



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาวัฏจักรไนโตรเจนและค่าการปล่อย
ก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในการเกษตร: กรณีศึกษาข้าวโพด

โดย

นางสาว มณฑิรา ยุติธรรม

มิถุนายน 2560

สัญญาเลขที่ TRG5780178

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาวัฏจักรไนโตรเจนและค่าการปล่อย
ก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในการเกษตร: กรณีศึกษาข้าวโพด

นางสาว มณฑิรา ยุติธรรม
มหาวิทยาลัยมหิดล

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและ
มหาวิทยาลัยมหิดล

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย
สกว. และต้นสังกัดไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เพื่อศึกษาค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์ทางตรงจากการใช้ปุ๋ยเคมี และเพื่อศึกษากระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนจากดินในการเกษตร ในรูปของกระบวนการ nitrification และ denitrification กรณีศึกษาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อพัฒนาค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากดินเกษตรศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมี และทำความเข้าใจกระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนในดินเกษตรในรูปของอัตรา nitrification denitrification เพื่อนำไปพัฒนาค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์เพื่อให้การศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นท์ภาคการเกษตรมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

การศึกษากการแลกเปลี่ยนก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในแปลงข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ทำการทดลองเป็น 3 รอบฤดูกาลเพาะปลูก ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2557-2558 วางแผนดำรับทดลอง (Treatments) เป็น 3 ดำรับทดลองที่มีอัตราการใช้ปุ๋ยที่แตกต่างกัน ดำรับควบคุม (T1) ไม่ใส่ปุ๋ย ดำรับการทดลองที่ 2 (T2) ใส่ปุ๋ยอัตรา 97 kg N ha^{-1} และดำรับการทดลองที่ 3 (T3) ใส่ปุ๋ยอัตรา 155 kg N ha^{-1} ปริมาณผลผลิตและบัญชีรายการการปล่อยไนตรัสออกไซด์ได้ทำการคำนวณในทุกดำรับการทดลอง

ผลการศึกษาพบว่า ดำรับการทดลองที่ 3 (มีอัตราการใช้ปุ๋ย 155 kg N ha^{-1}) มีค่าการปล่อยสูงที่สุด รองลงมา คือ ดำรับการทดลองที่ 2 (มีอัตราการใช้ปุ๋ย 97 kg N ha^{-1}) และดำรับการทดลองที่ 1 (ไม่ใส่ปุ๋ย) ค่าเฉลี่ยการปล่อย ได้แก่ $0.98, 0.81$ และ $0.54 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดลองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับอัตราการใช้ปุ๋ยและปริมาณผลผลิต

เมื่อพิจารณาค่าการปล่อยจาก IPCC (EF) โดย Tier 1 methodology เมื่อค่าการปล่อย 1% มีการใส่ปุ๋ยลงสู่ดิน ซึ่งค่าการปล่อยนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย เช่น ชนิดดิน สภาพภูมิอากาศ ขอบเขตของภูมิภาค โดยผลการทดลองจากการศึกษานี้ สรุปได้ว่าค่าการปล่อยสูงสุดเป็น 0.94% และ 0.81% จากอัตราการใช้ปุ๋ย 155 kg N ha^{-1} (T3) และ 97 kg N ha^{-1} (T2) ตามลำดับ สำหรับความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ผลการศึกษาสรุปและเสนอแนะให้เกษตรกรใช้การใส่ปุ๋ยอัตรา 97 kg N ha^{-1} ซึ่งมีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ ปริมาณผลผลิตและปริมาณการปล่อยไนตรัสออกไซด์ สำหรับงานวิจัยในอนาคตที่เสนอแนะให้ดำเนินการ ได้แก่ ควรศึกษาการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากความแตกต่างของปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ เช่น ชนิดดิน การจัดการปลูก และศึกษาค่าการปล่อยทางอ้อมจากกระบวนการการชะล้าง เป็นต้น

คำสำคัญ : การเคลื่อนย้ายไนโตรเจน, ค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์, ดินเกษตร, ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

Abstract

This research is being proposed to develop direct emission factors of N_2O emission from chemical fertilizer application and to improve our understanding of nitrogen transformation in upland soil in terms of rate of nitrification and denitrification. The aim of this research was to generate evidence from experiments to contribute to improving the N_2O agricultural inventory. It is expected that besides improving our understanding of nitrogen cycle, country specific emission factor for N_2O emission would be developed. Such factor is crucial not only for greenhouse gas inventory and mitigation purposes, it will be also providing important inputs for estimating the more accurate carbon footprint for many agricultural products produced in Thailand.

Nitrous oxide emissions were measured at three crop of maize cultivation from 2014 to 2015. Three different treatments between three rate synthetic fertilizer application (Treatment 1; no fertilizer input, Treatment 2; 97 kg N ha^{-1} , Treatment 3; 155 kg N ha^{-1}). Crop yield was also measured, and emission inventories were calculated for the contrasting fertilizer treatments. The experimental results show that the greatest mean N_2O emission from a range of nitrogen synthetic fertilizer rates of 155 kg N ha^{-1} follow by 97 kg N ha^{-1} rate and no fertilizer, where mean N_2O emissions were emitted 0.98 , 0.81 and $0.54 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, respectively. In addition, crop yield was a good relationship between fertilizer application rate and yield. In term of emission factor (EF) Tier 1 methodology, where an EF of 1% is applied to mineral soils, regardless of soil type, climate, or location (IPCC). The results from this study can be concluding that EF from greatest rate was 0.94% and 0.81% from 155 kg N ha^{-1} and 97 kg N ha^{-1} nitrogen fertilizer application. In addition, T2 treatments (Nitrogen application rate of 97 kg N ha^{-1}) can be recommended to farmers to use these Nitrogen rate, it appropriated for farmers in term yield and economic cost.

Based on findings of this study, future researches and other studies are recommended a study of the estimate the nitrous oxide emissions and the emission factor from maize in the country should study other maize field areas, soil types, types of nitrogen fertilizer and rate of fertilizer use, other maize cultivars and crop management. Study indirect emissions such as leaching/runoff from agricultural soil in maize for more comprehensive and specific data for

generating higher tier emission factor in terms of fertilizer rate and type for use in national inventories.

Keywords : Nitrogen transformation, N₂O emission factor, Agricultural Soil, Maize

Executive Summary

โครงการ (ภาษาไทย): การศึกษาวัฏจักรไนโตรเจนและค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในการเกษตร: กรณีศึกษาข้าวโพด

(ภาษาอังกฤษ): Understanding nitrogen cycle and developing N₂O emissions factors in agricultural soil: the case study in maize

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งในห้าสิบประเทศที่อยู่ภายใต้กรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)) ซึ่งมีเป้าหมายหลักในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide (N₂O)) เป็นก๊าซเรือนกระจกหลักชนิดหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน (IPCC, 2007) มากกว่า 50-60% ไนตรัสออกไซด์มาจากดินทางการเกษตร ซึ่งผลจากการปล่อยจากภาคเกษตรส่วนใหญ่มาจากการใช้ปุ๋ยเคมี (Mosier et al., 1998) โดยค่าการปล่อยทั้งทางตรงและทางอ้อมของไนตรัสออกไซด์ใช้ค่า IPCC default (IPCC, 2006b; De Klein et al., 2006) ค่าการปล่อยของไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยมีค่าแตกต่างกันอยู่ระหว่าง 0.0 % ถึง 10.8% ค่าเฉลี่ยเป็น 1.1% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.7% ซึ่งค่าที่แตกต่างกันเหล่านี้ขึ้นอยู่กับภูมิภาคที่แตกต่างกันและปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ภูมิอากาศ ชนิดของดิน ปัจจัยด้านการเพาะปลูกพืช และการจัดการ (ปริมาณและชนิดของปุ๋ย เวลาใส่ปุ๋ย) เป็นต้น (Bouwman et al., 2002a, b; Stehfest and Bouwman, 2006; Novoa and Tejeda, 2006; Flechard et al., 2007) นอกจากนี้มีการศึกษาประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการการเกษตรโดยเฉพาะการปล่อยจากการใช้ปุ๋ยพบว่า ค่าการปล่อย N₂O จากการใช้ปุ๋ยมีมากถึง 40% - 60% (Yuttitham et al., 2011; Cheng et al., 2011; Gan et al. 2011) ดังนั้นการศึกษาเพื่อให้เข้าใจค่าการปล่อย N₂O จากดินในการเกษตร และเพื่อให้ค่าการปล่อยมีค่าที่ถูกต้องมากขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์และการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ให้ถูกต้องยิ่งขึ้นสำหรับผลิตภัณฑ์หรือสินค้าที่จะส่งออก ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยรองจากข้าว ระยะเวลาเพาะปลูกประมาณ 3-4 เดือนและมีความต้องการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นจำนวนมาก ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อุตสาหกรรมอาหารและส่งออก สำหรับประเทศไทยอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มากถึง 95% (Manewan, 2010) อัตราการผลิตเท่ากับ 3.886 ล้านตันต่อปี พื้นที่ผลิตหลักอยู่ที่ จังหวัด เพชรบูรณ์ นครราชสีมา ลพบุรี นครสวรรค์ ตาก เชียงราย เลย อุทัยธานี และพิษณุโลก

การศึกษานี้เพื่อศึกษากระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนจากดินในการเกษตรภายใต้สภาพภูมิอากาศเขตร้อน กรณีศึกษาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ผลการศึกษาคาดว่าจะสามารถพัฒนาค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น ผลที่คาดว่าจะได้รับแบ่งเป็น 1) เข้าใจกระบวนการ

เคลื่อนย้ายไนโตรเจนในภูมิภาคเขตร้อน 2) พัฒนาการรายงานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากภาคเกษตรในรูปแบบของ LCA, carbon footprint และค่าการปล่อย N_2O ในระดับประเทศ (country-specific N_2O emission factor)

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมี

2.2 เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนในดินเกษตรในรูปแบบของอัตรา nitrification denitrification และการสูญเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการ ammonia volatilization

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้ศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินจากการใช้ปุ๋ยเคมี เพื่อปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ การศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ขอบเขตการวิจัยส่วนที่ 1 การประมาณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการจัดการปลูกข้าวโพด ค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีส่วนใหญ่ใช้ค่าอ้างอิงของ IPCC จากการตรวจสอบเอกสารเบื้องต้น พบว่าปัจจุบันประเทศไทยใช้ฐานข้อมูลค่าการปล่อยเพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ดังนี้ National Metal and Materials Technology Center (MTEC), Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), (TGO) และงานวิจัยที่มีรายงานในประเทศ รวมทั้งงานวิจัยที่อยู่ในภูมิภาคเขตร้อน เป็นต้น ดังนั้นการศึกษานี้เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการจัดการปลูกข้าวโพด โดยใช้ค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีจากฐานข้อมูลดังกล่าว เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับการใช้ค่าการปล่อยที่ได้จากการศึกษาในขอบเขตการวิจัยส่วนที่ 2

ขอบเขตการวิจัยส่วนที่ 2 ศึกษาการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีในแปลงทดลอง โดยใช้วิธี static chamber method การวิจัยทำการศึกษาทั้งในแปลงทดลอง (ตรวจวัดก๊าซไนตรัสออกไซด์ที่ปล่อยจากดิน การระเหยของ ammonia volatilization) ที่มีการจัดการใส่ปุ๋ยเคมีที่มีชนิดปุ๋ยแตกต่างกันอ้างอิงจากการอัตราการใช้ปุ๋ยเคมีจากกรมวิชาการเกษตรและอ้างอิงการใช้ปุ๋ยเคมีจากเกษตรกร ทำการทดลอง 3 รอบเพาะปลูกเพื่อให้ครอบคลุมฤดูกาลด้วยการจัดการน้ำที่ใช้ในแปลงแบบใช้น้ำฝน (rain fed) นอกจากนี้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน และคุณสมบัติของพืช ส่วนการศึกษาในห้องปฏิบัติการ วิเคราะห์ตัวอย่างดินและพืช รวมทั้งศึกษาเพื่อเสริมความเข้าใจกระบวนการ nitrification และ denitrification จากการใช้ปุ๋ยเคมี

เมื่อทำการทดลองแล้วเสร็จ ประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์โดยเปรียบเทียบกับการใช้ค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมี จาก IPCC และจากการศึกษาวิจัย

3.2 ผลการศึกษา

3.2.1 สภาพภูมิอากาศ

สภาพภูมิอากาศของแปลงทดลองทั้งสามรอบการเพาะปลูกแสดงในตารางที่ 1 โดยปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรอบการเพาะปลูกที่ 1 2 และ 3 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ส่วนปริมาณน้ำฝนสะสมตลอดการเพาะปลูก (ตั้งแต่วันปลูกจนถึงวันเก็บเกี่ยว) พบว่า รอบการเพาะปลูกที่ 1 มีปริมาณฝนสะสมสูงสุดที่ 480 มิลลิเมตร รองลงมาเป็นรอบการเพาะปลูกที่ 2 280 มิลลิเมตร และรอบการเพาะปลูกที่ 3 มีปริมาณฝนสะสมน้อยที่สุด 160 มิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวพบปัญหาภัยแล้ง อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย พบว่า รอบการเพาะปลูกที่ 2 มีอุณหภูมิอากาศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) โดยมีค่า 27.59 องศาเซลเซียส รองลงมาคือ รอบการเพาะปลูกที่ 1 และรอบการเพาะปลูกที่ 3 มีค่า 26.74 และ 26.13 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้ รอบการเพาะปลูกที่ 1 และรอบการเพาะปลูกที่ 3 มีอุณหภูมิอากาศต่ำกว่ารอบการเพาะปลูกที่ 2 เนื่องจากมีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง และมีฝนตกในช่วงฤดูฝน

ตารางที่ 1 The average values of tropical savanna climatic data during the maize production

Parameters	Unit	Seasons		
		Wet season	Dry season	Wet season
		2014: 1 st Crop (Sep-Nov, 2014)	2015: 2 nd Crop (Mar-June, 2015)	2015: 3 rd Crop (Sep-Nov, 2015)
Average precipitation	mm day ⁻¹	4.22±9.73 ^a	2.48±6.24 ^a	4.51±11.83 ^a
Total precipitation	mm	480	280	160
Air temperature during maize production	°C	26.74±0.80 ^c	27.59±1.70 ^{a**}	26.13±1.11 ^b
Air temperature at sampling time	°C	28.81±1.22 ^a	25.72±3.32 ^{ab}	30.05±1.03 ^b
Soil temperature at sampling time	°C	26.71±1.40 ^a	25.72±3.32 ^{ab}	27.86±1.44 ^{b*}
Relative Humidity	%	79.69±6.39 ^{a**}	69.27±9.88 ^c	79.09±7.22 ^b

Different lowercase letters indicate significant differences between treatment ($P < 0.05$) and ($P < 0.01$).

The single asterisk (*) and double asterisk (**) indicate significant differences between the two season at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

3.2.2 คุณสมบัติของดินในแปลงทดลอง

ดินในแปลงทดลองเป็นดินสีแดงที่มีการระบายน้ำดี (reddish brown lateritic soil) นอกจากนี้ชั้นดินบนมีสีดำนแดงเข้มมากกว่าชั้นดินล่างซึ่งพบว่ามีอินทรีย์วัตถุอยู่ปริมาณมาก โดยทั่วไปดินสีแดงพบมากในภูมิภาคเขตร้อน ดินมีสีแดงเนื่องจากมีส่วนผสมของเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ (Wisawapipat et al., 2010) ปริมาณเหล็กบนชั้นดินบนทำให้โครงสร้างดินเป็นเม็ดก้อนกลม ซึ่งทำให้ดินมีการระบายน้ำดี อัตราการอุ้มน้ำจึงค่อนข้างต่ำ (well drained water and low water holding capacity) (Trakoonyingcharoen et al., 2012) ซึ่งทำให้ดินเก็บกักน้ำได้น้อยใน

ฤดูแล้ง ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH) อยู่ในช่วง 6.0-7.0 และเพิ่มขึ้นตามระดับความลึก ดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่ตื้นชั้นล่าง pH อยู่ระหว่าง 4.5-5.5 ส่วนความอุดมสมบูรณ์ของดิน มีค่าค่อนข้างต่ำ คุณสมบัติของดินทางกายภาพ ความอุดมสมบูรณ์ของดิน ปริมาณไนโตรเจนในดิน ในรูปของ NH_4^+ , NO_3^- และ NO_2^- ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ความเป็นกรดต่างของดิน (pH), อินทรีย์คาร์บอนในดิน (SOC), ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (TKN), แอมโมเนียม (Ammonium), ไนเตรต (Nitrate) และไนไตรท์ (Nitrite) ของแต่ละตำรับการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) และค่า C:N ratio ของแต่ละตำรับการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

3.2.3 การปล่อยไนตรัสออกไซด์และปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสม

ผลการศึกษาพบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 (มีอัตราการใช้ปุ๋ย 155 kg N ha^{-1}) มีค่าการปล่อยสูงที่สุด รองลงมา คือ ตำรับการทดลองที่ 2 (มีอัตราการใช้ปุ๋ย 97 kg N ha^{-1}) และตำรับการทดลองที่ 1 (ไม่ใส่ปุ๋ย) ค่าเฉลี่ยการปล่อย ได้แก่ 0.98, 0.81 และ $0.54 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดลองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับอัตราการใช้ปุ๋ยและปริมาณผลผลิต

ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสม ($\text{N}_2\text{O fluxes accumulation}$) พบว่าในรอบการเพาะปลูกที่ 1 2 และ 3 ตำรับการทดลองที่ 1 มีการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสมต่ำที่สุดมีค่า 0.35, 0.82 และ $0.47 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ crop}^{-1}$ ตำรับการทดลองที่ 2 มีค่า 0.65, 1.07 และ $0.69 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ crop}^{-1}$ และตำรับการทดลองที่ 3 มีค่า 0.80, 1.20 และ $0.81 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ crop}^{-1}$ โดยทั่วไปปุ๋ยไนโตรเจนและไนโตรเจนในดินเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการปล่อย N_2O จากภาคการเกษตร (Bouwman et al., 2002)

3.2.4 ค่าการปล่อยและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เมื่อพิจารณาค่าการปล่อยจาก IPCC (EF) โดย Tier 1 methodology เมื่อค่าการปล่อย 1% มีการใส่ปุ๋ยลงสู่ดิน ซึ่งค่าการปล่อยนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย เช่น ชนิดดิน สภาพภูมิอากาศ ขอบเขตของภูมิภาค โดยผลการทดลองจากการศึกษานี้ สรุปได้ว่าค่าการปล่อยสูงสุดเป็น 0.94% และ 0.81% จากอัตราการใช้ปุ๋ย 155 kg N ha^{-1} (T3) และ 97 kg N ha^{-1} (T2) ตามลำดับ

สำหรับความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ผลการศึกษสามารถสรุปและเสนอแนะให้เกษตรกรใช้การใส่ปุ๋ยอัตรา 97 kg N ha^{-1} ซึ่งมีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ ปริมาณผลผลิตและปริมาณการปล่อยไนตรัสออกไซด์

3.2.5 สมดุลไนโตรเจน

สมดุลไนโตรเจนของการเพาะปลูกรอบที่ 1 อยู่ในช่วง -107.01-49.35 การเพาะปลูกรอบที่ 2 อยู่ในช่วง -109-64.82 และการเพาะปลูกรอบที่ 3 ในช่วง -95.35-59.64 ตามลำดับ พบว่าการ

สูญเสียไนโตรเจนจะเกิดมากที่สุดในการเพาะปลูกรอบที่ 3 และการสูญเสียจะอยู่สูงที่สุดและจะสะสมในชีวมวล รองลงมาคือ ในดิน และการสูญเสียในรูปของก๊าซ N_2O ตามลำดับ ในตำรับการทดลองที่ 2 การสูญเสียไนโตรเจนมีค่ามากกว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน (Nitrogen input) ในทุกๆ รอบการเพาะปลูก และมีค่าติดลบ รอบการเพาะปลูกรอบที่ 1 2 และ 3 ดังนี้ -13.94, -6.07 และ -7.55 $kg\ N\ ha^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับตำรับการทดลองที่ 3 สมดุลไนโตรเจน (Nitrogen balance) มีค่าบวกมีค่า 49.35, 64.82 และ 59.64 $kg\ N\ ha^{-1}$ เพราะว่ามี การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนปริมาณมากและมีปริมาณไนโตรเจนในดินมากกว่าความสามารถของพืชในการดูดไปใช้ได้ เมื่อมีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนปริมาณสูงก็จะมี การปล่อยก๊าซ N_2O สูงเช่นเดียวกัน

3.2.6 การสูญเสียไนโตรเจนและการศึกษา N_2O production

การสูญเสียไนโตรเจนศึกษาในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษามีดังนี้ ผลของการสูญเสียไนโตรเจนจากการใช้ปุ๋ยโดยมี 2 ครั้งในการใส่ปุ๋ย การใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 (สูตร 16-20-0) พบว่า ตำรับการทดลองที่ 1 การสูญเสียไนโตรเจนใช้เวลาประมาณ 4 วันหลังจากใส่ปุ๋ยที่มีการสูญเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการ ammonia volatilization ส่วนตำรับการทดลองที่ 2 และ 3 ใช้เวลาประมาณ 7 วันหลังจากใส่ปุ๋ย

ส่วนการศึกษา pathways and rates of N_2O production ในดินที่ใช้ปลูกข้าวโพด มีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเข้าใจวัฏจักรไนโตรเจนในดินเกษตรในภูมิภาคเขตร้อน โดยทั่วไปมีสองกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการปล่อย N_2O คือ กระบวนการ nitrification และ denitrification การวิจัยนี้ใช้การศึกษาแบบ Incubation method ในห้องปฏิบัติการความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์ (ppm) บ่มดินที่ 30% WHC และความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์ (ppm) บ่มดินที่ 60% WHC แสดงในรูปที่ 6.5 พบว่า ที่ 30% WHC การลดลงของแก๊สไนตรัสออกไซด์ในตำรับการทดลองที่ 1 2 และ 3 มีการลดลงในทิศทางเดียวกันและลดลงจนถึงค่อนข้างคงที่ในวันที่ 7 ของการทดลองและมีค่าคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในวันที่ 12 ของการทดลอง ความเข้มข้นของไนตรัสออกไซด์ของตำรับการทดลองที่ 1 มีค่าระหว่าง 0.640-0.480 ppm ตำรับการทดลองที่ 2 มีค่าระหว่าง 0.646-0.489 ppm และตำรับการทดลองที่ 3 มีค่าระหว่าง 0.669-0.497 ppm ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง N_2O production พบว่า มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณอนินทรีย์ไนโตรเจน (NH_4^+ , NO_3^- และ NO_2^-) แต่ที่มีความสัมพันธ์สูงกว่าและเห็นความสัมพันธ์ชัดเจนในการบ่มดินที่ 30% WHC

3.2.7 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

สำหรับงานวิจัยในอนาคตที่จะสามารถต่อยอดจากงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย

3.2.7.1 การศึกษาความสัมพันธ์ของค่าการปล่อยในพื้นที่ศึกษาอื่นๆ จำแนกตามความแตกต่างของการจัดการปลูกข้าวโพด และชนิดของดิน

3.2.7.2 การศึกษาปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อค่าการปล่อยในปัจจัยอื่นๆ เช่น ความชื้น เป็นต้น

3.2.7.3 การศึกษาการปล่อยทางอ้อม (Indirect emission) เช่น การปล่อยจากระบบการชะล้าง และการไหลบ่า (leaching and runoff) เป็นต้น

การศึกษาและข้อเสนอแนะดังกล่าวข้างต้นนี้หากมีการศึกษาเพิ่มเติมก็คาดหวัง ค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากดินเกษตรในประเทศไทยสำหรับการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จะมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งในห้าสิบประเทศที่อยู่ภายใต้กรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)) ซึ่งมีเป้าหมายหลักในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide (N_2O)) เป็นก๊าซเรือนกระจกหลักชนิดหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน (IPCC, 2007) มากกว่า 50-60% ไนตรัสออกไซด์มาจากดินทางการเกษตร ซึ่งผลจากการปล่อยจากภาคเกษตรส่วนใหญ่มาจากการใช้ปุ๋ยเคมี (Mosier et al., 1998) โดยค่าการปล่อยทั้งทางตรงและทางอ้อมของไนตรัสออกไซด์ใช้ค่า IPCC default (IPCC, 2006b; De Klein et al., 2006) พบว่าค่าการปล่อยของไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยมีค่าแตกต่างกันอยู่ระหว่าง 0.0 % ถึง 10.8% ค่าเฉลี่ยเป็น 1.1% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.7% ซึ่งค่าที่แตกต่างกันเหล่านี้ขึ้นอยู่กับภูมิภาคที่แตกต่างกันและปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ภูมิอากาศ ชนิดของดิน ปัจจัยด้านการเพาะปลูกพืช และการจัดการ (ปริมาณและชนิดของปุ๋ย เวลาการใส่ปุ๋ย) เป็นต้น (Bouwman et al., 2002a, b; Stehfest and Bouwman, 2006; Novoa and Tejeda, 2006; Flechard et al., 2007) นอกจากนี้มีการศึกษาประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการการเกษตรโดยเฉพาะการปล่อยจากการใช้ปุ๋ยพบว่า ค่าการปล่อย N_2O จากการใช้ปุ๋ยมีมากถึง 40% - 60% ของการปล่อยจากการจัดการการเกษตร (Yuttitham et al., 2011; Cheng et al., 2011; Gan et al. 2011) ดังนั้นการศึกษาเพื่อให้เข้าใจค่าการปล่อย N_2O จากดินในการเกษตร เพื่อให้ค่าการปล่อยที่ถูกต้องมากขึ้น ซึ่งจะส่งต่อการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์และการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ให้ถูกต้องยิ่งขึ้น สำหรับผลิตภัณฑ์หรือสินค้าที่จะส่งออก ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยรองจากข้าว ระยะเวลาเพาะปลูกประมาณ 3-4 เดือนและมีความต้องการการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นจำนวนมาก ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อุตสาหกรรมอาหารและส่งออก สำหรับประเทศไทยอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ถึง 95% (Manewan, 2010) อัตราการผลิตเท่ากับ 3.886 ล้านตันต่อปี พื้นที่ผลิตหลักอยู่ที่ จังหวัดเพชรบูรณ์ นครราชสีมา ลพบุรี นครสวรรค์ ตาก เชียงราย เลย อุทัยธานี และพิษณุโลก

การศึกษานี้ศึกษากระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนจากดินในการเกษตรภายใต้สภาพภูมิอากาศเขตร้อน กรณีศึกษาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ผลการศึกษาสามารถพัฒนาค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น ผลที่คาดว่าจะได้รับแบ่งเป็น 1) เข้าใจกระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนในภูมิภาคเขตร้อน 2) พัฒนาการรายงานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากภาคเกษตรในรูปแบบของ LCA, Carbon Footprint และค่าการปล่อย N_2O ในระดับประเทศ (country-specific N_2O emission factor)

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมี

1.2.2 เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนในดินเกษตรในรูปของอัตรา nitrification denitrification และการสูญเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการ ammonia volatilization

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้ศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินจากการใช้ปุ๋ยเคมี เพื่อปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ การศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ขอบเขตการวิจัยส่วนที่ 1 การประมาณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการจัดการปลูกข้าวโพด ค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีส่วนใหญ่ใช้ค่าอ้างอิงของ IPCC จากการตรวจเอกสารเบื้องต้น พบว่าปัจจุบันประเทศไทยใช้ฐานข้อมูลค่าการปล่อยเพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ดังนี้ National Metal and Materials Technology Center (MTEC), Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), (TGO) และงานวิจัยที่มีรายงานในประเทศ รวมทั้งงานวิจัยที่อยู่ในภูมิภาคเขตร้อน เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาส่วนนี้เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการจัดการปลูกข้าวโพด โดยใช้ค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีจากฐานข้อมูลดังกล่าวเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการปล่อยที่ได้จากการศึกษาในขอบเขตการวิจัยส่วนที่ 2

ขอบเขตการวิจัยส่วนที่ 2 ศึกษาการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีในแปลงทดลอง โดยใช้วิธี static chamber method การวิจัยทำการศึกษาทั้งในแปลงทดลอง (ตรวจวัดก๊าซไนตรัสออกไซด์ที่ปล่อยจากดิน การระเหยของ ammonia volatilization) ที่มีการจัดการใส่ปุ๋ยเคมีที่มีชนิดปุ๋ยแตกต่างกันอ้างอิงจากอัตราการใช้ปุ๋ยเคมีจากกรมวิชาการเกษตรและอ้างอิงการใช้ปุ๋ยเคมีจากเกษตรกร ทำการทดลอง 3 รอบเพาะปลูกเพื่อให้ครอบคลุมฤดูกาลด้วยการจัดการน้ำที่ใช้ในแปลงแบบใช้น้ำฝน (rain fed) นอกจากนี้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน และคุณสมบัติของพืช ส่วนการศึกษาในห้องปฏิบัติการ วิเคราะห์ตัวอย่างดินและพืช รวมทั้งศึกษาเพื่อเสริมความเข้าใจกระบวนการ nitrification และ denitrification จากการใช้ปุ๋ยเคมี

เมื่อทำการทดลองแล้วเสร็จ ประเมินปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์โดยเปรียบเทียบกับค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมี จาก IPCC และจากผลการศึกษาวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ จากการใช้ปุ๋ยเคมี

1.4.2 เข้าใจกระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนในดินเกษตรในรูปของอัตรา nitrification denitrification และการสูญเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการ ammonia volatilization

1.5 นิยามศัพท์

1.5.1 ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) หมายถึง ก๊าซต่างๆ ในชั้นบรรยากาศทั้งหมดที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติและส่วนที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งดูดซับและปลดปล่อยรังสีความร้อนในช่วงความยาวคลื่นเฉพาะในช่วงอินฟราเรดที่สะท้อนออกมาจากพื้นผิวโลก ชั้นบรรยากาศ และเมฆ

โดยก๊าซเรือนกระจก ที่ถูกควบคุมโดยพิธีสารเกียวโต มีเพียง 6 ชนิด ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC) ก๊าซเพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFC) ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6)

1.5.2 ค่าการปล่อย หรือ Emission Factor หมายถึง ค่าที่กำหนดขึ้น (Representative Value) ที่สัมพันธ์กับปริมาณการปลดปล่อยมลพิษต่อกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยอยู่ในรูปหน่วยน้ำหนักของสารมลพิษ ต่อหน่วยน้ำหนัก ปริมาตร ระยะทาง หรือระยะเวลาของกิจกรรมที่ก่อให้เกิดมลพิษ ปล่อยสู่บรรยากาศ เพื่อใช้ในการประมาณค่าการปล่อยก๊าซสู่บรรยากาศจากแหล่งต่างๆ การคำนวณหรือคาดประมาณการปลดปล่อยมลพิษ ทำได้โดยนำค่าการปล่อย (Emission Factor) มาคูณกับอัตราการดำเนินกิจกรรมที่ก่อให้เกิดมลพิษ (Activity Data) หรือข้อมูลปริมาณงานที่ทำในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เช่น ปริมาณการผลิต ปริมาณการใช้น้ำ อัตราการไหล ก็จะทราบถึงปริมาณการปลดปล่อยได้

1.5.3 กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) หมายถึง กระบวนการออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนโตรตและไนเตรท โดยอาศัยจุลินทรีย์ประเภทออโตโทรฟ (Autotroph) 2 ชนิด ใน 2 ขั้นตอนย่อย ได้แก่ ขั้นตอนย่อยที่ 1 จุลินทรีย์กลุ่มแอมโมเนียออกซิไดซิงแบคทีเรีย (Ammonium Oxidizing Bacteria; AOB) มีหน้าที่ออกซิไดซ์แอมโมเนียให้เป็นไนโตรต ส่วนขั้นตอนย่อยที่ 2 จุลินทรีย์กลุ่มไนโตรตออกซิไดซิงแบคทีเรีย (Nitrite Oxidizing Bacteria; NOB) มีหน้าที่ออกซิไดซ์ไนโตรตเป็นไนเตรท

1.5.4 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) หมายถึง กระบวนการรีดิวซ์ไนเตรทให้อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas or Molecular nitrogen) หรือก๊าซอื่นๆ รวมทั้งก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ที่เกิดขึ้นด้วย จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดีไนตริฟิเคชันประกอบด้วยสองพวกใหญ่ ๆ ด้วยกัน คือ พวกแรกเป็นพวกที่ไม่ขึ้นกับไนเตรทโดยสามารถที่จะเจริญอยู่ได้ในสภาวะที่ไม่มีไนเตรท พวกที่สองเป็นพวกที่มีชีวิตอยู่ได้โดยที่ต้องมีไนเตรท โดยส่วนใหญ่กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ไนเตรทจะถูกเปลี่ยนให้เป็นก๊าซไนโตรเจน โดยกลุ่มจุลินทรีย์กลุ่ม Aerobic Heterotrophic Bacteria ที่สามารถใช้ไนเตรท ไนโตรต ไนตริกออกไซด์ หรือซัลเฟต เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนอิสระในสภาวะไร้อากาศ กระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะมีขั้นตอนการเกิดของปฏิกิริยา 4 ขั้นตอนด้วยกัน คือ ไนตริกออกไซด์ถูกเปลี่ยนเป็นไนตรัสออกไซด์ ไนโตรตถูกเปลี่ยนเป็นไนตริกออกไซด์ ไนตริกออกไซด์ถูกเปลี่ยนเป็นไนตรัสออกไซด์ และได้ก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยมีเอนไซม์ที่กระตุ้นการลดรูปของไนโตรเจน

1.5.5 กระบวนการระเหยแอมโมเนีย (Ammonia volatilization) หมายถึง กระบวนการสูญเสียแอมโมเนียในรูปของก๊าซไนโตรเจน การสูญเสียไนโตรเจนในกระบวนการ ammonia volatilization จะมีประมาณ 0-50% ของปุ๋ยที่ใส่ลงไปในดิน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น รูปแบบของปุ๋ย วิธีการใส่ปุ๋ย ค่า pH ค่า Cation Exchange Capacity (CEC) และระยะการเจริญเติบโตของพืช เป็นต้น Ammonium (NH_3) ที่เกิดขึ้นหรือใส่ลงไปในดินในรูปของปุ๋ยต่างๆ นั้นถ้าในดินมี H^+ เพียงพอ NH_3 ก็จะดูดซับ H^+ กลายเป็น NH_4^+ และมีโอกาสถูกดูดซับบนผิวคอลลอยด์ได้ ทำให้การสูญเสียโดยการระเหยน้อยลง ผลการทดลองจากงานวิจัยพบว่ากระบวนการ ammonia volatilization จะเกิดต่ำที่สุดในดินที่มี CEC สูง ความชื้นสูงและมี pH ต่ำ ส่วนการสูญเสียจำนวนมากนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในดินทรายต่าง (alkaline sandy soils) โดยไม่มีการปลูกพืช

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

การศึกษาการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในการเกษตร กรณีศึกษาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มีทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

2.1 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ก๊าซเรือนกระจก คือ ก๊าซที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศ มีคุณสมบัติในการดูดซับรังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อนได้ดี ทำหน้าที่ลดการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศ ผ่านปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) ผลจากชั้นบรรยากาศมีก๊าซเรือนกระจกมากเกินไป ทำให้ความร้อนที่มาจากดวงอาทิตย์สะท้อนกลับจากพื้นดินสู่บรรยากาศไม่สามารถออกไปนอกชั้นบรรยากาศของโลกได้และถูกกักเก็บความร้อนสะสมไว้ในชั้นบรรยากาศ ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนจนมีความสำคัญต่อการรักษาระดับอุณหภูมิของโลก หากปราศจากก๊าซเรือนกระจก โลกจะหนาวเย็นจนสิ่งมีชีวิตอยู่อาศัยไม่ได้ แต่การมีก๊าซเรือนกระจกปริมาณมากเกินไป ก็เป็นสาเหตุให้บรรยากาศโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น ก๊าซเรือนกระจกมีหลายชนิด เช่น ไอน้ำ โอโซน ซึ่งเป็นกลุ่มก๊าซที่จะก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก แต่เมื่อพิจารณาตามพิธีสารเกียวโต ระบุก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญไว้ 6 ชนิด ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFCs) และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) เนื่องจากก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดมีศักยภาพการเกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) ไม่เท่ากัน (ตารางที่ 2.1) ดังนั้น IPCC ได้กำหนดค่าการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซเรือนกระจกให้เทียบกับศักยภาพการเกิดภาวะโลกร้อนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกค่านี้ว่า คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e : Carbon Dioxide Equivalent) เช่น ก๊าซมีเทน 1 หน่วย จะมีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเป็น 25 หน่วยของคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น (IPCC (2007))

ตารางที่ 2.1 ศักยภาพการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน

Greenhouse gases	GWP for each time horizon		
	20 years	100 years	500 years
CO_2	1	1	1
CH_4	72	25	7.6
NO_2	289	298	153

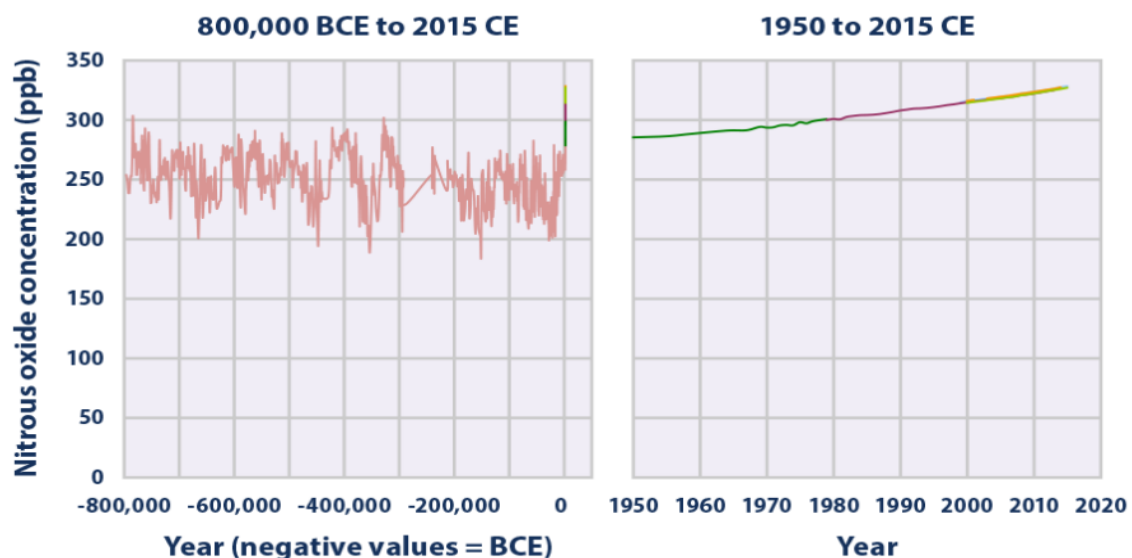
ที่มา: IPCC (2007)

ในปี พ.ศ. 2543 (ค.ศ. 2000) ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกทั้งหมดของประเทศไทยมีค่าเท่ากับ 229.08 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยภาคพลังงานมีปริมาณการปล่อยมากที่สุดเท่ากับ ร้อยละ 69.6 รองลงมาคือภาคการเกษตร ร้อยละ 22.6 ก๊าซหลักที่ปล่อยออกมาจากภาคการเกษตร คือ ก๊าซมีเทน กิจกรรมที่ปล่อยก๊าซมีเทนมากที่สุด คือ กลุ่มนาข้าว คิดเป็น 29.94 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และคิดเป็นร้อยละ 57.7 ของปริมาณการปล่อยในภาคการเกษตร รองลงมา คือ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ กิจกรรมที่ปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์มากที่สุด คือ กลุ่มดินที่ใช้ใน

การเกษตร ซึ่งเกิดจากการใส่ปุ๋ยเป็นหลัก คิดเป็น 7.6 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และคิดเป็นร้อยละ 14.6 ของปริมาณการปล่อยจากภาคการเกษตร การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกในภาคการเกษตรในช่วงปี พ.ศ. 2543-2547 ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากกิจกรรมในภาคการเกษตรค่อนข้างคงที่ โดยเฉพาะพื้นที่ในการปลูกข้าว ส่วนใหญ่การเพิ่มขึ้นมาจากการเพิ่มปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมีเป็นหลัก (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553)

ความเข้มข้นของก๊าซไนตรัสออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมีปริมาณเพิ่มขึ้น (Denman *et al.* 2007, Forster *et al.* 2007, Le Treut *et al.* 2007) จาก 270 ส่วนในพันล้านส่วน (parts per billion: ppb) ในช่วงก่อนยุคอุตสาหกรรม เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 319 ส่วนในพันล้านส่วนในปี ค.ศ. 2005 (IPCC, 2007) แหล่งที่มาหลักของก๊าซไนตรัสออกไซด์มาจากปุ๋ยไนโตรเจนที่ใส่ลงในดิน การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล กลไกทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นในดินและระบบนิเวศทางน้ำ ซึ่งมีอัตราการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อปี 0.2-0.3% ต่อปี (Diana *et al.* 2013) ทั้งนี้การคงอยู่ในชั้นบรรยากาศของก๊าซไนตรัสออกไซด์มีอายุคงอยู่ 114 ปี ซึ่งมีอายุการคงอยู่ในชั้นบรรยากาศยาวนานกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน ที่ 100 และ 12 ปี ตามลำดับ

แหล่งที่มาของก๊าซไนตรัสออกไซด์ที่ปล่อยสู่บรรยากาศทั่วโลก ในช่วงทศวรรษที่ 1990 จำแนกตามแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมมนุษย์และจากธรรมชาติ (ตารางที่ 2.2) พบว่า ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สู่บรรยากาศมีค่า 17.7 Tg N yr⁻¹ โดยมาจากกิจกรรมของมนุษย์ 6.7 Tg N yr⁻¹ และจากธรรมชาติ 11.0 Tg N yr⁻¹ โดยกิจกรรมจากภาคการเกษตรเป็นกิจกรรมหลักของแหล่งปล่อยจากกิจกรรมของมนุษย์ ที่มีปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ถึง 15.82% ของการปล่อยทั่วโลกและมีแนวโน้มการปล่อยสูงขึ้น (รูปที่ 2.1) แหล่งที่มาของก๊าซไนตรัสออกไซด์จากภาคการเกษตรจึงเป็นแหล่งปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สู่บรรยากาศที่สำคัญ (Diana *et al.* 2013)



รูปที่ 2.1 Concentrations of N₂O in the atmosphere from hundreds of thousands of years ago through 2015 (U.S. EPA. (2016))

2.2 การปล่อยไนตรัสออกไซด์จากวัฏจักรไนโตรเจนในภาคการเกษตร

2.2.1 วัฏจักรไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นธาตุที่มีความสำคัญที่พบในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด และมีบทบาทในการเจริญเติบโตของพืชเป็นอย่างมาก ไนโตรเจนในดินจะมีการแปรสภาพตลอดเวลา ผ่านทางกระบวนการทางชีวเคมี โดยสามารถพบได้ทั้ง 3 สถานะ คือ ก๊าซ สารละลายที่มีก๊าซอยู่ และของแข็ง โดยอาศัยเอนไซม์ หรือ จุลินทรีย์ในดินเข้าไปเกี่ยวข้อง แหล่งที่มาของธาตุไนโตรเจนในดิน นั้นมาจากชั้นเปลือกโลกและอากาศที่มีไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบโดยสัดส่วน โดยชั้นเปลือกโลกสะสมปริมาณไนโตรเจนถึง 98% และบรรยากาศที่อยู่ในรูปของก๊าซไนโตรเจน 78% ของปริมาณบรรยากาศทั้งหมด (คิดเป็น 1.2 ของปริมาณไนโตรเจนของโลก) (หนึ่ง, 2554)

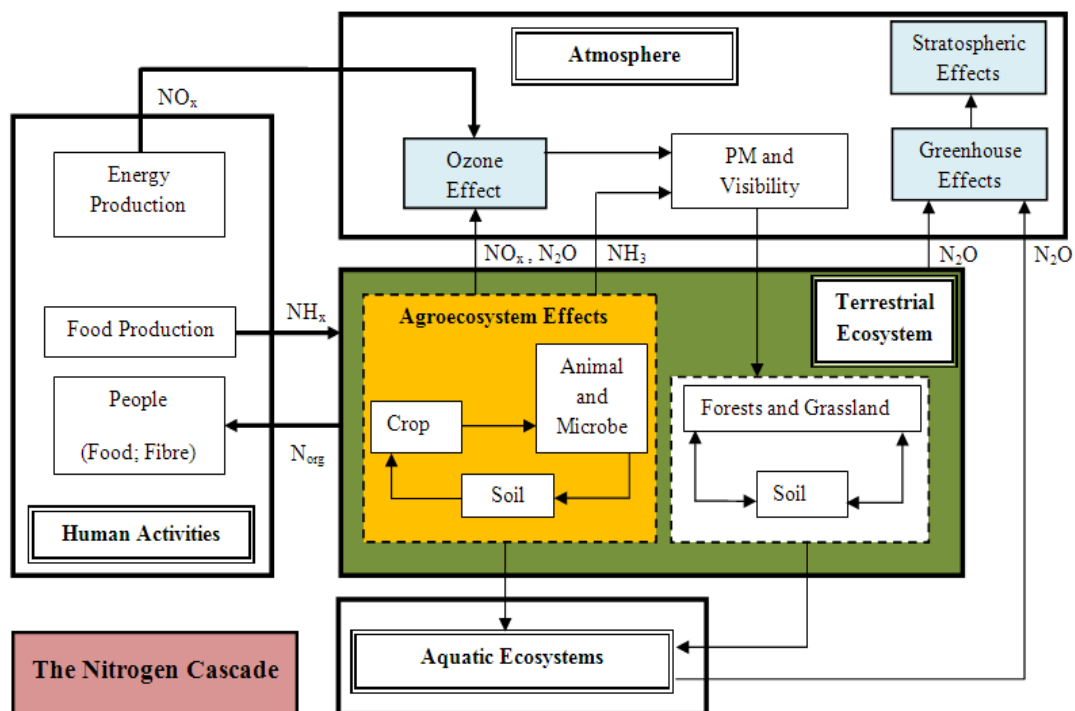
ตารางที่ 2.2 แหล่งปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สู่บรรยากาศ (Tg N yr^{-1}) ในช่วงทศวรรษที่ 1990

Sources	TAR (2001)	AR4 (2007)
Anthropogenic sources		
Fossil fuel combustion and industrial processes	1.3 ^a /0.7 ^b Range 0.2-1.8	0.7 Range 0.2-1.8
Agriculture	6.3 ^a /2.9 ^b Range 0.9-17.9	2.8 Range 1.47-4.8
Biomass and biofuel burning	0.5 ^a Range 0.2-1.0	0.7 Range 0.2-1.0
Human excreta	-	0.2 Range 0.1-0.3
River, estuaries, coastal zones	-	1.7 Range 0.5-2.9
Atmospheric deposition	-	0.6 Range 0.3-0.9
Total anthropogenic sources	8.1 ^a /4.1 ^b	6.7
Natural sources		
Soils under natural vegetation	3.0 ^a /6.6 ^b Range 3.3-9.9	6.6
Oceans	3.0 ^a /3.6 ^b Range 1.0-5.7	3.8 Range 1.8-5.8
Atmospheric chemistry	0.6 ^a / Range 0.3-1.2	0.6 Range 0.3-1.2
Total natural sources	9.6 ^a /10.8 ^b	11.0
Total sources	17.7 ^a /14.9 ^b Range 5.9-37.5	11.7 Range 8.5-27.7

ที่มา: Denman *et al.*, 2007

หมายเหตุ: TAR หมายถึง Third Assessment Report of IPCC (2001) และ AR หมายถึง The Fourth Assessment Report of IPCC (2007) ค่า N_2O Emission ใน TAR column ดัดแปลงจาก Mosier *et al.* (1998) and Kroeze *et al.* (1999) and Oliver *et al.* (1998) ปรากฏสัญลักษณ์ ^a และ ^b super subscription

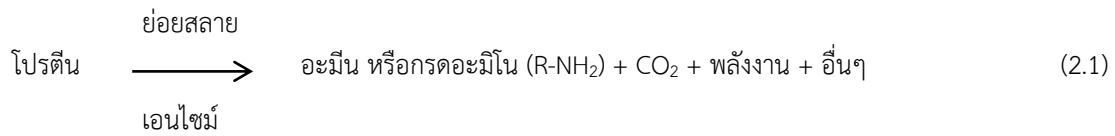
กระบวนการตรึงไนโตรเจนโดยไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศ เป็นกระบวนการแปรสภาพไนโตรเจนจากรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ เป็นรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยไนโตรเจนในอากาศจะถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นไนตริกออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์ ผ่านปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและฟ้าแลบ ซึ่งก๊าซไนโตรเจนในอากาศถูกออกซิไดซ์กลายเป็นไนตรัสออกไซด์ ไนตริกออกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์ ซึ่งจะละลายตกลงมายังผิวดินผ่านทางน้ำฝน หรือผ่านทางกระบวนการตรึงไนโตรเจนจากอากาศ (Nitrogen Fixation) โดยอาศัยจุลินทรีย์ที่มีภาวะอยู่ร่วมกันกับพืชบางชนิด เช่น การตรึงไนโตรเจนของไรโซเบียม ที่อาศัยที่ปมรากของพืชตระกูลถั่ว และการตรึงไนโตรเจนจากอากาศ โดยจุลินทรีย์ที่อยู่อย่างอิสระในดิน ได้แก่แบคทีเรียกลุ่ม *Azotobacter* หรือสาหร่ายบางชนิดและการได้มาซึ่งไนโตรเจนในดิน จากการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ในภาคเกษตรกรรม โดยไนโตรเจนในดินจะแปรสภาพไปเป็นแอมโมเนียม และไนเตรท โดยกระบวนการไนตริฟิเคชัน ไนเตรทถูกชะล้างสูญเสียได้ง่ายในสภาพฝนตกมากในระยะที่ฝนเริ่มตกใหม่ๆ ไนเตรทในดินจะถูกปล่อย พืชจะได้รับไนโตรเจนในรูปของไนเตรทที่มีสะสมอยู่ในดิน ทำให้พืชเจริญงอกงามดีในฤดูฝน (รูปที่ 2.2)



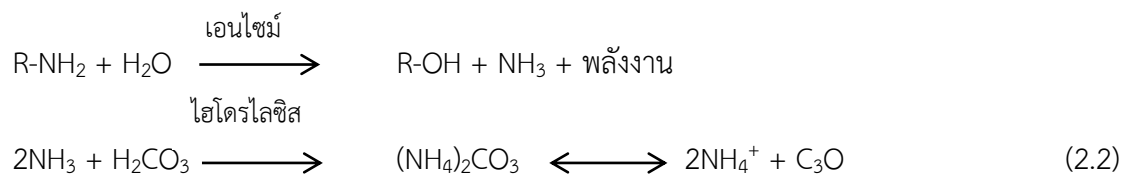
รูปที่ 2.2 The nitrogen cascade, illustrating the movement of human-produced reactive nitrogen as it cycle through the atmosphere, terrestrial ecosystems and aquatic ecosystems (Galloway and Cowling, (2002) with permission from the Royal Swedish Academy of Sciences)

ไนโตรเจนในดินจากแหล่งต่างๆ มีการเปลี่ยนรูปเพื่อเข้าสู่ระบบสิ่งแวดล้อม โดยการเปลี่ยนรูปจากสารอินทรีย์ไนโตรเจน เป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจน เรียกว่า กระบวนการ Mineralization

โดยอนินทรีย์ไนโตรเจน จะอยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยเริ่มจากการย่อยสลายสารประกอบโปรตีนในซากพืชซากสัตว์ ให้เปลี่ยนเป็นอะมีนและกรดอะมิโน ผ่านกระบวนการอะมิไนเซชัน (Aminization) ดังสมการ (2.1)



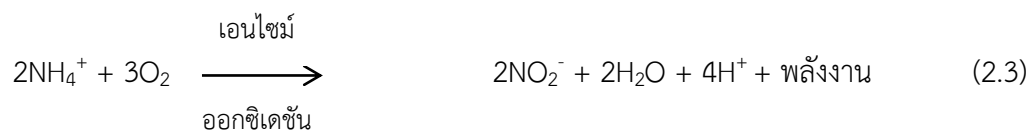
อะมีนและกรดอะมิโน ถูกเปลี่ยนสภาพเป็นแอมโมเนียต่อไป ผ่านกระบวนการแอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification) ดังสมการ (2.2)



แอมโมเนียที่มีอยู่จะถูกแบคทีเรียจำพวก Nitrosomonas และ Nitrobacter เปลี่ยนแอมโมเนียหรือแอมโมเนียม จะถูกออกซิไดซ์ให้เป็นไนไตรท์และไนเตรทตามลำดับ โดยกระบวนการนี้เกิดในสภาวะที่มีออกซิเจน เรียกว่า ไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ดังสมการ (2.3) และ (2.4)

สมการปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

ก. แอมโมเนียหรือแอมโมเนียมจะถูกออกซิไดซ์ให้เป็นไนไตรต์ โดยแบคทีเรียจำพวก Nitrosomonas ดังสมการ (2.3)

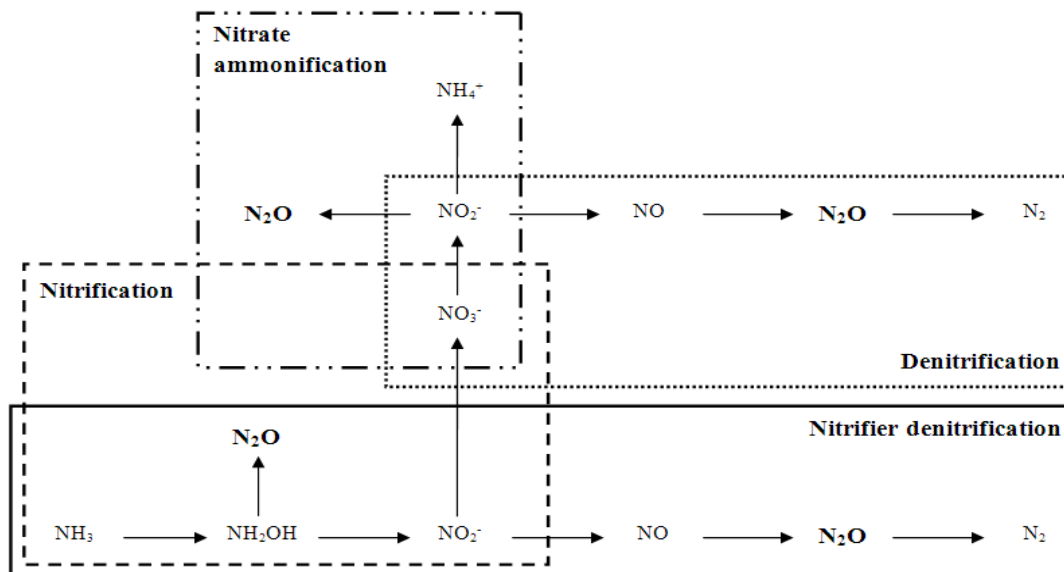


ข. ไนไตรต์ที่เกิดขึ้นถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนเป็นไนเตรทไอออน โดยแบคทีเรีย Nitrobacter ดังสมการ (2.4)



ไนเตรทที่ได้จากกระบวนการไนตริฟิเคชันจะอยู่ในสารละลายดินถูกพืชและจุลินทรีย์ในดินนำไปใช้ ส่วนที่เหลือจะสูญเสียไปโดยการชะล้างผ่านการซึมผ่านชั้นดิน ลงสู่ดินชั้นล่าง และสูญเสียใน

รูปของก๊าซสู่อากาศ ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ไนเตรทจะถูกแบคทีเรีย Heterotrophic Bacteria ใช้ออกซิเจนจากไนเตรท แล้วปล่อยก๊าซไนโตรเจนสู่อากาศ เรียกกระบวนการนี้ว่า ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) (มุกดา, 2544)

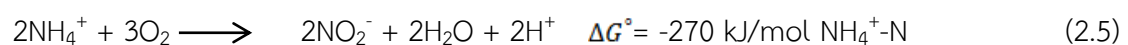


รูปที่ 2.3 Nitrification and denitrification processes in soils (Baggs, 2008)

2.2.2 กระบวนการไนตริฟิเคชัน

กระบวนการไนตริฟิเคชัน เป็นกระบวนการ Enzymatic Oxidation ซึ่งเกิดขึ้นโดยเอนไซม์ของแบคทีเรียกลุ่ม Nitrifying Bacteria ในดิน ซึ่งเป็นจุลินทรีย์กลุ่มที่ต้องการออกซิเจน กระบวนการนี้ ประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน 2 ขั้นตอน คือ แบคทีเรียจะได้พลังงานจากการออกซิเดชันแอมโมเนียเป็นไนไตรท์ (NO_2^-) และไนเตรท (NO_3^-) ตามลำดับ (รูปที่ 2.3) ตัวอย่างแสดงดังสมการ (2.5)-(2.7) ดังต่อไปนี้

สมการปฏิกิริยาของ Nitrosomonas



สมการปฏิกิริยาของ Nitrobacter



ปฏิกิริยารวม

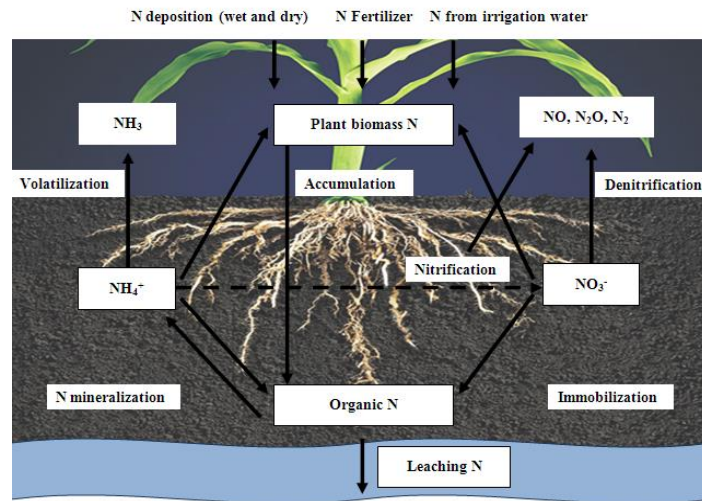


โดยปกติไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจะไม่สะสมอยู่ในดินเป็นเวลานาน คือ เมื่อเกิดไนโตรเจนแล้วจะถูกเปลี่ยนให้เป็นไนเตรททันทีและหากว่ามีการสะสมของไนโตรเจนเป็นจำนวนมาก จะเป็นพิษต่อพืชได้ โดยไนเตรทที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของสารละลายดิน ถูกพืชและจุลินทรีย์นำไปใช้ ส่วนที่เหลือจะสูญเสียไปโดยการชะละลายผ่านชั้นดินลงสู่ชั้นล่าง และสูญเสียไปในรูปของก๊าซ (มุกดา, 2544)

2.2.3 Nitrous oxide production by nitrification and denitrification

ไนตรัสออกไซด์เป็นผลจากกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน ภายใต้สภาวะมีออกซิเจน (aerobic condition) (i.e. up to 50% of soil pore spaces filled with water) และ NO_3^- กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (e.g. >75% of the soil pore spaces filled with water) (Mosier et al., 1996) สองกระบวนการนี้มีผลต่อการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากดินในภาคเกษตรถึงประมาณ 90% (Smith et al., 1997) ดินจากการเกษตรไนโตรเจนหายไปไนตรัสออกไซด์ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันค่อนข้างต่ำประมาณ 2-4% (Duxbury and McConnaughey, 1986) นอกจากนี้ไนตรัสออกไซด์จากกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นรวดเร็วและมีปริมาณสูง โดยเฉพาะในสภาพเปียกชื้น และอุณหภูมิพอเหมาะ ซึ่งจะเหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ (Linn and Doran, 1984) ประมาณ 60-80% ของ $\text{NO}_3\text{-N}$ สามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซ N_2O , NO และ N_2 ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (anaerobic conditions) (Mosier et al., 1996) กระบวนการของวัฏจักรไนโตรเจนแสดงดัง รูปที่ 2.4

อัตราการผลิตไนตรัสออกไซด์ (N_2O production) ด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณไนเตรท ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ซึ่งจะส่งผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการดีไนตริฟิเคชันและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ทางการกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ และปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิดิน ความชื้นในดิน ความเป็นกรดต่างของดิน ค่าการนำไฟฟ้า (redox potential) ปริมาณไนโตรเจน ออกซิเจน และอินทรีย์คาร์บอนในดิน และพบว่าอุณหภูมิและความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการปล่อยไนตรัสออกไซด์โดยตรง (Gasche and Papen, 1999; Butterbach-Bahl et al., 2004) อุณหภูมิในดินมีผลต่อการปล่อยโดยตรง ซึ่งอุณหภูมิจะไปกระทบต่อ kinetics and metabolic rates of nitrifiers and denitrifiers ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม 30-35 °C อย่างไรก็ตามความชื้นในดินก็มีผลโดยตรง เมื่อความชื้นกระทบต่อ O_2 diffusion ค่า soil water filled pore space (WFPS) สำหรับ N_2O production คือ 60-65% ที่ % WFPS values >70-80% ไนตรัสออกไซด์จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญถ้าอยู่ภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นของไนเตรทในดินสูง (Conrad, 1996, 2002; Firestone and Davidson, 1989).

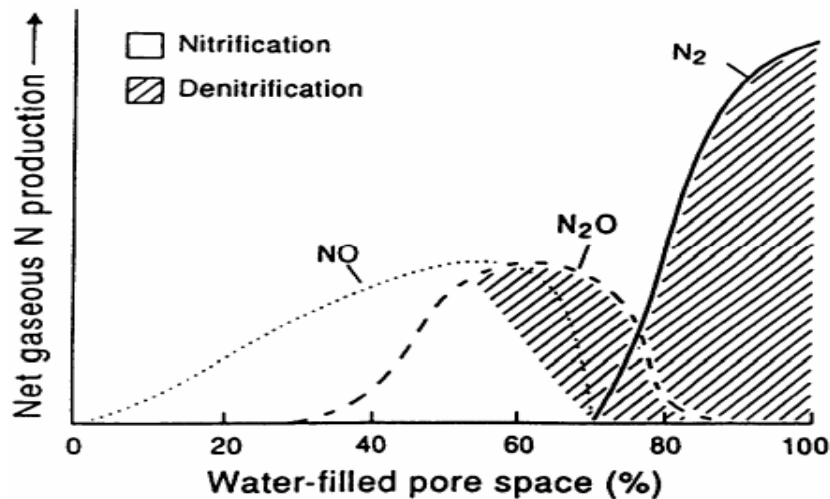


รูปที่ 2.4 Conceptual framework of nitrogen cycling in the ecosystem
(Mosier et al., 1996)

ในรูปที่ 2.5 NO fluxes ที่มีค่าสูงที่สุดในช่วงของ 30-60% WFPS เมื่อมีขบวนการไนตริฟิเคชันและมีค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์ 50-80 ถึง 60-90% WFPS ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดิน เนื้อดิน ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของกระบวนการไนตริฟิเคชัน ประมาณ 80% WFPS มีปริมาณออกซิเจนจำกัด ไนตรัสออกไซด์จะลดลงด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันและ N₂ เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย เมื่อความชื้นสูงจะไปยังยังการหายใจของจุลินทรีย์ มีออกซิเจนจำนวนจำกัด และการเพิ่มขึ้นของ NO₃⁻-diffusion ถึงจุลินทรีย์ นอกจากนี้กระบวนการไนตริฟิเคชันจะเกิดขึ้นสูงหลังฝนตกหรือภายหลังจากการให้น้ำพืช (Ussiri and Lal, 2013)

2.2.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

กระบวนการไนตริฟิเคชัน(Nitrification) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของจุลินทรีย์ ได้แก่ เนื้อดิน โครงสร้างดิน ซึ่งสองปัจจัยนี้มีผลต่อการระบายอากาศหรือการซึมน้ำในดิน (รูปที่ 2.5) นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติของดินทางเคมี เช่น ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH) Cation exchange capacity (CEC) และปริมาณอินทรีย์วัตถุ (Soil organic matter (SOM)) ส่วนปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และการระบายอากาศจะเป็นส่วนสำคัญต่อขบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification process)



รูปที่ 2.5 The relationship between water-filled pore space (WFPS) of soils and the relative fluxes of nitrogen gases from nitrification and denitrification (Yoshinari, 1993)

กระบวนการไนตริฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อการแปรรูปไนโตรเจนในดิน โดยจำเป็นต้องมีสภาพสิ่งแวดล้อมต่างๆ ในดินที่เหมาะสม สำหรับการทำงานของจุลินทรีย์ที่ควบคุมกระบวนการ ดังนี้

2.2.4.1 กลุ่มแบคทีเรียไนตริฟายอิงค์ (Nitrifying Bacteria)

กลุ่มแบคทีเรียไนตริฟายอิงค์ (Nitrifying Bacteria) เป็นปัจจัยหลักของการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน จำนวนและความหลากหลายของกลุ่มจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่ทำการศึกษา โดยเฉพาะชนิดของดิน Belser (1979) และ Jha *et al.* (1996) พบว่า จำนวนของจุลินทรีย์ไนตริฟายอิงค์มีผลต่ออัตราการออกซิเดชันของแอมโมเนียและไนไตรท์และส่งผลต่ออัตราการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันอย่างมีนัยสำคัญ

2.2.4.2 การถ่ายเทอากาศในดิน (Soil Aeration)

กระบวนการไนตริฟิเคชัน เป็นกระบวนการออกซิเดชันของไนโตรเจน โดยเกี่ยวข้องกับแบคทีเรียไนตริฟายอิงค์ ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ชนิดแอโรบิกที่ต้องการออกซิเจนในการหายใจ ดังนั้นออกซิเจนจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการนี้ อากาศที่ไหลผ่านในดินอาศัยช่องว่างของเม็ดดินเป็นสำคัญ โดย Prasad and Power (1997) พบว่า ดินที่มีโครงสร้างร่วนและเม็ดดินขนาดใหญ่ มีอัตราแลกเปลี่ยนก๊าซได้ดีและส่งเสริมการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มไนตริฟายอิงค์ ซึ่งสอดคล้องกับงานศึกษาของ Wahhab and Alam (1957) ที่รายงานถึงลักษณะของเนื้อดินต่อระดับของไนโตรเจนไว้ ดังนี้ คือ ดินที่มีเนื้อละเอียดจะมีระดับไนโตรเจนสูงกว่าดินที่มีเนื้อหยาบ ในดินที่มีแร่ดินเหนียวมากจะเกิดไนตริฟิเคชันได้ช้า แต่จะเกิดได้นาน ดินร่วนจะเกิดไนตริฟิเคชันของแอมโมเนียมซัลเฟตได้เร็วกว่าดินทรายในระยะ 14 วันแรก ซึ่งปริมาณออกซิเจนในดินที่เหมาะสมต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 2.1 จึงจะทำให้กระบวนการไนตริฟิเคชันดำเนินไปตามปกติ ดินที่อยู่ในสภาพที่มีการถ่ายเทอากาศดี จะมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอสำหรับกระบวนการนี้ ไนตริฟิเคชันจะเกิดเฉพาะดินชั้นบน (ชั้น A) แต่ถ้ามมีการไถพรวนจะเกิดในดินชั้นล่าง (ชั้น B) ด้วย (Amer *et al.*, 1951)

2.2.4.3 อุณหภูมิในดิน (Soil Temperature)

กระบวนการไนตริฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่เกิดจากจุลินทรีย์ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิต ดังนั้นจึงต้องการอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเกิดออกซิเดชันของแอมโมเนียมเกิดขึ้นได้ตั้งแต่ 0-60 องศาเซลเซียส และการเกิดออกซิเดชันของไนโตรที่ จะหยุดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส (Tate, 2000) โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการดังกล่าว คือ ระหว่าง 26-32 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงถึง 51.5 องศาเซลเซียส กระบวนการไนตริฟิเคชันจะหยุดทันที และถ้าอุณหภูมิลดต่ำลงถึง 4 องศาเซลเซียส จุลินทรีย์ก็จะไม่ทำงานเช่นเดียวกัน สำหรับการศึกษาในห้องปฏิบัติการ Schimidt and Belser (1994) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่ออัตราการเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันได้ดี อยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส

2.2.4.4 ความชื้นในดิน (Soil Moisture)

โดยทั่วไปความชื้นที่เหมาะสมที่จุลินทรีย์สามารถทำงานจะประมาณร้อยละ 50-70 ของความสามารถในการอุ้มน้ำ การศึกษาของ Morill and Dawson (1967) พบว่า กระบวนการไนตริฟิเคชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้น แต่หากมีปริมาณน้ำในช่องว่างดินมากเกินไป จะส่งผลให้เกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ดังนั้น ความชื้นในดินจึงมีผลต่อการถ่ายเทอากาศในดิน ถ้าความชื้นในดินน้อยเกินไปจะทำให้ดินมีสภาพแห้งเกินไป ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและทำงานของจุลินทรีย์

2.2.4.5 ความเป็นกรดต่างของดิน (Soil pH)

ความเป็นกรดต่างของดิน มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยความเป็นกรดต่างของดินไม่ควรต่ำกว่า 4.5 และระดับที่เหมาะสม คือ 6.5-7.0 การศึกษาของ Glimour (1984) พบว่า การเกิดไนตริฟิเคชันจะเกิดได้ดี เมื่อดินมีค่าความเป็นกรดต่างในช่วง 4.0-7.7 สภาพที่ดินเป็นกรดจะเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันได้น้อยมาก เนื่องจากความเป็นพิษของอะลูมิเนียมและกรดไนตริก ที่มีผลต่อจุลินทรีย์ ในขณะที่ดินด่าง จะมีความเป็นพิษของแอมโมเนียมต่อจุลินทรีย์ในดินเช่นเดียวกัน ซึ่งค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจริญของ Nitrobacter คือ 6.2-7.0 และ Nitromonas คือ ประมาณ 7.0 (Amer *et al.*, 1951)

2.2.4.6 อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนของอินทรีย์วัตถุ และธาตุอาหารต่างๆ (C/N ratio and Nutrient)

อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนของอินทรีย์วัตถุมีความสำคัญต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน คือ ถ้าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนของอินทรีย์วัตถุสูงหรือกว้าง แสดงว่ามีสัดส่วนคาร์บอนที่สูงกว่าไนโตรเจนมากและไม่เหมาะสมต่อการเพิ่มขึ้นของจำนวนจุลินทรีย์ เพราะเมื่อจำนวนจุลินทรีย์มากขึ้น ความต้องการไนโตรเจนสำหรับการสร้างเซลล์จะมากขึ้นด้วย แต่มีปริมาณไนโตรเจนจำนวนจำกัด อาจส่งผลให้กระบวนการไนตริฟิเคชันชะงักลง เนื่องจากขาดแอมโมเนียม ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นของกระบวนการ ส่วนธาตุอาหารอื่นๆ เป็นปัจจัยที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วยเช่นกัน โดยจุลินทรีย์ต้องการธาตุอาหารเหล่านั้นเช่นเดียวกับพืชชั้นสูง ดังนั้นการใส่ปุ๋ยลงไปในดินเพื่อให้มีระดับธาตุอาหารที่สมดุล จะช่วยให้กระบวนการไนตริฟิเคชันดำเนินไปได้ดียิ่งขึ้น

2.2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

ดินในการเกษตร การจัดการต่าง ๆ จะส่งผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน เช่น การไถพรวน ใส่ปุ๋ย ปูน ยากำจัดศัตรูพืชและวัชพืช และการให้น้ำ มีการศึกษาพบว่า กระบวนการดีไนตริฟิเคชันมี

การสูญเสียเกิดขึ้นจากการไม่ไถพรวนมากกว่าการไถพรวน ความแตกต่างจะเกิดเมื่อมีปริมาณน้ำมาก ภายใต้การไม่ไถพรวน ความเป็นกรดจากการใช้ปุ๋ยส่งผลต่ออัตราดีไนตริฟิเคชัน การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนจะสัมพันธ์กับขบวนการดีไนตริฟิเคชัน ถ้ามีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนที่หายไปเกิดจากขบวนการดีไนตริฟิเคชัน ปุ๋ยส่งผลต่ออัตราของการเปลี่ยน N_2O ถึง N_2 และไนตรัสออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่ปุ๋ยมากขึ้นด้วย (Skiba and Smith, 2000).

อัตราดีไนตริฟิเคชันจากการใส่ปุ๋ยลงดิน มีผลจาก ชนิดของปุ๋ย อัตราการใส่ปุ๋ย เวลาและวิธีการใส่ปุ๋ย และความสัมพันธ์ของการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนปริมาณสูงและการระบายน้ำไม่ดีหรือเกิดการขังน้ำจะส่งผลให้เกิดขบวนการดีไนตริฟิเคชันสูง นอกจากนี้ปุ๋ยยังมีผลต่อดีไนตริฟิเคชัน เช่น ทำให้ pH ของดินเปลี่ยน กระบวนการดีไนตริฟิเคชันจะเกิดสูงกรณีที่ pH เป็นกลางมากกว่าสภาวะดินเป็นกรด Mulvaney *et al.*, (1997) รายงานว่าปริมาณการปล่อยไนตรัสออกไซด์สูง และ N gas หลังจากใส่ alkaline fertilizers มากกว่า acidic fertilizers และตามด้วย $NH_3 > urea > (NH_4)_2HPO_4 > (NH_4)_2SO_4 > NH_4H_2PO_4$ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมมีผลต่อกิจกรรมของดีไนตริฟิเคชัน ดังนี้

2.2.5.1 น้ำและอากาศในดิน (Soil water and aeration)

น้ำในดินกับอัตราของออกซิเจนเป็นตัวกำหนด oxygen availability (Tiedje, 1988) ออกซิเจนเป็นปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญสำหรับขบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยทั่วไป Nitrogen oxide reductase enzymes จะขึ้นกับออกซิเจนเมื่อมีการนำออกซิเจนออกไป reductase enzymes จะเกิดภายในระยะเวลา 40 นาที ถึง 3 ชั่วโมง (Payne, 1973) ศักยภาพของอัตราดีไนตริฟิเคชัน ภายในสภาวะมีอากาศ คือ 0.3-3.0% ของอัตรา anaerobic rate การเพิ่มขึ้นของอัตราดีไนตริฟิเคชันจะสัมพันธ์กับอากาศในดินและปริมาณน้ำในดิน

ปริมาณจุลินทรีย์ในดินจะถูกควบคุมด้วยอัตราของออกซิเจนในดินและอัตราการใช้ออกซิเจน (O_2 consumption) ด้วยกระบวนการหายใจ ปัจจัยที่สำคัญที่ควบคุมความชื้นในดิน ได้แก่ ปริมาณฝน การคายน้ำของพืช และเนื้อดินจะกระทบต่อความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน (Soil water holding capacity) นอกจากนี้ความชื้นในดินมีผลกระทบโดยตรงต่อขบวนการดีไนตริฟิเคชัน โดยกระทบปริมาณเยื่อด้วย O_2 diffusion

2.2.5.2 อุณหภูมิ

ขบวนการดีไนตริฟิเคชัน เกิดในช่วงอุณหภูมิ 4-60 °C ที่อุณหภูมิ 1°C มีการสูญเสีย NO_3^- เพียงเล็กน้อยใน saturated soil อุณหภูมิมักเพิ่มขึ้นถึง 5-7°C ก่อนที่ปริมาณ NO_3^- จะลดลง เมื่ออุณหภูมิลดลงจะไปเพิ่มปริมาณออกซิเจนในสารละลายทำให้มีการลดกิจกรรมของดีไนตริฟิเคชันลงด้วย (Coyne, 2008)

2.2.5.3 คาร์บอน

บทบาทของคาร์บอนจะประกอบด้วย electron donor สำหรับ nitrate reduction มีผลกระทบทางอ้อมต่อสถานะของออกซิเจนในสภาวะดินมีอากาศ (aerobic soils) คาร์บอนจะเพิ่มขบวนการหายใจแบบใช้อากาศใน aerobic soils และลดความเข้มข้นของออกซิเจนและเพิ่ม anaerobic microbes สำหรับ Denitrifiers

2.2.5.4 ไนเตรทในดิน (Soil nitrates)

ไนเตรทต้องการตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) สำหรับกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ปริมาณไนเตรทที่เป็นประโยชน์ (availability of NO_3^-) สำหรับ denitrifiers ขึ้นอยู่กับอัตราของไนเตรทที่เคลื่อนย้ายจากสารละลายดินสู่ denitrifying microbes และอัตราความเข้มข้นในดิน ความ

เป็นประโยชน์ของไนโตรเจนจะไปจำกัดขบวนการตรึงไนโตรเจนในดินเพื่อไม่ให้รับไนโตรเจนจากปุ๋ยหรือ biological nitrogen fixation

2.2.6 การสูญหายของไนโตรเจนในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2.2.6.1 พืชและจุลินทรีย์ในดินนำไปใช้

พืชและจุลินทรีย์ในดินสามารถนำไนโตรเจนไปใช้ได้ในรูปแบบของไนเตรท และแอมโมเนียมเป็นส่วนใหญ่ โดยจะไปสะสมเป็นโครงสร้างและผลผลิต โดยพืชสามารถนำไนโตรเจนไปใช้ในปริมาณ 50-60% ของปุ๋ยที่ใส่ลงไป การสูญเสียไนโตรเจนดังกล่าวอาจจะเป็นการสูญเสียชั่วคราว และจะกลับคืนสู่ดิน เมื่อพืชและจุลินทรีย์นั้นตายและเน่าเปื่อยลง แต่หากมีการขนย้ายผลผลิตออกไป ย่อมหมายถึงการสูญเสียไนโตรเจนจากดินไปอย่างถาวร

2.2.6.2 การชะละลาย (Leaching)

ฝนที่ตกลงมา หรือน้ำที่ซึมผ่านชั้นดินจะชะเอาไนโตรเจนตามลงไปด้วย โดยเฉพาะในรูปแบบไนไตรท์หรือไนเตรท ถ้าหากไนโตรเจนที่ถูกชะลงไปยังดินชั้นล่างลึกไม่เกินบริเวณรากพืช จะถูกรากพืชดูดกลับขึ้นมาใช้ใหม่ แต่ถ้าถูกชะลงไปยังดินชั้นล่างที่ลึกเกินรากพืชแล้วยังถึงแล้ว จะเกิดการสูญเสียไนโตรเจนเกิดขึ้น โดยอาจอยู่ในรูปการชะละลายไปกับน้ำใต้ดิน ซึ่งการสูญเสียของปุ๋ยไนโตรเจนไปจากดินส่วนใหญ่ เกิดจากไนเตรทในดินถูกชะละลายไปกับน้ำ แล้วเกิดกระบวนการ Eutrophication ในดินที่มีลักษณะเนื้อหยาบ จะมีการสูญเสียไนโตรเจนผ่านกระบวนการชะละลายมากกว่าดินเนื้อละเอียด และไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของไนเตรท จะสูญเสียได้มากและง่ายกว่าแอมโมเนียมซึ่งมีไอออนบวก เพราะในการดูดซับไอออนบวกของดินเนื้อหยาบมีน้อยกว่า และไนเตรทเป็นไอออนลบ ถูกดูดซับได้น้อยทำให้ถูกชะละลายได้ง่าย

ธาตุไนโตรเจนเป็นธาตุที่มีการสูญเสียได้ง่ายที่สุดโดยกระบวนการต่างๆ ได้แก่ denitrification การชะละลาย (leaching) หรือการไหลบ่า (run off) ทัศนีย์ (2543) พบว่า ดินที่ใช้ปลูกข้าวในเขตร้อน มีการสูญเสียไนโตรเจนอย่างรวดเร็วภายใน 2 ถึง 3 วัน หลังดินมีน้ำขังและการทำให้ดินเปียกแห้งสลับกันจะส่งเสริมให้เกิดการสูญเสียไนโตรเจนมากขึ้นด้วย

IPCC, 2006 รายงานค่า Default Emission Factor ของการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ของกิจกรรมมนุษย์ พื้นที่เพาะปลูกทางการเกษตร จากกระบวนการชะละลายไนเตรท และการไหลบ่าของไนโตรเจน ซึ่งเป็นค่า Default Indirect emission มีค่าเท่ากับ 0.0075%

Grosso *et al.*, 2008 รายงานค่า Indirect Emissions จากกระบวนการชะละลาย (Leaching) และการไหลบ่า (run off) มีค่า 0.13-0.4 Tg yr⁻¹ สำหรับการปล่อยมลพิษจากกระบวนการชะละลาย และการไหลบ่า ของน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำผิวดิน

2.2.6.3 การสูญเสียในรูปก๊าซ (Volatilization)

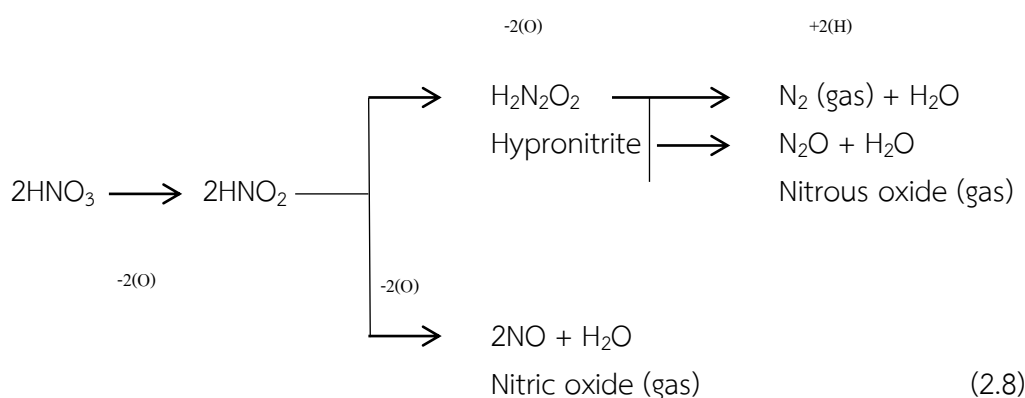
ไนโตรเจนอาจสูญเสียไปจากดินในรูปแบบของก๊าซได้ กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียไนโตรเจนในดินนี้ จะเกิดขึ้นเมื่อดินอยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสม คือ อากาศถ่ายเทไม่ดี มีสภาพน้ำขังในสภาวะเช่นนี้ ดินจะขาดออกซิเจน และกระบวนการรีดักชันจะเกิดขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ไนไตรท์และไนเตรทเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซได้ โดยแอมโมเนียมจะระเหยไปจากดิน (Ammonia volatilization) รวมทั้งไนเตรทถูกรีดิวซ์แล้วได้ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ก๊าซไนตริกออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน แล้วระเหยไปจากดิน

IPCC, 2006 รายงานค่า Default Emission Factor ของการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากกิจกรรมมนุษย์ พื้นที่เพาะปลูกทางการเกษตร จากกระบวนการสูญเสียในรูปก๊าซ (Volatilization) ซึ่งเป็นค่า Default Indirect emission มีค่าเท่ากับ 0.01%

กระบวนการรีดักชันอาจเกิดขึ้นได้ทั้งกระบวนการทางชีวภาพ และกระบวนการทางเคมี ดังนี้

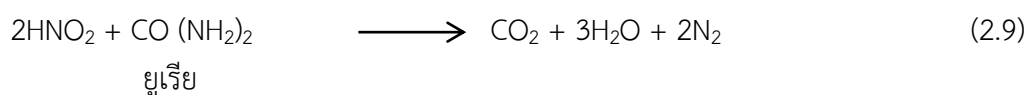
ก. กระบวนการทางชีวภาพ

เป็นกระบวนการรีดักชัน อันเนื่องมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน เมื่อดินขาดออกซิเจน จุลินทรีย์บางชนิดจะใช้อนุมูลต่างๆ ที่มีระดับออกซิเดชันสูงๆ เช่น ไนโตรท์ หรือไนเตรท เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ในกระบวนการหายใจโดยไม่ใช้อากาศ นั่นคือไนโตรท์หรือไนเตรทในดิน จะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นก๊าซในรูปต่างๆ เช่น ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ก๊าซไนตริกออกไซด์ และสูญเสียออกไปจากดินผ่านกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน ดังสมการที่ (2.8) ดังต่อไปนี้ (อภิชาติ, 2555)

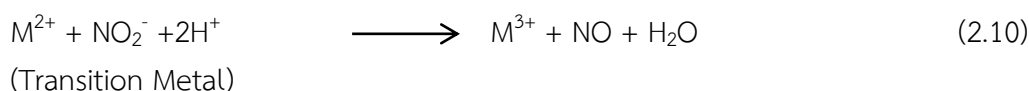


ข. กระบวนการทางเคมี

ไนโตรท์จะสูญเสียไปจากดินได้ เมื่ออยู่ในดินที่มีปฏิกิริยาเป็นกรด และมีเกลือแอมโมเนียมหรือสารประกอบอะมีน เช่น ยูเรีย หรือสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรตอยู่ด้วย โดยปฏิกิริยารีดักชันอาจเกิดขึ้น ดังสมการ (2.9) ต่อไปนี้



นอกจากนี้ไนโตรท์อาจจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของก๊าซได้ เมื่อมีโลหะทรานซิชัน เช่น Fe^{2+} Cu^{2+} Mn^{2+} ในดิน และกระบวนการนี้เกิดขึ้นได้ ดังสมการ (2.10) ต่อไปนี้



ไนโตรเจนในดินมีการสูญหายได้ง่าย ทั้งในสภาพอากาศถ่ายเทดีและไม่ดี และการสูญหายมักอยู่ในรูปของการถูกชะละลายหรือแปรรูปเป็นก๊าซสูญหายไป ดังนั้นการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนจึงควรระมัดระวัง มีการแบ่งใส่ตามระยะการเจริญเติบโตของพืชและปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินให้ดีขึ้น

2.2.7 การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินที่ใช้ในการเกษตร

การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากระบบนิเวศเกษตร คิดเป็น 60% ของการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ทั้งหมดจากกิจกรรมมนุษย์ (Smith *et al.*, 2007) ดินภายใต้ภาคการเกษตรมีส่วนในการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินในเขตร้อน ซึ่งมีการประมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์นั้น มีความไม่แน่นอนสูง (High uncertain estimation) (Lokupitiya and Paustain, 2006) ตัวอย่างเช่น การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากภาคการเกษตร ในระดับ Global scale ในทศวรรษที่ 1990 มีค่าแตกต่างกัน 0.9-4.8 Tg N yr⁻¹ (Smith *et al.*, 2007) 0.6-14.8 Tg N yr⁻¹ (Mosier *et al.*, 1998) ถึง 5.3 Tg N yr⁻¹ ในปี ค.ศ. 2006 (Syakila and Kroeze, 2011) เนื่องจากการวัดการปล่อยจากต่างพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น การใช้ปุ๋ยไนโตรเจนและการจัดการน้ำในพื้นที่ การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์มีการประเมินและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้ครอบคลุมทุกแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจก และหลักฐานวิทยาศาสตร์ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากภาคการเกษตร ประมาณค่าระหว่างปี ค.ศ. 1990-2011

References	Global N ₂ O flux (Tg N yr ⁻¹)	Emission sources
IPCC (1990)	0.01-2.2	Fertilizer and groundwater
IPCC (1992)	0.03-3.0	Cultivated soil
IPCC (1996)	3.5 (1.8-5.3)	Fertilizer, animal waste and N-fixation
Mosier <i>et al.</i> , (1998)/IPCC (2001)	6.8 (1.0-18.9)	Fertilizer, N-fixation, indirect emission, manure management, and biomass burning
IPCC (2007)	2.8 (1.47-4.8)	Fertilizer, indirect emission, manure management, and biomass burning
Syakila and Kroeze (2001)	5.3	Fertilizer, indirect emission, manure management and biomass burning, ocean and soil-aquatic system

ที่มา: Smith *et al.*, 2010

การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ในดินที่ใช้ในการเกษตร (Agriculture soil) เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในกระบวนการ Nitrification และ Denitrification ในกิจกรรมการทำเกษตร โดยเฉพาะจากการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน ทั้งในรูปของปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ (ปุ๋ยคอก ปุ๋ยพืชสด) ซึ่งปุ๋ยที่ใส่ลงไปในดินบางส่วนจะสูญเสียไปโดยกระบวนการ Nitrification และ Denitrification และมีการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ออกมาโดยตรง (Direct Emission) อย่างไรก็ตามการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ลงไปใน

ดิน ยังสามารถกระตุ้นให้มีการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจนที่มีอยู่ในดินเดิม ซึ่งกระบวนการนี้ส่งผลให้ดินปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จำนวนหนึ่ง ซึ่งเป็นการปล่อยโดยทางอ้อม (Indirect Emission) การปล่อยโดยทางอ้อมยังรวมถึงการสูญเสียไนโตรเจนจากกระบวนการอื่นๆ เช่น การชะล้าง การระเหยในรูปของก๊าซแอมโมเนีย เป็นต้น

ก๊าซไนตรัสออกไซด์ที่เกิดจากกิจกรรมมนุษย์ มีประมาณ 50-60% ที่เกิดจากภาคการเกษตร ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญจากการปล่อยไนตรัสออกไซด์โดยตรงจากดินทางการเกษตร (Mosier *et al.*, 1998) การคำนวณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ ค่าการปล่อย (Emission Factor) ใช้ค่า 0.01 kg N₂O-N/kg N หรือเท่ากับ 1% (IPCC, 2006; De Klein *et al.*, 2006) เนื่องจากเป็นค่าแนะนำ (Default Value) ตามคู่มือการจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจก ปี 2006 ของ IPCC (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553) ซึ่งเป็นค่ากลางที่ได้จากการเฉลี่ยค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเกษตรในประเทศต่างๆ ค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์แต่ละพื้นที่มีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์แตกต่างกันไปตามสภาพสิ่งแวดล้อม สภาพภูมิอากาศ ชนิดพืช ชนิดดิน และการจัดการการเพาะปลูก เช่น ประเภทของปุ๋ย อัตราการใส่ปุ๋ย และการจัดการน้ำในพื้นที่ เป็นต้น (Jan Peter *et al.*, 2011) ทั้งนี้ค่าการปล่อยจำเป็นต้องมีการปรับปรุงค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ให้แม่นยำมากขึ้น สำหรับกิจกรรมการเกษตรของประเทศ (Country Specific Emission Factor) และพัฒนาเป็นค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น ข้อมูลค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีในพื้นที่การเกษตรที่รวบรวมจากการศึกษาเอกสาร แสดงในตารางที่ 2.4 และ ตารางที่ 2.5

การจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553) รายงานการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ ในปี พ.ศ. 2543 (ค.ศ. 2000) จากภาคการเกษตร มีค่า 24.51 Gg N₂O ค่า Direct emission มีค่า 17 Gg N₂O ในขณะที่ ค่า Indirect emission มีค่า 7.51 Gg N₂O (ตารางที่ 2.6) การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากกิจกรรม Grazing animal, chemical fertilizer และ Leaching and runoff คิดเป็น 27.70%, 27.33% และ 18.85% ตามลำดับ

การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2547 (ค.ศ. 2000-2004) มีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องทุกปี ยกเว้นปี พ.ศ. 2547 (ค.ศ. 2004) โดยมีอัตราเพิ่มขึ้น 2.72% โดยการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ประเภท Direct emission คิดเป็น 70% ของการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ทั้งหมด (ตารางที่ 2.7) เนื่องจากความแตกต่างของค่าการปล่อย หรือ Emission Factor (EF) ที่ใช้ประเมินการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ ส่งผลให้กิจกรรมบางหมวดหมู่มีค่าความไม่แน่นอนสูง เช่น Grazing animal, Manure application to soil, Chemical fertilizer และ Leaching and runoff มีค่า 28% , 183%, 183% และ 40% ตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 ค่าการปล่อย (Emission Factor) ก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีในพื้นที่การเกษตร

N ₂ O emissions sources	Countries	(N ₂ O EFs) %	Reference
Default Value	Based on average data	1.0	IPCC, 2006
Sugarcane acid drainage soil)	Australia	21.0	Denmead <i>et al.</i> , 2010
Sugarcane (silt clay soil)	Australia	2.80	Denmead <i>et al.</i> , 2010
Arable (small grains)	UK	0.20-0.70	Smith <i>et al.</i> , 1998
Arable (other crops)	UK	1.2-11.2	Dobbie <i>et al.</i> , 1999
Arable (wheat)	Germany	5.0-8.8	Flessa <i>et al.</i> , 1995
Arable (wheat/barley/sugar beet/OS rape)	Germany	0.7-8.5	Kaiser <i>et al.</i> , 1998
Arable (maize)	Canada	1.0-4.0	MacKenzie <i>et al.</i> , 1997
Arable (maize)	China	2.0	Chen <i>et al.</i> , 1997
Arable (maize)	China	0.44	Feng <i>et al.</i> , 2012
Arable (maize)	China	0.51-3.8	Zhang <i>et al.</i> , 2012
Arable (maize)	China	0.14-0.30	Li <i>et al.</i> , 2016

ตารางที่ 2.5 Summary of N₂O emissions from maize soils in the North China Plain

Location	Period (day)	Total N (kg N ha ⁻¹)	Average fluxes (mg N ₂ O m ⁻² .day ⁻¹)	EF (%)	Reference
Luancheng, Hebei	45	100	0.45	0.04	Wang <i>et al.</i> , 2009
		200	0.45	0.006	Wang <i>et al.</i> , 2009
	107	100	0.93	0.41	Zhang <i>et al.</i> , 2004
		200	0.70	0.08	Zhang <i>et al.</i> , 2004
		300	1.49	0.34	Zhang <i>et al.</i> , 2004
Yucheng, shandong	105	150	0.45	0.19	Wang <i>et al.</i> , 1994
	124	90	1.38	1.9	Sun <i>et al.</i> , 2008
	122	210	3.47	0.51	Dong <i>et al.</i> , 2001
	89	207	3.78-4.07	1.2-1.3	Dong <i>et al.</i> , 2005
Fengqiu, Henan	105	150	1.92	1.1	Ding <i>et al.</i> , 2007
		250	3.60	1.3	Ding <i>et al.</i> , 2007
	102	150	0.361-0.49	0.20-0.28	Meng <i>et al.</i> , 2005
	66	150	4.90	1.9	Ding <i>et al.</i> , 2002
Beijing	75	300	6.44	1.6	Zou <i>et al.</i> , 2001

ตารางที่ 2.6 การประเมินการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ของประเทศไทย ในปี ค.ศ. 2000
เปรียบเทียบกับ INC และ SNC ในปี ค.ศ. 1994

Categories	Emission in Gg N ₂ O		
	1994 INC	1994 SNC	2000 SNC
Direct emission			
Chemical fertilizer	6.80	5.48	6.70
Manure application to soil	4.75	2.54	2.48
N fixation crop	(0.55)	(0.55)	0
Crop residue application	2.29	0.01	1.03
Compost application	(0.08)	(0.08)	0
Grazing animal	10.11	11.52	6.79
Subtotal	23.95	19.55	17.00
Indirect emission			
Emission from atmospheric deposition of NO _x and NH ₃	2.64	2.83	2.89
Emission from leaching and runoff	8.13	3.87	4.62
Subtotal	10.77	6.7	7.51
Total	34.72	26.25	24.51

ที่มา:สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553

หมายเหตุ: INC: Initial National Communication และ SNC: Second National Communication

ตารางที่ 2.7 การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ของประเทศไทย ปี ค.ศ. 2000-2004

Categories	Emission in Gg N ₂ O				
	2000	2001	2002	2003	2004
Direct emission					
Chemical fertilizer	6.70	6.69	6.86	7.25	6.55
Manure application to soil	2.48	2.67	2.49	2.74	2.24
Crop residue application	1.03	1.05	1.05	1.16	1.12
Grazing animal	6.79	7.19	7.37	7.79	8.16
Subtotal	17.00	17.60	17.77	18.94	18.07
Indirect emission					
Emission from atmospheric deposition of NO _x and NH ₃	2.89	3.03	3.05	3.25	3.03
Emission from leaching and runoff	4.62	4.81	4.84	5.12	4.78
Subtotal	7.51	7.84	7.89	8.37	7.81
Total	24.51	25.44	25.66	27.13	25.88

ที่มา: สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553

2.3 ปุ๋ยไนโตรเจน

การผลิตปุ๋ยไนโตรเจนเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1990 โดยอาศัยอยู่ในรูปที่เป็นของแข็งหรือของเหลว และอาจมีองค์ประกอบของธาตุอาหารอื่นๆ ร่วมด้วย จุดประสงค์หลักของการใส่ปุ๋ย เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณผลผลิตของพืช นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มคุณภาพของผลผลิต เช่น เพิ่มปริมาณโปรตีน ธาตุไนโตรเจนจึงมีความสำคัญและเป็นที่ต้องการในปริมาณมาก ดังนั้นการจัดการธาตุไนโตรเจนให้มีประสิทธิภาพจึงเป็นผลดีสำหรับเกษตรกรตลอดจนการอนุรักษ์และป้องกันผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน

ปุ๋ยไนโตรเจน คือ ปุ๋ยที่ประกอบด้วยธาตุไนโตรเจน ซึ่งเป็นหนึ่งในธาตุอาหารหลักของพืช โดยเป็นองค์ประกอบของโปรตีน มีหน้าที่เสริมสร้างส่วนที่เจริญเติบโต ระบบการสืบพันธุ์ และระบบการหายใจของพืช ปุ๋ยไนโตรเจนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำเกษตรกรรม ในปัจจุบันปุ๋ยไนโตรเจนมีหลายชนิด และที่เกษตรกรนิยมใช้กันมาก คือ ปุ๋ยแอมโมเนีย ปุ๋ยยูเรีย และปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต เนื่องจากในอุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ย ใช้ปุ๋ยยูเรีย และแอมโมเนียมซัลเฟต เป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยสูตรต่างๆ (ศักดิ์, 2547) ปุ๋ยไนโตรเจนแบ่งตามสถานะได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ (ตารางที่ 2.8) ปุ๋ยที่เป็นของแข็งสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ 1) ปุ๋ยที่มีไนโตรเจนเป็นธาตุหลักเพียงธาตุเดียว เช่น ยูเรีย แอมโมเนียมซัลเฟต แอมโมเนียมไนเตรท และแอมโมเนียมคลอไรด์ และ 2) ปุ๋ยที่มีไนโตรเจนกับธาตุหลักอีกธาตุหนึ่งเป็นองค์ประกอบ เช่น ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต โมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต และโพแทสเซียมไนเตรท (ยงยุทธและคณะ, 2551)

แอมโมเนีย เป็นสารประกอบที่มีไนโตรเจน 82.25% ไฮโดรเจน 17.75% ในอุณหภูมิปกติเป็นก๊าซ ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน น้ำหนักน้อยกว่าอากาศประมาณครึ่งหนึ่ง แต่เดิมก๊าซแอมโมเนียได้จากการบวนการเปลี่ยนถ่านหินให้เป็นถ่านโค้ก แล้วให้ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก ได้แอมโมเนียมซัลเฟต ต่อมาหันมาใช้กรดฟอสฟอริก เพื่อผลิตแอมโมเนียมฟอสเฟต ในปัจจุบันผลิตโดยตรงด้วยไนโตรเจนจากอากาศและไฮโดรเจนจากก๊าซธรรมชาติ หรือผลิตจากก๊าซปิโตรเลียมบางชนิด แอมโมเนียที่มีอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ทำให้เป็นของเหลวได้โดยอัดลงในถังที่มีความดัน 6.5 บรรยากาศของเหลวดังกล่าวเรียกว่า แอมโมเนียปราศจากน้ำ

ยูเรีย เป็นอินทรีย์สารซึ่งเป็นสารที่พบในปัสสาวะของสัตว์ นอกจากนี้ยังสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ปุ๋ยยูเรียจะผลิตในลักษณะเป็นเม็ดกลมสีขาว ละลายน้ำได้ดีมาก ดังนั้นจึงไม่ควรทิ้งไว้ในอากาศนานๆ จะเปื่อยขึ้นเร็ว ปุ๋ยยูเรียมีสารพิษไบยูเรต (Biuret) ผสมอยู่ด้วย ซึ่งเกิดจากกรรมวิธีในการผลิตจึงต้องระมัดระวังเมื่อมีการใช้ในอัตราสูง

แอมโมเนียมซัลเฟต เป็นปุ๋ยไนโตรเจนซึ่งผลิตได้จากปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟิวริก (30-50%) กับแอมโมเนีย โดยควบคุมให้มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 116-119 องศาเซลเซียส ปุ๋ยนี้มีไนโตรเจนทั้งหมด 21% ลักษณะเป็นผลึกสีขาวหรือสีเทา

แอมโมเนียมฟอสเฟต เป็นปุ๋ยซึ่งประกอบด้วยทั้งธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัส แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ โมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) และไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) เป็นปุ๋ยที่ละลายน้ำได้ดี

ปุ๋ย NP เป็นปุ๋ยที่ประกอบด้วยธาตุไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) เช่น ปุ๋ยสูตร 16-20-0 และ 18-46-0 และปุ๋ย N-P-K เป็นปุ๋ยที่ประกอบด้วยธาตุไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) เช่น ปุ๋ยสูตร 15-15-15 และ 16-16-8 เป็นต้น (ศักดิ์ดา, 2547)

ตารางที่ 2.8 ชนิดปุ๋ยไนโตรเจน

ชนิดปุ๋ย	สูตรเคมี	สูตรปุ๋ย
ของแข็ง		
1. แอมโมเนียมคลอไรด์	NH_4Cl	25-0-0 (66% Cl)
2. แอมโมเนียมไนเตรท	NH_4NO_3	33-0-0
3. แอมโมเนียมซัลเฟต	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	21-0-0 (24% S)
4. แคลเซียมไนเตรท	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	15-0-0 (22% Cl)
5. ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	18-46-0, 21-53-0
6. โมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	11-55-0, 12-61-0
7. ไนตริก ฟอสเฟต หรือ ไนโตรฟอสเฟต	$\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{CaHPO}_4 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	20-20-0 และสูตรอื่นๆ ขึ้นอยู่กับ การปรับกระบวนการผลิต
8. โพแทสเซียมไนเตรท	KNO_3	13-0-46
9. ยูเรีย	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	46-0-0
ของเหลว		
10. แอมโมเนียมพอลิฟอสเฟต	$(\text{NH}_4)_3\text{HP}_2\text{O}_7 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	10-34-0
11. ยูเรีย-แอมโมเนียมไนเตรท	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{NH}_4\text{NO}_3$	28-0-0 หรือ 32-0-0
ก๊าซ		
12. แอมโมเนียมปราศจากน้ำ	NH_3	82-0-0

ที่มา: Mortvedt *et al.*, 2014

ประเทศไทยนำเข้าปุ๋ยเคมีจากต่างประเทศ ในปริมาณเพิ่มสูงขึ้นทุกปี โดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน นำเข้าในรูปปุ๋ยยูเรีย จากประเทศซาอุดีอาระเบีย บังคลาเทศ บาห์เรน การ์ตาร์ มาเลเซีย และอินโดนีเซีย เพื่อใช้ในระบบเกษตรกรรมของประเทศ รวมทั้งใช้ในการผลิตปุ๋ยเคมีสำเร็จรูปสูตรต่างๆ (ศักดิ์ดา, 2547) ในปี พ.ศ. 2552-2556 ประเทศไทยมีแนวโน้มนำเข้าปุ๋ยไนโตรเจนปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามความต้องการการใช้ปุ๋ยเคมีในระบบการเกษตร เพื่อต้องการเพิ่มผลผลิต เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่รากพืชสามารถดูดใช้ได้ไนโตรเจนในรูปไนเตรตไอออน ($\text{NO}_3\text{-N}$) และแอมโมเนียมไอออน ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) ไนโตรเจนจึงมีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช โดยทั่วไปเมื่อใส่ปุ๋ยไนโตรเจนลงในดิน พืชสามารถนำไปใช้ในปริมาณ 50-60% ของปุ๋ยที่ใส่ลงไปเท่านั้น ส่วนที่เหลือถูกยึดไว้ในดินหรือเปลี่ยนเป็นรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ สูญหายไปโดยการชะละลาย หรือสูญหายไปไนโตรเจนของก๊าซ (ยงยุทธและคณะ, 2551)

การนำเข้าปุ๋ยไนโตรเจน มีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 3,350,000 ตัน เป็น 4,100,000 ตัน ในปี พ.ศ. 2552-2556 คิดเป็นมูลค่าการนำเข้าในแต่ละปีมากกว่า 30,000 ล้านบาท สำหรับปุ๋ยไนโตรเจน ประเทศไทยนำเข้าแม่ปุ๋ยไนโตรเจนของปุ๋ยยูเรีย และไดแอมโมเนียมฟอสเฟต และปุ๋ยสูตรไนโตรเจนแอมโมเนียมซัลเฟต ปุ๋ย NP และ NPK รายละเอียดปริมาณ และมูลค่าการนำเข้าปุ๋ยไนโตรเจน ของประเทศไทย โดยสำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตรแสดงในตาราง ที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าปุ๋ยไนโตรเจนที่สำคัญ ปี พ.ศ. 2552-2556

สูตรปุ๋ย	ปริมาณ: ต้น มูลค่า: ล้านบาท 2556									
	2552		2553		2554		2555		2556	
	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า	ปริมาณ	มูลค่า
46-0-0	2,307,784	23,544	2,121,342	21,824	2,087,879	27,758	2,153,690	30,240	2,170,237	24,483
18-46-0	192,725	2,447	481,343	7,997	395,044	7,939	536,806	10,198	550,257	8,606
21-0-0	232,649	1,154	350,023	1,893	276,558	2,047	282,782	2,266	191,674	1,154
16-20-0	335,541	3,501	494,393	5,187	571,528	7,147	549,688	7,587	575,112	6,885
16-16-8	21,974	280	10,795	122	42,736	616	71,223	1,050	102,448	1,345
15-15-15	260,069	3,527	409,488	5,513	379,906	5,691	400,776	6,511	534,378	7,483
รวม	3,350,742	34,453	3,867,384	42,536	3,753,651	51,198	3,994,965	57,852	4,124,16	49,956

ที่มา: สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2559

2.3.1 การจัดการที่เหมาะสมสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ย

เมื่อมีการใส่ปุ๋ยลงในพื้นที่และมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ปุ๋ยที่ใส่ลงไปดินจะละลาย เกิดการเปลี่ยนรูปและเคลื่อนย้ายไปในดิน ปุ๋ยแต่ละชนิดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงและเคลื่อนย้ายไปในดินได้แตกต่างกัน โดยปุ๋ยไนโตรเจนเกือบทุกชนิด ละลายน้ำได้ดีและจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปไนเตรท ซึ่งสูญเสียไปจากดินได้ง่ายและรวดเร็ว ทำให้พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้อย่างเต็มที่ โดยประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

2.3.1.1 ปัจจัยด้านภูมิอากาศ

ปัจจัยด้านภูมิอากาศ เป็นปัจจัยที่มีองค์ประกอบของปริมาณและการกระจายของฝน อุณหภูมิ ฤดูกาล ปริมาณแสงแดด ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญและควบคุมได้ยาก เนื่องจากน้ำฝนเป็นที่มาของน้ำในดินที่พืชต้องการนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ และยังเป็นตัวทำละลายธาตุอาหารจากดินและปุ๋ย จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดใช้ไนโตรเจน (Nitrogen Uptake Efficiency) อย่างมาก

2.3.1.2 ปัจจัยเกี่ยวกับปุ๋ย

ปุ๋ยไนโตรเจนในภาคการเกษตร มีสัดส่วนหรือปริมาณของธาตุอาหารที่แตกต่างกัน ดังนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงความต้องการของพืชและช่วงเวลาที่ใช้ปุ๋ยให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโต ทั้งนี้ปุ๋ยแต่ละชนิดมีลักษณะการแพร่ของธาตุอาหารที่ต่างกัน ดังนั้นการกำหนดช่วงเวลาและวิธีใส่ปุ๋ยจะช่วยให้พืชสามารถใช้ธาตุอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3.1.3 อัตราที่เหมาะสมและคุณค่าทางเศรษฐศาสตร์

การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเพื่อเพิ่มผลผลิต ต้องพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนกับผลผลิตที่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนให้แก่พืชจนถึงระดับหนึ่งแล้ว ผลผลิตจะไม่มีการเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันกลับได้ผลผลิตลดลง ซึ่งหมายถึงถ้ามีการใส่ปุ๋ยเกินระดับ จะทำให้ผลผลิตลดลงและยังเสียค่าใช้จ่ายโดยเปล่าประโยชน์ ฉะนั้นการกำหนดอัตราการใส่ปุ๋ยที่เหมาะสม ทั้งในเชิงผลผลิตทางการเกษตร ควบคู่กับความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาอย่างยิ่ง

2.3.2 ปุ๋ยและก๊าซเรือนกระจก

ภาคการเกษตรมีการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ประมาณ 2.8 พันล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี ซึ่งก๊าซไนตรัสออกไซด์ส่วนใหญ่ เกิดจากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในการเพาะปลูก

โดยเฉพาะการทำเกษตรอุตสาหกรรมที่ใช้ปุ๋ยในปริมาณมากเกินกว่าความจำเป็นที่พืชต้องนำมาใช้จริง ทำให้ปุ๋ยส่วนเกินที่พืชนำไปใช้บางส่วนสูญเสียหายออกจากระบบ ในรูปของก๊าซไนตรัสออกไซด์ ประเทศที่ปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์มากที่สุด คือ ประเทศจีน มีการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์กว่า 2,000 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี และคาดการณ์ว่าในระยะเวลา 20 ปีข้างหน้า การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้นร้อยละ 35-60 โดยเกิดจากการบุกรุกถางพื้นที่ป่าธรรมชาติ เพื่อใช้ทำพื้นที่เพาะปลูกเพื่อเกษตรอุตสาหกรรมและเพื่อปลูกพืชอาหารสัตว์ (อภิชาติ, 2555) รายงานของ Hickman *et al.* (2011) กล่าวถึง แนวโน้มการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ในพื้นที่การเกษตรในทวีปแอฟริกา ในปี ค.ศ. 2050 มีแนวโน้มการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนเพื่อระบบการเกษตรเพิ่มขึ้น 1.5-6 เท่า เมื่อเทียบกับปี ค.ศ. 2000 ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สูงขึ้นจากในปี ค.ศ. 2000 เป็นเท่าตัว โดยสาเหตุสำคัญ คือ การทำการเกษตรในทวีปแอฟริกาที่มีแนวโน้มการบุกรุกถางป่าเพื่อการทำการเกษตรเพิ่มมากขึ้น

2.4 ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (Maize)

ข้าวโพด (*Zea mays* L.) เป็นธัญพืชที่มีความสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ โดยในอดีตข้าวโพด ใช้ประโยชน์เป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์ มาตั้งแต่ พ.ศ. 2035 โดยเป็นที่ยอมรับกันว่า ถิ่นกำเนิดของข้าวโพดอยู่ในทวีปอเมริกา เมื่อคริสโตเฟอร์โคลัมบัส สำรวจค้นพบทวีปอเมริกาในปี พ.ศ. 2035 นั้น ยังไม่มีการปลูกข้าวโพดในทวีปอื่น ตั้งแต่นั้นมาข้าวโพดได้แพร่กระจายไปยังส่วนต่างๆ ของโลก (กรมวิชาการเกษตร, 2547) ข้าวโพดเป็นพืชที่มีความสำคัญรองจากข้าวสาลี และข้าว การผลิตโดยทั่วไปอยู่ในเขตอบอุ่น เขตกึ่งร้อนชื้น และพื้นที่ราบเขตร้อน ข้าวโพดสามารถปรับตัวได้ดีในสภาพแวดล้อมค่อนข้างกว้าง ปลูกได้ตั้งแต่เส้นรุ้ง 55 องศาเหนือ ถึง 40 องศาใต้ เมล็ดข้าวโพดมีแบ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญ ที่ใช้เป็นอาหารหลักของมนุษย์ ในหลายประเทศ เช่น เม็กซิโก สเปน อิตาลี แอฟริกาใต้ อินเดีย และอินโดนีเซีย (คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา, 2547) นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในอุตสาหกรรมแป้ง น้ำมัน น้ำตาล และต้นข้าวโพดยังใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์

ข้าวโพดมีคุณค่าทางโภชนาการสูง เป็นแหล่งพลังงาน (คาร์โบไฮเดรต และไขมัน) ที่สำคัญ นอกจากนี้ยังมีโปรตีน และองค์ประกอบอื่นๆ ที่สำคัญด้วยเช่นกัน ดังนั้นข้าวโพดจึงเป็นแหล่งอาหารสัตว์ที่สำคัญ โดยให้สัตว์กินโดยตรง หรือเป็นส่วนสำคัญของอาหารสัตว์

พื้นที่เก็บเกี่ยวข้าวโพดทั่วโลกประมาณ 873 ล้านไร่ มีผลผลิตรวม 590 ล้านตัน โดยประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุดของโลก รองลงมา ได้แก่ จีน บราซิล เม็กซิโก อาร์เจนตินา ผลผลิตข้าวโพดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความต้องการใช้ประโยชน์เป็นอาหารของมนุษย์ และใช้เมล็ดข้าวโพดในปริมาณมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ที่มีส่วนผสมของข้าวโพดสูงถึงร้อยละ 50-60 (คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา, 2547)

ประเทศไทยมีข้าวโพดที่ปลูก แบ่งได้ 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ข้าวโพดไร่ หรือข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เป็นข้าวโพดที่มีแป้งมาก ข้าวโพดข้าวเหนียว หรือข้าวโพดเทียน และข้าวโพดหวานชนิดพิเศษ มีน้ำตาลซูโครสสูง แต่มีแป้งน้อย

2.4.1 สถานการณ์การผลิต ความต้องการใช้ และการตลาดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของโลก

2.4.1.1 การผลิต

การผลิตปี พ.ศ. 2549/50-2553/54 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 714.03 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2549/50 เป็น 828.69 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2553/54 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.34 ต่อปี โดยสหรัฐอเมริกาเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ของโลก ผลิตได้เพิ่มขึ้นจาก 267.50 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2549/50 เป็น 316.17 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2553/54 เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.44 ต่อปี นอกจากนี้ประเทศผู้ผลิตสำคัญ ผลิตได้เพิ่มขึ้น เช่น อาร์เจนตินา บราซิล แคนาดา จีน สหภาพยุโรป อินเดีย ไนจีเรีย ฟิลิปปินส์ แอฟริกาใต้ ยูเครน และเวียดนาม ผลผลิตของโลกปี พ.ศ. 2553/54 มี 828.69 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจาก 819.61 ล้านตัน ในปี พ.ศ.2552/53 ร้อยละ 1.11 แม้ว่าสหรัฐอเมริกาผลิตได้ลดลงจากปี พ.ศ. 2552/53 ร้อยละ 4.93 แต่หลายประเทศ เช่น จีน อินเดีย เม็กซิโก ไนจีเรีย แคนาดา ฟิลิปปินส์ ยูเครน และเวียดนาม ผลิตได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลผลิตของโลกเพิ่มขึ้นไม่มากนัก (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557)

การผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของโลก ในปี พ.ศ. 2556 อยู่ที่ 968 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจาก 863 ล้านตัน จากปี พ.ศ. 2555 คิดเป็นร้อยละ 12.06 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) ประเทศผู้ผลิตรายใหญ่ คือ สหรัฐอเมริกา รองลงมา ได้แก่ จีน บราซิล สหภาพยุโรป ตามลำดับ สัดส่วนการผลิต ความต้องการ และปริมาณการส่งออกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ของประเทศผู้ผลิตสำคัญ แสดงในตารางที่ 2.10

2.4.1.2 ความต้องการใช้

ความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อุตสาหกรรมเอทานอล และเมล็ดพันธุ์ ปีพ.ศ. 2549/50-2553/54 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จาก 728.67 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2549/50 เป็น 843.70 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2553/54 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.61 ต่อปี โดยสหรัฐอเมริกา มีความต้องการใช้เพิ่มขึ้น จาก 230.67 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2549/50 เป็น 284.99 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2553/54 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.09 ต่อปี นอกจากนี้ประเทศอาร์เจนตินา บราซิล จีน ยูเครนอินเดีย อียิปต์ ฟิลิปปินส์ ไนจีเรีย แอฟริกาใต้ และอินโดนีเซีย มีความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.10 สัดส่วนการผลิต ความต้องการ และปริมาณการส่งออกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ปี พ.ศ. 2556

ลำดับ	ประเทศผู้ผลิต	ผลผลิต (เปอร์เซ็นต์)	ความต้องการ (เปอร์เซ็นต์)	ส่งออก (เปอร์เซ็นต์)
1	สหรัฐอเมริกา	35.56	31.49	37.18
2	จีน	22.50	22.89	18.59
3	บราซิล	7.24	7.79	16.38
4	สหภาพยุโรป	6.74	5.83	11.51

ที่มา: The Foreign Agricultural Service, 2014

สำหรับความต้องการใช้ข้าวโพด ปีพ.ศ. 2553/54 มี 34.70 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจาก 822.76 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2552/53 ร้อยละ 2.55 เนื่องจากความต้องการใช้ของสหรัฐอเมริกาเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2552/53 ร้อยละ 1.21 โดยนำไปใช้ผลิตเอทานอล ร้อยละ 40.34 ของผลผลิต ขณะที่ประเทศ อาร์เจนตินา บราซิล จีน สหภาพยุโรป อินเดีย อียิปต์ ฟิลิปปินส์ ยูเครน แอฟริกาใต้ ไนจีเรีย และอินโดนีเซีย มีความต้องการใช้เพิ่มขึ้นด้วย

ความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในตลาดโลก ปี พ.ศ. 2556 อยู่ที่ 944 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจาก 861 ล้านตันจากปีที่แล้ว คิดเป็นร้อยละ 9.54 ประเทศที่มีความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มากที่สุด คือ สหรัฐอเมริกา รองลงมา ได้แก่ จีน สหภาพยุโรป บราซิล และเม็กซิโก ตามลำดับ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557)

2.4.1.3 การส่งออก/นำเข้า

การค้าของโลก (ส่งออก/นำเข้า) ปีพ.ศ. 2549/50-2553/54 มีแนวโน้มลดลงจาก 91.49 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2549/50 เป็น 91.22 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2553/54 หรือลดลงร้อยละ 0.62 ต่อปี โดยสหรัฐอเมริกาซึ่งเป็นผู้ส่งออกอันดับหนึ่งของโลก ส่งออกลดลงในร้อยละ 5.45 ต่อปี และประเทศอาร์เจนตินา ปารากวัย ส่งออกลดลง แต่ยูเครน บราซิล อินเดีย และแอฟริกาใต้ ส่งออกได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การส่งออกในภาพรวมลดลงไม่มาก

ในปี พ.ศ. 2553/54 ปริมาณการค้าของโลก มี 91.22 ล้านตัน ลดลงจาก 92.95 ล้านตัน ของปี พ.ศ. 2552/53 ร้อยละ 1.86 เนื่องจากสหรัฐอเมริกา อาร์เจนตินา สหภาพยุโรป ปารากวัย และยูเครน ส่งออกลดลง นอกจากนี้ประเทศญี่ปุ่น เกาหลีใต้ มาเลเซีย ไต้หวัน และเวียดนาม มีการนำเข้าลดลง (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557)

2.4.1.4 กลุ่มประเทศอาเซียน

สถานการณ์การผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กลุ่มประเทศอาเซียน ในปี พ.ศ. 2555-2557 พบว่าประเทศที่มีพื้นที่ปลูกมากที่สุด ได้แก่ อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ และไทย ตามลำดับ (ตารางที่ 2.11) โดยประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพิ่มมากขึ้น จาก 7.52 ล้านไร่ ในปี พ.ศ. 2555 เป็น 7.54 ล้านไร่ ในปี พ.ศ. 2557 แต่ในปี พ.ศ. 2557 พื้นที่การผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีการเปลี่ยนแปลงตามราคาสินค้าการเกษตรที่ลดลง (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) ประเทศที่ผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มากที่สุด ได้แก่ ฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย และประเทศไทย ตามลำดับ (ตารางที่ 2.12)

ตารางที่ 2.11 พื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (ไร่) ในกลุ่มประเทศอาเซียน ปี พ.ศ. 2555-2557

ประเทศ	2555	2556	พื้นที่	(เปอร์เซ็นต์)	2557	พื้นที่	(เปอร์เซ็นต์)
	(2554/2555)	(2555/2556)	เปลี่ยนแปลง		(2556/2557)	เปลี่ยนแปลง	
กัมพูชา	1,352,062	1,191,000	-161,062	-13.52	1,194,250	3,250	0.27
อินโดนีเซีย	24,794,500	24,134,562	-659,938	-2.73	24,715,062	580,500	2.35
ลาว	1,105,875	1,282,250	175,375	13.69	1,333,125	51,875	3.89
เมียนมาร์	2,572,750	2,636,562	63,812	2.42	2,600,812	-35,750	-1.37
ฟิลิปปินส์	16,214,812	16,297,938	83,125	0.51	17,387,250	1,089,312	6.27
ไทย	7,528,541	7,541,447	12,459	0.17	7,507,166	-34,281	0.45
เวียดนาม	6,989,375	7,045,625	56,250	0.80	7,059,375	13,750	0.19

ที่มา: ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2557 และ สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557

ตารางที่ 2.12 ผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (ตัน) ในกลุ่มประเทศอาเซียน ปี พ.ศ. 2555-2557

ประเทศ	2555	2556	ผลผลิต (เปอร์เซ็นต์) เปลี่ยนแปลง	(เปอร์เซ็นต์)	2557	ผลผลิต (เปอร์เซ็นต์) เปลี่ยนแปลง	(เปอร์เซ็นต์)
	(2554/2555)	(2555/2556)			(2556/2557)		
กัมพูชา	950,910	840,900	-110,010	-11.57	844,340	3,440	0.41
อินโดนีเซีย	19,378,020	18,510,440	-867,580	-4.52	18,998,660	488,220	2.64
ลาว	926,830	1,065,940	139,110	15.01	1,070,000	4,060	0.38
เมียนมาร์	1,484,910	1,525,670	40,760	2.74	1,581,420	55,750	3.65
ฟิลิปปินส์	7,406,830	7,597,390	190,560	2.57	8,231,160	6,33770	8.34
ไทย	4,947,451	5,062,828	115,377	2.33	5,095,262	32,434	0.64
เวียดนาม	4,803,600	4,883,350	79,750	1.66	4,926,780	43,430	0.89

ที่มา: ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2557 และ สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557

2.4.2 สถานการณ์การผลิต ความต้องการใช้ และการตลาดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของไทย (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557)

2.4.2.1 การผลิต

เนื้อที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ระหว่างปี พ.ศ. 2549/50-2553/54 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 6.40 ล้านไร่ ในปี พ.ศ. 2549/50 เป็น 7.25 ล้านไร่ ในปี พ.ศ. 2553/54 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.66 ต่อปี เนื่องจากราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อยู่ในเกณฑ์ดี จึงทำให้เกษตรกรขยายการเพาะปลูก และมีการปลูกทดแทนมันสำปะหลัง ในพื้นที่ที่เกิดปัญหาเพลี้ยแป้งระบาด ผลผลิตต่อไร่เพิ่มขึ้นจาก 612 กิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2549/50 เป็น 646 กิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2553/54 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.71 ต่อปี เนื่องจากสภาพดินฟ้าอากาศเอื้ออำนวยต่อการเพาะปลูก ส่งผลให้ผลผลิตรวมเพิ่มขึ้นจาก 3.92 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2549/50 เป็น 4.68 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2553/54 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.40 ต่อปี

ปี พ.ศ. 2553/54 พื้นที่เพาะปลูก 7.25 ล้านไร่ เพิ่มขึ้นจาก 7.10 ล้านไร่ ในปี พ.ศ. 2552/53 ร้อยละ 2.11 เนื่องจากนโยบายประกันรายได้เกษตรกรและราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อยู่ในเกณฑ์ดี จึงทำให้เกษตรกรขยายพื้นที่เพาะปลูกในที่ว่างเชิงเขาและปลูกทดแทนพื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลัง ที่มีเพลี้ยแป้งระบาด สำหรับผลผลิตต่อไร่ 646 กิโลกรัม ลดลงจากร้อยละ 650 กิโลกรัม ในปี พ.ศ. 2552/53 ร้อยละ 0.62 เนื่องจากฝนทิ้งช่วงต้นฤดูปลูกและบางพื้นที่ประสบอุทกภัย ทำให้ผลผลิตได้รับความเสียหายบางส่วน สำหรับผลผลิตรวม 4.68 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจาก 4.62 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2552/53 ร้อยละ 1.30 เนื่องจากพื้นที่เพาะปลูกเพิ่มขึ้น

ปี พ.ศ. 2556/57 พื้นที่เพาะปลูก 7.51 ล้านไร่ ลดลง จากปี พ.ศ. 2555/56 ร้อยละ 0.45 (ตารางที่ 2.13) เนื้อที่ปลูกส่วนใหญ่อยู่ในภาคเหนือ ร้อยละ 67.69 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ร้อยละ 23.03 และภาคกลาง ร้อยละ 9.28 จังหวัดที่เนื้อที่เพาะปลูกมาก 5 อันดับแรก ได้แก่ เพชรบูรณ์ น่าน นครราชสีมา เลย และตาก

ปี พ.ศ. 2556/57 ผลผลิตรวม 5.095 ล้านตัน เพิ่มขึ้น จากปี พ.ศ. 2555/56 ร้อยละ 0.64 เป็นผลผลิตของภาคเหนือ ร้อยละ 66.84 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ร้อยละ 23.97 และภาคกลาง ร้อยละ 9.19 โดยผลผลิตจะออกสู่ตลาดมากในช่วงเดือนกันยายนถึงพฤศจิกายน ประมาณ 2.95 ล้านตัน ผลผลิตเฉลี่ย 679 กิโลกรัมต่อไร่ เพิ่มขึ้น ร้อยละ 1.19 โดยผลผลิตในภาคเหนือเฉลี่ยร้อยละ 670 กิโลกรัม ภาคตะวันออกเฉียงเหนือร้อยละ 707 กิโลกรัม และภาคกลางร้อยละ 672 กิโลกรัม

2.4.2.2 ความต้องการใช้

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ผลิตได้ในประเทศร้อยละ 90 ใช้เป็นวัตถุดิบในภาคอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ในปี พ.ศ. 2549/50-2553/54 ความต้องการใช้ในประเทศ ปี พ.ศ. 2549/50 มี 3.85 ล้านตัน เพิ่มขึ้นเป็น 4.28 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2553/54 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.77 ต่อปี เนื่องจากการส่งออก เนื้อไก่และผลิตภัณฑ์ได้เพิ่มขึ้น จากการปรับปรุงแบบการส่งออกจากไก่สดเป็นไก่แปรรูปจึงไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อใช้หัวคอก ทำให้ตลาดต่างประเทศมีความมั่นใจคุณภาพและมาตรฐานความปลอดภัยด้านอาหารของไทย ส่งผลให้ความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์เพิ่มขึ้นด้วย

สำหรับปี พ.ศ. 2553/54 ประเทศไทยได้โควตาส่งออกไก่แปรรูปจากสหภาพยุโรปและโรงงานอาหารสัตว์ที่ใช้มันสำปะหลังในสูตรอาหารสัตว์ปรับเปลี่ยนมาใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เช่นเดิม ส่งผลให้ความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เป็น 4.28 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจาก 4.21 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2552/53 คิดเป็นร้อยละ 1.66

2.4.2.3 การส่งออก

ปี พ.ศ. 2549/50-2553/54 การส่งออกขยายเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.39 ต่อปี โดยการส่งออกปี พ.ศ. 2549/50 มี 0.22 ล้านตัน เพิ่มขึ้นเป็น 1.00 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2552/53 เนื่องจากการส่งออก บางส่วนเป็นการระบายสต็อกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ตามโครงการรับจำนำปี พ.ศ. 2551/52 ของรัฐบาล และเป็นการส่งออกปกติที่เคยส่งออกได้ ปี พ.ศ. 2553/54 มีการส่งออก 0.21 ล้านตัน สำหรับปี พ.ศ. 2553/54 การส่งออกคิดเป็น 0.21 ล้านตัน และมีมูลค่า 1,725 ล้านบาท ลดลงจาก 1.00 ล้านตัน และมีมูลค่า 6,490 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2552/53 ซึ่งปริมาณลดลงถึง 5 เท่า และมูลค่าลดลง 4 เท่า

ตารางที่ 2.13 เนื้อที่เพาะปลูก ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของไทย ปี พ.ศ. 2551-2557

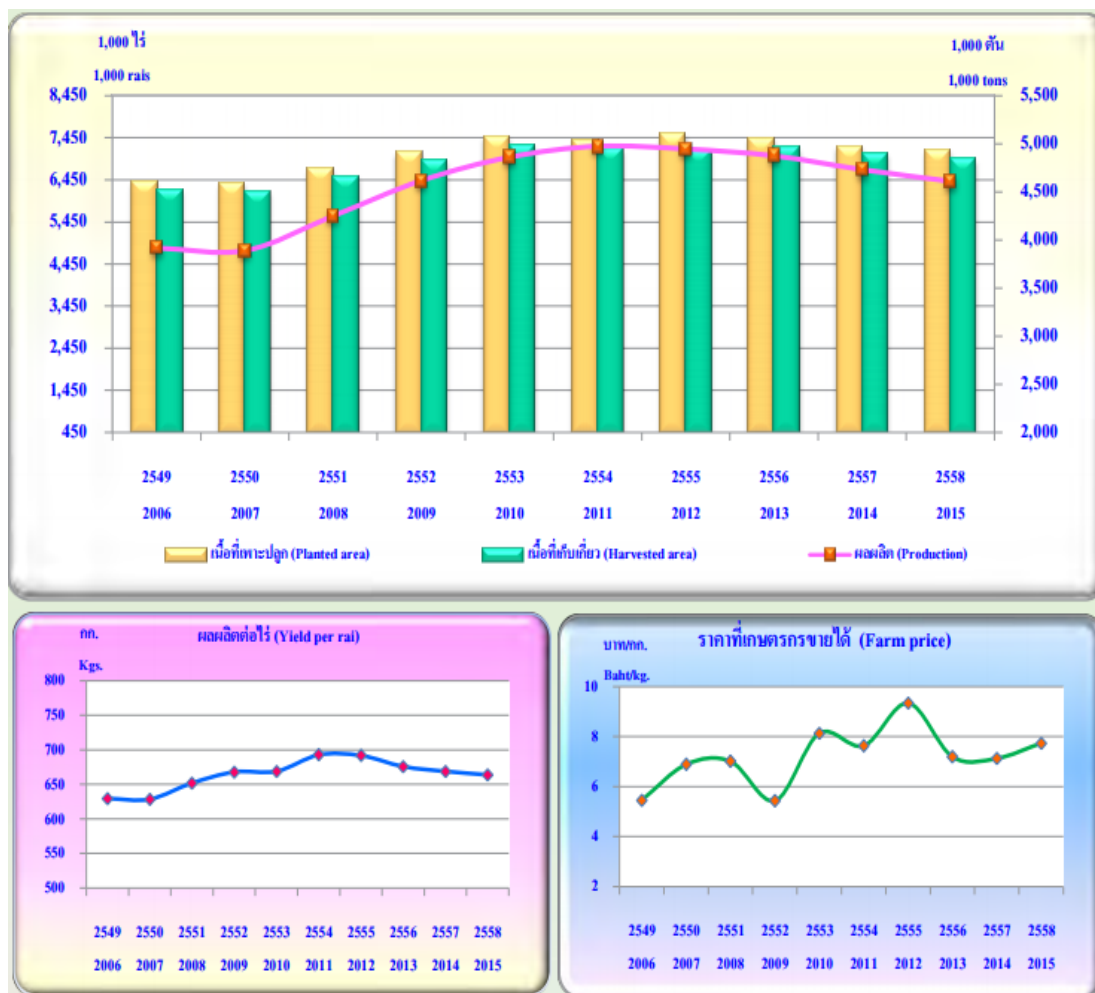
ปีเพาะปลูก	เนื้อที่เพาะปลูก (ล้านไร่)	ผลผลิต (ล้านตัน)	ผลผลิตต่อไร่ (กิโลกรัม)
2551/52	6.69	4.25	635
2552/53	7.10	4.26	650
2553/54	7.48	4.86	650
2554/55	7.52	4.95	673
2555/56	7.54	5.06	666
2556/57	7.51	5.09	679

ที่มา: ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2557 และ สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557

ตารางที่ 2.14 Cultivated area of maize in Thailand by region, 2011-2015

Region	Planted area (ha)					Production (million tons)	Yield per ha (tons)
	2011	2012	2013	2014	2015	2015	2015
Whole kingdom	1,186,498	1,178,719	1,188,242	1,157,054	1,145,088	4.61	4.15
Northern	757,318	754,549	807,797	802,776	793,266	3.23	4.16
Northeastern	302,239	299,070	262,377	243,671	239,538	0.96	4.11
Central plain	126,941	125,100	118,069	110,607	112,281	0.42	4.16

ที่มา: Office of Agricultural Economics (2016)



รูปที่ 2.6 The maize planted and harvested area, crop yield and farm price in Thailand (Office of Agricultural Economics, 2016)

2.4.2.4 การนำเข้า

ปี พ.ศ. 2549/50-2553/54 การนำเข้าขยายเพิ่มขึ้นร้อยละ 33.33 ต่อปี โดยการนำเข้าปี พ.ศ. 2549/50 มี 0.09 ล้านตัน เพิ่มขึ้นเป็น 0.24 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2552/53 เนื่องจากความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของโลกที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีการนำเข้าข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จากประเทศเพื่อนบ้านซึ่งมีราคาถูกกว่ามาเพื่อส่งออกไปขาย

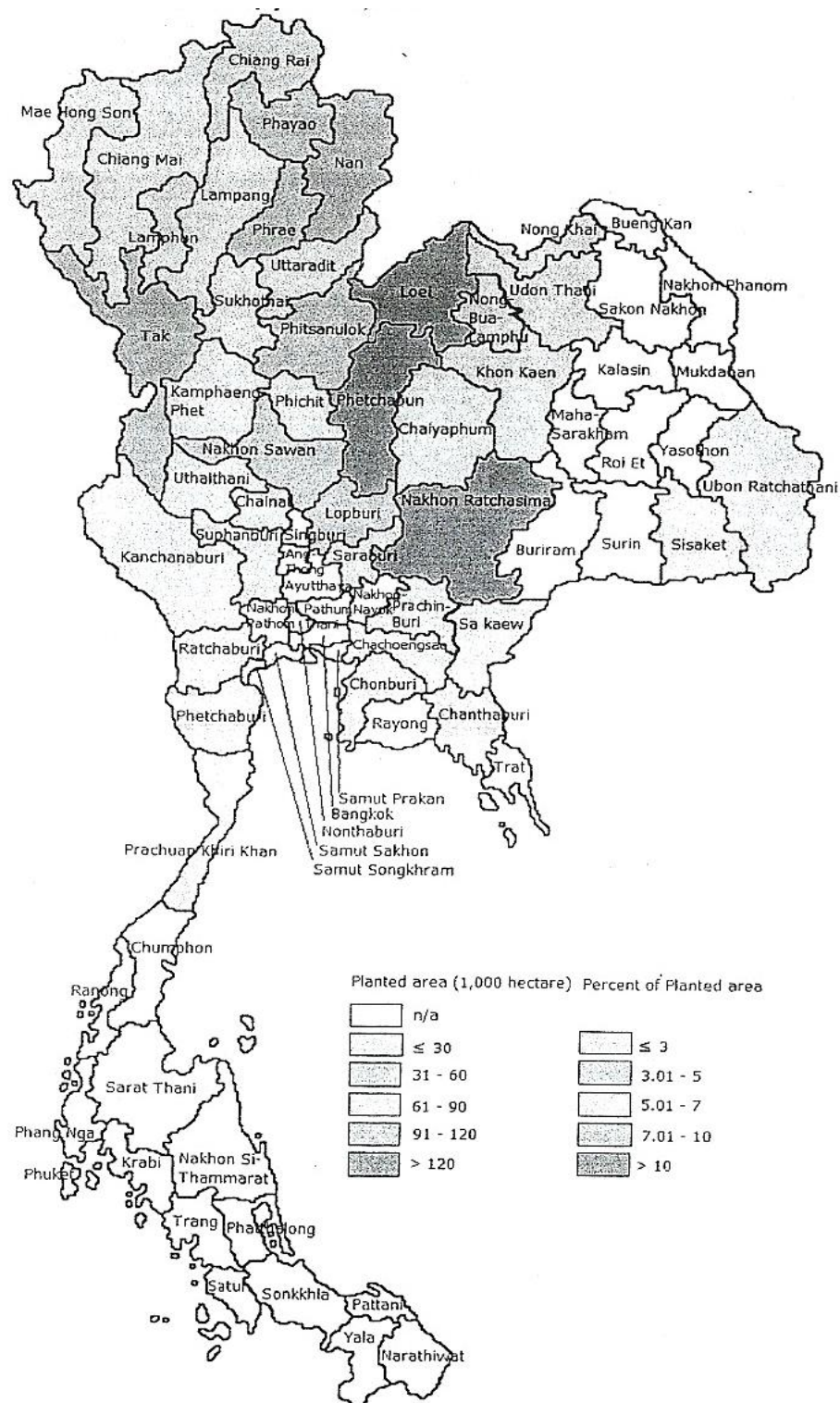
สำหรับปี พ.ศ. 2553/54 การนำเข้า 0.39 ล้านตัน และมีมูลค่า 1,474 ล้านบาท เพิ่มขึ้นจาก 0.24 ล้านตัน มูลค่า 815 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2552/53 โดยปริมาณเพิ่มขึ้นร้อยละ 62.50 และมูลค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 80.86

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชที่ใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในปริมาณมากกว่าพืชชนิดอื่นๆ (IFA, 2009) แต่ประสิทธิภาพของการนำไปใช้ของข้าวโพด มีเพียง 30% เนื่องจากปุ๋ยโดยส่วนใหญ่ที่ใส่ลงไปในดิน จะสูญหายไปนในสิ่งแวดล้อม (Huang *et al.*, 2010) ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จึงเป็นแหล่งสำคัญของการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Zhang *et al.*, 2012)

ตารางที่ 2.15 Thailand's import and export quantity and value of maize seed, 2005-2012

Year	Import			Export			Balance of Trade (million USD)
	Quantity (ton)	Value (million USD)	Unit value (USD/kg)	Quantity (ton)	Value (million USD)	Unit value (USD/kg)	
2005	3,125.97	3.119	0.998	9,730.66	15.116	1.559	12.047
2006	2,688.27	3.174	1.181	10,259.77	17.577	1.713	14.403
2007	1,968.26	2.590	1.316	13,432.64	24.237	1.806	21.647
2008	2,414.48	3.304	1.368	15,573.12	32.930	2.115	29.626
2009	5,263.81	9.187	1.745	13,292.29	33.894	2.550	24.707
2010	2,992.01	5.354	1.789	13,595.91	36.928	2.716	31.574
2011	1,216.88	2.667	2.192	19,971.80	45.009	2.254	42.342
2012	3,190.68	7.222	2.264	15,443.98	43.831	2.838	36.609

ที่มา: Orachos (2015)



รูปที่ 2.7 The maize planted area in Thailand by province in year 2012 (Orachos, 2015)

2.4.3 ลักษณะบางประการของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลูกผสมเดี่ยวพันธุ์สุวรรณ 4452 (ศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ, 2549)

ข้าวโพดลูกผสมเดี่ยวพันธุ์สุวรรณ 4452 ชื่อวิทยาศาสตร์ *Zea mays* L. ชื่อสามัญ Field Corn รหัสพืช Ksx 4452 เป็นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลูกผสมเดี่ยว ที่พัฒนาขึ้นโดย ดร. โชคชัย เอกทัศนาวรรณ ศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ สถาบันอินทรีจันทร์สถิตย์เพื่อการค้นคว้าและพัฒนาพืชศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เกิดจากการนำสายพันธุ์แท้ เกษตรศาสตร์ 47 (Ki47) ผสมกับสายพันธุ์แท้ Kei 0102 ในปี พ.ศ. 2543 ผลการทดสอบพันธุ์ในแหล่งปลูกข้าวโพด ในพื้นที่ต่างๆ ช่วง 3 ปี (พ.ศ. 2543-2545) พบว่า ให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์เปรียบเทียบอย่างน้อยร้อยละ 10 มีเสถียรภาพสูงในการให้ผลผลิตในสภาพแวดล้อมต่างๆ จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2546 ศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ ได้แนะนำพันธุ์สู่เกษตรกร ภาครัฐ และเอกชนต่างๆ

ข้าวโพดลูกผสมเดี่ยวพันธุ์สุวรรณ 4452 เป็นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์ที่ปรับตัวได้ดี ในสภาพแวดล้อมที่เลวถึงดี มีระบบราก และลำต้นที่แข็งแรง ไม่หักล้มง่าย มีความสูงของลำต้น 214 เซนติเมตร ใบตั้ง มีสีเขียวเข้ม (รูปที่ 2.8a) ช่อดอกมีสีม่วง (รูปที่ 2.8b) มีอายุวันสลัดละอองเกสร 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ 53 วัน วันออกไหม 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ 54 วัน ความสูงฝักที่ระดับ 128 เซนติเมตร ฝักมีเปลือกหุ้มฝักปิดมิดชิด (รูปที่ 2.8c) เมล็ดมีสีส้มเหลือง ฝักมีจำนวนแถว 16 แถว จำนวน 38 เมล็ดต่อแถว ซึ่งมีสีขาว (รูปที่ 2.8d) สามารถต้านทานต่อโรคราน้ำค้าง และโรคทางใบได้ดีโดยเฉพาะโรคราสนิม ให้ผลผลิตเฉลี่ย 1,187-1,454 กิโลกรัมต่อไร่ มีเปอร์เซ็นต์กะเทาะเมล็ด 81.9 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก 1,000 เมล็ด มีค่า 310.14 กรัม สามารถปลูกได้ทุกสภาพอากาศ ไม่ว่าจะเป็นช่วงต้นและปลายฤดูฝน รวมถึงในพื้นที่ดินเหนียวสีดำและดินเหนียวสีแดง

ข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 4452 มีลักษณะเด่นที่ให้ผลผลิตสูงเหมาะสำหรับเกษตรกรในการปลูกเพื่อใช้เป็นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในระบบอุตสาหกรรม สมชัย และคณะ (2547ก) ทดสอบพันธุ์ข้าวโพดการค้าในไร่กลีกร โดยใช้ข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 4452 เป็นพันธุ์เปรียบเทียบกับข้าวโพดที่จำหน่ายในพื้นที่อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา อีกจำนวน 9 พันธุ์ ซึ่งทั้งหมดล้วนเป็นพันธุ์ที่เพาะปลูกในพื้นที่อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นแหล่งปลูกข้าวโพดสำคัญของประเทศ พบว่า พันธุ์สุวรรณ 4452 ซึ่งเป็นพันธุ์เปรียบเทียบ ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงสุด 819 กิโลกรัมต่อไร่ เนื่องจากการได้รับการพัฒนาและปรับปรุงที่ไร่สุวรรณ ซึ่งมีสภาพแวดล้อมเดียวกับเขตอำเภอปากช่อง จึงเหมาะเป็นข้าวโพดเฉพาะแหล่ง ปลูกที่อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

ต่อมา สมชัย และคณะ (2547ข) ทดสอบพันธุ์ข้าวโพดลูกผสมกึ่งการค้าในระดับไร่เกษตรกร ทั้งสิ้นจำนวน 25 พันธุ์ ในพื้นที่ทดลอง 10 แห่ง ในจังหวัดลพบุรี นครสวรรค์และนครราชสีมา โดยใช้พันธุ์สุวรรณ 4452 เป็นพันธุ์เปรียบเทียบ พบว่า ข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 4452 ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงกว่าพันธุ์อื่นๆ ทั้งหมด โดยให้ผลผลิตเฉลี่ย 906 กิโลกรัมต่อไร่ ยกเว้นพันธุ์ KSX 4601 เพียงพันธุ์เดียว ที่ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงกว่า 966 กิโลกรัมต่อไร่ (สูงกว่า 7%)

2.4.4 รูปแบบการปลูกและการดูแลรักษาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (กรมวิชาการเกษตร, 2547)

2.4.4.1 การเตรียมดินสำหรับปลูก

การเตรียมดินสำหรับปลูกข้าวโพดที่ดี ควรมีการปฏิบัติเมื่อดินมีความชื้นเพียงพอ กล่าวคือ หลังจากที่มีฝนตกจนกระทั่งดินมีความชื้นเหมาะสม การเตรียมดินสำหรับปลูกข้าวโพดสามารถปฏิบัติได้ ดังนี้

การไถตะ (Primary Tillage) เป็นการไถครั้งแรก เพื่อเปิดหน้าดิน ส่วนใหญ่ใช้ผาน (Disk Plow) 3 หรือ ผาน 4 หรือ ไถหัวหมู (Moldboard Plow) ตัดท้ายรถแทรกเตอร์ เพื่อพลิกหน้าดินและเก็บวัชพืช โดยกำหนดให้ความลึกในการไถประมาณ 30 เซนติเมตร แล้วตากดินไว้ 7-10 วัน



(a) ลักษณะลำต้นและใบ

(b) ลักษณะช่อดอกเพศผู้ (Tassel)



(c) ลักษณะดอกเพศเมีย หรือฝักข้าวโพด (Ear)

(d) ลักษณะฝักข้าวโพดและเมล็ด

รูปที่ 2.8 ลักษณะบางประการของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลูกผสมเดี่ยวพันธุ์สุวรรณ 4452

การไถแปรและไถพรวน (Secondary Tillage and Harrowing) เป็นการไถขวางแนวการไถตะ เพื่อย่อยดินให้แตกและคลุกเคล้าเศษซากพืชและอินทรีย์วัตถุได้อย่างสม่ำเสมอ หากการไถแปรยังทำให้ดินละเอียดไม่เพียงพอ กำหนดให้มีการไถอีก 1-2 ครั้ง ในกรณีที่มีการไถตะแล้วดินร่วนพอควร อาจยกเว้นการไถแปร คงเหลือเพียงแต่การไถพรวนอย่างเดียวได้ การไถแปรมักจะใช้ผาน 3 หรือผาน 4 ส่วนการไถพรวนมักจะใช้ผาน 7 ตัดท้ายรถแทรกเตอร์

การชักช่องว่างระหว่างแถวข้าวโพด เป็นการปฏิบัติกันดินหลังข้าวโพดงอกแล้ว ประมาณ 4-6 สัปดาห์ (Post Emergence Cultivation) มีวัตถุประสงค์เพื่อการกำจัดวัชพืชและเป็นการกลบปุ๋ยเสริมที่ใส่ให้กับข้าวโพดในขณะเดียวกัน รวมทั้งเป็นการพูนโคนให้กับข้าวโพด เสริมสร้างความแข็งแรงไม่ให้ต้นหักล้มได้ง่าย

2.4.4.2 วิธีปลูกและอัตราปลูกที่เหมาะสม

การปลูกด้วยแรงงานคน ใช้ระยะระหว่างแถว 75 เซนติเมตร ระยะระหว่างหลุม 20-25 เซนติเมตร อัตราปลูก 8,533-10,667 ต้นต่อไร่ ใช้เมล็ดพันธุ์ 3-4 กิโลกรัมต่อไร่ โดยใช้จอบขุดเป็น

หลุมหรือรถไถเดินตาม หรือแทรกเตอร์ติดหัวเปิดร่อง หยอดเมล็ดหลุมละ 1-2 เมล็ด กลบดินให้แน่น เมื่อข้าวโพดอายุประมาณ 14 วัน หลังงอก ถอนแยกให้เหลือหลุมละ 1 ต้น

ปลูกด้วยเครื่องจักรกลการเกษตร ใช้รถแทรกเตอร์ลากจูงเครื่องจักรกลสำหรับปลูก ปรับให้มีระยะระหว่างแถว 75 เซนติเมตร ระยะระหว่างหลุม 20 เซนติเมตร จำนวน 1 ต้นต่อหลุม หรืออัตราปลูก 10,667 ต้นต่อไร่ ใช้เมล็ด 2-3 กิโลกรัมต่อไร่ โดยไม่ถอนแยก

สมชัย และคณะ (2547ค) ทดลองอัตราปลูกต่อผลผลิตข้าวโพดลูกผสม ใน 3 ระยะปลูก คือ 75×25, 75×20 และ 75×15 เซนติเมตร ที่อัตราปลูก 8,533, 10,667 และ 14,000 ต้นต่อไร่ ในข้าวโพด 6 พันธุ์ พบว่า ระยะปลูกทั้ง 3 ระยะ ให้ผลผลิตเฉลี่ยของข้าวโพดทุกพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยพันธุ์สุวรรณ 4452 ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงสุดที่ 1,091, 1,126 และ 1,182 กิโลกรัมต่อไร่ ที่ระยะปลูก 75×25, 75×20 และ 75×15 เซนติเมตร ตามลำดับ

2.4.4.3 การให้ปุ๋ย

ชนิดของปุ๋ย เลือกใช้ปุ๋ยอินทรีย์ หรือปุ๋ยเคมี ให้มีความเหมาะสมกับสมบัติของดิน รวมทั้งระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพด โดยทั่วไปปุ๋ยเคมีที่เหมาะสมกับข้าวโพด เช่น ปุ๋ยสูตร 46-0-0, 16-20-0, 20-20-0, 15-15-15, 12-12-6 และ 16-16-8 เป็นต้น ส่วนปุ๋ยอินทรีย์ ได้แก่ ปุ๋ยคอก และปุ๋ยพืชสด แม้ว่าจะมีปริมาณธาตุอาหารไม่สูงเท่าปุ๋ยเคมี แต่จะช่วยปรับปรุงสมบัติของดินทั้งทางกายภาพ และทางเคมี

อัตราปุ๋ย ได้แก่ ปริมาณของปุ๋ยที่ใส่ต่อพื้นที่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของดิน สมบัติของดิน ฤดูกาล และระยะการเจริญเติบโตของพืช

ระยะเวลาใส่ปุ๋ย ระยะวิกฤตที่ข้าวโพดต้องการปุ๋ยเพื่อใช้ในการสร้างเสริมการเจริญเติบโต และผลผลิต ได้แก่ ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นและระยะการสร้างเมล็ด การใส่ปุ๋ยที่เหมาะสมควรมีการใส่ในระยะที่ข้าวโพดต้องการมากที่สุด

การใส่ปุ๋ยรองพื้นในดินพร้อมกับการปลูกข้าวโพด มีจุดประสงค์ให้ข้าวโพดได้ใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารในปุ๋ยทันทีเมื่อข้าวโพดงอก โดยส่วนใหญ่ตำแหน่งมาตรฐานของการใส่ปุ๋ยรองพื้น จะเป็นแถบด้านข้างเมล็ด ห่างไป 5 เซนติเมตร ทั้งนี้สามารถปรับระยะให้เหมาะสมกับระบบการจัดการการปลูกแบบต่างๆ ได้ (Alley *et al.*, 2010) การใส่ปุ๋ยรองพื้นเป็นการเร่งพัฒนาการของข้าวโพดและเพิ่มผลผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพในพื้นที่ที่มีความแปรผันของธาตุอาหารสูง (Pierson, 2013) ซึ่งสอดคล้องกับ Bullock *et al.*, 1993 รายงานว่า ปุ๋ยรองพื้นเพิ่มอัตราการพัฒนาการของข้าวโพด ในพื้นที่ที่ได้รับปุ๋ยรองพื้นจะออกดอกตัวผู้และการสุกแก่ของเมล็ดก่อนพื้นที่ที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ย 2-3 วัน การเจริญเติบโตของข้าวโพดจะตอบสนองต่อการใส่ปุ๋ยรองพื้น ทั้งในดินที่มีฟอสฟอรัสสูงและตอบสนองสูงมากในดินที่มีฟอสฟอรัสต่ำ (Bermudez and Mallarino, 2002)

การใส่ปุ๋ยโรยหน้า เป็นการใส่ปุ๋ยเสริม (Top dressing) ใส่ระยะข้าวโพดมีอายุประมาณ 15-25 วัน โดยใส่บริเวณโคนต้น (Side dressing) หรือโรยเป็นแถว (Banding)

ดินแต่ละชนิด มีความอุดมสมบูรณ์ของดินไม่เท่ากัน การใส่ปุ๋ยเคมีกับข้าวโพด จึงควรใช้ชนิดปุ๋ยสูตร อัตราเหมาะสมและถูกเวลา โดยดินเหนียวสีดำ ถ้ามีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงกว่า 10 ส่วนในล้านส่วน ให้ปุ๋ยเคมีสูตร 21-0-0 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ หรือสูตร 46-0-0 อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ โรยข้างแถวหลังปลูก 20-25 วัน ถ้ามีฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำกว่า 10 ส่วนในล้านส่วน ให้ปุ๋ยเคมีสูตร 20-20-0 อัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ หรือสูตร 16-20-0 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ รองกันหลุม

พร้อมปลูก และให้ปุ๋ยสูตร 46-0-0 อัตรา 10 กิโลกรัมต่อไร่ หรือสูตร 21-0-0 อัตรา 20 กิโลกรัมต่อไร่ โรยข้างแถวหลังปลูก 20-25 วัน แล้วพรวนดินกลบ

ดินเหนียวสีแดง ดินเหนียวสีน้ำตาล หรือดินร่วนสีน้ำตาล ให้ปุ๋ยเคมีสูตร 16-20-0 หรือ 16-16-8 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ รองกันหลุมพร้อมปลูก และให้ปุ๋ยสูตร 21-0-0 อัตรา 30 กิโลกรัมต่อไร่ หรือสูตร 46-0-0 อัตรา 10 กิโลกรัมต่อไร่ โรยข้างแถวหลังปลูก 20-25 วัน แล้วพรวนดินกลบ

ดินร่วน หรือดินร่วนปนทราย ให้ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-8 หรือสูตร 15-15-15 อัตรา 50 กิโลกรัมต่อไร่ รองกันหลุมพร้อมปลูกและให้ปุ๋ยเคมีสูตร 21-0-0 อัตรา 30 กิโลกรัมต่อไร่ โรยข้างแถวหลังปลูก 20-25 วัน แล้วพรวนดินกลบ

2.4.4.4 การควบคุมวัชพืช

วัชพืชระบาดในไร่ข้าวโพดส่วนใหญ่เกิดมาจากเมล็ดและบางส่วนเกิดมาจากส่วนขยายพันธุ์อื่นๆ ที่ตกค้างอยู่ในดิน การควบคุมวัชพืชในไร่ข้าวโพดสามารถทำได้ โดยในช่วงการเตรียมดินเป็นการกำจัดวัชพืชวิธีหนึ่ง ทำให้วัชพืชถูกทำลายและปริมาณวัชพืชลดลง การกำจัดวัชพืชเมื่อข้าวโพดมีอายุ 3-4 สัปดาห์ เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับกำจัดวัชพืชครั้งเดียว โดยใช้แรงงานคน หากมีวัชพืชจำนวนมากขึ้นมาในภายหลัง ควรกำจัดวัชพืชก่อนถึงระยะข้าวโพดออกดอกและวิธีการใช้สารกำจัดวัชพืช สารเคมีแต่ละชนิด มีสมบัติในการปราบวัชพืชและผลตกค้างในสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน ตัวอย่างสารกำจัดวัชพืช เช่น อะทราซีน (Atrazine) อะลาคลอร์ (Alachlor) และพาราควอต (Paraquat) เป็นต้น (คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา, 2547)

2.4.4.5 การเก็บเกี่ยวผลผลิต

การเก็บเกี่ยวผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ใช้วิธีหักฝักข้าวโพดใส่กระสอบ และขนส่งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพื่อไปกะเทาะเมล็ดและวัดค่าความชื้นในเมล็ดข้าวโพดด้วยเครื่องวัดความชื้น

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jan Peter *et al.* (2011) รายงานว่า ข้อมูลที่จำเป็นในการศึกษาการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในการเกษตร และค่าการปล่อย หรือ Emission Factor ควรพิจารณาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ Nitrogen input source คือ ประเภทของปุ๋ย ไนโตรเจน และองค์ประกอบของปุ๋ย อัตราการใส่ปุ๋ยในพื้นที่ มูลสัตว์ที่ใช้ในการเกษตร เศษซากพืชในการเกษตร ดิน ได้แก่ ชนิดดิน ความอุดมสมบูรณ์ของดิน ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิดิน การใช้ที่ดินและประเภทของพื้นที่ทางการเกษตร สภาพภูมิอากาศ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน และอุณหภูมิอากาศ เป็นต้น ทั้งนี้ค่า Emission Factor ที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากความแตกต่างของพื้นที่ศึกษาในระดับภูมิภาค สภาพแวดล้อม ชนิดพืช และกิจกรรมทางการเกษตรในแต่ละพื้นที่การศึกษา ค่า Emission Factor ในเงื่อนไขระดับภูมิภาคที่ต่างกันกลับเป็นผลดีในการวิจัยและพัฒนา ค่า Emission Factor ในระดับ Tier 2 และ Tier 3 และเป็นแนวทางการศึกษามาตรการการลดผลกระทบการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในการเกษตร

Huang *et al.* (2010) พบว่า การใส่ปุ๋ยเคมีเพื่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และเพิ่มผลผลิตให้แก่ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยใส่ปุ๋ยเคมีลงในดิน ประสิทธิภาพของการนำปุ๋ยเคมีไปใช้ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มีเพียง 30% เนื่องจากปุ๋ยโดยส่วนใหญ่ที่ใส่ลงไปในดิน จะสูญหายไปเป็นสิ่งแวดล้อมทั้งในรูปการสูญเสียในรูปก๊าซออกสู่บรรยากาศ การชะละลาย ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จึงเป็นพืชเกษตรสำคัญของโลก ที่เป็นแหล่งสำคัญของการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ

Xiao-Kang Huet *et al.* (2013) ศึกษาการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากพื้นที่ปลูกข้าวสาลีและข้าวโพด ที่มีการให้ปุ๋ยเคมีไนโตรเจนในอัตราแตกต่างกัน คือ ไม่ใส่ปุ๋ยเคมี และใส่ปุ๋ยเคมีในอัตราแนะนำของเกษตรกร อัตรา $200 \text{ kg} - \text{N ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ การเก็บตัวอย่างก๊าซที่ปล่อยจากการเกษตรใช้วิธี Static Chamber Method และตรวจวัดค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ด้วยเทคนิค Gas Chromatography พบว่า การการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ยต่อปี มีค่า $691 \text{ g N}_2\text{Oe N ha}^{-1}$ โดย 69% เป็นการปล่อยออกมาในช่วงฤดูปลูกข้าวโพดเป็นหลัก การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ปลูกข้าวโพดที่ไม่ใส่ปุ๋ยเคมี และใส่ปุ๋ยเคมีอัตรา $200 \text{ kg} - \text{N ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ มีค่า 475 ± 151 และ $1,533 \pm 254 \text{ g N}_2\text{Oe N ha}^{-1}$ ตามลำดับ และการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ปลูกข้าวสาลีที่ไม่ใส่ปุ๋ยเคมี และใส่ปุ๋ยเคมีอัตรา $200 \text{ kg} - \text{N ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ มีค่า 216 ± 32 และ $628 \pm 73 \text{ g N}_2\text{Oe N ha}^{-1}$ ตามลำดับ

อภิชาติ (2555) ศึกษาการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ในพื้นที่ปลูกข้าวโพดพันธุ์สุวรรณ 4452 และผลของสารยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชัน โดยการทดลองแรก เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ในขั้นตอนการบ่มดิน โดยใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 ที่อัตรา 30 และ 50 กิโลกรัมต่อไร่ และบ่มดินที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 วัน พบว่า อัตราการใส่ปุ๋ยที่ 50 กิโลกรัมต่อไร่ ปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สูงกว่า อัตราการใส่ปุ๋ยที่ 30 กิโลกรัมต่อไร่ ปริมาณ 0.750 mg/kg ของดิน และ 0.469 mg/kg ของดิน ตามลำดับ โดยเฉพาะในช่วง 14 วันแรกของการบ่มดิน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณปุ๋ย เป็นการเพิ่มปริมาณแอมโมเนีย และไนเตรท ให้แก่ดิน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดก๊าซไนตรัสออกไซด์ ทั้งนี้ไม่พบว่าอุณหภูมิการบ่มดิน มีผลต่อการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การทดลองที่สองในระดับไร่นา ในพื้นที่สถานีวิจัยเขาคันทรง จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยใช้วิธีการเก็บก๊าซด้วยวิธี Close Chamber แล้ววิเคราะห์ปริมาณก๊าซไนตรัสออกไซด์ โดยใช้การตรวจวัดด้วยเทคนิค Gas Chromatography พบว่า รูปแบบการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์มีค่าสูงในช่วงใส่ปุ๋ย และลดลงตามระยะเวลาที่ปลูกข้าวโพด จนถึงช่วงเก็บเกี่ยว แปลงทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว มีอัตราการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินที่สูงกว่าแปลงทดลองที่ใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับสารยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชันและการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดินและความชื้นในดิน ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณน้ำ อากาศ และการเคลื่อนที่ของก๊าซในช่องว่างของเม็ดดิน

C. Liu *et al.* (2012) ศึกษาการปล่อยไนตรัสออกไซด์ จากการใส่ปุ๋ยเคมีไนโตรเจนปลูกข้าวสาลีและข้าวโพด ในระบบชลประทาน ทางภาคเหนือของจีน โดยใส่ปุ๋ยเคมีไนโตรเจนในรูปของยูเรียที่อัตรา 0, 135, 270, 430, 650 และ $850 \text{ kg} - \text{N ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ การคำนวณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการเก็บตัวอย่างก๊าซที่ปล่อยจากการเกษตรโดยวิธี Static Chamber Method พบว่า การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ การใส่ปุ๋ยที่อัตราสูงสุด $850 \text{ kg} - \text{N ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ ในพื้นที่ปลูกข้าวสาลีและข้าวโพด มีการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์มากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $25.6 \pm 3.2 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ และ $235.3 \pm 46.2 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ตามลำดับ การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ มีค่าสูงในช่วง 7 วันแรก ของการใส่ปุ๋ย และอัตราการใส่ปุ๋ยที่เหมาะสมแนะนำแก่เกษตรกรอยู่ที่อัตรา $270 \text{ kg} - \text{N ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ เมื่อคำนึงถึงค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์และปัจจัยการผลิตที่คุ้มค่าต่อต้นทุนการผลิต

Li Hu *et al.* (2013) ประเมินการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินทางการเกษตร จากการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในฤดูใบไม้ผลิ ซึ่งเป็นระบบการปลูกพืชหลักทั่วภูมิภาคการเกษตร ของประเทศจีน ในพื้นที่มณฑลเหอหนานในภาคตะวันออกเฉียงเหนือประเทศ ในปี ค.ศ. 2009 และ 2010 โดย

พบว่า การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ที่สำคัญ เกิดขึ้นในช่วงเวลา 3-5 วัน หลังจากการใส่ปุ๋ย ทั้งในปี ค.ศ. 2009 และ 2010 ซึ่งโดยเฉลี่ยคิดเป็นประมาณ 60% ของการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์รวมในแต่ละปี ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในการเกษตร คือ ปริมาณน้ำฝน และปริมาณปุ๋ยเคมีในโตรเจนที่ใส่ในพื้นที่ การศึกษาพบว่า การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ของพื้นที่ไม่ใส่ปุ๋ยเคมีและใส่ปุ๋ยเคมีตามการจัดการของเกษตรกร ในอัตราการใช้ปุ๋ย 270 kg – N ha⁻¹ ในปี ค.ศ. 2009 มีค่าเท่ากับ 23.1 และ 60.6 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ และในปี ค.ศ. 2010 มีค่าเท่ากับ 21.5 และ 64.3 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ตามลำดับ และค่าการปล่อย หรือ Emission Factor จากการใช้ปุ๋ยเคมีในโตรเจน ที่อัตรา 270 kg – N ha⁻¹ มีค่า 0.62% ในปี ค.ศ. 2009 และ 0.77% ในปี ค.ศ. 2010 ตามลำดับ

Y. Zhang *et al.* (2014) ศึกษาการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากพื้นที่การเกษตรปลูกข้าวสาลี และข้าวโพด ในช่วง 4 ปีต่อเนื่อง (ค.ศ. 2008-2012) ในพื้นที่ภาคเหนือของจีน เก็บตัวอย่างก๊าซที่ปล่อยจากดินการเกษตรโดยวิธี Static Chamber Method โดยควบคุมตัวแปรโดยการใส่ปุ๋ยเคมีและไม่ใส่ปุ๋ยเคมี พบว่า การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ยของพื้นที่ไม่ใส่ปุ๋ยเคมีและใส่ปุ๋ยเคมี ในปี ค.ศ. 2008-2009 มีค่า $1.5 \pm 0.2 \text{ kg N ha}^{-1}$ และ $9.4 \pm 1.7 \text{ kg N ha}^{-1}$ ในปี 2009-2010 มีค่า $2.0 \pm 0.01 \text{ kg N ha}^{-1}$ และ $4.0 \pm 0.03 \text{ kg N ha}^{-1}$ ในปี 2010-2011 มีค่า $1.3 \pm 0.02 \text{ kg N ha}^{-1}$ และ $5.0 \pm 0.3 \text{ kg N ha}^{-1}$ และในปี 2011-2012 มีค่า $2.7 \pm 0.6 \text{ kg N ha}^{-1}$ และ $12.5 \pm 0.1 \text{ kg N ha}^{-1}$ ตามลำดับ และค่า Annual direct emission factors (EFd 's) ของพื้นที่ใส่ปุ๋ยเคมีในปีที่สอดคล้องกันมีค่า $2.4 \pm 0.5\%$, $0.60 \pm 0.01\%$, $1.1 \pm 0.09\%$ และ $2.9 \pm 0.2\%$ ตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญกับการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้ศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินจากการใช้ปุ๋ยเคมี เพื่อปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ การศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ขอบเขตการวิจัยส่วนที่ 1 การประมาณค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการจัดการปลูกข้าวโพด ค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีส่วนใหญ่ใช้ค่าอ้างอิงของ IPCC จากการตรวจเอกสารเบื้องต้น พบว่าปัจจุบันประเทศไทยใช้ฐานข้อมูลค่าการปล่อยเพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ดังนี้ National Metal and Materials Technology Center (MTEC), Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), (TGO) และงานวิจัยที่มีรายงานในประเทศ รวมทั้งงานวิจัยที่อยู่ในภูมิภาคเขตร้อน เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาส่วนนี้เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการจัดการปลูกข้าวโพด โดยใช้ค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีจากฐานข้อมูลดังกล่าวเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการปล่อยที่ได้จากการศึกษาในขอบเขตการวิจัยส่วนที่ 2

ขอบเขตการวิจัยส่วนที่ 2 ศึกษาค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีในแปลงทดลอง โดยใช้วิธี static chamber method การวิจัยทำการศึกษาทั้งในแปลงทดลอง (ตรวจวัดก๊าซไนตรัสออกไซด์ที่ปล่อยจากดิน และการระเหยของ ammonia volatilization) ที่มีการจัดการใส่ปุ๋ยเคมีที่มีชนิดปุ๋ยแตกต่างกันอ้างอิงจากการอัตราการใช้ปุ๋ยเคมีจากกรมวิชาการเกษตรและอ้างอิงการใช้ปุ๋ยเคมีจากเกษตรกร ทำการทดลอง 3 รอบเพาะปลูกเพื่อให้ครอบคลุมฤดูกาลด้วยการจัดการน้ำที่ใช้ในแปลงแบบใช้น้ำฝน (rain fed) นอกจากนี้วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน และคุณสมบัติของพืช ส่วนการศึกษาในห้องปฏิบัติการ วิเคราะห์ตัวอย่างดินและพืช รวมทั้งศึกษาเพื่อเสริมความเข้าใจกระบวนการ nitrification และ denitrification จากการใช้ปุ๋ยเคมี

เมื่อทำการทดลองแล้วเสร็จ ประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์โดยเปรียบเทียบจากการใช้ค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมี จาก IPCC และจากการศึกษาวิจัย

3.2 สถานที่วิจัย

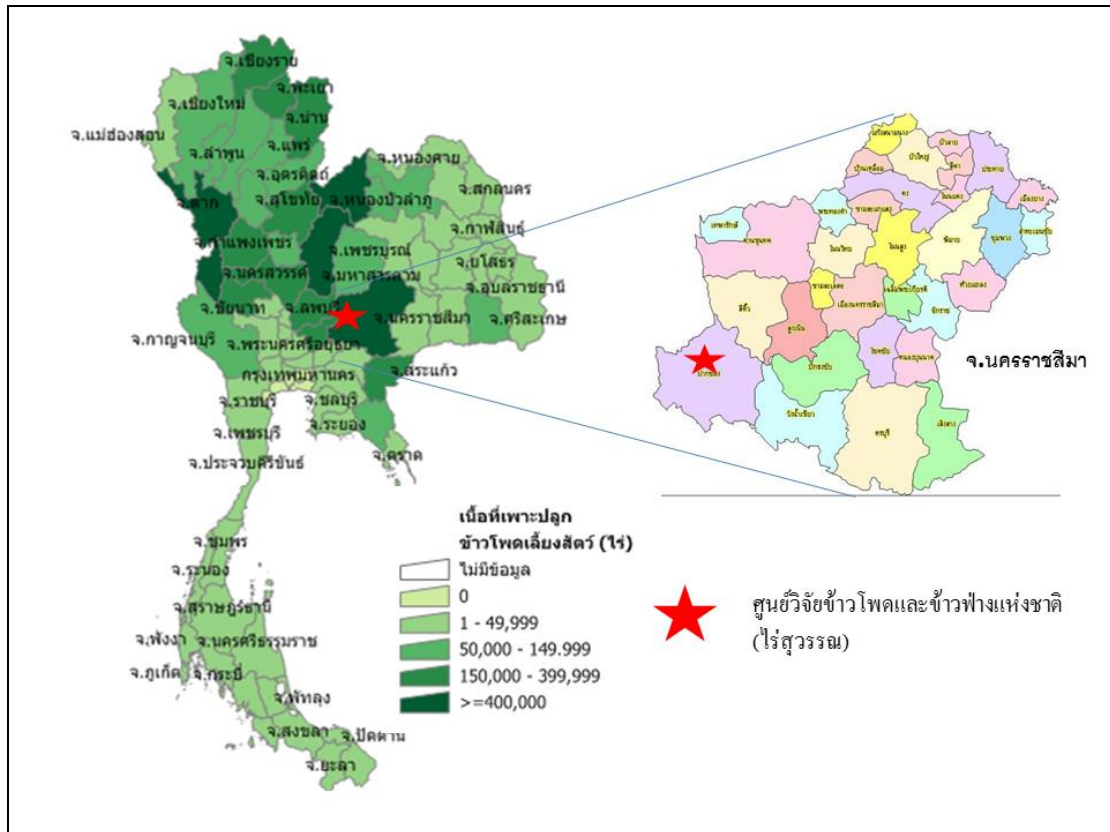
การดำเนินการวิจัย ณ ศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ (ไร่สุวรรณ) (รหัสแปลงที่ทำการวิจัย คือ รหัส E7) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บ้านปางอโศก ตำบลกลางดง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา อยู่ในแนวเส้นรุ้งที่ 14.5 องศาเหนือ เส้นแวงที่ 101 องศาตะวันออก สูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 360 เมตร พื้นที่มีลักษณะเป็นลูกคลื่นลอนลาดเล็กน้อยถึงลูกคลื่นลอนลาด มีความลาดชัน 2-8 % ลักษณะดินในพื้นที่เป็นชุดดินปากช่อง ลักษณะและสมบัติดิน เป็นดินลึกมาก ดินบนเป็นดินเหนียวหรือดินเหนียวปนทรายแป้ง สีน้ำตาลปนแดงเข้ม ดินล่างเป็นดินเหนียว สีน้ำตาลปนแดงเข้มและสีแดง ปฏิกริยาดินเป็นกรดปานกลางถึงเป็นกลาง (pH 6.0-7.0) ในดินบน และเป็นกรดจัดมากถึงเป็นกรดจัด (pH 4.5-5.5) ในดินล่าง ดินระบายน้ำได้ดี การไหลบ่าของน้ำบนผิวดินปานกลาง การซึมผ่านได้ของน้ำปานกลาง มีธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในระดับต่ำ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2535)

พันธุ์ข้าวโพดที่ใช้ทำการทดลอง ได้แก่ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลูกผสมเดี่ยวพันธุ์สุวรรณ 4452 เป็นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูง ทนทานต่อโรคและแมลง เกษตรกรนิยมใช้ ซึ่งเป็นพันธุ์ที่ได้รับรางวัลชนะเลิศการประกวดผลงานนวัตกรรมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ. 2556 สาขาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี ประเภทบุคลากรซีเนียร์และรางวัล สุดยอดนวัตกรรมประเภทบุคลากร จากการวิจัยและพัฒนาของ ดร.โชคชัย เอกทัศนารรณ และคณะนักวิชาการเกษตรเชี่ยวชาญพิเศษ ศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ สถาบันอินทรีจันทร์สถิตย์เพื่อการค้นคว้าและพัฒนาพืชศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยผลงานวิจัยนี้ได้พัฒนาต่อยอดมาจากข้าวโพดลูกผสมเดี่ยวพันธุ์สุวรรณ 3853 (Ki 47 × Ki 45) โดยนำสายพันธุ์แท้เกษตรศาสตร์ 47 (Ki 47) ซึ่งเป็นสายพันธุ์แม่ของพันธุ์สุวรรณ 3853 มาผสมกับสายพันธุ์แท้เกษตรศาสตร์ 48 (Ki 48) สร้างเป็นพันธุ์สุวรรณ 4452 โดยพันธุ์สุวรรณ 4452 เป็น พันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงและปรับตัวได้ดีในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ จากการทดสอบพันธุ์ในแหล่งปลูกข้าวโพดต่างๆ ในช่วง 4 ปี (พ.ศ. 2543 – 2546) พบว่า พันธุ์สุวรรณ 4452 ให้ผลผลิตเฉลี่ย 1,151 – 1,430 กก.ต่อไร่ สูงกว่าพันธุ์สุวรรณ 3851 (21.7%) ลูกผสมเดี่ยวพันธุ์ CP-DK 888 (27.4%) ลูกผสมเดี่ยวพันธุ์นครสวรรค์ 72 (23.8%) และพันธุ์สุวรรณ 1 (รอบคัดเลือกที่ 11, 12, 13) (38.4%) โดยพันธุ์สุวรรณ 4452 มีลักษณะทางการเกษตรส่วนใหญ่ดีกว่าพันธุ์เปรียบเทียบ คือ มีอายุวันสลัดละอองเกสร 50% 54 วัน วันออกไหม 50% 54 วัน ความสูงต้น 217 ซม. ความสูงฝัก 130 ซม. ต้านทานโรคราน้ำค้าง และโรคราสนิม มีเปอร์เซ็นต์กะเทาะเมล็ด 81.9% มีเมล็ดสีส้มเหลืองหัวแข็ง สามารถปลูกได้ในต้นฤดูฝนและปลายฤดูฝน สำหรับศักยภาพเชิงพาณิชย์ พันธุ์สุวรรณ 4452 เป็นพันธุ์ Non – GMO ทำให้ผลของผลิตภัณฑ์สัตว์และอาหารสัตว์ที่ใช้เมล็ดพันธุ์สุวรรณ 4452 ปลอดภัยจาก GMO และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคทั่วไป โดยศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้ส่งเสริมและเผยแพร่เมล็ดพันธุ์สุวรรณ 4452 สู่ภาครัฐและเอกชน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ถึงปัจจุบัน สำหรับราคาจำหน่ายเมล็ดพันธุ์สุวรรณ 4452 อยู่ที่ราคากิโลกรัมละ 90 บาท ซึ่งถูกกว่าเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดที่จำหน่ายในตลาดเมล็ดพันธุ์ราคากิโลกรัมละ 120 – 180 บาท ซึ่งถูกกว่าถึงร้อยละ 20 – 100 เป็นการช่วยประหยัดต้นทุนการผลิตให้เกษตรกรได้ถึง 75 – 225 บาทต่อไร่ (โชคชัย, 2556)

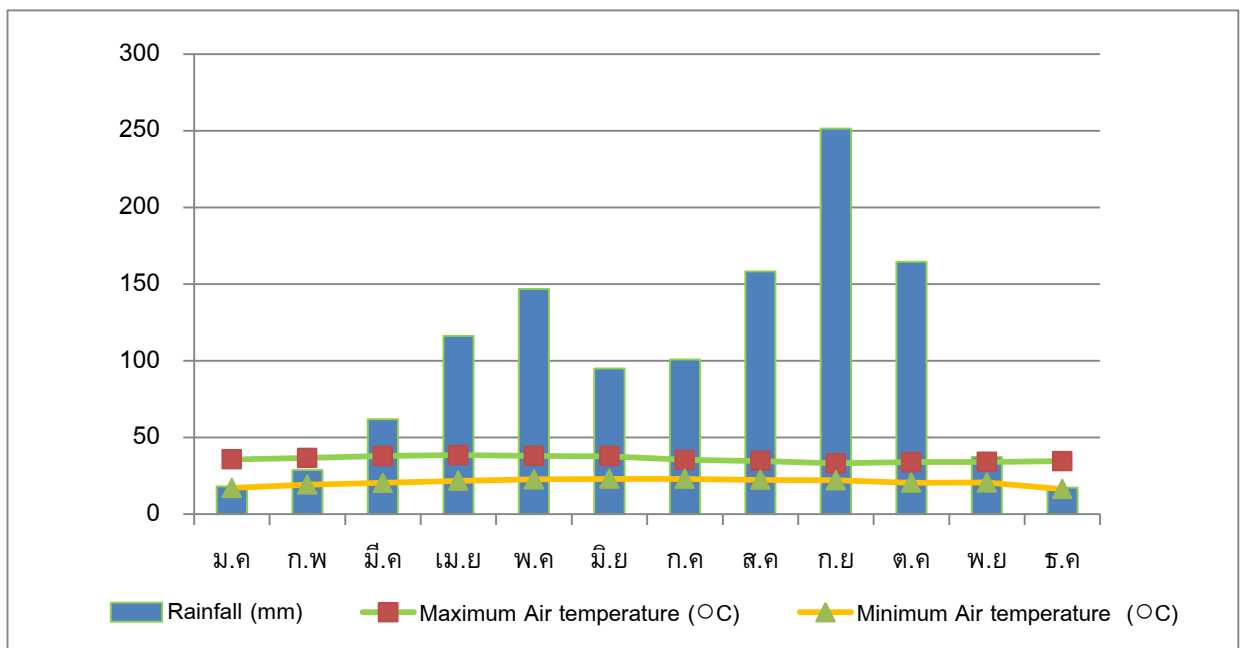
ฤดูกาลสำหรับการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย ฤดูปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่เหมาะสม ได้แก่

- ต้นฤดูฝน เริ่มตั้งแต่ปลายเดือนมีนาคม-ต้นเดือนมิถุนายน ตามสภาพฝนของแต่ละพื้นที่
- ปลายฤดูฝน เริ่มตั้งแต่กลางเดือนกรกฎาคม-กลางเดือนสิงหาคม
- ฤดูแล้ง เริ่มตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน-เดือนกุมภาพันธ์

แสดงเนื้อที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ปี 2552 และที่ตั้งของแปลงทดลอง ณ ศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ (รูปที่ 3.1) และข้อมูลอุณหภูมิมหาวิทยาลัยเกษตรปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ปี 2548-2558 (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.1 แสดงเนื้อที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ปี 2552 และแปลงทดลอง ณ ศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2557)



รูปที่ 3.2 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา สถานีเกษตรปากช่อง จังหวัดนครราชสีมาปี 2548-2558

3.3 การศึกษาในแปลงทดลอง

3.3.1 การออกแบบการทดลอง

3.3.1.1 การออกแบบการทดลองและระยะเวลาการเก็บข้อมูล

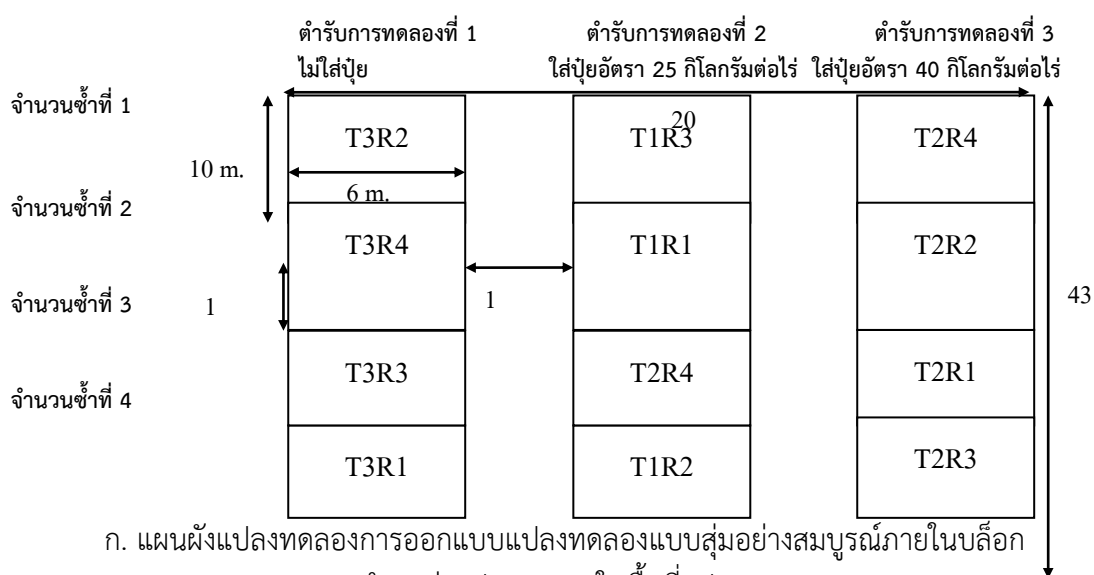
ในการศึกษาวิจัยการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในการเกษตรเพื่อปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ออกแบบแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Block Design: CRBD) โดยวางแผนดำรับทดลอง (Treatment; T) เป็น 3 ดำรับทดลอง และ 4 ซ้ำ (Replication; R) ของแต่ละดำรับทดลอง ในแปลงทดลองขนาด 6x10 เมตร จำนวน 12 แปลง (รูปที่ 3.3) ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลูกผสมเดี่ยวพันธุ์สุวรรณ 4452 (คุณสมบัติ ให้ผลผลิตสูง คุณภาพดี) โดยวิธีการเตรียมแปลง วิธีการปลูกและการจัดการของศูนย์วิจัยข้าวโพดละข้าวพ่างแห่งชาติ ซึ่งเป็นวิธีการที่กรมวิชาการเกษตรแนะนำให้เกษตรกรใช้โดยทั่วไป การศึกษาตัวแปร จำนวน 1 ตัวแปร ได้แก่ อัตราการใส่ปุ๋ย การทดลองประกอบด้วยดำรับทดลอง (Treatment) 3 ดำรับการทดลอง ได้แก่

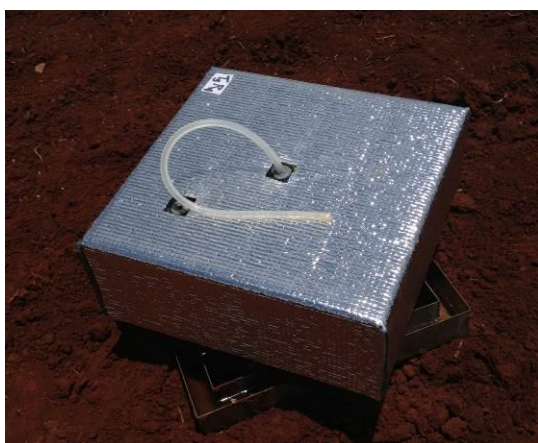
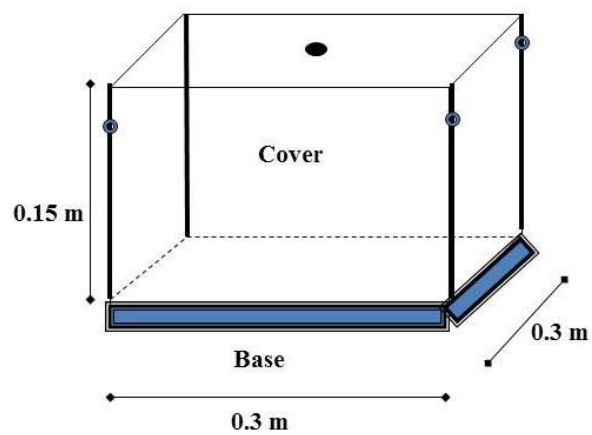
1. ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (Treatment 1; T1)
2. ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (Treatment 2; T2)
3. ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (Treatment 3; T3)

การใส่ปุ๋ยใช้ปุ๋ย 2 สูตร ได้แก่ ปุ๋ยสูตร 16-20-0 ใส่ในครั้งที่ 1 โดยใส่รองกันหลุมขณะหยอดเมล็ดพันธุ์ และใส่ปุ๋ยสูตร 46-0-0 ใส่ในครั้งที่ 2 โดยโรยรอบต้นกล้า 15-20 วัน หลังจากการหยอดเมล็ดพันธุ์

ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) คิดเป็นเฉพาะปริมาณการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 4 kg N/ไร่ หรือ 25 kg N/ha (ครั้งที่ 1) และอัตรา 11.5 kg N/ไร่ หรือ 71.875 kg N/ha (ครั้งที่ 2) รวมอัตราการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนทั้งหมดตลอดการเพาะปลูกของดำรับการทดลองที่ 2 เท่ากับ 15.5 kg N/ไร่ หรือ 96.875 kg N/ha หรือประมาณ 97 kg N/ha

ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3) คิดเป็นเฉพาะปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 6.4 kg N/ไร่ หรือ 40 kg N/ha (ครั้งที่ 1) และอัตรา 18.4 kg N/ไร่ หรือ 115 kg N/ha (ครั้งที่ 2) รวมอัตราการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนทั้งหมดตลอดการเพาะปลูกของดำรับการทดลองที่ 3 เท่ากับ 24.8 kg N/ไร่ หรือ 155 kg N/ha





Cover



Base

ข. Static chamber and a flux measurement setting



ค. แปลงทดลอง

รูปที่ 3.3 แปลงทดลองและอุปกรณ์เก็บตัวอย่าง N_2O Flux

3.3.1.2 ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล และ Crop calendar

จำนวนการทดลองแบ่งเป็น 3 ฤดูกาลเพาะปลูก ดังนี้

1. ฤดูกาลที่ 1 ทำแปลงทดลอง วันที่ 18 กรกฎาคม ถึง วันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ.2557
2. ฤดูกาลที่ 2 ทำแปลงทดลอง วันที่ 2 กุมภาพันธ์ ถึง วันที่ 25 เมษายน พ.ศ. 2558
3. ฤดูกาลที่ 3 ทำแปลงทดลอง วันที่ 23 กรกฎาคม ถึง วันที่ 21 พฤศจิกายน พ.ศ. 2558

ตารางที่ 3.1 Crop calendar for Maize plantation in 2014-2015

2014							2015													
June	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sep	Oct	Nov			
←→		←				↔		←→		←→				↔		←→			←→	
♣	Planting				●	♣	Planting				●	♣	Planting				●			
	▲	■						▲	■				▲	■						
Crop 1							Crop 2					Crop 3								

- ♣ Land Preparation
- Harvest
- ▲ First Fertilizer Application
- Second Fertilizer Application

3.3.2 การเตรียมแปลงทดลองและวิธีการปลูก

การเตรียมแปลงทดลองและการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ใช้วิธีการเตรียมแปลงและวิธีการปลูก ดังนี้

3.3.2.1 การเตรียมแปลง

เริ่มไถด้วยพาสสาม 1 ครั้ง ความลึก 20-30 เซนติเมตร เพื่อไถบดเปิดพลิกหน้าดิน ทำให้ดินชั้นล่างได้ขึ้นมาสัมผัสอากาศ ตากดิน 7-10 วัน เพื่อทำลายวัชพืช ขั้นตอนต่อมาไถพรวนด้วยพาสเจ็ด 1 ครั้ง เพื่อพรวนดินและย่อยดินให้มีขนาดเล็กและปรับดินให้สม่ำเสมอ แล้วจึงคราดเก็บเศษซากวัชพืชออกจากแปลง

3.3.2.2 การปลูก

ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ด้วยเครื่องจักรกลการเกษตร โดยใช้รถแทรกเตอร์ลากจูงเครื่องจักรกลสำหรับการปลูก โดยมีระยะการปลูกระหว่างแถว 75 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างหลุม 20 เซนติเมตร หยอดเมล็ดพันธุ์จำนวน 1 ต้นต่อหลุม อัตราการปลูก 10,667 ต้นต่อไร่ ให้น้ำด้วยระบบให้น้ำแบบฝนเทียม (Sprinkler irrigation) ภายหลังการให้น้ำ 1 วัน จะฉีดยาคุมวัชพืช



(ก) ลักษณะลำต้นและใบ



(ข) ลักษณะช่อดอกเพศผู้ (Tassel)



(ค) ลักษณะดอกเพศเมียหรือฝักข้าวโพด (Ear)



(ง) ลักษณะฝักข้าวโพดและเมล็ด

รูปที่ 3.4 ลักษณะบางประการของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลูกผสมเดี่ยวพันธุ์สุวรรณ 4452

3.3.3 การศึกษาการแลกเปลี่ยนก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O flux) ในแปลงเกษตร

การศึกษาการแลกเปลี่ยนก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในแปลงข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ วางแผน ดำเนินการทดลอง (Treatment) เป็น 3 ดำเนินการทดลอง และ 4 ซ้ำ (Replication) ของแต่ละดำเนินการทดลอง ดำเนินการทดลองที่ 1 คือ ดำเนินการควบคุม (Treatment 1; T1) ดำเนินการทดลองที่ 2 (Treatment 2; T2) คือ การใส่ปุ๋ยเคมีชนิดและปริมาณอ้างอิงจากกรมวิชาการเกษตร และดำเนินการทดลองที่ 3 (Treatment 3; T3) การใส่ปุ๋ยเคมีชนิดและปริมาณอ้างอิงการจัดการของเกษตรกร และทำการทดลองเป็น 3 รอบ ฤดูกาลเพาะปลูก เพื่อให้ครอบคลุมฤดูกาลเพาะปลูกทั้งในฤดูฝนและฤดูแล้ง พันธุ์ข้าวโพด คือ พันธุ์ สุวรรณ 4452 ส่วนพื้นที่ที่ศึกษา คือ แปลงทดลองศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ (ไร่สุวรรณ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีลักษณะดินที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

3.3.3.1 *In situ* gases flux measurements

(a) Gas sampling

การศึกษาการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในการเกษตร ตรวจวัดโดยใช้ static chamber method ซึ่ง chamber ประกอบด้วยสองส่วน ส่วน cover ทำด้วย acrylic สีดำ ขนาด กว้าง × ยาว × สูง (30 × 30 × 15 cm.) และฐานทำด้วย stainless steel ขนาด กว้าง × ยาว × สูง (30 × 30 × 15 cm.) ส่วนของฐาน chamber จะติดตั้งถาวรในแปลงทดลอง เมื่อจะทำการตรวจวัด N_2O gases ส่วนของ cover วางไว้ด้านบนของฐาน และใช้น้ำในการกั้นไม่ให้มีการแลกเปลี่ยนอากาศ ระหว่างในและนอก chamber หลังจากปิด chamber จะเก็บตัวอย่างก๊าซที่ความจุ 25 ml-syringes

ที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 นาที ไว้ในขวด vial จากนั้นนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซไนตรัสออกไซด์ในห้องปฏิบัติการ

เมื่อเก็บตัวอย่างก๊าซ จะเก็บข้อมูลความชื้นของดิน อุณหภูมิดิน การจัดการการเพาะปลูก เช่น ชนิด อัตราและเวลาใส่ปุ๋ย การเจริญเติบโตของพืช ผลผลิต และคุณสมบัติของดิน

ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างก๊าซไนตรัสออกไซด์ต่อการเพาะปลูก มีดังนี้ ก่อนและหลังปลูก ช่วงที่ใส่ปุ๋ย 2 ช่วง เป็นเวลา 5 วันต่อเนื่องในช่วงที่ใส่ปุ๋ย นอกจากนี้เก็บตัวอย่างทุกสัปดาห์ตั้งแต่ปลูก จนกระทั่งเก็บเกี่ยวผลผลิต หนึ่งรอบการเพาะปลูกใช้เวลาประมาณ 100-120 วัน

(b) Determination of N_2O concentrations and calculation of N_2O emission rate

ความเข้มข้นของไนตรัสออกไซด์ (N_2O concentrations) วิเคราะห์ด้วย GC with electron capture detector (ECD) และคำนวณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ที่ตรวจวัดได้ใน chamber แสดงการคำนวณในสมการที่ 3.1

$$F = p (V/A) dc/dt \quad (3.1)$$

เมื่อ

P is the density of N_2O at pressure and temperature inside the chamber

V is the headspace volume of the chamber

A is the area of surface that cover by the chamber

dC/dt is the increase of N_2O concentration inside the chamber as a function of time

ค่า dC/dt ใช้สมการถดถอยเชิงเส้นตรง (linear regression) วิเคราะห์ N_2O concentration ภายในเวลา 30 นาที (Peng et al., 2011)

3.3.3.2 การศึกษาการสูญเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการ Ammonia volatilization

การศึกษาการสูญเสียแอมโมเนีย (Ammonia volatilization) จากการใช้ปุ๋ยเคมีที่มีต่อการทดลองเช่นเดียวกับการตรวจวัดก๊าซ N_2O จากแปลงทดลอง โดยใช้วิธี trap volatilized ammonia ด้วยกรดบอริก (Boric Acid) และนำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาค่า ammonia volatilization ในห้องปฏิบัติการ



ก. อุปกรณ์

(PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้วและความสูง 20 cm.)



ข. ตัวอย่างการทดลอง

รูปที่ 3.5 แปลงทดลองและอุปกรณ์ศึกษา Ammonia volatilization

รายละเอียดการศึกษา Ammonia volatilization losses ด้วยวิธี Force draft technique (Fenn and Kissel, 1973) มีดังนี้

1. ปริมาณ Boric acid (2%) 100 ml + Mixed Indicator (ประกอบด้วย Bromocresol green และ methyl red) ใส่ในขวดชมพูขนาด 250 ml
2. ปิดด้วย PVC ซึ่งภายใน PVC ใส่ปุ๋ยในอัตราตามการทดลอง และทำชุดควบคุม (T1) ด้วย 1 ชุด โดยไม่ต้องปิดด้วย PVC
3. ปิดฝา PVC ทิ้งไว้ประมาณ 2-3 ชั่วโมง
4. นำขวดรูปชมพูออกจาก PVC และปิดฝาเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากอากาศภายนอกก่อนนำไป titrated ด้วย Hydrochloric acid (HCl) 0.1 N
5. บันทึกปริมาณ Hydrochloric acid (HCl) ที่ใช้
6. บันทึกข้อมูลความชื้นของดินและปริมาตรของ PVC ในแต่ละชุดทดลอง

วิธีการคำนวณปริมาณการสูญเสียแอมโมเนีย คำนวณการการสูญเสียแอมโมเนีย แสดงการคำนวณในสมการที่ 3.2

$$Y = a + b \ln x \quad (3.2)$$

เมื่อ Y = ammonia volatilization loss (%)

a = intercept (%)

b = slope (%/day)

x = time (day)

อัตราการสูญเสียแอมโมเนียเริ่มต้นมีค่าสูงและจะมีค่าลดลงตามเวลา slope จะมีค่าระหว่าง 6.6 และ 23.9% วันซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของดิน

3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของดินและพืช (Soil property and plant analysis)

วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของดิน ได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิ ความหนาแน่นของดิน เนื้อดิน คุณสมบัติทางเคมีของดิน ได้แก่ Inorganic nitrogen compounds (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) อินทรีย์วัตถุ และค่าความเป็นกรดต่างของดิน (ตารางที่ 3.2)

วิเคราะห์คุณสมบัติของพืช ได้แก่ การเจริญเติบโตของพืช ปริมาณคาร์บอน ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณผลผลิต และปริมาณชีวมวล (ตารางที่ 3.2)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของดินและพืช

คุณสมบัติ	ลักษณะคุณสมบัติ	วิธีการวิเคราะห์
สมบัติทางกายภาพ ของดิน	- ความชื้น - อุณหภูมิดิน - ความหนาแน่นของดิน - เนื้อดิน	- Topp, G.C 1993 - Thermometer (Peech, 1965) - Core method (Black, 1965) - Hydrometer
สมบัติทางเคมีของดิน	- Inorganic nitrogen compounds - NO_2^- - NO_3^- - NH_4^+ - อินทรีย์วัตถุ (Organic matter) - ปริมาณคาร์บอนในดิน - ไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) - ค่าปฏิกิริยาของดิน (pH)	- Colorimetric method (Promega, 2009) - Colorimetric method (Mulvancy, 1996) - Colorimetric method (Mulvancy, 1996) - Titration (Walkley and Black, 1947). - Walkley and Black (1947) - Kjeldahl method (Bremner, 1965) - Soil: Water (1:1), Peech (1965)
สมบัติของพืช	- การเจริญเติบโตของพืช - ปริมาณคาร์บอน - ปริมาณไนโตรเจน - ปริมาณผลผลิต - ปริมาณชีวมวล	- วัดการเจริญเติบโตตลอดฤดูกาล (ความสูง, จำนวนใบ, น้ำหนักแห้ง) - AOAC, 1990 - Kjeldahl method (Bremner, 1965) - Dry weight - Dry weight

3.5 การประมาณค่าการปล่อย (Estimate of emission factor)

เมื่อทำการทดลองในแปลงเกษตรและการทดลองในห้องปฏิบัติการเสร็จสิ้นแล้ว สรุปและวิเคราะห์ค่าปล่อยของ N_2O ซึ่งจะคาดการณ์จาก $\text{N}_2\text{O-N/N}$ input การวิเคราะห์และสรุปผลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการการเพาะปลูก

3.6 การศึกษาในห้องปฏิบัติการ

3.6.1 Pathways and rates of N_2O production study

การศึกษา pathways and rates of N_2O production ในดินที่ใช้ปลูกข้าวโพด มีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเข้าใจวัฏจักรไนโตรเจนในดินเกษตรในภูมิภาคเขตร้อน มีสองกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการปล่อย N_2O ที่ต้องทำความเข้าใจ คือ กระบวนการ nitrification และ denitrification ซึ่งใช้การศึกษาแบบ incubation method ในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาด้วยปัจจัยหรือทำนายบทบาทของ nitrification and denitrification จากกระบวนการสร้าง N_2O production ในดิน

การศึกษาใช้ acetylene (C_2H_2) เพื่อศึกษาศักยภาพของการผลิต N_2O ในห้องปฏิบัติการ โดยการใช้ชนิดปุ๋ยและอัตราการใส่ปุ๋ยแบบเดียวกับการศึกษาการปล่อย N_2O จากแปลงเกษตร โดยนำ

ตัวอย่างดินมาทำการบ่มด้วยสภาวะการทดลองแสดงในตารางที่ 3.3 ทฤษฎีที่ศึกษานี้ช่วยให้เข้าใจกระบวนการ nitrification และ denitrification หลักการของ acetylene (C_2H_2) ที่เลือกใช้สำหรับการทดลองนี้ acetylene จะเป็นตัวยับยั้งกระบวนการ nitrification ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการ denitrification ในการทดลองมีการใช้ค่า water holding capacity ที่แตกต่างกันเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับกระบวนการ nitrification และ denitrification (ตารางที่ 3.3)

ตารางที่ 3.3 Soil incubation conditions for N_2O production pathway study

Parameter	Details
Soil type	Tropical agriculture soil (Maize)
Soil sample	15 g of sieve soil through 2 mm mesh size
Bottle volume	120 ml
Moisture	30% WHC and 60% WHC
Incubation time (before gas sampling) - 30 % WHC (Water holding capacity) - 60 % WHC	1 days 6 hrs
Interval gas sampling time - 30 % WHC - 60 % WHC	Every day Every 2 hrs
Volume of gas sampling	0.1-1 ml

การศึกษา pathways of N_2O production ในดิน (ตากดินและร่อนดินผ่านตะแกรงที่ขนาด 2 mm mesh size) นำตัวอย่างดิน 15 g ใส่ขวดขนาด 120 ml กำหนดความชื้นที่ 30% และ 60% WHC (water holding capacity) และ ความเข้มข้น acetylene (C_2H_2) ที่ 10Pa บ่มตัวอย่างเป็นเวลา 1 วัน (30% WHC) และ 6 ชั่วโมง (60% WHC) ภายใต้สภาวะนี้จะเกิดแต่กระบวนการ denitrification ที่ผลิต N_2O ส่วนดินที่ใช้เป็นตำรับควบคุม (without addition of C_2H_2) N_2O จะสร้างทั้งกระบวนการ nitrification และ denitrification เมื่อหักลบส่วนของ denitrification จากกระบวนการ N_2O production ในดินตำรับควบคุมจะทำให้ทราบ nitrification ได้

ในการ incubation หรือบ่มตัวอย่างดินที่อุณหภูมิ 25 $^{\circ}C$ เก็บตัวอย่างก๊าซและตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซไนโตรสออกไซด์ด้วยเครื่อง GC (ECD detector) ค่าความเข้มข้นของ nitrate และ nitrite ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Colorimetric method ส่วน Ammonium จะสกัดด้วย 1 M KCL ส่วนความเข้มข้นวิเคราะห์ด้วย Colorimeter method ที่ absorbance 670 nm.

อัตราการผลิต N_2O ประเมินด้วยความเข้มข้นของ N_2O ต่อเวลา และอัตราการเกิด nitrification และ denitrification ประเมินด้วย NH_4^+ หรือ NO_3^- ที่สะสมภายใต้สภาวะ inhibitor ซึ่งผลการศึกษาทำให้เสริมความเข้าใจกระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนในดินที่ทำการปลูกข้าวโพดมากขึ้น



รูปที่ 3.6 การศึกษา Pathways and rates of N_2O production study

3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ระหว่างกรรมวิธีการทดลอง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-way analysis of variances: ANOVA)

บทที่ 4

ผลการศึกษาในรอบการเพาะปลูกที่ 1-3

การศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีในการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และการศึกษาทำความเข้าใจกระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนในดินเกษตรในรูปของอัตรา nitrification denitrification และการสูญเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการ ammonia volatilization ผลการศึกษามีดังนี้

ส่วนที่ 1 เพื่อศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมีรอบการเพาะปลูกที่ 1 ถึง 3

4.1 คุณสมบัติของดินและพืช

4.1.1 คุณสมบัติของดินก่อนทำการศึกษา

ลักษณะดินในพื้นที่ศึกษาเป็นชุดดินปากช่อง ลักษณะและสมบัติของดิน เป็นดินลี้กมาก ดินบนเป็นดินเหนียวหรือดินเหนียวปนทรายแป้ง สีน้ำตาลปนแดงเข้ม ดินล่างเป็นดินเหนียว สีน้ำตาลปนแดงเข้มและสีแดง เนื้อดินเป็นดินร่วนปนทรายแป้ง (Silty loam) ในดินบน (ที่ระดับความลึก 0-30 ซม.) ปฏิกริยาดินเป็นกรดปานกลางถึงเป็นกลาง (pH 5.92 - 6.31) ดินมีการระบายน้ำได้ดี การไหลบ่าของน้ำบนผิวดินปานกลาง การซึมผ่านได้ของน้ำปานกลาง มีอินทรีย์วัตถุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในระดับปานกลางถึงสูง มีปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมในระดับปานกลาง (ตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของดินก่อนทำการศึกษา

Treatment	Soil Texture				pH	Organic matter		Phosphorus		Potassium		Calcium		Magnesium	
	%Sand	%Silt	%Clay	Texture	(1:1)	%	rate	(mg/kg)	rate	(mg/kg)	rate	(mg/kg)	rate	(mg/kg)	rate
T1R1	27	54	19	Silt loam	6.17	4.21	H	243.19	VH	173.20	VH	1,534	M	119.50	M
T1R2	24	56	20	Silt loam	6.26	3.58	H	273.78	VH	61.15	M	1,622	M	128.60	M
T1R3	22	58	20	Silt loam	6.01	2.20	M	206.33	VH	91.53	H	1628	M	124.70	M
T1R4	25	55	20	Silt loam	6.30	5.15	VH	281.18	VH	88.88	M	1776	M	131.90	M
T2R1	27	54	19	Silt loam	6.10	4.39	H	257.51	VH	199.90	VH	1462	M	119.90	M
T2R2	25	55	20	Silt loam	6.06	4.29	H	207.28	VH	96.82	H	1594	M	138.20	M
T2R3	23	57	20	Silt loam	6.03	3.58	H	162.69	VH	74.86	M	1632	M	130.80	M
T2R4	25	55	20	Silt loam	6.16	3.78	H	286.31	VH	84.29	M	1600	M	124.60	M
T3R1	23	56	21	Silt loam	6.05	2.97	MH	311.20	VH	152.90	VH	1569	M	126.90	M
T3R2	27	54	19	Silt loam	6.1	3.68	H	176.10	VH	45.69	L	1573	M	122.70	M
T3R3	25	56	19	Silt loam	5.92	4.56	VH	266.00	VH	111.30	H	1566	M	147.70	M
T3R4	32	51	17	Silt loam	6.31	3.37	MH	259.31	VH	101.0	H	1608	M	123.30	M

Rate: VL=Very Low, L= Low, ML= Moderately Low, M= Medium, MH=Moderately High, H=High, VH=Very High

4.1.2 คุณสมบัติของดินในรอบการเพาะปลูกทั้ง 3 รอบ

4.1.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดิน

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของดิน ความหนาแน่นของดิน (Bulk density)

Treatment	1 st Crop		2 nd Crop		3 rd Crop	
	Bulk Density (Mean)	Bulk Density (S.D.)	Bulk Density (Mean)	Bulk Density (S.D.)	Bulk Density (Mean)	Bulk Density (S.D.)
T1R1	1.13	0.08	1.20	0.11	1.12	0.18
T1R2	1.17	0.05	1.25	0.13	1.19	0.22
T1R3	1.14	0.06	1.24	0.18	1.07	0.18
T1R4	1.22	0.09	1.22	0.14	1.08	0.13
T2R1	1.11	0.09	1.25	0.17	1.12	0.18
T2R2	1.17	0.11	1.25	0.15	1.19	0.22
T2R3	1.28	0.17	1.22	0.15	1.07	0.18
T2R4	1.16	0.16	1.26	0.20	1.08	0.13
T3R1	1.11	0.09	1.27	0.13	1.11	0.15
T3R2	1.17	0.11	1.28	0.14	1.13	0.19
T3R3	1.28	0.17	1.22	0.16	1.04	0.14
T3R4	1.16	0.16	1.32	0.12	1.13	0.13

4.1.2.2 คุณสมบัติทางเคมีของดิน

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของดินทางเคมี (pH, Organic matter, organic C, Total N)

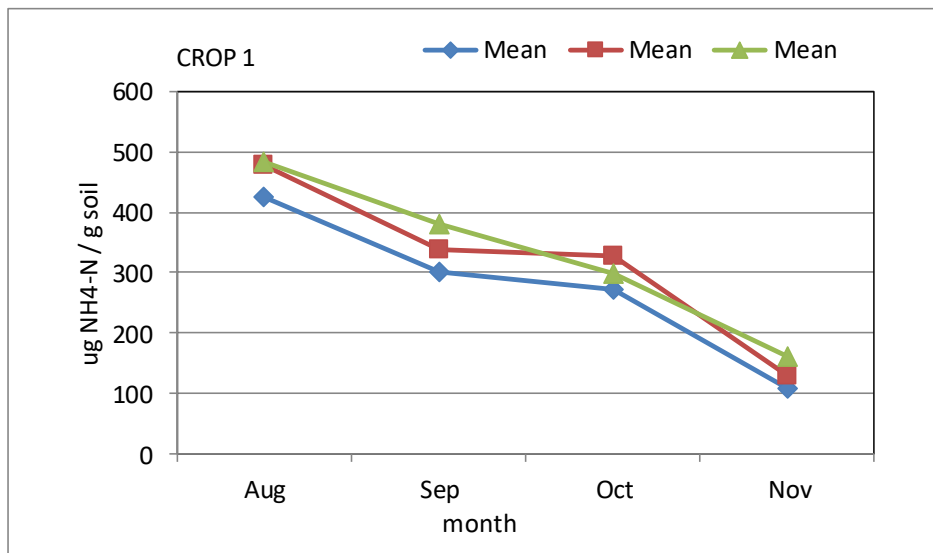
Treatment		1 st Crop				2 nd Crop				3 rd Crop			
		pH (1:1)	OM (%)	OC (%)	Total N	pH (1:1)	OM (%)	OC (%)	Total N	pH (1:1)	OM (%)	OC (%)	Total N
T1R1	Mean	6.54	0.99	0.57	0.019	6.54	0.93	0.54	0.018	6.67	0.77	0.44	0.017
	S.D.	0.22	0.10	0.06	0.003	0.22	0.06	0.04	0.001	0.15	0.04	0.02	0.002
T1R2	Mean	6.45	1.23	0.72	0.022	6.45	1.06	0.61	0.020	6.51	0.91	0.53	0.020
	S.D.	0.19	0.09	0.05	0.002	0.19	0.46	0.27	0.002	0.22	0.03	0.02	0.001
T1R3	Mean	6.49	1.17	0.68	0.021	6.49	1.05	0.61	0.019	6.45	1.01	0.59	0.018
	S.D.	0.21	0.05	0.03	0.001	0.21	0.08	0.05	0.003	0.21	0.07	0.04	0.002
T1R4	Mean	6.52	1.18	0.69	0.020	6.52	1.01	0.59	0.021	6.52	1.00	0.58	0.017
	S.D.	0.15	0.10	0.06	0.001	0.15	0.15	0.08	0.004	0.06	0.09	0.05	0.001
T2R1	Mean	6.64	1.09	0.63	0.017	6.64	0.91	0.53	0.020	6.43	0.84	0.49	0.019
	S.D.	0.17	0.16	0.09	0.002	0.17	0.13	0.07	0.001	0.06	0.07	0.04	0.002
T2R2	Mean	6.64	1.08	0.63	0.021	6.64	0.98	0.57	0.020	6.50	0.86	0.50	0.020
	S.D.	0.32	0.14	0.08	0.001	0.32	0.17	0.10	0.001	0.17	0.09	0.05	0.002
T2R3	Mean	6.58	1.15	0.67	0.021	6.58	1.10	0.64	0.018	6.45	0.97	0.56	0.019
	S.D.	0.17	0.13	0.07	0.002	0.17	0.07	0.04	0.001	0.12	0.08	0.05	0.002
T2R4	Mean	6.53	1.23	0.71	0.020	6.53	1.04	0.61	0.020	6.40	0.92	0.53	0.018
	S.D.	0.13	0.18	0.11	0.002	0.13	0.07	0.04	0.004	0.04	0.09	0.05	0.002
T3R1	Mean	6.72	1.18	0.69	0.021	6.72	0.87	0.50	0.018	6.49	0.95	0.55	0.022
	S.D.	0.20	0.24	0.14	0.001	0.20	0.08	0.04	0.003	0.03	0.08	0.04	0.002

Treatment		1 st Crop				2 nd Crop				3 rd Crop			
		pH (1:1)	OM (%)	OC (%)	Total N	pH (1:1)	OM (%)	OC (%)	Total N	pH (1:1)	OM (%)	OC (%)	Total N
T3R2	Mean	6.56	1.14	0.66	0.022	6.56	0.86	0.50	0.021	6.40	0.90	0.52	0.020
	S.D.	0.06	0.23	0.13	0.004	0.06	0.15	0.09	0.003	0.12	0.09	0.05	0.002
T3R3	Mean	6.63	1.08	0.63	0.019	6.63	0.99	0.57	0.020	6.48	0.94	0.54	0.018
	S.D.	0.20	0.13	0.08	0.003	0.20	0.07	0.04	0.002	0.16	0.12	0.07	0.002
T3R4	Mean	6.58	1.16	0.67	0.021	6.58	1.08	0.63	0.021	6.48	0.92	0.54	0.017
	S.D.	0.15	0.29	0.17	0.002	0.15	1.01	0.58	0.003	0.17	0.95	0.55	0.001

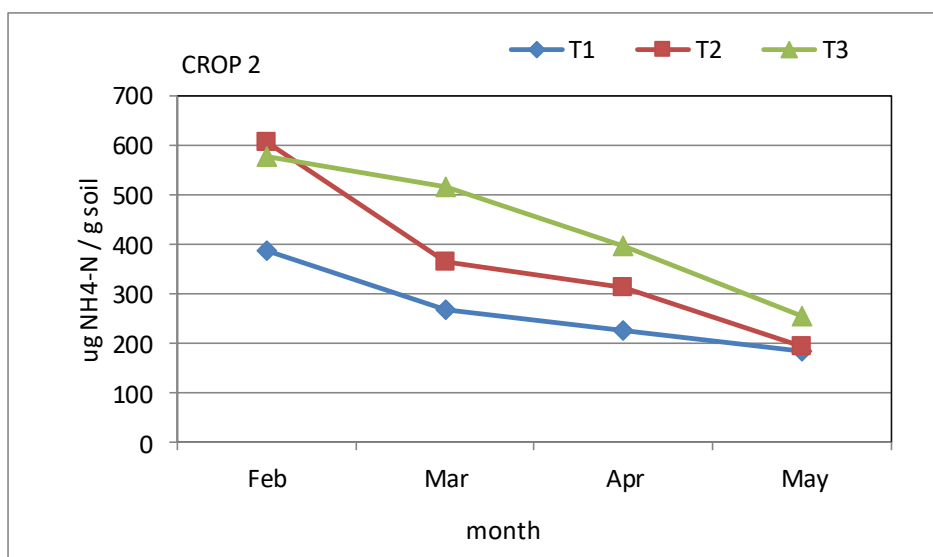
ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของดิน Inorganic Nitrogen (NH_4^+) หน่วย $\text{ug NH}_4^+ \text{ N 1g dry soil}$

1 st Crop				
Month		T1	T2	T3
		Mean±S.D.	Mean±S.D.	Mean±S.D.
1	Aug	424.59±86.08	477.56±77.27	484.21±20.56
2	Sep	300.82±45.49	338.35±49.01	379.44±21.33
3	Oct	272.50±16.21	327.39±61.15	299.38±24.85
4	Nov	108.01±21.24	130.00±33.81	160.72±27.02
2 nd Crop				
Month		T1	T2	T3
		Mean±S.D.	Mean±S.D.	Mean±S.D.
1	Feb	388.55±26.54	606.33±128.48	579.01±163.45
2	Mar	266.63±4.97	364.62±56.04	517.74±38.66
3	Apr	227.17±130.18	313.09±129.70	396.98±67.78
4	May	184.83±80.19	193.46±51.49	254.32±48.09
3 rd Crop				
Month		T1	T2	T3
		Mean±S.D.	Mean±S.D.	Mean±S.D.
1	Aug	119.22±24.81	388.04±29.89	465.43±21.54
2	Sep	89.37±29.98	250.92±22.89	340.66±50.16
3	Oct	65.28±17.29	185.09±7.55	193.87±10.93
4	Nov	74.22±22.01	66.12±16.18	122.28±22.23

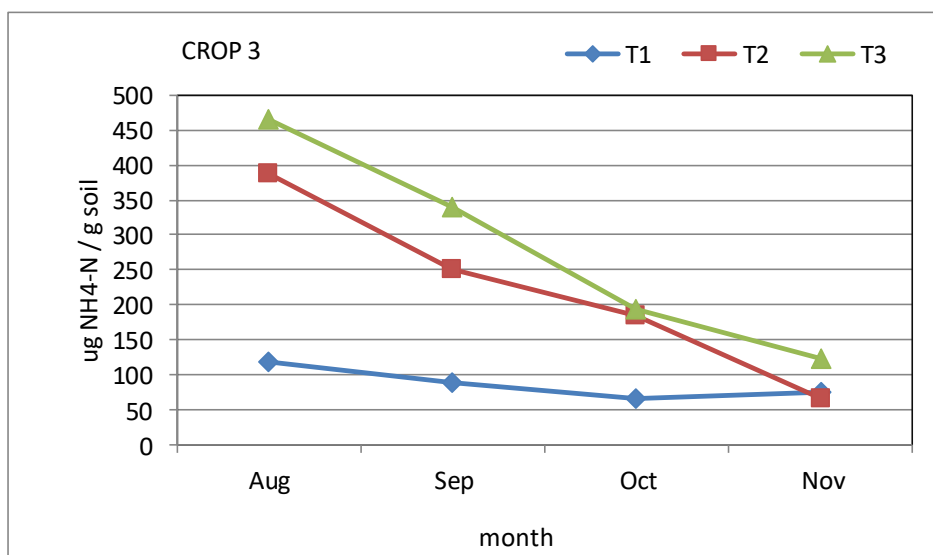
หมายเหตุ: หน่วย $\text{ug NH}_4^+ \text{ N 1g dry soil}$



a. 1st Crop



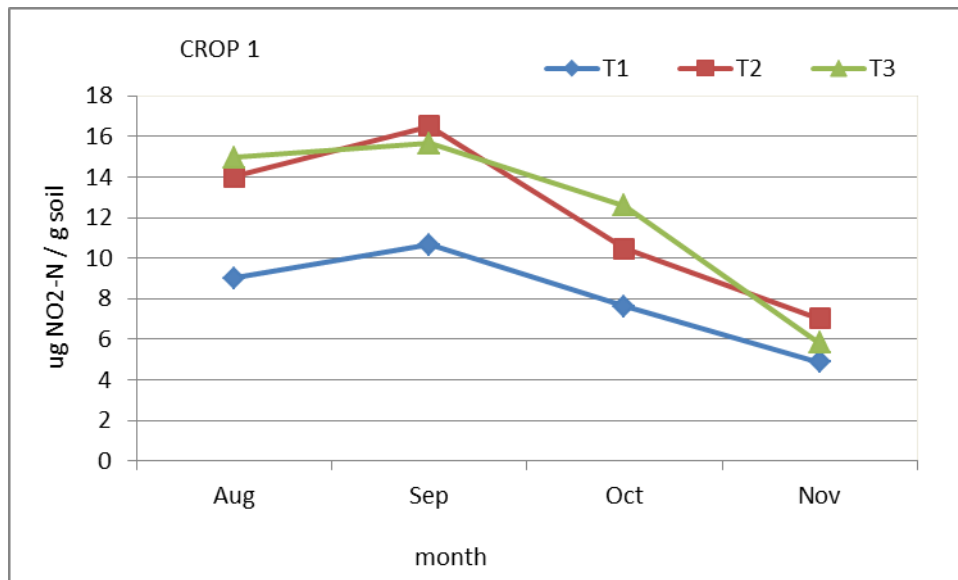
b. 2nd Crop



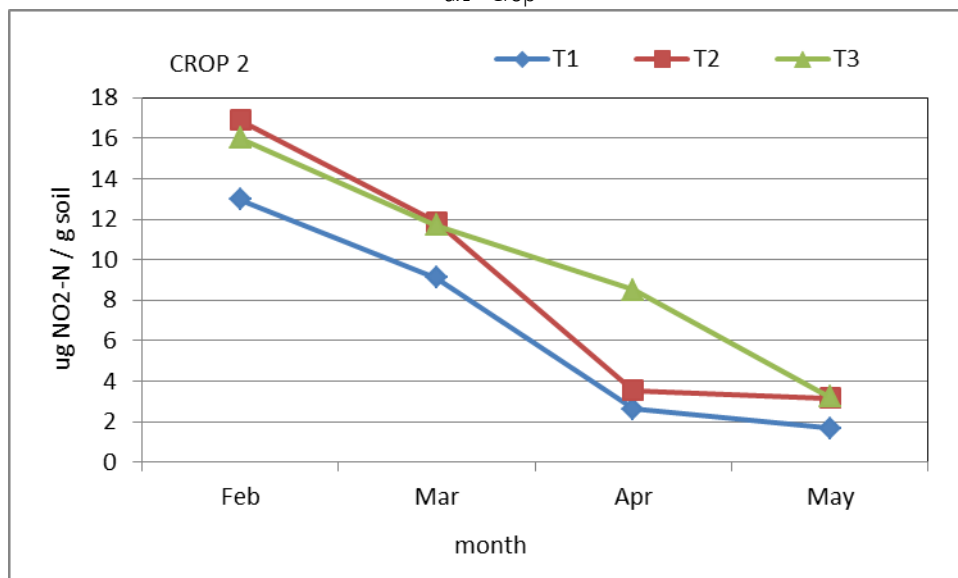
c. 3rd Crop รูปที่ 4.1 คุณสมบัติของดิน Inorganic Nitrogen (NH_4^+)

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติของดิน Inorganic Nitrogen (NO_2^-) หน่วย $\mu\text{g NO}_2^- \text{N 1g dry soil}$

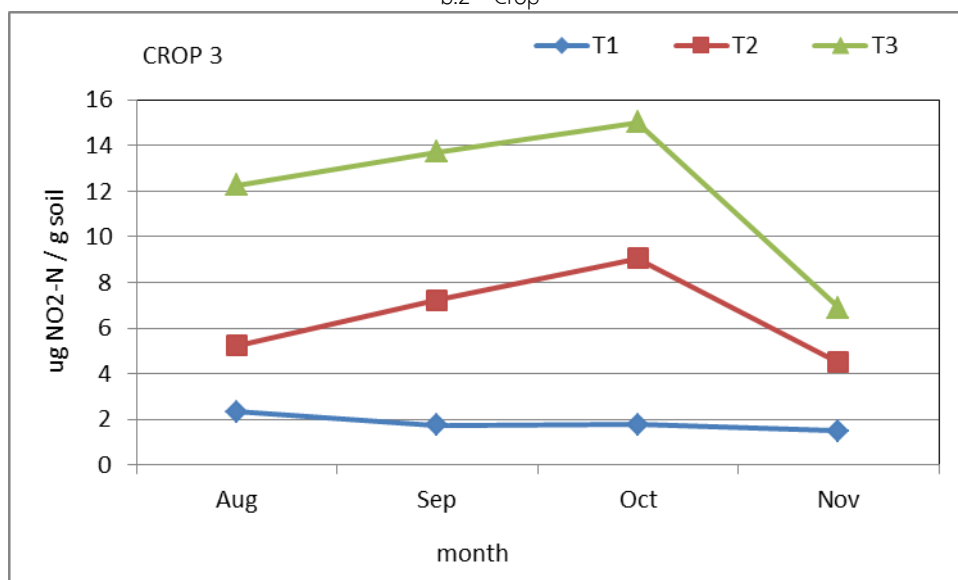
1 st Crop				
Month		T1	T2	T3
		Mean±S.D.	Mean±S.D.	Mean±S.D.
1	Aug	9.01±1.18	14.02±3.19	14.96±4.99
2	Sep	10.66±3.10	16.52±4.61	15.66±1.94
3	Oct	7.63±3.79	10.47±4.43	12.60±5.50
4	Nov	4.85±1.09	7.03±1.22	5.82±3.21
2 nd Crop				
Month		T1	T2	T3
		Mean±S.D.	Mean±S.D.	Mean±S.D.
1	Feb	12.96±5.19	16.88±5.19	16.02±3.00
2	Mar	9.11±1.45	11.87±1.12	11.70±1.07
3	Apr	2.61±1.15	3.55±0.44	8.50±2.86
4	May	1.67±0.30	3.16±0.70	3.23±1.20
3 rd Crop				
Month		T1	T2	T3
		Mean±S.D.	Mean±S.D.	Mean±S.D.
1	Aug	2.34±0.79	5.22±0.95	12.27±3.70
2	Sep	1.73±0.43	7.23±2.00	13.73±1.41
3	Oct	1.77±0.93	9.04±2.06	15.03±3.96
4	Nov	1.50±0.41	4.49±0.86	6.90±0.89



a.1st Crop



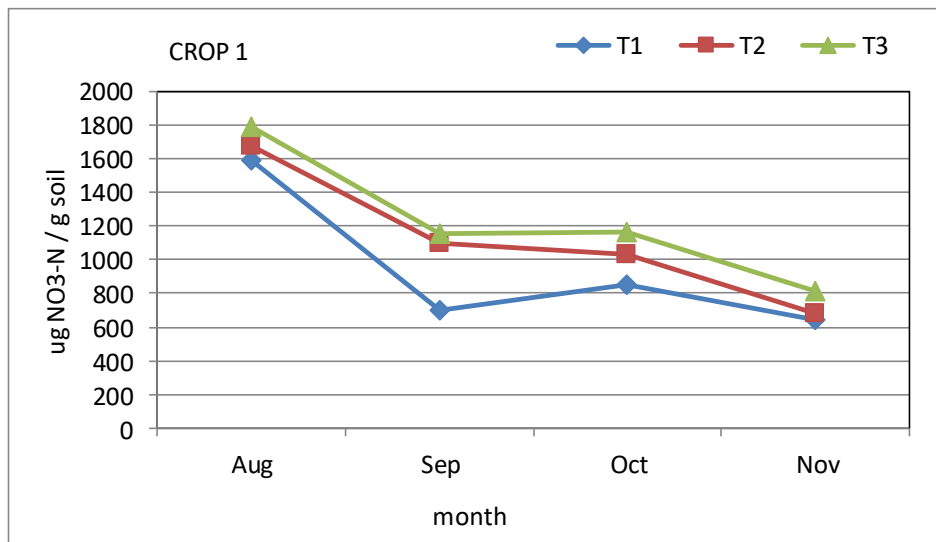
b.2nd Crop



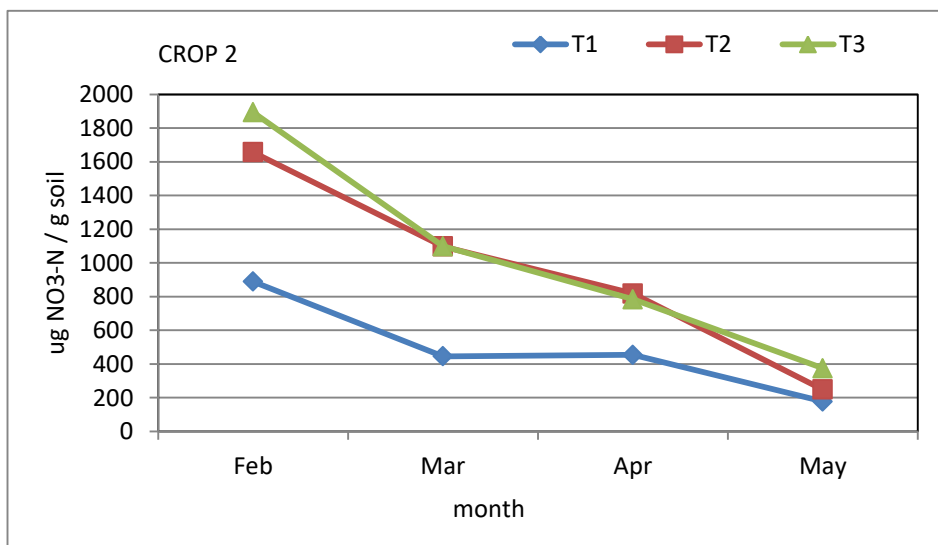
c. 3rd Crop รูปที่ 4.2 คุณสมบัติของดิน Inorganic Nitrogen (NO₂-)

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติของดิน Inorganic Nitrogen (NO_3^-) หน่วย $\mu\text{g NO}_3^- \text{ N } 1\text{g dry soil}$

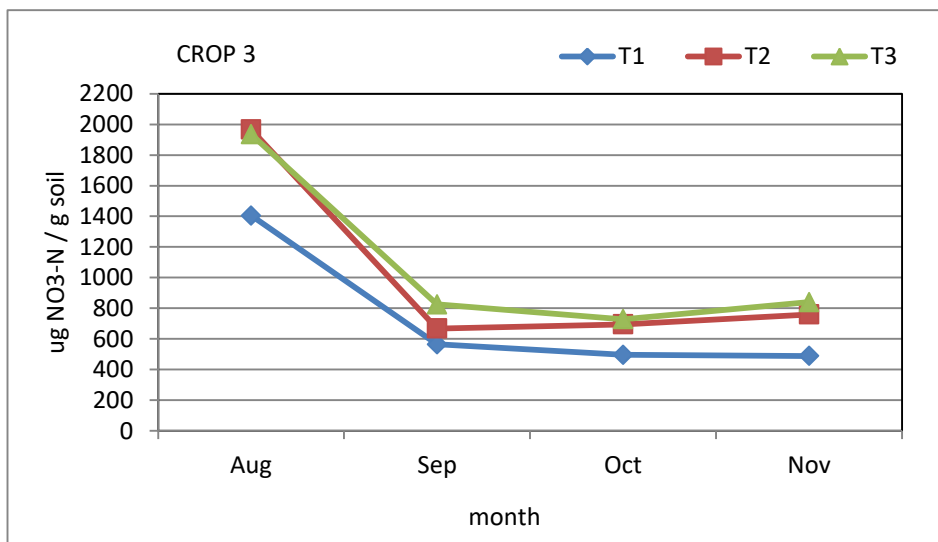
1 st Crop				
Month		T1	T2	T3
		Mean±S.D.	Mean±S.D.	Mean±S.D.
1	Aug	1589.74±26.71	1679.75±22.43	1786.77±90.89
2	Sep	701.33±86.96	1093.91±185.52	1151.92±51.51
3	Oct	849.86±150.83	1034.26±129.67	1163.30±276.93
4	Nov	642.53±4.58	684.13±79.72	814.13±62.58
2 nd Crop				
Month		T1	T2	T3
		Mean±S.D.	Mean±S.D.	Mean±S.D.
1	Feb	889.35±314.95	1656.86±347.56	1894.23±267.17
2	Mar	446.19±235.11	1098.06±339.80	1098.50±297.17
3	Apr	454.09±117.14	818.28±81.36	784.15±210.01
4	May	177.14±29.34	248.80±95.16	374.32±175.39
3 rd Crop				
Month		T1	T2	T3
		Mean±S.D.	Mean±S.D.	Mean±S.D.
1	Aug	1404.91±84.58	1966.42±237.29	1934.88±212.63
2	Sep	564.71±119.02	667.14±102.40	825.00±170.46
3	Oct	496.08±90.75	694.88±46.32	728.46±98.51
4	Nov	488.58±102.01	759.60±54.86	839.88±51.92



a. 1st Crop



b. 2nd Crop



c. 3rd Crop รูปที่ 4.3 คุณสมบัติของดิน Inorganic Nitrogen (NO₃-)

4.1.3 คุณสมบัติของพืชและผลผลิต

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติของผลผลิต (เมล็ดข้าวโพด; unit % by weight)

Treatment	1 st Crop		2 nd Crop		3 rd Crop	
	Total C (% by weight)	Total N (% by weight)	Total C (% by weight)	Total N (% by weight)	Total C (% by weight)	Total N (% by weight)
T1R1	54.07	0.37	53.01	0.42	52.98	0.42
T1R2	54.48	0.45	53.95	0.46	54.49	0.38
T1R3	54.55	0.41	52.98	0.44	54.05	0.40
T1R4	54.11	0.38	53.95	0.42	54.48	0.41
Mean±S.D.	13.52±0.45	0.09±0.01	13.25±1.00	0.10±0.01	13.25±1.27	0.10±0.01
T2R1	53.54	0.43	53.98	0.42	54.08	0.46
T2R2	54.03	0.44	54.53	0.43	54.50	0.45
T2R3	53.08	0.44	54.48	0.42	53.94	0.42
T2R4	54.03	0.41	53.05	0.41	54.00	0.43
Mean±S.D.	13.38±0.82	0.11±0.01	13.50±1.23	0.11±0.00	13.52±0.46	0.12±0.01
T3R1	54.48	0.42	53.95	0.38	53.05	0.38
T3R2	54.07	0.41	53.59	0.37	54.49	0.41
T3R3	53.95	0.42	53.44	0.39	53.08	0.40
T3R4	54.00	0.39	53.46	0.39	53.03	0.42
Mean±S.D.	13.62±0.43	0.11±0.01	13.49±0.43	0.09±0.00	13.26±1.29	0.09±0.00

ตารางที่ 4.8 ปริมาณคาร์บอนในต้นข้าวโพด (unit % by weight)

Treatment	1 st Crop		2 nd Crop		3 rd Crop	
	Total C รอบที่ 1	Total C รอบที่ 2	Total C รอบที่ 1	Total C รอบที่ 2	Total C รอบที่ 1	Total C รอบที่ 2
T1R1	49.76	46.97	46.21	51.13	46.78	50.15
T1R2	50.60	47.46	44.06	50.72	46.39	49.68
T1R3	51.01	47.25	44.87	50.21	46.03	49.11
T1R4	51.95	45.41	44.77	50.51	44.85	49.21
Mean±S.D.	51.76±0.91	48.97±0.93	48.21±0.90	53.13±0.39	48.78±0.83	52.15±0.48
T2R1	50.70	48.55	45.20	52.86	49.38	51.92
T2R2	49.22	47.40	47.47	51.92	47.40	52.91
T2R3	50.26	48.18	46.03	52.02	48.05	52.35
T2R4	50.21	48.00	44.87	52.35	47.39	52.32
Mean±S.D.	53.70±0.63	51.55±0.48	48.20±1.16	55.86±0.42	52.38±0.94	54.92±0.41
T3R1	47.33	46.12	45.31	52.29	43.43	51.48
T3R2	48.61	47.12	44.74	52.88	44.87	51.78
T3R3	48.29	48.22	46.65	54.03	45.60	51.01
T3R4	49.33	47.98	47.62	52.32	47.46	51.40
	51.33±0.83	50.12±0.95	49.31±1.30	56.29±0.81	47.43±1.68	55.48±0.32

หมายเหตุ: รอบที่ 1 หมายถึง รอบหลังใส่ปุ๋ยรองพื้น ประมาณ 30 วันหลังปลูก รอบที่ 2 หมายถึง รอบเก็บเกี่ยวผลผลิต

ตารางที่ 4.9 ปริมาณไนโตรเจนรวมในต้นข้าวโพด (unit % by weight)

Treatment	1 st Crop		2 nd Crop		3 rd Crop	
	Total N รอบที่ 1	Total N รอบที่ 2	Total N รอบที่ 1	Total N รอบที่ 2	Total N รอบที่ 1	Total N รอบที่ 2
T1R1	0.28	0.17	0.33	0.16	0.26	0.14
T1R2	0.28	0.16	0.32	0.15	0.27	0.14
T1R3	0.26	0.16	0.35	0.16	0.27	0.15
T1R4	0.27	0.16	0.03	0.16	0.27	0.01
Mean±S.D.	0.27±0.01	0.16±0.00	0.26±0.15	0.16±0.00	0.27±0.00	0.11±0.06
T2R1	0.35	0.15	0.36	0.17	0.34	0.15
T2R2	0.35	0.15	0.37	0.16	0.32	0.16
T2R3	0.38	0.15	0.43	0.16	0.39	0.17
T2R4	0.35	0.16	0.04	0.16	0.38	0.16
Mean±S.D.	0.36±0.01	0.15±0.00	0.30±0.18	0.17±0.01	0.36±0.03	0.16±0.00
T3R1	0.32	0.17	0.30	0.16	0.30	0.17
T3R2	0.28	0.17	0.26	0.16	0.25	0.17
T3R3	0.37	0.17	0.26	0.15	0.28	0.18
T3R4	0.31	0.15	0.27	0.15	0.27	0.17
Mean±S.D.	0.36±0.01	0.16±0.01	0.28±0.02	0.17±0.01	0.28±0.02	0.17±0.00

หมายเหตุ: รอบที่ 1 หมายถึง รอบหลังใส่ปุ๋ยรองพื้น ประมาณ 30 วันหลังปลูก รอบที่ 2 หมายถึง รอบเก็บเกี่ยวผลผลิต

ตารางที่ 4.10 ปริมาณคาร์บอนในใบข้าวโพด (unit % by weight)

Treatment	1 st Crop		2 nd Crop		3 rd Crop	
	Total C รอบที่ 1	Total C รอบที่ 2	Total C รอบที่ 1	Total C รอบที่ 2	Total C รอบที่ 1	Total C รอบที่ 2
T1R1	46.12	47.25	45.21	47.33	45.96	48.35
T1R2	43.94	47.20	44.87	48.48	46.63	49.15
T1R3	44.77	48.99	43.43	47.01	47.84	48.29
T1R4	45.55	48.29	44.15	48.35	46.56	48.93
Mean±S.D.	45.09±0.95	47.93±0.87	44.41±0.79	47.79±0.74	46.75±0.79	48.68±0.42
T2R1	42.81	48.68	46.56	49.15	43.57	49.68
T2R2	44.77	48.61	45.85	47.62	43.83	47.93
T2R3	43.92	50.36	44.74	47.91	43.26	47.69
T2R4	45.36	49.74	47.54	48.00	45.45	46.97
Mean±S.D.	44.21±1.11	49.35±0.85	46.17±1.18	48.17±0.67	44.03±0.98	48.07±1.15
T3R1	42.58	44.23	46.47	47.01	42.74	48.25
T3R2	42.88	44.44	45.41	45.96	43.00	48.61
T3R3	43.09	44.03	47.17	46.56	44.13	46.65
T3R4	43.72	45.75	45.27	47.12	44.77	47.47
Mean±S.D.	43.07±0.49	44.61±0.78	46.08±0.90	46.66±0.53	43.66±0.96	47.74±0.87

หมายเหตุ: รอบที่ 1 หมายถึงรอบหลังใส่ปุ๋ยรองพื้น ประมาณ 30 วันหลังปลูก, รอบที่ 2 หมายถึงรอบเก็บเกี่ยวผลผลิต

ตารางที่ 4.11 ปริมาณไนโตรเจนรวมในใบข้าวโพด (unit % by weight)

Treatment	1 st Crop		2 nd Crop		3 rd Crop	
	Total N รอบที่ 1	Total N รอบที่ 2	Total N รอบที่ 1	Total N รอบที่ 2	Total N รอบที่ 1	Total N รอบที่ 2
T1R1	0.42	0.32	0.44	0.32	0.38	0.27
T1R2	0.48	0.29	0.44	0.31	0.37	0.26
T1R3	0.44	0.31	0.48	0.29	0.41	0.26
T1R4	0.41	0.32	0.04	0.30	0.35	0.26
Mean±S.D.	0.44±0.03	0.31±0.01	0.35±0.21	0.30±0.01	0.38±0.03	0.26±0.01
T2R1	0.51	0.32	0.56	0.31	0.47	0.27
T2R2	0.54	0.34	0.56	0.31	0.45	0.25
T2R3	0.51	0.32	0.52	0.30	0.48	0.23
T2R4	0.51	0.32	0.51	0.03	0.13	0.26
Mean±S.D.	0.52±0.02	0.33±0.01	0.54±0.03	0.24±0.14	0.38±0.17	0.25±0.02
T3R1	0.54	0.27	0.56	0.21	0.50	0.19
T3R2	0.46	0.27	0.55	0.21	0.50	0.21
T3R3	0.48	0.27	0.58	0.22	0.51	0.19
T3R4	0.45	0.30	0.05	0.02	0.48	0.19
Mean±S.D.	0.48±0.04	0.28±0.01	0.43±0.25	0.16±0.09	0.50±0.01	0.19±0.01

หมายเหตุ: รอบที่ 1 หมายถึง รอบหลังใส่ปุ๋ยรองพื้น ประมาณ 30 วันหลังปลูก
รอบที่ 2 หมายถึง รอบเก็บเกี่ยวผลผลิต

4.2 การศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ รอบการเพาะปลูกที่ 1

การศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ รอบการเพาะปลูกที่ 2 ในวันที่ 18 กรกฎาคม ถึง 24 พฤศจิกายน 2557 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 126 วัน ผลการศึกษา (ตารางที่ 4.12) มีดังนี้

4.2.1 ตารางการเก็บข้อมูล

ตารางที่ 4.12 แสดงการเก็บข้อมูลในแปลงทดลองในรอบการเพาะปลูกที่ 1 (วันที่ 18 กรกฎาคม ถึง 24 พฤศจิกายน 2557)

วัน เดือน ปี	กิจกรรม	หมายเหตุ
27 มิถุนายน 2557	เก็บตัวอย่างดินก่อนทำการทดลอง	
18 กรกฎาคม 2557	ไถเตรียมแปลงทดลอง	
21 กรกฎาคม 2557	วางฐานอุปกรณ์ก่อนทำการทดลอง	
21-25 กรกฎาคม 2557	หยอดเมล็ดปลูก, ใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 และให้น้ำ	
2 สิงหาคม 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต รายสัปดาห์	♣
9 สิงหาคม 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต รายสัปดาห์	♣
16 สิงหาคม 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต รายสัปดาห์	♣
22-26 สิงหาคม 2557	ทำรุ่นพูนโคน กำจัดวัชพืชและ ใส่ปุ๋ยรอบที่ 2	♣♣♣♣♣
30 สิงหาคม 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต รายสัปดาห์	♣

วัน เดือน ปี	กิจกรรม	หมายเหตุ
6 กันยายน 2557	เก็บตัวอย่างดิน และการเจริญเติบโต ร่ายสัปดาห์ และเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตและปริมาณชีวมวล	♣
13 กันยายน 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต ร่ายสัปดาห์	♣
20 กันยายน 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต ร่ายสัปดาห์	♣
27 กันยายน 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต ร่ายสัปดาห์	♣
4 ตุลาคม 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต ร่ายสัปดาห์	♣
11 ตุลาคม 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต ร่ายสัปดาห์	♣
18 ตุลาคม 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต ร่ายสัปดาห์	♣
25 ตุลาคม 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต ร่ายสัปดาห์	♣
1 พฤศจิกายน 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต ร่ายสัปดาห์	♣
8 พฤศจิกายน 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต ร่ายสัปดาห์	♣
15 พฤศจิกายน 2557	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และการเจริญเติบโต ร่ายสัปดาห์	♣
24 พฤศจิกายน 2557	เก็บผลผลิตและปริมาณชีวมวล	
เก็บตัวอย่างก๊าซ 20 ครั้ง ระยะเวลาปลูก 126 วัน		

4.2.2 ปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในดิน

ปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในดินทำการศึกษาทั้งหมด 5 ครั้งตั้งแต่อ่อนปลูกและเดือนละ 1 ครั้ง ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร ปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในดินมีปริมาณที่ค่อนข้างต่ำมีค่าอยู่ระหว่าง 4.37 ± 0.05 ถึง 5.42 ± 0.60 ดัน/ไร่ (ตารางที่ 4.13)

ตารางที่ 4.13 ค่าความหนาแน่นของดิน และปริมาณคาร์บอนที่เก็บกักในดิน

Treatment	ก่อนปลูก 27 มิ.ย. 57		เดือน 1 22 ก.ค. 57		เดือน 2 24 ส.ค. 57		เดือน 3 6 ก.ย. 57		เดือน 4 25 ต.ค. 57	
	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.
T1R1	1.10	4.65	1.18	4.98	1.12	4.73	1.24	5.24	1.03	4.35
T1R2	1.25	5.28	1.18	4.98	1.13	4.77	1.19	5.03	1.11	4.69
T1R3	1.06	4.48	1.19	5.03	1.18	4.98	1.19	5.03	1.09	4.60
T1R4	1.08	4.56	1.23	5.20	1.27	5.36	1.31	5.53	1.19	5.03
Mean $\pm$ S.D.	1.13 $\pm$ 0.09	4.74 $\pm$ 0.37	1.20 $\pm$ 0.02	5.05 $\pm$ 0.10	1.17 $\pm$ 0.07	4.96 $\pm$ 0.29	1.23 $\pm$ 0.06	5.21 $\pm$ 0.24	1.10 $\pm$ 0.07	4.67 $\pm$ 0.28
T2R1	1.03	4.35	1.24	5.24	1.03	4.35	1.12	4.73	1.15	4.86
T2R2	1.05	4.44	1.26	5.32	1.31	5.53	1.18	4.98	1.07	4.52
T2R3	1.02	4.31	1.49	6.29	1.35	5.70	1.29	5.45	1.26	5.32
T2R4	1.04	4.39	1.14	4.82	1.27	5.36	1.36	5.74	0.97	4.10
Mean $\pm$ S.D.	1.04 $\pm$ 0.01	4.37 $\pm$ 0.05	1.28 $\pm$ 0.14	5.42 $\pm$ 0.60	1.24 $\pm$ 0.14	5.24 $\pm$ 0.61	1.24 $\pm$ 0.11	5.23 $\pm$ 0.46	1.11 $\pm$ 0.13	4.70 $\pm$ 0.52
T3R1	1.11	4.69	1.08	4.56	1.24	5.24	1.20	5.07	1.05	4.44
T3R2	1.12	4.73	1.28	5.41	1.21	5.11	1.34	5.66	1.07	4.52
T3R3	1.11	4.69	1.37	5.79	1.11	4.69	1.03	4.35	1.12	4.73
T3R4	1.12	4.73	1.21	5.11	1.20	5.07	1.00	4.22	1.10	4.65
Mean $\pm$ S.D.	1.12 $\pm$ 0.01	4.71 $\pm$ 0.02	1.24 $\pm$ 0.12	5.22 $\pm$ 0.52	1.19 $\pm$ 0.06	5.03 $\pm$ 0.24	1.14 $\pm$ 0.10	4.83 $\pm$ 0.06	1.08 $\pm$ 0.03	4.58 $\pm$ 0.13

หมายเหตุ : Bulk หมายถึง Bulk density (ความหนาแน่นรวมของดิน), SOC หมายถึง Soil Organic Carbon ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในดิน (ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในดิน (กรัม/ตร.ม./ความลึก ซม.) = (ความลึก) $\times$ (% อินทรีย์คาร์บอน) $\times$ (ความหนาแน่นรวมของดิน) หน่วย ดัน/ไร่

4.2.3 การเจริญเติบโต

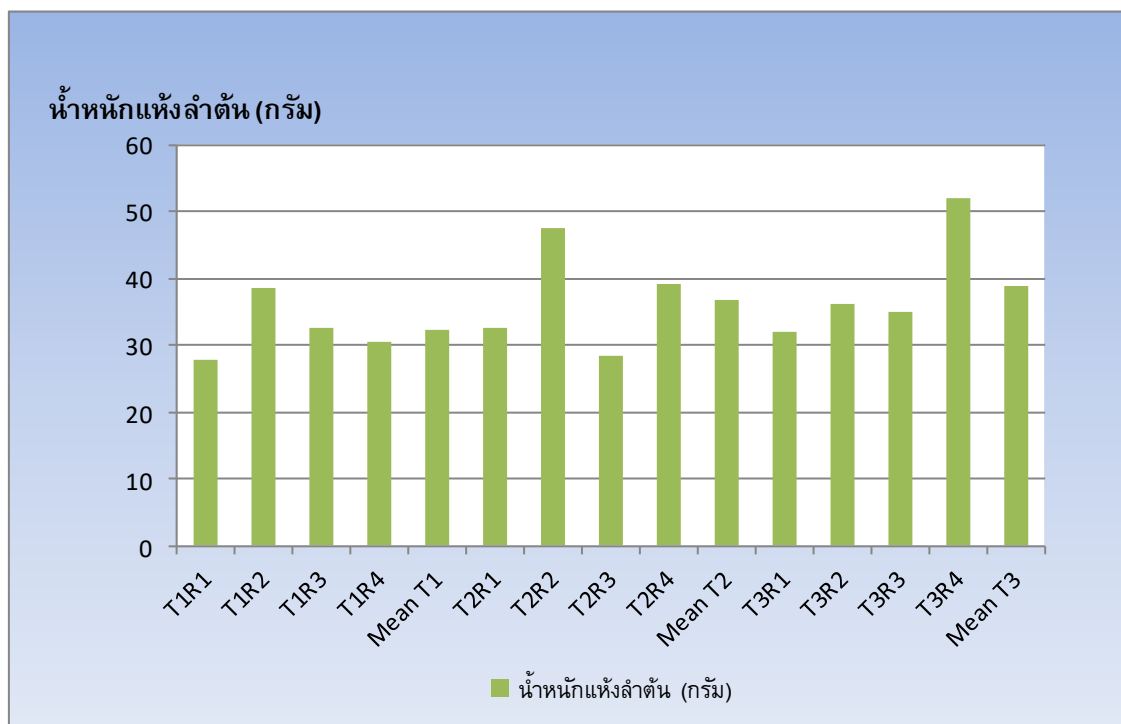
4.2.3.1 การเจริญเติบโตหลังจากใส่ปุ๋ยรอบที่ 2 เป็นเวลา 15 วัน

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวโพดในระยะ 50 วันหลังจากปลูก และเป็นช่วงที่ใส่ปุ๋ยรอบที่ 2 มาแล้วเป็นเวลา 15 วัน พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 ที่ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3) ซึ่งมีอัตราการใส่ปุ๋ยสูงที่สุด พบว่ามีการเจริญเติบโตมากที่สุด โดยวัดจากน้ำหนักแห้งของลำต้นมีค่าเฉลี่ย 38.75 ± 9.01 กรัม (ตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.4) และการเจริญเติบโตที่รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และตำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1) มีค่าเฉลี่ยของน้ำหนักลำต้นแห้ง 36.88 ± 8.35 กรัม และ 32.31 ± 4.58 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.4)

ตารางที่ 4.14 แสดงการเจริญเติบโตของข้าวโพดระยะ 50 วันหลังจากมีการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 แล้ว 15 วัน ที่แปลงขนาด 1×1 เมตร (เก็บข้อมูล 6 กันยายน 2557)

Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)
T1R1	27.74	T2R1	32.71	T3R1	31.93
T1R2	38.51	T2R2	47.52	T3R2	36.19
T1R3	32.59	T2R3	28.27	T3R3	34.90
T1R4	30.40	T2R4	39.01	T3R4	51.99
Mean±S.D.	32.31±4.58	Mean±S.D.	36.88±8.35	Mean±S.D.	38.75±9.01
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ตำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และตำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)



รูปที่ 4.4 แสดงการเจริญเติบโตของข้าวโพดระยะ 50 วันหลังจากมีการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 แล้ว 15 วัน (เก็บข้อมูล 6 กันยายน 2557)

ตารางที่ 4.15 แสดงการเจริญเติบโตของข้าวโพดระยะ 50 วันหลังจากมีการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 แล้ว 15 วัน ที่แปลงขนาด 1×1 เมตร (เก็บข้อมูล 6 กันยายน 2557)

Treatment	น้ำหนักแห้งใบ (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้งใบ (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้งใบ (กรัม)
T1R1	32.14	T2R1	36.0	T3R1	39.63
T1R2	32.84	T2R2	36.8	T3R2	36.28
T1R3	36.79	T2R3	35.1	T3R3	34.57
T1R4	37.35	T2R4	45.8	T3R4	53.46
Mean±S.D.	34.78±2.07	Mean±S.D.	38.4± 3.86	Mean±S.D.	40.99± 6.65
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำเนินการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำเนินการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และดำเนินการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

4.2.3.2 น้ำหนักชีวมวลหลังเก็บเกี่ยว

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวโพดโดยแสดงผลในรูปของน้ำหนักชีวมวลหลังเก็บเกี่ยว ได้แก่ น้ำหนักสดหลังเก็บเกี่ยวของลำต้น ใบ ฟักและเมล็ด พบว่า ดำเนินการทดลองที่ 3 ที่มีการใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ หรือ 155 kg N ha⁻¹ (T3) มีอัตราการใส่ปุ๋ยสูงที่สุด พบว่าอัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุด โดยวัดจากน้ำหนักของลำต้นมีค่าเฉลี่ย 120.90±7.17 กรัม ใบมีค่าเฉลี่ย 52.36±2.46 กรัม น้ำหนักฟักและเมล็ดหลังเก็บเกี่ยวมีค่าเฉลี่ย 333.91± 24.43 กรัม น้ำหนักสดรวม (ต้น, ใบ, ฟักและเมล็ด หลังเก็บเกี่ยว) มีค่าเฉลี่ย 181.09±8.95 กรัม และการเจริญเติบโตที่รองลงมา ได้แก่ ดำเนินการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ หรือ 97 kg N ha⁻¹ (T2) และดำเนินการ

ทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1) ตามลำดับ (ตารางที่ 4.16, 4.17, 4.18 และ 4.19)

ตารางที่ 4.16 แสดงน้ำหนักแห้งลำต้นหลังเก็บเกี่ยว ที่แปลงขนาด 1×1 เมตร (เก็บข้อมูล 24 พฤศจิกายน 2557)

Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)
T1R1	102.53	T2R1	109.84	T3R1	120.90
T1R2	112.73	T2R2	106.09	T3R2	137.69
T1R3	98.45	T2R3	117.88	T3R3	125.74
T1R4	117.14	T2R4	114.81	T3R4	128.74
Mean±S.D.	107.71±8.69	Mean±S.D.	112.15±5.23	Mean±S.D.	120.90±7.17
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

ตารางที่ 4.17 แสดงน้ำหนักแห้งใบหลังเก็บเกี่ยว ที่แปลงขนาด 1×1 เมตร (เก็บข้อมูล 24 พฤศจิกายน 2557)

Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)
T1R1	44.73	T2R1	42.72	T3R1	50.62
T1R2	40.57	T2R2	43.85	T3R2	49.93
T1R3	47.17	T2R3	49.85	T3R3	54.94
T1R4	46.82	T2R4	48.97	T3R4	53.94
Mean±S.D.	44.82±3.03	Mean±S.D.	46.35±3.59	Mean±S.D.	52.36±2.46
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

ตารางที่ 4.18 แสดงน้ำหนักฝักและเมล็ดหลังเก็บเกี่ยว (เก็บข้อมูล 24 พฤศจิกายน 2557)

Treatment	น้ำหนัก ฝักและเมล็ด (กรัม)	Treatment	น้ำหนัก ฝักและเมล็ด (กรัม)	Treatment	น้ำหนัก ฝักและเมล็ด (กรัม)
T1R1	316.59	T2R1	322.51	T3R1	353.82
T1R2	309.33	T2R2	356.53	T3R2	368.94
T1R3	357.02	T2R3	357.95	T3R3	372.14
T1R4	352.69	T2R4	365.75	T3R4	345.96
Mean±S.D.	333.91± 24.43	Mean±S.D.	350.69±19.22	Mean±S.D.	360.22±12.42
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

ตารางที่ 4.19 แสดงน้ำหนักแห้งรวม (ต้น, ใบ, ฟักและเมล็ด หลังเก็บเกี่ยว) ที่แปลงขนาด 1×1 เมตร (เก็บข้อมูล 24 พฤศจิกายน 2557)

Treatment	น้ำหนักแห้งรวม (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้งรวม (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้งรวม (กรัม)
T1R1	178.60	T2R1	152.56	T3R1	181.23
T1R2	198.48	T2R2	149.93	T3R2	170.83
T1R3	196.30	T2R3	167.73	T3R3	192.63
T1R4	214.90	T2R4	163.78	T3R4	179.68
Mean±S.D.	197.07±14.85	Mean±S.D.	158.50±8.60	Mean±S.D.	181.09±8.95
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

4.2.3.3 การเจริญเติบโตตลอดฤดูกาลเพาะปลูก

การเจริญเติบโตตลอดฤดูกาลเพาะปลูก พบว่า มีการเจริญเติบโตที่แสดงผลแตกต่างกันอย่างชัดเจนในแต่ละรอบเดือน โดยข้าวโพดจะเริ่มออกฝักในเดือนที่ 2 และเก็บเกี่ยวผลผลิตในเดือนที่ 4 (รูปที่ 4.5) ส่วนการเจริญเติบโตที่แสดงผลในรูปของ ความสูงเฉลี่ย จำนวนฝัก จำนวนใบ และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น พบว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ ดำรับการทดลองที่ 3 มีอัตราการเจริญเติบโตและปริมาณผลผลิตสูงสุด (รูปที่ 4.6)



Treatment 1 เริ่มปลูก



Treatment 2 เริ่มปลูก



Treatment 3 เริ่มปลูก



Treatment 1 เดือนที่ 1



Treatment 2 เดือนที่ 1



Treatment 3 เดือนที่ 1



Treatment 1 เดือนที่ 2



Treatment 2 เดือนที่ 2



Treatment 3 เดือนที่ 2



Treatment 1 เดือนที่ 3



Treatment 2 เดือนที่ 3



Treatment 3 เดือนที่ 3



Treatment 1 เดือนที่ 4

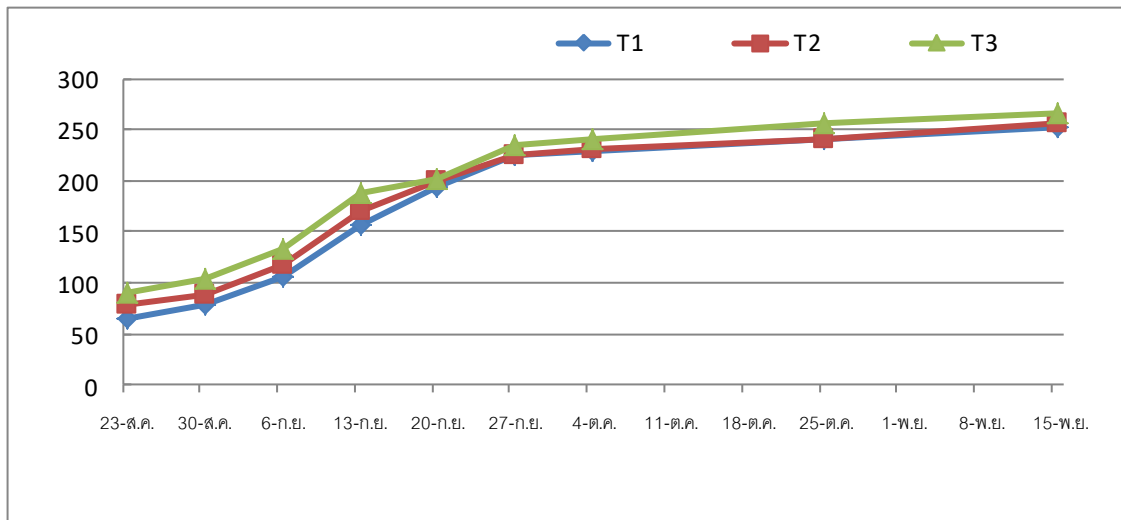


Treatment 2 เดือนที่ 4

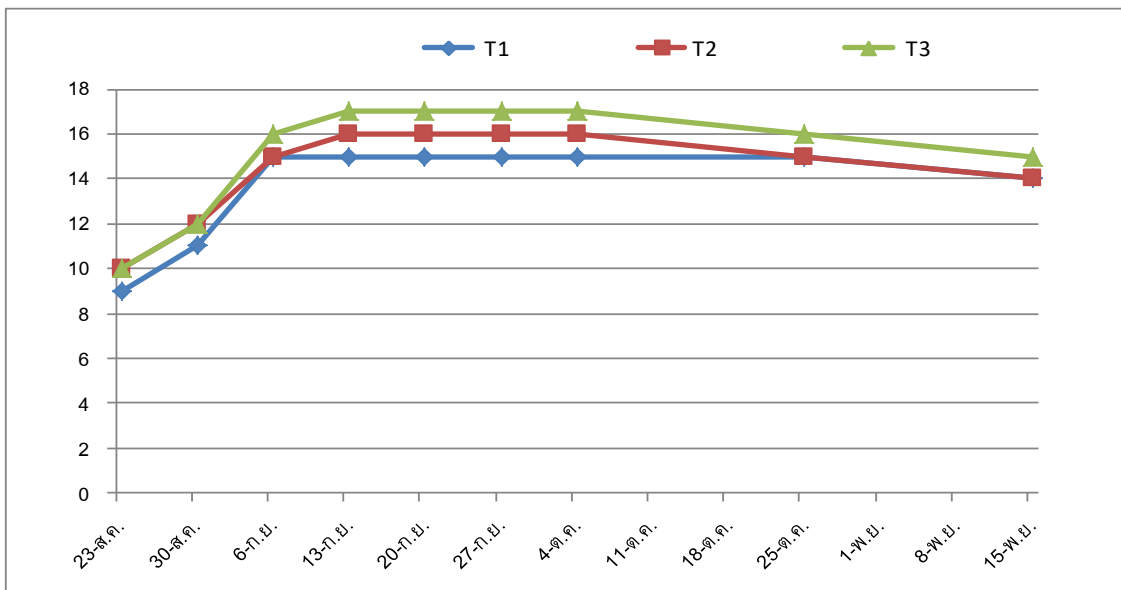


Treatment 3 เดือนที่ 4

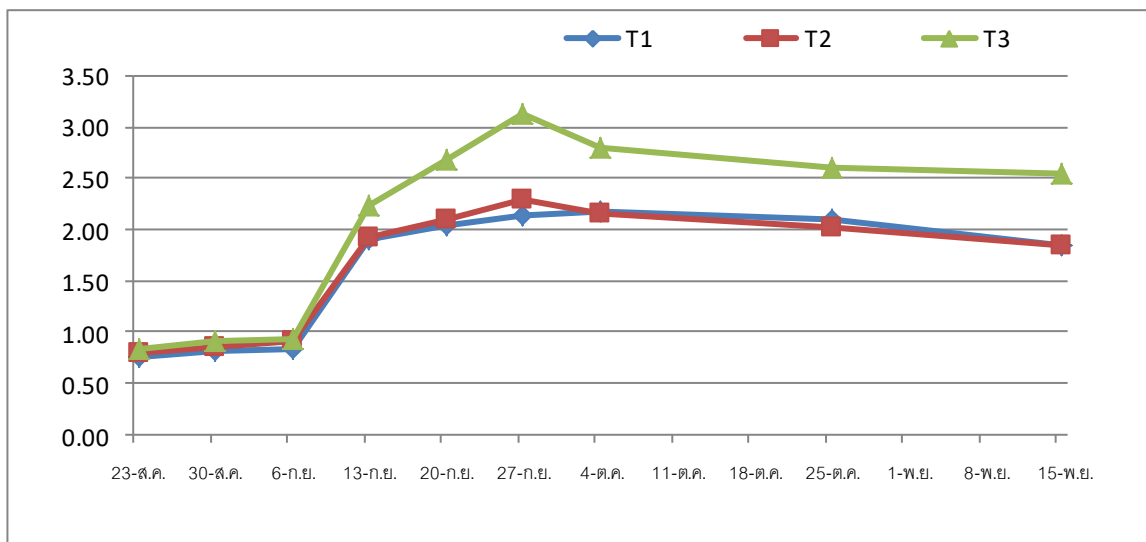
รูปที่ 4.5 แสดงการเจริญเติบโตของข้าวโพด



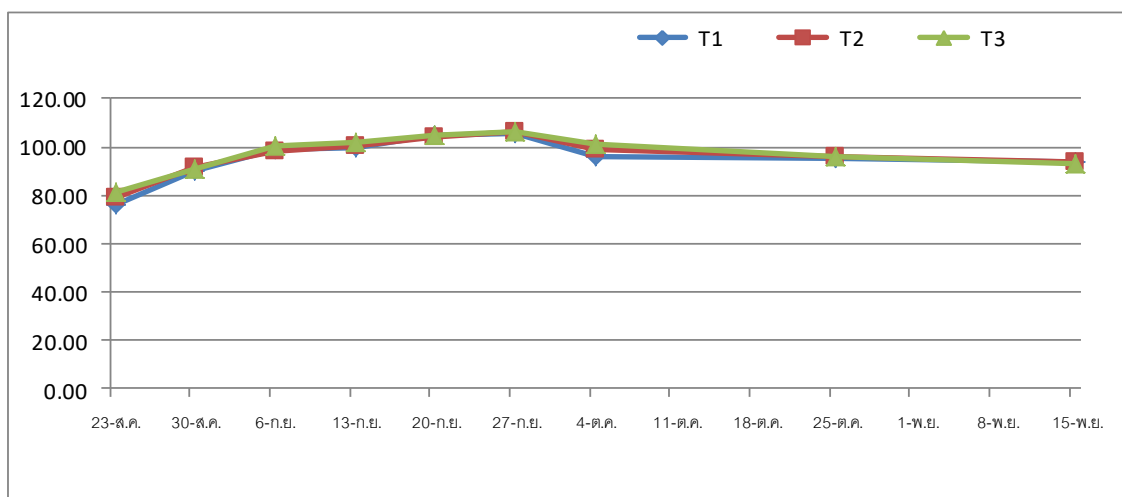
ก. ความสูงเฉลี่ย (เซ็นติเมตร)



ข. จำนวนฝัก



ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (เซ็นติเมตร)



จ. จำนวนใบ

รูปที่ 4.6 แสดงการเจริญเติบโต (ความสูงเฉลี่ย จำนวนฝัก จำนวนใบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น)

4.2.3.4 ปริมาณผลผลิต

ปริมาณผลผลิตซึ่งได้เก็บรวบรวมผลผลิตทั้งแปลงทดลองของน้ำหนักรวมฝักหลังสี พบว่า การทำการทดลองที่ 3 มีค่าสูงที่สุด 1,080 กิโลกรัมต่อไร่ รองลงมาได้แก่ การทำการทดลองที่ 2 และการควบคุม มีค่า 1,040 กิโลกรัมต่อไร่ และ 670 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.20)

ตารางที่ 4.20 แสดงปริมาณผลผลิต (เก็บข้อมูล 24 พฤศจิกายน 2557)

Treatment	ก่อนสี		หลังสี
	จำนวนฝัก (ฝัก)	น้ำหนักรวมฝัก (กก./ไร่)	น้ำหนักรวมฝัก (กก./ไร่)
T1	886	820	670
T2	972	1,260	1,040
T3	956	1,240	1,080

หมายเหตุ : การทำการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), การทำการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และการทำการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

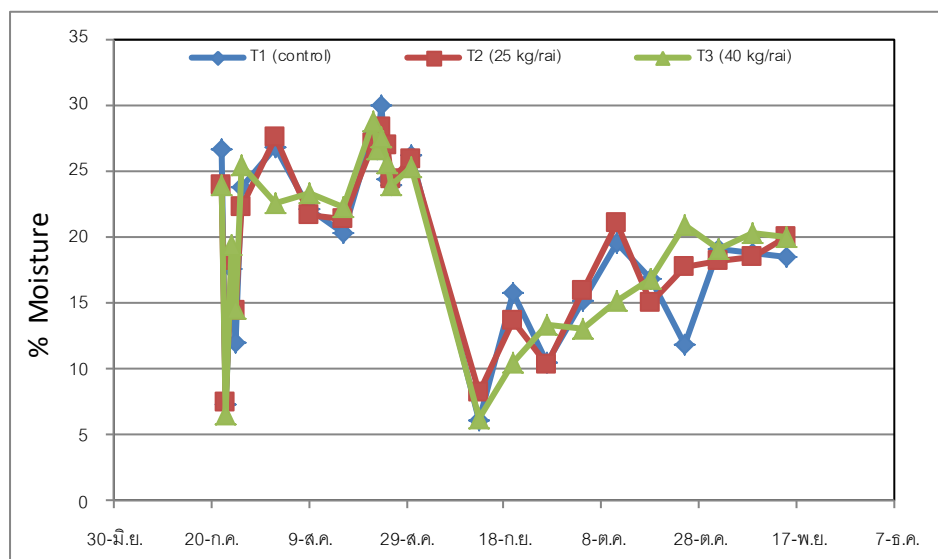
4.2.4 N₂O flux

4.2.4.1 ความชื้นในดิน

ความชื้นของดินขณะที่ทำการทดลองซึ่งจะสอดคล้องกับอุณหภูมิของดิน (ตารางที่ 4.21 และ 4.22 รูปที่ 4.7 และ 4.8)

ตารางที่ 4.21 แสดงค่าเฉลี่ยความชื้นในดิน (%)

ครั้งที่	วัน เดือน ปี	T1 (control) (% moisture)	T2 (25 kg/rai) (% moisture)	T3 (40 kg/rai) (% moisture)
1	22-ก.ค.57	26.67	23.96	23.88
2	23-ก.ค.57	7.31	7.41	6.6
3	24-ก.ค.57	17.59	18.21	19.45
4	25-ก.ค.57	12.07	14.44	14.56
5	26-ก.ค.57	23.79	22.32	25.45
6	2-ส.ค.57	26.82	27.49	22.51
7	9-ส.ค.57	22.16	21.74	23.32
8	16-ส.ค.57	20.28	21.37	22.24
9	22-ส.ค.57	27.97	27.06	28.72
10	23-ส.ค.57	26.72	26.73	26.72
11	24-ส.ค.57	29.94	28.35	27.62
12	25-ส.ค.57	24.41	26.9	25.53
13	26-ส.ค.57	23.93	24.32	24.01
14	30-ส.ค.57	26.21	25.88	25.37
16	13-ก.ย.57	6.06	8.28	6.28
17	20-ก.ย.57	15.8	13.66	10.45
18	27-ก.ย.57	10.49	10.3	13.29
19	4-ต.ค.57	15.21	15.94	13.08
20	11-ต.ค.57	19.54	21.07	15.18
21	18-ต.ค.57	16.89	15.06	16.87
22	25-ต.ค.57	11.82	17.67	20.98
23	1-พ.ย. 57	19.13	18.16	19.11
24	8-พ.ย. 57	18.76	18.56	20.30
25	15-พ.ย. 57	18.45	20.05	19.99

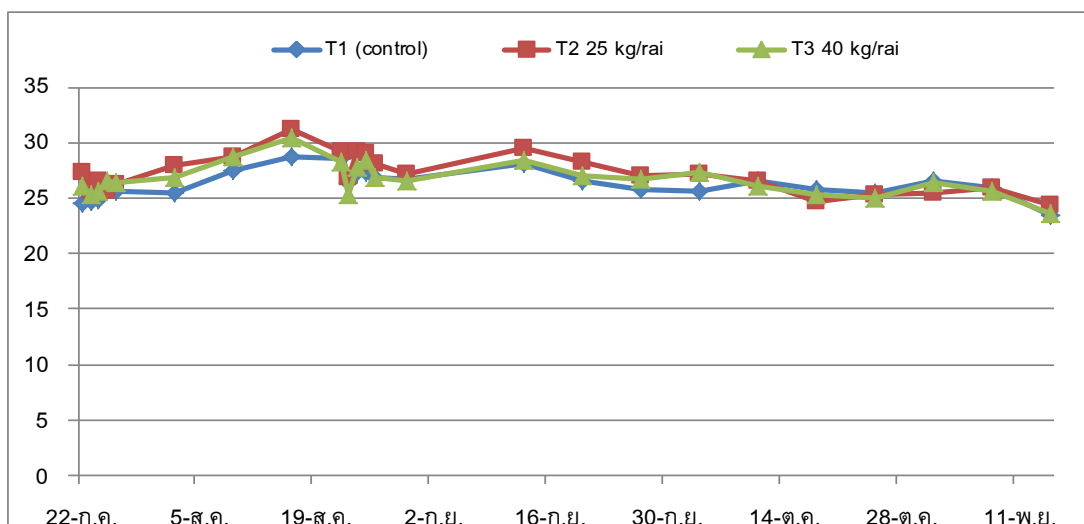


รูปที่ 4.7 เปอร์เซนต์ความชื้นในดิน

4.2.4.2 อุณหภูมิดิน

ตารางที่ 4.22 แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิดินที่ระดับ 5 เซนติเมตร

ครั้งที่	วัน เดือน ปี	T1 (control)	T2 (25 kg/rai)	T3 (40 kg/rai)
1	22-ก.ค.57	25	27	26
2	23-ก.ค.57	25	26	25
3	24-ก.ค.57	25	27	26
4	25-ก.ค.57	26	26	27
5	26-ก.ค.57	26	26	26
6	2-ส.ค.57	25	28	27
7	9-ส.ค.57	28	29	29
8	16-ส.ค.57	29	31	30
9	22-ส.ค.57	29	29	28
10	23-ส.ค.57	26	27	25
11	24-ส.ค.57	27	29	28
12	25-ส.ค.57	27	29	28
13	26-ส.ค.57	27	28	27
14	30-ส.ค.57	27	27	27
16	13-ก.ย.57	28	29	28
17	20-ก.ย.57	27	28	27
18	27-ก.ย.57	26	27	27
19	4-ต.ค.57	26	27	27
20	11-ต.ค.57	27	27	26
21	18-ต.ค.57	26	25	25
22	25-ต.ค.57	26	25	25
23	1-พ.ย. 57	27	25	26
24	8-พ.ย. 57	26	26	26
25	15-พ.ย.57	23	24	24



รูปที่ 4.8 อุณหภูมิดิน (องศาเซลเซียส)

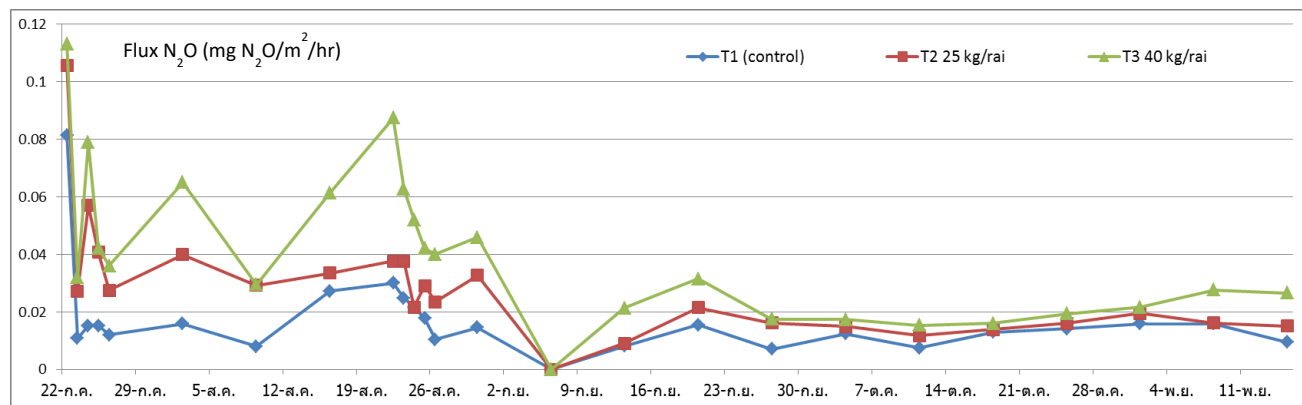
4.2.4.3 ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O Flux)

ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3) มีอัตราการการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สูงที่สุด รองลงมาได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และ ตำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1) มีค่าเฉลี่ย 0.042 ± 0.025 , 0.029 ± 0.02 และ 0.018 ± 0.015 mg N₂O/m²/hr ตามลำดับ (ตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.9) ส่วนปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จะสูงที่สุดในวันแรกของการใส่ปุ๋ยรอบที่ 2 และลดลงตามจำนวนวันที่ใส่ปุ๋ยมากขึ้น (ตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.9)

ตารางที่ 4.23 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณการปล่อยไนตรัสออกไซด์ค่า (N₂O Flux)

ครั้งที่	วัน เดือน ปี	T1 (control) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)	T2 (25 kg/rai) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)	T3 (40 kg/rai) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)
1	22-ก.ค.57	0.081	0.106	0.113
2	23-ก.ค.57	0.011	0.027	0.032
3	24-ก.ค.57	0.015	0.057	0.079
4	25-ก.ค.57	0.015	0.041	0.042
5	26-ก.ค.57	0.012	0.027	0.036
6	2-ส.ค.57	0.016	0.040	0.065
7	9-ส.ค.57	0.008	0.029	0.030
8	16-ส.ค.57	0.027	0.033	0.061
9	22-ส.ค.57	0.030	0.038	0.087
10	23-ส.ค.57	0.025	0.038	0.063
11	24-ส.ค.57	0.022	0.022	0.052
12	25-ส.ค.57	0.018	0.029	0.042
13	26-ส.ค.57	0.010	0.023	0.040
14	30-ส.ค.57	0.014	0.033	0.046
16	13-ก.ย.57	0.008	0.009	0.021

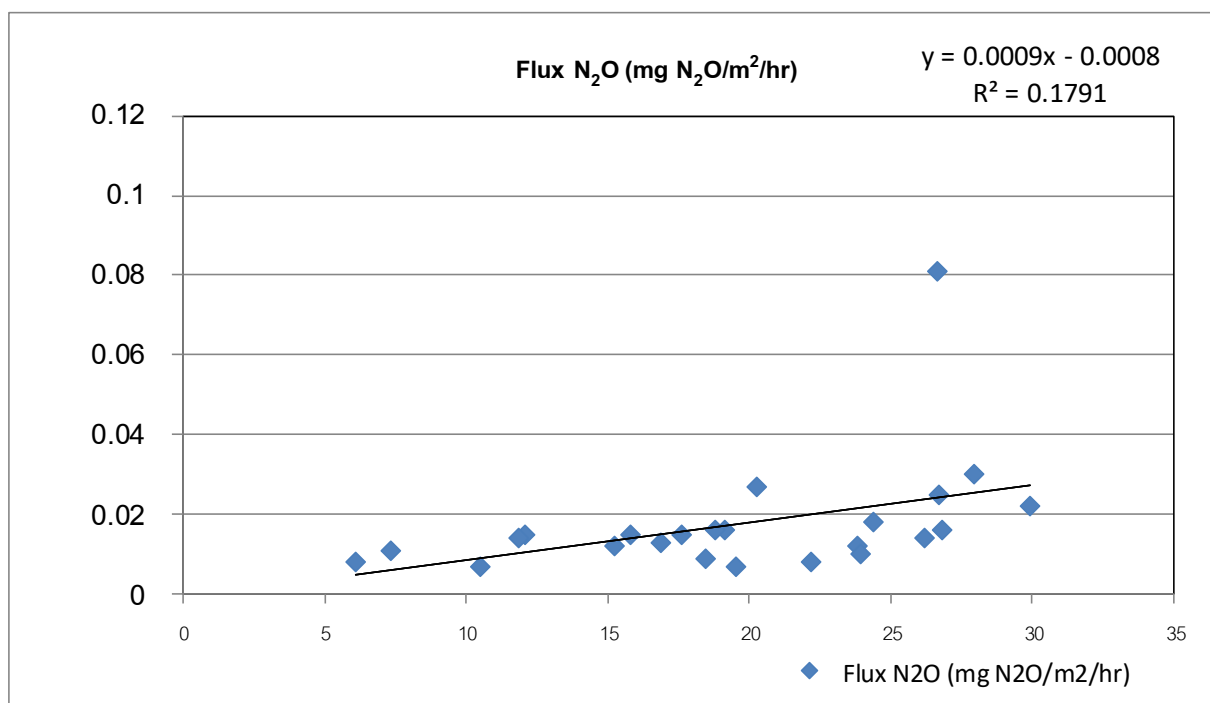
ครั้งที่	วัน เดือน ปี	T1 (control) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)	T2 (25 kg/rai) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)	T3 (40 kg/rai) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)
17	20-ก.ย.57	0.015	0.022	0.031
18	27-ก.ย.57	0.007	0.016	0.018
19	4-ต.ค.57	0.012	0.015	0.017
20	11-ต.ค.57	0.007	0.012	0.015
21	18-ต.ค.57	0.013	0.014	0.016
22	25-ต.ค.57	0.014	0.016	0.019
23	1-พ.ย.57	0.016	0.019	0.022
24	8-พ.ย.57	0.016	0.016	0.028
25	15-พ.ย.57	0.009	0.015	0.027
Mean		0.018	0.029	0.042
S.D.		0.015	0.020	0.025
N		24	24	24



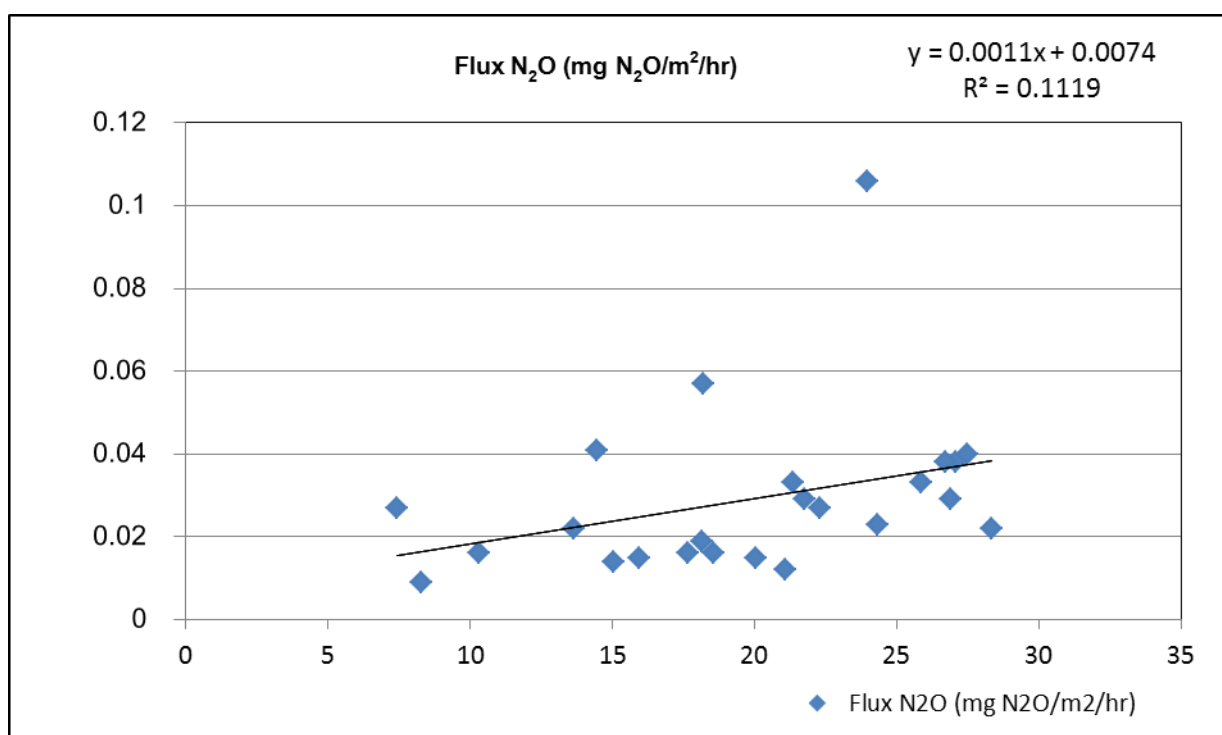
เดือนที่ 1	เดือนที่ 2	เดือนที่ 3	เดือนที่ 4
------------	------------	------------	------------

รูปที่ 4.9 ค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากดิน (N₂O Flux)

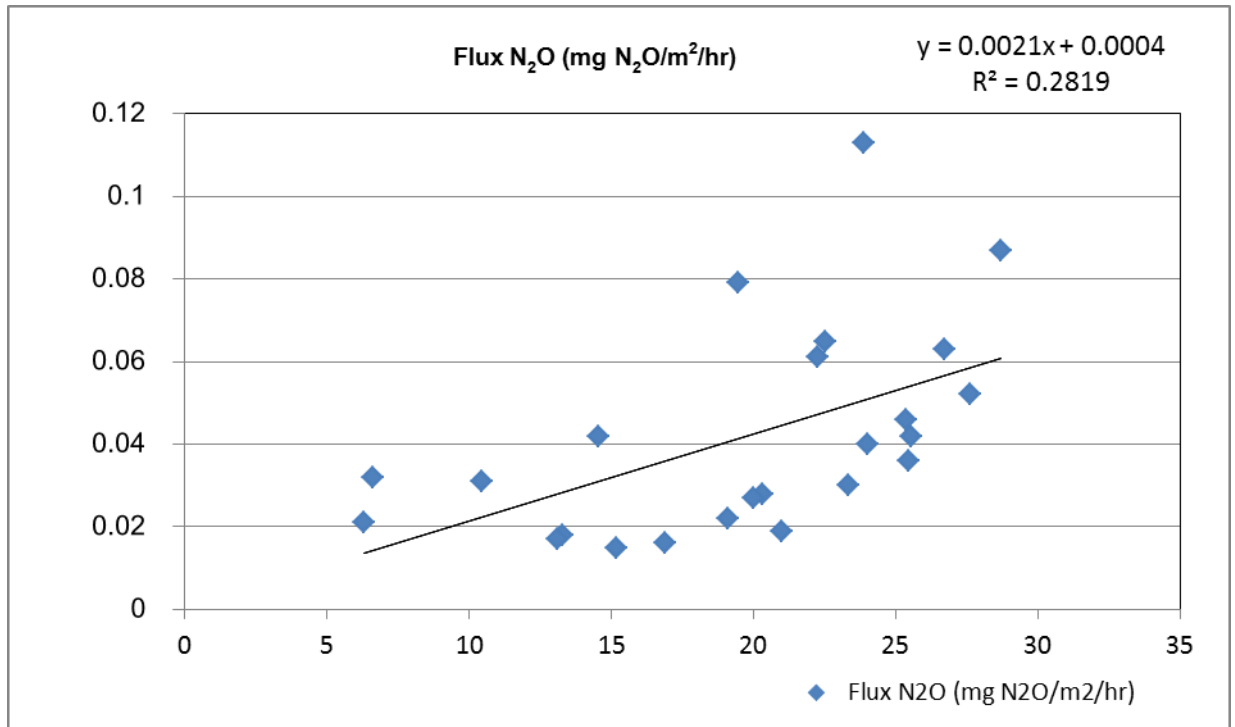
4.2.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับความชื้นในดิน
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับความชื้นในดิน พบว่า มีความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.10



ñ. Treatment 1



ŧ. Treatment 2

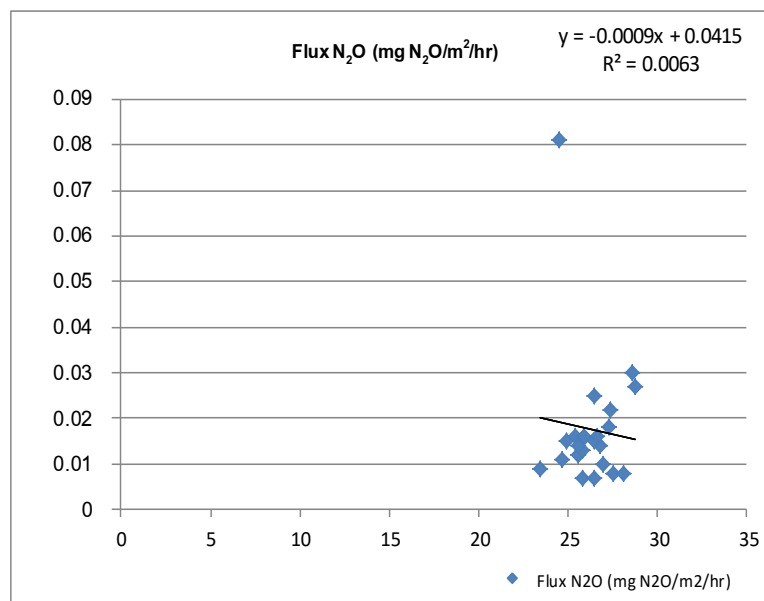


ค. Treatment 3

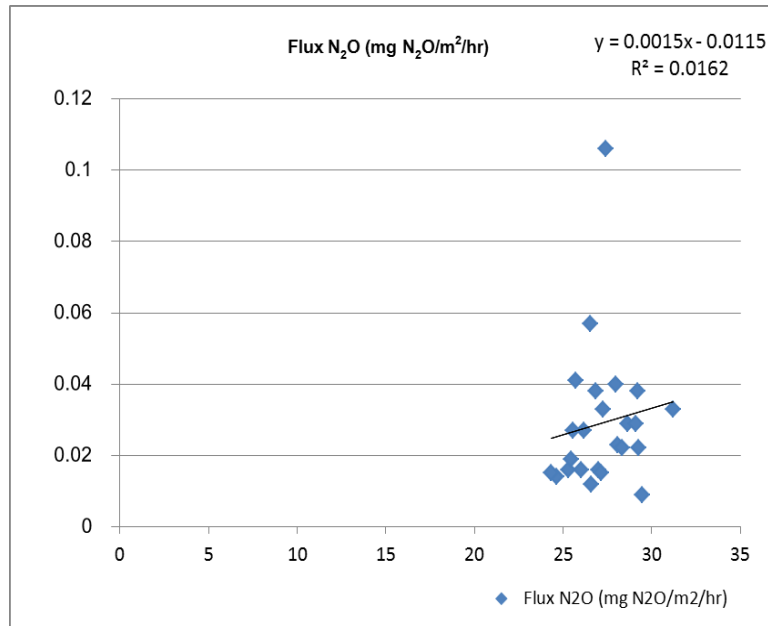
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับความชื้นในดิน

4.2.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับอุณหภูมิดิน

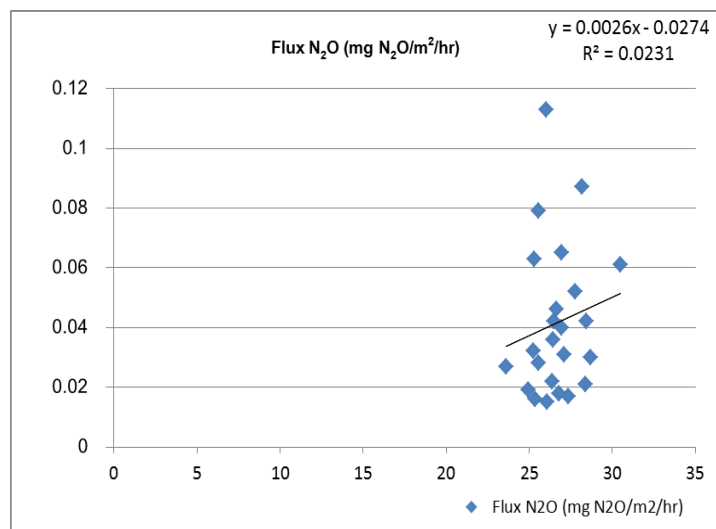
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับอุณหภูมิดินดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งมีความสัมพันธ์น้อยกว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับความชื้นในดิน



ก. Treatment 1



ข. Treatment 2



ค. Treatment 3

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับอุณหภูมิดิน
ที่ระดับความลึกดิน 5 เซนติเมตร

4.2.5 สรุปผลการทดลองในรอบการเพาะปลูกครั้งที่ 1

ผลการทดลองปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ พบว่า ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3) มีอัตราการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สูงสุด รองลงมา ได้แก่ ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และ ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1) ซึ่งแสดงผลในทำนองเดียวกันทั้งหมด ได้แก่ ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ ปริมาณชีวมวล การเจริญเติบโต และปริมาณผลผลิต

4.3 การศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ รอบการเพาะปลูกที่ 2

การศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ รอบการเพาะปลูกที่ 2 ในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ ถึง 5 มิถุนายน 2558 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 125 วัน ผลการศึกษา มีดังนี้

4.3.1 ตารางการเก็บข้อมูล

ตารางที่ 4.24 แสดงการเก็บข้อมูลในแปลงทดลองในรอบการเพาะปลูกที่ 2 (วันที่ 2 กุมภาพันธ์ ถึง 5 มิถุนายน 2558)

วัน เดือน ปี	กิจกรรม	หมายเหตุ
2 กุมภาพันธ์ 2558	ปลูกข้าวโพด สุวรรณ 4452 และใส่ปุ๋ยรองพื้น อัตรา 0 25 และ 40 กิโลกรัม/ไร่	
3 กุมภาพันธ์ 2558	ให้น้ำด้วยระบบสปริงเกอร์	
4 กุมภาพันธ์ 2558	พ่นสารเคมีกำจัดศัตรูพืช	
5 กุมภาพันธ์ 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization	♣
6 กุมภาพันธ์ 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization	♣
7 กุมภาพันธ์ 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization	♣
8 กุมภาพันธ์ 2558	ให้น้ำด้วยระบบสปริงเกอร์	
9 กุมภาพันธ์ 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization	♣
10 กุมภาพันธ์ 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization	♣
15 กุมภาพันธ์ 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization และวัดความสูงต้นข้าวโพด	♣
22 กุมภาพันธ์ 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization และวัดความสูงต้นข้าวโพด ทำ core เดือนกุมภาพันธ์	♣
1 มีนาคม 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization และวัดความสูงต้นข้าวโพด	♣
8 มีนาคม 2558	เก็บก๊าซ และวัดความสูงต้นข้าวโพด	♣
9 มีนาคม 2558	พ่นโคน	
11 มีนาคม 2558	ใส่ปุ๋ยโรยหน้า อัตรา 0, 25 และ 40 กิโลกรัม/ไร่	
12 มีนาคม 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization	♣
13 มีนาคม 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization	♣
14 มีนาคม 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization	♣
15 มีนาคม 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization และวัดความสูงต้นข้าวโพด และทำ core เดือนมีนาคม	♣
16 มีนาคม 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization	♣
21 มีนาคม 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization และวัดความสูงต้นข้าวโพด เก็บ Biomass ข้าวโพดรอบที่ 1 หลังใส่ปุ๋ย (ใบและลำต้น) และทำ core ที่รากพืช	♣
28 มีนาคม 2558	เก็บก๊าซ และ NH_3 Volatilization และวัดความสูงต้น	♣

วัน เดือน ปี	กิจกรรม	หมายเหตุ
	ข้าวโพด	
4 เมษายน 2558	เก็บก๊าซ และ NH ₃ Volatilization และวัดความสูงต้นข้าวโพด	♣
10 เมษายน 2558	เก็บก๊าซ และวัดความสูงต้นข้าวโพด	♣
25 เมษายน 2558	เก็บก๊าซ และวัดความสูงต้นข้าวโพด และ ทำ core เดือนเมษายน	♣
9 พฤษภาคม 2558	เก็บก๊าซ และ NH ₃ Volatilization และวัดความสูงต้นข้าวโพด	♣
16 พฤษภาคม 2558	เก็บก๊าซ และ NH ₃ Volatilization และวัดความสูงต้นข้าวโพด	♣
23 พฤษภาคม 2558	เก็บก๊าซ และ NH ₃ Volatilization และวัดความสูงต้นข้าวโพด	♣
30 พฤษภาคม 2558	เก็บก๊าซ และ NH ₃ Volatilization และวัดความสูงต้นข้าวโพด	♣
5 มิถุนายน 2558	เก็บเกี่ยวและเก็บข้อมูลปริมาณชีวมวลครั้งที่ 2	
เก็บตัวอย่างก๊าซ 23 ครั้ง ระยะเวลาปลูก 125 วัน		

4.3.2 ปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในดิน

ปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในดินทำการศึกษาทั้งหมด 5 ครั้งตั้งแต่ก่อนปลูกและเดือนละ 1 ครั้ง ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร ปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในดินมีปริมาณที่ค่อนข้างต่ำมีค่าอยู่ระหว่าง 4.41 ± 0.21 ถึง 5.68 ± 0.34 ตัน/ไร่ (ตารางที่ 4.25)

ตารางที่ 4.25 ค่าความหนาแน่นของดิน และปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในดิน

Treatment	ก่อนปลูก 2 ก.พ. 58		เดือน 1 22 ก.พ. 58		เดือน 2 15 มี.ค.58		เดือน 3 25 มี.ค.58		เดือน 4 23 พ.ค.58	
	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.
T1R1	1.13	4.77	1.28	5.41	1.17	4.94	1.35	5.70	1.09	4.60
T1R2	1.30	5.49	1.26	5.32	1.39	5.87	1.26	5.32	1.04	4.39
T1R3	1.05	4.44	1.40	5.91	1.35	5.70	1.34	5.66	1.04	4.39
T1R4	1.17	4.94	1.28	5.41	1.29	5.45	1.35	5.70	0.99	4.18
Mean ±S.D.	1.16± 0.11	4.91± 0.44	1.31± 0.06	5.51± 0.27	1.30± 0.09	5.49± 0.41	1.33± 0.05	5.60± 0.18	1.04± 0.04	4.39± 0.17
T2R1	1.25	5.28	1.28	5.41	1.36	5.74	1.39	5.87	0.97	4.10
T2R2	1.13	4.77	1.27	5.36	1.36	5.74	1.43	6.04	1.07	4.52
T2R3	1.11	4.69	1.22	5.15	1.29	5.45	1.43	6.04	1.06	4.48
T2R4	1.04	4.39	1.31	5.53	1.34	5.66	1.51	6.38	1.08	4.56
Mean ± S.D.	1.13± 0.09	4.78± 0.37	1.27± 0.04	5.36± 0.16	1.34± 0.03	5.65± 0.14	1.44± 0.05	6.08± 0.21	1.05± 0.05	4.41± 0.21
T3R1	1.21	5.11	1.36	5.74	1.28	5.41	1.43	6.04	1.09	4.60
T3R2	1.13	4.77	1.37	5.79	1.42	6.00	1.35	5.70	1.13	4.77
T3R3	1.08	4.56	1.23	5.20	1.27	5.36	1.45	6.12	1.06	4.48
T3R4	1.35	5.70	1.42	6.00	1.35	5.70	1.36	5.74	1.10	4.65
Mean ± S.D.	1.19± 0.12	5.04± 0.50	1.34± 0.08	5.68± 0.34	1.33± 0.07	5.62± 0.29	1.40± 0.05	5.90± 0.21	1.09± 0.03	4.63± 0.12

หมายเหตุ : Bulk หมายถึง Bulk density (ความหนาแน่นรวมของดิน), SOC หมายถึง Soil Organic Carbon ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในดิน (ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในดิน (กรัม/ตร.ม./ความลึก ซม.) = (ความลึก) × (% อินทรีย์คาร์บอน) × (ความหนาแน่นรวมของดิน) หน่วย ตัน/ไร่

4.3.3 การเจริญเติบโต

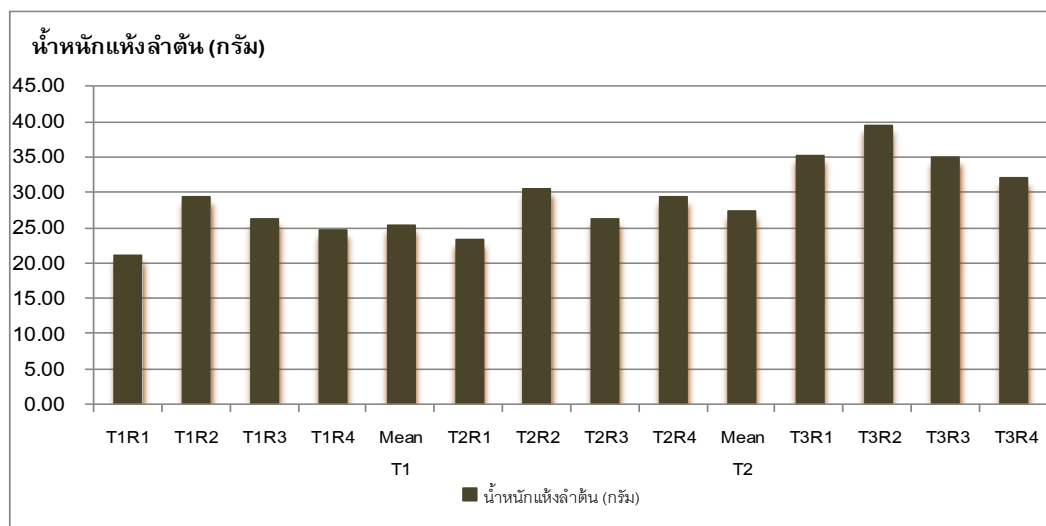
4.3.3.1 การเจริญเติบโตหลังจากใส่ปุ๋ยรอบที่ 2 เป็นเวลา 15 วัน

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวโพดในระยะ 50 วันหลังจากปลูก และเป็นช่วงที่ใส่ปุ๋ยรอบที่ 2 มาแล้วเป็นเวลา 15 วัน พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 ที่ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3) ซึ่งมีอัตราการใส่ปุ๋ยสูงที่สุดพบว่าการเจริญเติบโตมากที่สุด โดยวัดจากน้ำหนักแห้งของลำต้นมีค่าเฉลี่ย 35.49±3.11 กรัม (ตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.12) และการเจริญเติบโตที่รองลงมาได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และตำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1) มีค่าเฉลี่ยของน้ำหนักลำต้นแห้ง 27.39±3.24 กรัม และ 25.39±3.47 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.12)

ตารางที่ 4.26 แสดงการเจริญเติบโตของข้าวโพดระยะ 50 วันหลังจากมีการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 แล้ว 15 วัน ที่แปลงขนาด 1x1 เมตร (เก็บข้อมูล 21 มีนาคม 2558)

Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)
T1R1	21.09	T2R1	23.34	T3R1	35.33
T1R2	29.42	T2R2	30.57	T3R2	39.57
T1R3	26.33	T2R3	26.31	T3R3	35.05
T1R4	24.74	T2R4	29.35	T3R4	32.00
Mean±S.D.		Mean±S.D.	27.39±3.24	Mean±S.D.	35.49±3.11
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และ ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)



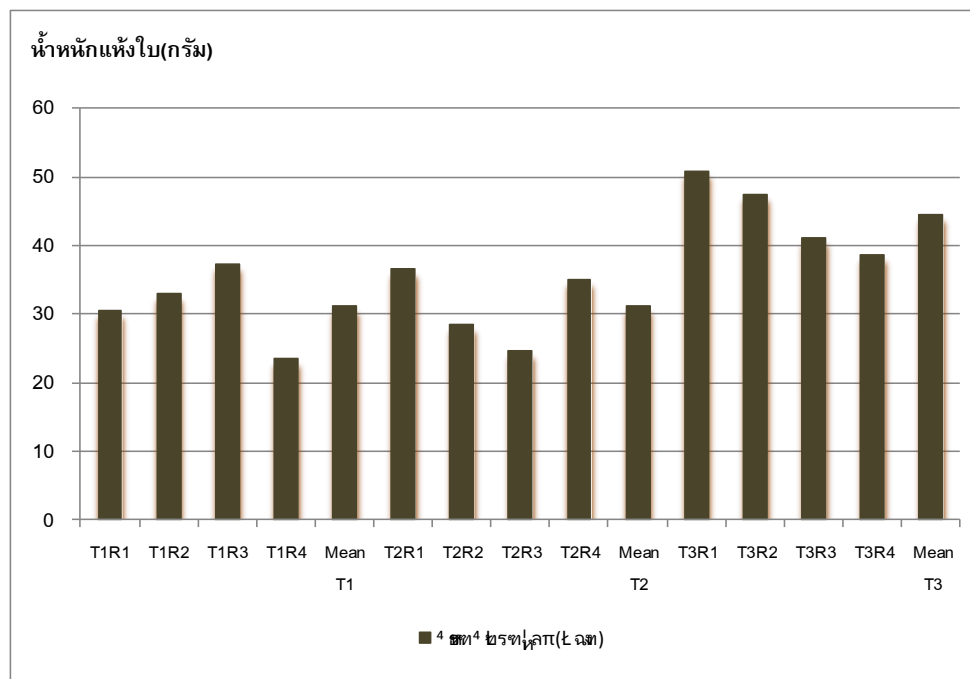
รูป

ที่ 4.12 แสดงการเจริญเติบโตของข้าวโพดระยะ 50 วันหลังจากมีการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 แล้ว 15 วัน (เก็บข้อมูลวันที่ 21 มีนาคม 2558)

ตารางที่ 4.27 แสดงการเจริญเติบโตของข้าวโพดระยะ 50 วันหลังจากมีการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 แล้ว 15 วัน ที่แปลงขนาด 1x1 เมตร (เก็บข้อมูล 21 มีนาคม 2558)

Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)
T1R1	30.54	T2R1	36.58	T3R1	50.91
T1R2	33.01	T2R2	28.54	T3R2	47.57
T1R3	37.46	T2R3	24.72	T3R3	41.12
T1R4	23.63	T2R4	35.15	T3R4	38.74
Mean±S.D.	31.16±5.78	Mean±S.D.	31.25±5.59	Mean±S.D.	44.58±5.63
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และ ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)



รูปที่ 4.13 แสดงการเจริญเติบโตของข้าวโพดระยะ 50 วันหลังจากมีการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 แล้ว 15 วัน (เก็บข้อมูลวันที่ 21 มีนาคม 2558)

4.3.3.2 น้ำหนักชีวมวลหลังเก็บเกี่ยว

ผลการศึกษากการเจริญเติบโตของข้าวโพดโดยแสดงผลในรูปของน้ำหนักชีวมวลหลังเก็บเกี่ยว ได้แก่ น้ำหนักสดหลังเก็บเกี่ยวของลำต้น ใบ ฟักและเมล็ด พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 ที่มีการใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3) มีอัตราการใส่ปุ๋ยสูงที่สุด พบว่า มีอัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุด โดยวัดจากน้ำหนักของลำต้นมีค่าเฉลี่ย 132.70 ± 13.87 กรัม ใบมีค่าเฉลี่ย 69.09 ± 2.36 กรัม น้ำหนักฟักและเมล็ดหลังเก็บเกี่ยวมีค่าเฉลี่ย 235.43 ± 5.39 กรัม น้ำหนักแห้งรวม (ต้น ใบ ฟักและเมล็ด หลังเก็บเกี่ยว) มีค่าเฉลี่ย 437.22 ± 20.02 กรัม และการเจริญเติบโตที่รองลงมาได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และตำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1) ตามลำดับ (ตารางที่ 4.28, 4.29, 4.30 และ 4.31)

ตารางที่ 4.28 แสดงน้ำหนักแห้งลำต้นหลังเก็บเกี่ยว ที่แปลงขนาด 1×1 เมตร (เก็บข้อมูล 5 มิถุนายน 2558)

Treatment	น้ำหนักแห้งลำต้น (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้งลำต้น (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้งลำต้น (กรัม)
T1R1	112.52	T2R1	49.56	T3R1	146.56
T1R2	90.24	T2R2	99.14	T3R2	111.38
T1R3	106.85	T2R3	84.21	T3R3	129.55
T1R4	113.33	T2R4	67.58	T3R4	143.30
Mean±S.D.	105.74±9.29	Mean±S.D.	75.12±18.50	Mean±S.D.	132.70±13.87
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ตำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และตำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

ตารางที่ 4.29 แสดงน้ำหนักแห้งของใบหลังเก็บเกี่ยว ที่แปลงขนาด 1×1 เมตร (เก็บข้อมูล 5 มิถุนายน 2558)

Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)
T1R1	58.83	T2R1	46.74	T3R1	72.62
T1R2	48.56	T2R2	53.83	T3R2	68.35
T1R3	59.00	T2R3	44.90	T3R3	66.04
T1R4	50.69	T2R4	41.68	T3R4	69.34
Mean±S.D.	54.27±4.71	Mean±S.D.	46.79±4.45	Mean±S.D.	69.09±2.36
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และ ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

ตารางที่ 4.30 แสดงน้ำหนักฝักและเมล็ดหลังเก็บเกี่ยว (เก็บข้อมูล 5 มิถุนายน 2558)

Treatment	น้ำหนัก ฝักและเมล็ด (กรัม)	Treatment	น้ำหนัก ฝักและเมล็ด (กรัม)	Treatment	น้ำหนัก ฝักและเมล็ด (กรัม)
T1R1	218.65	T2R1	161.93	T3R1	241.16
T1R2	186.33	T2R2	208.35	T3R2	226.80
T1R3	213.72	T2R3	185.18	T3R3	238.40
T1R4	210.45	T2R4	185.58	T3R4	235.36
Mean±S.D.	207.29±12.45	Mean±S.D.	185.26±16.42	Mean±S.D.	235.43±5.39
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และ ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

ตารางที่ 4.31 แสดงน้ำหนักแห้งรวม (ต้น, ใบ, ฝักและเมล็ด หลังเก็บเกี่ยว) ที่แปลงขนาด 1×1 เมตร (เก็บข้อมูล 5 มิถุนายน 2558)

Treatment	น้ำหนักแห้ง รวม (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง รวม (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง รวม (กรัม)
T1R1	390.00	T2R1	258.23	T3R1	460.34
T1R2	325.13	T2R2	361.32	T3R2	406.53
T1R3	379.57	T2R3	314.29	T3R3	434.00
T1R4	374.48	T2R4	294.83	T3R4	448.00
Mean±S.D.	367.30±24.98	Mean±S.D.	307.17±37.18	Mean±S.D.	437.22±20.02
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และ ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

4.3.3 3. การเจริญเติบโตตั้งแต่วันที่ 2 กุมภาพันธ์- 30 เมษายน 2558

การเจริญเติบโตพบว่า มีการเจริญเติบโตที่แสดงผลแตกต่างกันอย่างเด่นชัดในแต่ละรอบเดือน โดยข้าวโพดจะเริ่มออกฝักในเดือนที่ 2 และเก็บเกี่ยวผลผลิตในเดือนที่ 4 (รูปที่ 4.14) ส่วนการ

เจริญเติบโตที่แสดงผลในรูปของ ความสูงเฉลี่ย จำนวนใบ และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น พบว่า เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ตำรับการทดลองที่ 3 มีอัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุด (รูปที่ 4.15)



Treatment 1 เริ่มปลูก



Treatment 2 เริ่มปลูก



Treatment 3 เริ่มปลูก



Treatment 1 เดือนที่ 1



Treatment 2 เดือนที่ 1



Treatment 3 เดือนที่ 1



Treatment 1 เดือนที่ 2



Treatment 2 เดือนที่ 2



Treatment 3 เดือนที่ 2



Treatment 1 เดือนที่ 3



Treatment 2 เดือนที่ 3



Treatment 3 เดือนที่ 3



Treatment 1 เดือนที่ 4

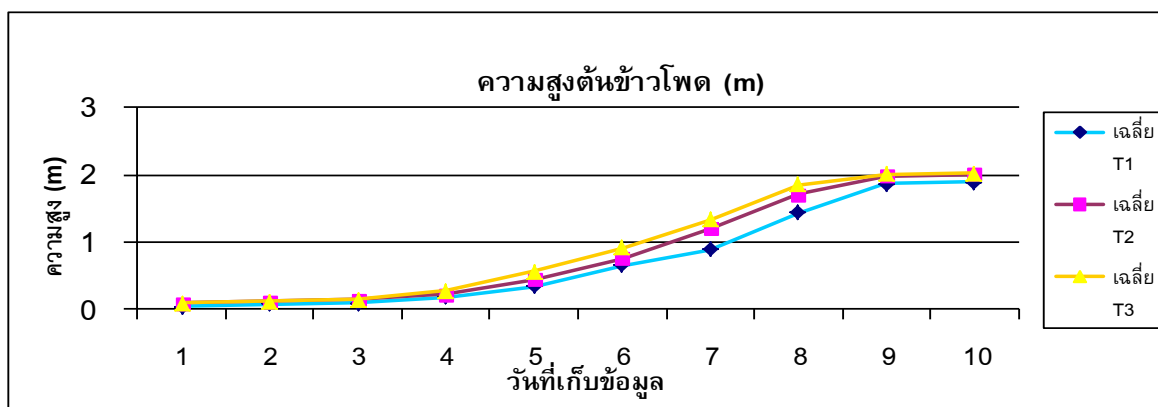


Treatment 2 เดือนที่ 4



Treatment 3 เดือนที่ 4

รูปที่ 4.14 แสดงการเจริญเติบโตของข้าวโพด



รูปที่ 4.15 แสดงการเจริญเติบโต (ความสูงเฉลี่ย หน่วย เมตร)

4.3.3.4 ปริมาณผลผลิต

ปริมาณผลผลิตซึ่งได้เก็บรวบรวมผลผลิตทั้งแปลงทดลองของน้ำหนักรวมเมล็ดหลังสี พบว่า การทดลองที่ 3 มีค่าสูงที่สุด 861.5 กิโลกรัมต่อไร่ รองลงมา ได้แก่ การทดลองที่ 2 และ การควบคุม มีค่า 713 กิโลกรัมต่อไร่ และ 695 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.32)

ตารางที่ 4.32 แสดงปริมาณผลผลิต (เก็บข้อมูล 5 มิถุนายน 2558)

Treatment	ก่อนสี		หลังสี
	จำนวนฝัก (ฝัก)	น้ำหนักรวมฝัก (กก./ไร่)	น้ำหนักรวมเมล็ด (กก./ไร่)
T1	863	900	695
T2	869	923	713
T3	946	1,080.5	861.5

หมายเหตุ : การทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), การทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

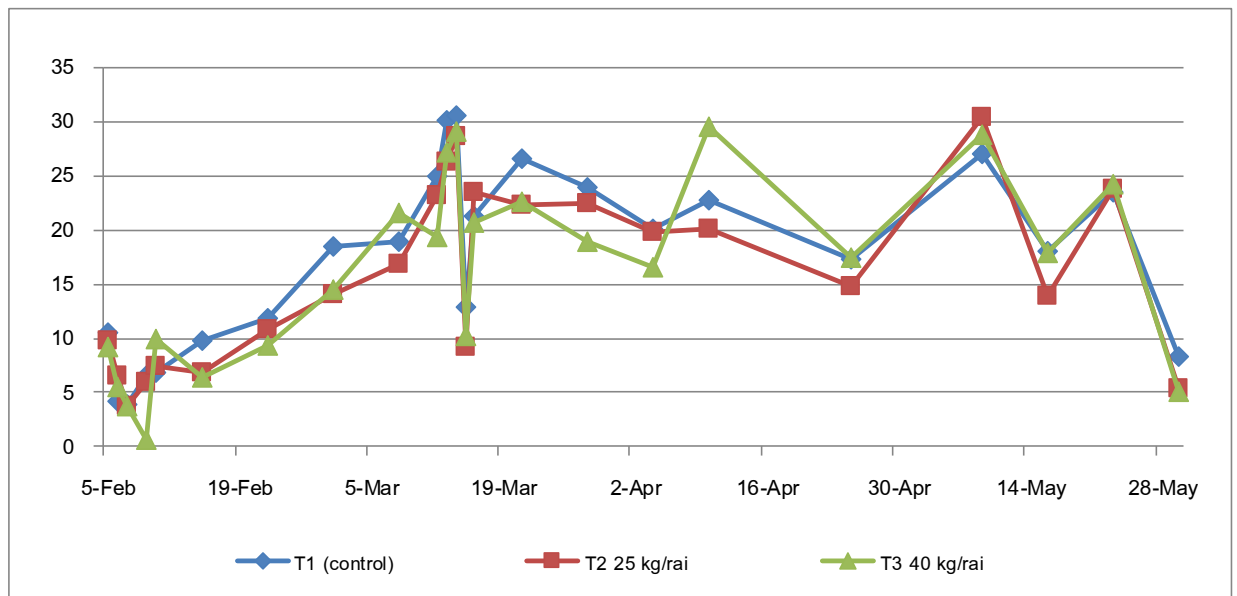
4.3.4 N₂O flux

4.3.4.1 ความชื้นในดิน

ความชื้นของดินขณะที่ทำการทดลองซึ่งจะสอดคล้องกับอุณหภูมิของดิน (ตารางที่ 4.33 และ 4.34 รูปที่ 4.16 และ 4.17)

ตารางที่ 4.33 แสดงค่าเฉลี่ยความชื้นในดิน (%)

ครั้งที่	วัน เดือน ปี	T1 (control) (% moisture)	T2 (25 kg/rai) (% moisture)	T3 (40 kg/rai) (% moisture)
1	5-ก.พ.58	10.57	9.76	9.14
2	6-ก.พ.58	4.23	6.61	5.47
3	7-ก.พ.58	3.88	3.7	3.77
4	9-ก.พ.58	6.49	5.96	0.61
5	10-ก.พ.58	6.84	7.47	9.97
6	15-ก.พ.58	9.81	6.79	6.37
7	22-ก.พ.58	11.92	10.89	9.42
8	1-มี.ค.58	18.52	14.05	14.54
9	8-มี.ค.58	18.98	16.92	21.61
10	12-มี.ค.58	24.94	23.26	19.36
11	13-มี.ค.58	30.13	26.39	27.19
12	14-มี.ค.58	30.59	28.74	29.13
13	15-มี.ค.58	12.86	9.22	10.25
14	16-มี.ค.58	21.37	23.54	20.78
15	21-มี.ค.58	26.56	22.32	22.64
16	28-มี.ค.58	23.91	22.42	19.02
17	4-เม.ย.58	20.15	19.84	16.59
18	10-เม.ย.58	22.73	20.16	29.62
19	25-เม.ย.58	17.34	14.77	17.46
20	9-พ.ค.58	27.14	30.40	28.81
21	16-พ.ค.58	18.04	13.93	17.9
22	23-พ.ค.58	23.46	23.88	24.27
23	30-พ.ค.58	8.32	5.33	5.02

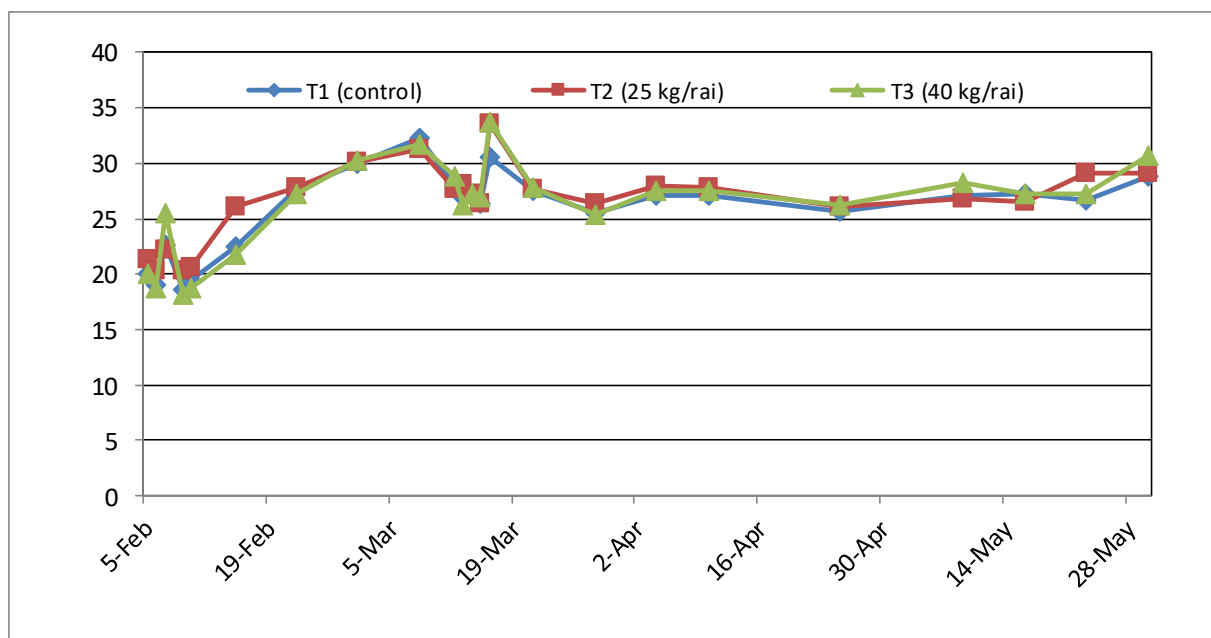


รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์ความชื้นในดิน

4.3.4.2 อุณหภูมิดิน

ตารางที่ 4.34 แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิดินที่ระดับ 5 เซนติเมตร

ครั้งที่	วัน เดือน ปี	T1 (control)	T2 (25 kg/rai)	T3 (40 kg/rai)
1	5-ก.พ.58	20.06	21.38	20.00
2	6-ก.พ.58	19.06	20.38	18.75
3	7-ก.พ.58	22.69	22.13	25.56
4	9-ก.พ.58	18.63	20.28	18.13
5	10-ก.พ.58	19.44	20.63	18.69
6	15-ก.พ.58	22.50	26.06	21.69
7	22-ก.พ.58	27.72	27.81	27.19
8	1-มี.ค.58	29.94	30.06	30.31
9	8-มี.ค.58	32.25	31.31	31.75
10	12-มี.ค.58	28.00	27.69	28.88
11	13-มี.ค.58	27.00	28.13	26.19
12	14-มี.ค.58	27.19	27.31	27.25
13	15-มี.ค.58	26.41	26.44	26.94
14	16-มี.ค.48	30.56	33.56	33.69
15	21-มี.ค.58	27.56	27.69	27.88
16	28-มี.ค.58	25.56	26.44	25.38
17	4-เม.ย.58	27.03	27.94	27.53
18	10-เม.ย.58	27.06	27.81	27.50
19	25-เม.ย.58	25.69	26.06	26.19
20	9-พ.ค.58	27.13	26.81	28.19
21	16-พ.ค.58	27.25	26.5	27.25
22	23-พ.ค.58	26.69	29.13	27.25
23	30-พ.ค.58	28.78	29.13	30.69



รูปที่ 4.17 อุณหภูมิดิน (องศาเซลเซียส)

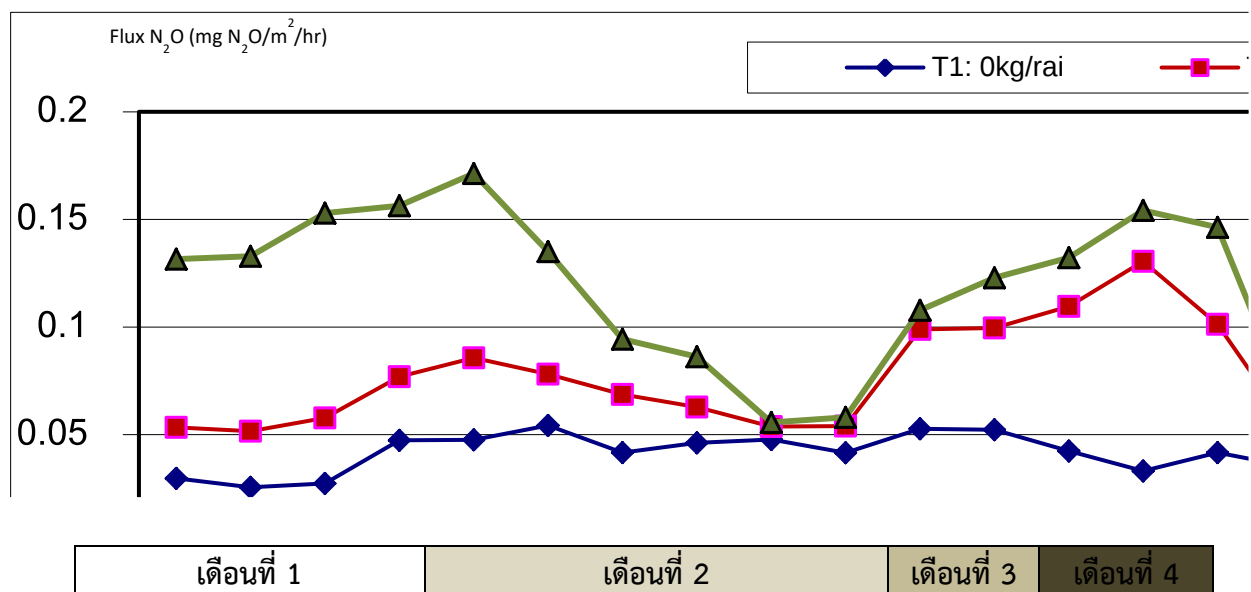
4.3.4.3 ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O Flux)

ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ พบว่า ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3) มีอัตราการการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และ ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1) มีค่าเฉลี่ย 0.109 ± 0.047 , 0.072 ± 0.030 และ 0.040 ± 0.011 mg N₂O/m²/hr ตามลำดับ (ตารางที่ 4.35 และ รูปที่ 4.18) ส่วนปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จะสูงที่สุดในวันแรกของการใส่ปุ๋ยรอบที่ 2 และลดลงตามจำนวนวันที่ใส่ปุ๋ยมากขึ้น (ตารางที่ 4.35 และรูปที่ 4.19)

ตารางที่ 4.35 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ค่า (N₂O Flux)

ครั้งที่	วัน เดือน ปี	T1 (control) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)	T2 (25 kg/rai) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)	T3 (40 kg/rai) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)
1	5-ก.พ.58	0.030	0.053	0.132
2	6-ก.พ.58	0.026	0.052	0.133
3	7-ก.พ.58	0.027	0.058	0.153
4	9-ก.พ.58	0.047	0.077	0.156
5	10-ก.พ.58	0.048	0.086	0.171
6	15-ก.พ.58	0.054	0.078	0.135
7	22-ก.พ.58	0.042	0.069	0.094
8	1-มี.ค.58	0.046	0.063	0.086
9	8-มี.ค.58	0.048	0.054	0.056

ครั้งที่	วัน เดือน ปี	T1 (control) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)	T2 (25 kg/rai) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)	T3 (40 kg/rai) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)
10	12-มี.ค.58	0.042	0.054	0.058
11	13-มี.ค.58	0.053	0.099	0.108
12	14-มี.ค.58	0.052	0.100	0.123
13	15-มี.ค.58	0.042	0.110	0.132
14	16-มี.ค.48	0.033	0.131	0.154
15	21-มี.ค.58	0.042	0.101	0.146
16	28-มี.ค.58	0.035	0.052	0.061
17	4-เม.ย.58	0.022	0.025	0.033
18	10-เม.ย.58	0.024	0.026	0.033
19	25-เม.ย.58	0.024	0.024	0.029
20	9-พ.ค.58	0.011	0.013	0.012
21	16-พ.ค.58	0.027	0.031	0.040
22	23-พ.ค.58	0.011	0.009	0.017
23	30-พ.ค.58	0.012	0.017	0.016
Mean		0.035	0.060	0.090
S.D.		0.014	0.034	0.054
N		23	23	23



รูปที่ 4.18 ค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากดิน (N₂O Flux)

4.3.5 สรุปผลการทดลองในรอบการเพาะปลูกครั้งที่ 2

ผลการทดลองปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ พบว่า ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3) มีอัตราการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สูงสุด รองลงมา ได้แก่ ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และ ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1) ซึ่งแสดงผลในทำนองเดียวกันทั้งหมด ได้แก่ ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ ปริมาณชีวมวล การเจริญเติบโต และปริมาณผลผลิต

4.4 การศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ รอบการเพาะปลูกที่ 3

การศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ รอบการเพาะปลูกที่ 3 ใน วันที่ 23 กรกฎาคม ถึง 27 พฤศจิกายน 2558 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 116 วัน ผลการศึกษา มีดังนี้

4.4.1 ตารางการเก็บข้อมูล

ตารางที่ 4.36 แสดงการเก็บข้อมูลในแปลงทดลองในรอบการเพาะปลูกที่ 3 (วันที่ 23 กรกฎาคม ถึง 27 พฤศจิกายน 2558)

วัน เดือน ปี	กิจกรรม	หมายเหตุ
23 กรกฎาคม 2558	เก็บตัวอย่างดินก่อนทำการทดลอง ความชื้น ความหนาแน่นของดิน	
25 กรกฎาคม 2558	ไถเตรียมแปลงทดลอง	
3 สิงหาคม 2558	วางฐานอุปกรณ์ก่อนทำการทดลอง	
4 สิงหาคม 2558	ปลูกข้าวโพดสุวรรณ 4452 ใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 รองพื้นสูตร 16-20-0 ตามอัตรากำหนด	
5 สิงหาคม 2558	พ่นยากำจัดวัชพืช	
8-12 สิงหาคม 2558	เก็บตัวอย่างก๊าซ หลังใส่ปุ๋ย	♣♣♣♣♣
15 สิงหาคม 2558	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และวัดการเจริญเติบโต รายสัปดาห์	♣
28 สิงหาคม 2558	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และวัดการเจริญเติบโต รายสัปดาห์	♣
4 กันยายน 2558	ทำร่นพูนโคน กำจัดวัชพืชและ ใส่ปุ๋ยรอบที่ 2 ใส่ปุ๋ยโรยหน้าสูตร 46-0-0 ตามอัตรากำหนด	
5-9 กันยายน 2558	เก็บตัวอย่างก๊าซ	♣♣♣♣♣
19 กันยายน 2558	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และวัดการเจริญเติบโต รายสัปดาห์ เก็บข้อมูลปริมาณชีวมวลครั้งที่ 1	♣
10 ตุลาคม 2558	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และวัดการเจริญเติบโต รายสัปดาห์	♣
24 ตุลาคม 2558	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และวัดการเจริญเติบโต รายสัปดาห์	♣
8 พฤศจิกายน 2558	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และวัดการเจริญเติบโต รายสัปดาห์	♣
21 พฤศจิกายน 2558	เก็บตัวอย่างก๊าซ ดิน และวัดการเจริญเติบโต รายสัปดาห์	♣
23 พฤศจิกายน 2558	เก็บข้อมูลปริมาณชีวมวลครั้งที่ 2	
27 พฤศจิกายน 2558	เก็บเกี่ยวผลผลิต	
รวมเก็บตัวอย่างก๊าซ 17 ครั้ง ระยะเวลาปลูกทั้งหมด 116 วัน		

4.4.2 ปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในดิน

ปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในดินทำการศึกษาทั้งหมด 4 ครั้งตั้งแต่ก่อนปลูกและเดือนละ 1 ครั้ง เดือนที่ 1-4 ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร ปริมาณคาร์บอนที่เก็บกักในดินมีปริมาณที่ค่อนข้างต่ำมีค่าอยู่ระหว่าง 3.66 ± 0.22 ถึง 5.50 ± 0.41 ตัน/ไร่ (ตารางที่ 4.37)

ตารางที่ 4.37 ความหนาแน่นของดิน และปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในดิน

Treatment	ก่อนปลูก 23 ก.ค. 58		เดือน 1 15 ส.ค. 58		เดือน 2 5 ก.ย. 58		เดือน 3 24 ต.ค. 58		เดือน 4 21 พ.ย. 58	
	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.	Bulk (g/cm ³)	SOC 30 cm.
T1R1	1.15	4.84	1.31	5.55	1.26	5.33	0.88	3.71	0.99	4.18
T1R2	1.33	5.61	1.44	6.07	1.26	5.30	1.01	4.28	0.93	3.93
T1R3	1.19	5.04	1.27	5.35	1.13	4.78	0.83	3.52	0.95	4.01
T1R4	1.20	5.09	1.08	4.55	1.22	5.17	0.90	3.79	1.00	4.22
Mean $\pm$ S.D.	1.22 $\pm$ 0.08	5.15 $\pm$ 0.33	1.13 $\pm$ 0.15	5.38 $\pm$ 0.63	1.22 $\pm$ 0.06	5.15 $\pm$ 0.26	0.91 $\pm$ 0.08	3.83 $\pm$ 0.33	0.97 $\pm$ 0.04	4.09 $\pm$ 0.14
T2R1	1.23	5.22	1.26	5.34	1.21	5.12	0.96	4.08	0.97	4.10
T2R2	1.20	5.07	1.40	5.90	1.23	5.18	0.87	3.66	1.05	4.41
T2R3	1.23	5.20	1.36	5.75	1.26	5.34	0.85	3.59	1.05	4.43
T2R4	1.07	4.52	1.19	5.01	1.13	4.77	0.83	3.49	1.04	4.37
Mean $\pm$ S.D.	1.18 $\pm$ 0.08	5.00 $\pm$ 0.33	1.30 $\pm$ 0.10	5.50 $\pm$ 0.41	1.21 $\pm$ 0.06	5.10 $\pm$ 0.24	0.88 $\pm$ 0.06	3.70 $\pm$ 0.26	1.02 $\pm$ 0.04	4.33 $\pm$ 0.16
T3R1	1.19	5.05	1.28	5.41	1.13	4.77	0.88	3.70	1.05	4.43
T3R2	1.17	4.93	1.30	5.47	1.26	5.34	0.83	3.49	1.09	4.59
T3R3	1.04	4.39	1.20	5.06	1.14	4.81	0.83	3.49	1.01	4.26
T3R4	1.18	4.96	1.19	5.03	1.28	5.40	0.94	3.95	1.07	4.54
Mean $\pm$ S.D.	1.14 $\pm$ 0.07	4.83 $\pm$ 0.30	1.24 $\pm$ 0.05	5.24 $\pm$ 0.23	1.20 $\pm$ 0.08	5.08 $\pm$ 0.34	0.87 $\pm$ 0.05	3.66 $\pm$ 0.22	1.05 $\pm$ 0.03	4.45 $\pm$ 0.15

หมายเหตุ : Bulk หมายถึง Bulk density (ความหนาแน่นรวมของดิน), SOC หมายถึง Soil Organic Carbon ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในดิน (ปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในดิน (กรัม/ตร.ม./ความลึก ซม.) = (ความลึก) $\times$ (% อินทรีย์คาร์บอน) $\times$ (ความหนาแน่นรวมของดิน) หน่วย ตัน/ไร่

4.4.3 การเจริญเติบโต

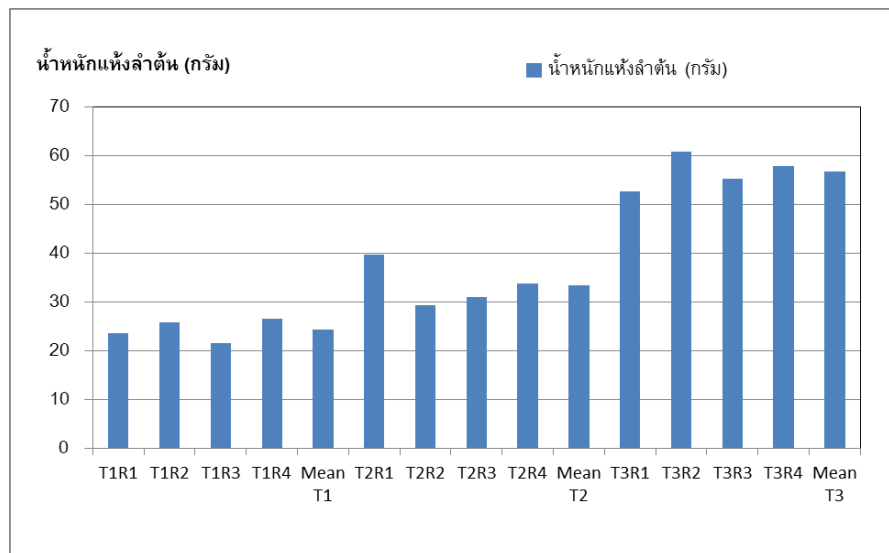
4.4.3.1 การเจริญเติบโตหลังจากใส่ปุ๋ยรอบที่ 2 เป็นเวลา 15 วัน

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวโพดในระยะ 50 วันหลังจากปลูก และเป็นช่วงที่ใส่ปุ๋ยรอบที่ 2 มาแล้วเป็นเวลา 15 วัน พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 ที่ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3) ซึ่งมีอัตราการใส่ปุ๋ยสูงที่สุดพบว่าการเจริญเติบโตมากที่สุด โดยวัดจากน้ำหนักแห้งของลำต้นมีค่าเฉลี่ย 56.70 ± 3.01 กรัม (ตารางที่ 4.38 และรูปที่ 4.19) และการเจริญเติบโตที่รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และตำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1) มีค่าเฉลี่ยของน้ำหนักลำต้นแห้ง 33.51 ± 3.92 กรัม และ 24.44 ± 1.98 กรัม ตามลำดับ ส่วนของน้ำหนักใบก็เป็นไปในแนวทางเดียวกัน ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 3 มีน้ำหนักใบแห้ง 57.24 ± 5.10 กรัม และ รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 2 และ 1 ตามลำดับ มีน้ำหนักใบแห้ง 48.27 ± 4.19 กรัม และ 42.64 ± 2.32 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.38 และรูปที่ 4.19)

ตารางที่ 4.38 แสดงการเจริญเติบโตของข้าวโพดระยะ 50 หลังจากมีการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 แล้ว 15 วัน ที่แปลงขนาด 1×1 เมตร (เก็บข้อมูล 19 กันยายน 2558)

Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)
T1R1	23.70	T2R1	39.69	T3R1	52.75
T1R2	25.97	T2R2	29.33	T3R2	60.87
T1R3	21.54	T2R3	31.13	T3R3	55.30
T1R4	26.54	T2R4	33.88	T3R4	57.87
Mean±S.D.	24.44±1.98	Mean±S.D.	33.51±3.92	Mean±S.D.	56.70±3.01
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และ ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)



รูปที่ 4.19 แสดงการเจริญเติบโตของข้าวโพดระยะ 50 วันหลังจากมีการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 แล้ว 15 วัน (เก็บข้อมูล 19 กันยายน 2558)

ตารางที่ 4.39 แสดงการเจริญเติบโตของข้าวโพดระยะ 50 หลังจากมีการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 แล้ว 15 วัน ที่แปลงขนาด 1×1 เมตร (เก็บข้อมูล 19 กันยายน 2558)

Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)
T1R1	39.42	T2R1	48.30	T3R1	59.72
T1R2	43.38	T2R2	41.50	T3R2	63.46
T1R3	45.82	T2R3	50.76	T3R3	49.61
T1R4	41.94	T2R4	52.53	T3R4	56.16
Mean±S.D.	42.64±2.32	Mean±S.D.	48.27±4.19	Mean±S.D.	57.24±5.10
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และ ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

4.4.3.2 น้ำหนักชีวมวลหลังเก็บเกี่ยว

ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวโพดโดยแสดงผลในรูปของน้ำหนักชีวมวลหลังเก็บเกี่ยว ได้แก่ น้ำหนักแห้งหลังเก็บเกี่ยวของลำต้น ใบ ฝักและเมล็ด พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 ที่มีการใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3) มีอัตราการใส่ปุ๋ยสูงที่สุด พบว่ามีอัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุด โดยวัดจากน้ำหนักของลำต้นมีค่าเฉลี่ย 81.10 ± 11.44 กรัม ใบมีค่าเฉลี่ย 64.45 ± 3.52 กรัม น้ำหนักฝักและเมล็ดหลังเก็บเกี่ยวมีค่าเฉลี่ย 241.49 ± 11.09 กรัม น้ำหนักแห้งรวม (ต้น ใบ ฝักและเมล็ด หลังเก็บเกี่ยว) มีค่าเฉลี่ย 387.04 ± 16.67 กรัม และการเจริญเติบโตที่รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และตำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1) ตามลำดับ (ตารางที่ 4.40, 4.41 4.42 และ 4.43)

ตารางที่ 4.40 แสดงน้ำหนักแห้งลำต้นหลังเก็บเกี่ยว ที่แปลงขนาด 1×1 เมตร (เก็บข้อมูล 23 พฤศจิกายน 2558)

Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ลำต้น (กรัม)
T1R1	21.14	T2R1	67.11	T3R1	85.52
T1R2	75.52	T2R2	21.96	T3R2	64.63
T1R3	42.63	T2R3	87.32	T3R3	78.18
T1R4	67.39	T2R4	94.83	T3R4	96.07
Mean±S.D.	51.67±21.39	Mean±S.D.	67.81±28.39	Mean±S.D.	81.10±11.44
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ตำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และตำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

ตารางที่ 4.41 แสดงน้ำหนักแห้งใบหลังเก็บเกี่ยว ที่แปลงขนาด 1×1 เมตร (เก็บข้อมูล 23 พฤศจิกายน 2558)

Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง ใบ (กรัม)
T1R1	52.66	T2R1	70.90	T3R1	59.60
T1R2	55.93	T2R2	39.00	T3R2	64.90
T1R3	44.59	T2R3	67.45	T3R3	69.49
T1R4	39.95	T2R4	56.96	T3R4	63.82
Mean±S.D.	48.28±6.34	Mean±S.D.	58.58±12.41	Mean±S.D.	64.45±3.52
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ตำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และตำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

ตารางที่ 4.42 แสดงน้ำหนักฝักและเมล็ดหลังเก็บเกี่ยว (เก็บข้อมูล 23 พฤศจิกายน 2558)

Treatment	น้ำหนัก ฝักและเมล็ด (กรัม)	Treatment	น้ำหนัก ฝักและเมล็ด (กรัม)	Treatment	น้ำหนัก ฝักและเมล็ด (กรัม)
T1R1	195.66	T2R1	234.12	T3R1	224.78
T1R2	200.97	T2R2	186.94	T3R2	248.19
T1R3	201.58	T2R3	272.66	T3R3	238.80
T1R4	142.73	T2R4	260.34	T3R4	254.18
Mean±S.D.	185.24±24.65	Mean±S.D.	238.51±32.87	Mean±S.D.	241.49±11.09
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และ ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

ตารางที่ 4.43 แสดงน้ำหนักแห้งรวม (ต้น, ใบ, ฝักและเมล็ด หลังเก็บเกี่ยว) ที่แปลงขนาด 1×1 เมตร (เก็บข้อมูล 23 พฤศจิกายน 2558)

Treatment	น้ำหนักแห้ง รวม (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง รวม (กรัม)	Treatment	น้ำหนักแห้ง รวม (กรัม)
T1R1	307.93	T2R1	372.13	T3R1	369.90
T1R2	318.39	T2R2	247.90	T3R2	377.72
T1R3	359.88	T2R3	427.42	T3R3	386.47
T1R4	367.67	T2R4	412.13	T3R4	414.06
Mean±S.D.	338.47±25.73	Mean±S.D.	364.90±70.50	Mean±S.D.	387.04±16.67
N	12	N	12	N	12

หมายเหตุ : ดำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และ ดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

4.4.3.3 การเจริญเติบโตตลอดฤดูกาลเพาะปลูก

การเจริญเติบโตตลอดฤดูกาลเพาะปลูก พบว่า มีการเจริญเติบโตที่แสดงผลแตกต่างกันอย่างเด่นชัดในแต่ละรอบเดือน รอบการเพาะปลูกนี้ข้าวโพดจะเริ่มออกฝักช้าเนื่องจากประสบกับสภาวะแห้งแล้ง ซึ่งข้าวโพดใช้เวลาออกฝักเป็นเวลาเกือบสามเดือน และเก็บเกี่ยวผลผลิตในเดือนที่ 4 (รูปที่ 4.20) ส่วนการเจริญเติบโตที่แสดงผลในรูปของ ความสูงเฉลี่ย จำนวนฝัก จำนวนใบ และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น พบว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ ดำรับการทดลองที่ 3 มีอัตราการเจริญเติบโตสูงที่สุด ส่วนรอบการเพาะปลูกที่ 3 นี้ประสบปัญหาภัยแล้ง จึงทำให้การเจริญเติบโตของข้าวโพดไม่ค่อยดีเท่าไรนักเมื่อเปรียบเทียบกับรอบการเพาะปลูกที่ 1 และ 2 ที่ผ่านมา (รูปที่ 4.21)



Treatment 1 เริ่มปลูก



Treatment 2 เริ่มปลูก



Treatment 3 เริ่มปลูก



Treatment 1 เดือนที่ 1



Treatment 2 เดือนที่ 1



Treatment 3 เดือนที่ 1



Treatment 1 เดือนที่ 2



Treatment 2 เดือนที่ 2



Treatment 3 เดือนที่ 2



Treatment 1 เดือนที่ 3



Treatment 2 เดือนที่ 3



Treatment 3 เดือนที่ 3



Treatment 1 เดือนที่ 4

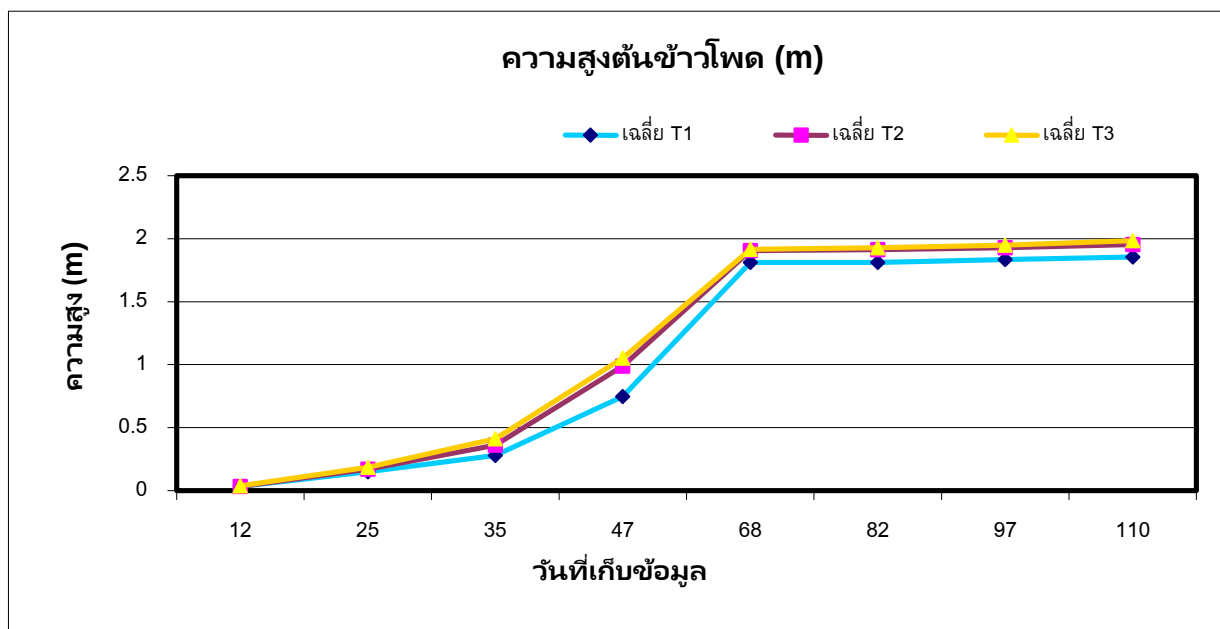


Treatment 2 เดือนที่ 4



Treatment 3 เดือนที่ 4

รูปที่ 4.20 แสดงการเจริญเติบโตของข้าวโพด



รูปที่ 4.21 แสดงการเจริญเติบโต (ความสูงเฉลี่ย หน่วยเซนติเมตร)

4.4.3.4 ปริมาณผลผลิต

ปริมาณผลผลิตซึ่งได้เก็บรวบรวมผลผลิตทั้งแปลงทดลองของน้ำหนักรวมเมล็ดหลังสี พบว่า การทำการทดลองที่ 3 มีค่าสูงที่สุด 1,367 กิโลกรัมต่อไร่ รองลงมาได้แก่ การทำการทดลองที่ 2 และการควบคุม มีค่า 1,240 กิโลกรัมต่อไร่ และ 807 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.44)

ตารางที่ 4.44 แสดงปริมาณผลผลิต (เก็บข้อมูล 23 พฤศจิกายน 2558)

Treatment	ก่อนสี		หลังสี
	จำนวนฝัก (ฝัก)	น้ำหนักเมล็ดรวมฝัก (กก./ไร่)	น้ำหนักเมล็ด (กก./ไร่)
T1	870	1,100	807
T2	925	1,433	1,240
T3	941	1,733	1,367

หมายเหตุ : การทำการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1), การทำการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และการทำการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3)

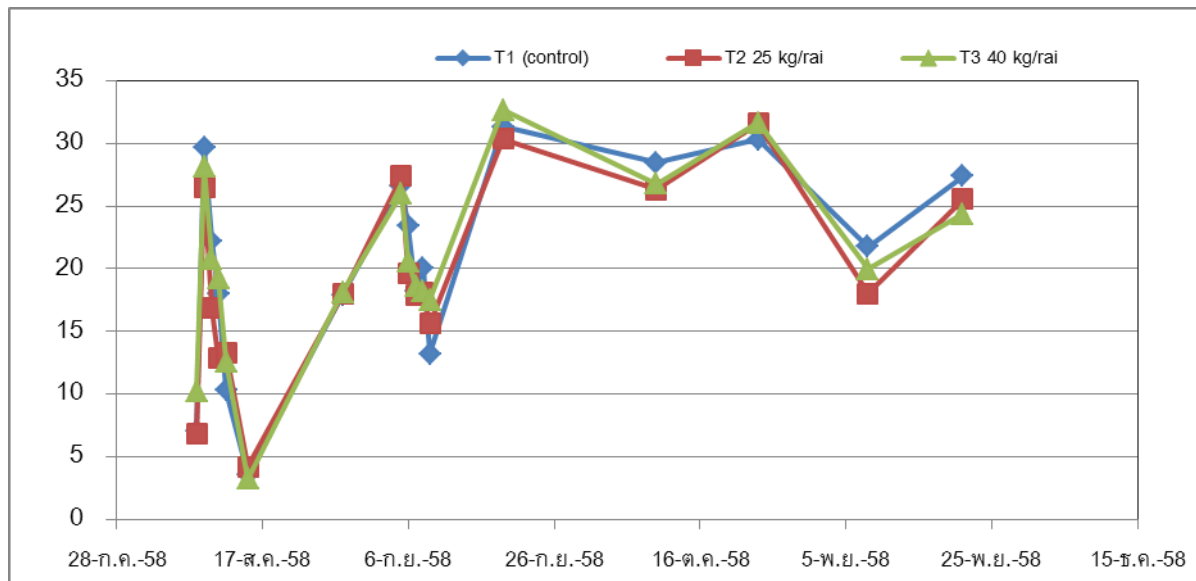
4.4.4 N₂O flux

4.4.4.1 ความชื้นในดิน

ความชื้นของดินขณะที่ทำการทดลองซึ่งจะสอดคล้องกับอุณหภูมิของดิน ค่าเฉลี่ยความชื้นในดินมีค่าไม่สม่ำเสมอเนื่องจากมีฝนตกเป็นช่วงสลับกันไประหว่างทำการทดลอง (ตารางที่ 4.45 และ 4.25-C3 รูปที่ 4.22 และ 4.23)

ตารางที่ 4.45 แสดงค่าเฉลี่ยความชื้นในดิน (%)

ครั้งที่	วัน เดือน ปี	T1 (control) (% moisture)	T2 (25 kg/rai) (% moisture)	T3 (40 kg/rai) (% moisture)
1	8 ส.ค.58	7.04	6.78	10.18
2	9 ส.ค.58	29.62	26.52	28.11
3	10 ส.ค.58	22.2	16.82	20.8
4	11 ส.ค.58	18.01	12.82	19.22
5	12 ส.ค.58	10.26	13.31	12.56
6	15 ส.ค.58	3.55	4.20	3.20
7	28 ส.ค.58	17.92	17.98	18.11
8	5 ก.ย.58	26.56	27.38	26.02
9	6 ก.ย.58	23.39	19.58	20.59
10	7 ก.ย.58	18.19	17.89	18.64
11	8 ก.ย.58	20.02	18.07	18.22
12	9 ก.ย.58	13.18	15.6	17.52
13	19 ก.ย.58	31.35	30.38	32.68
14	10 ต.ค.58	28.47	26.3	26.78
15	24 ต.ค.58	30.3	31.6	31.65
16	8 พ.ย. 58	21.77	18.04	19.95
17	21 พ.ย. 58	27.37	25.55	24.37

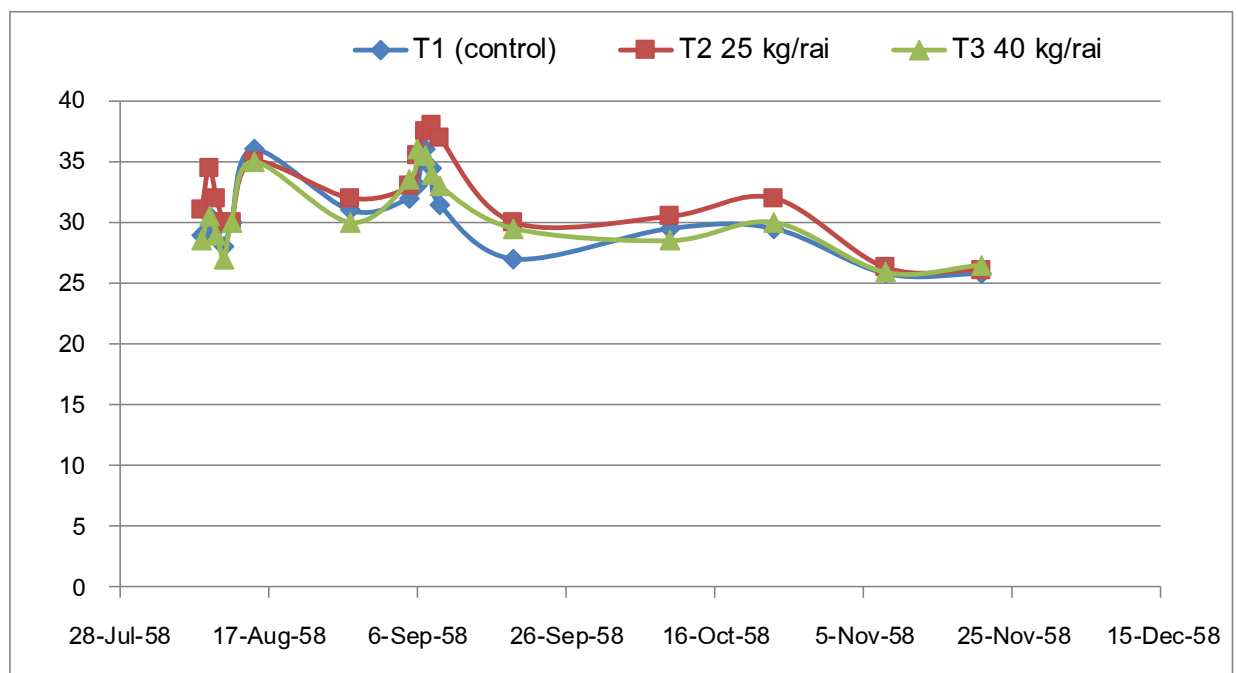


รูปที่ 4.22 เปอร์เซ็นต์ความชื้นในดิน

4.4.4.2 อุณหภูมิดิน

ตารางที่ 4.46 แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิดินที่ระดับ 5 เซนติเมตร

ครั้งที่	วัน เดือน ปี	T1 (control)	T2 (25 kg/rai)	T3 (40 kg/rai)
1	8 ส.ค.58	29	31	28.5
2	9 ส.ค.58	30.5	34.5	30.5
3	10 ส.ค.58	29.5	32	29
4	11 ส.ค.58	28	30	27
5	12 ส.ค.58	30	30	30
6	15 ส.ค.58	36	35	35
7	28 ส.ค.58	31	32	30
8	5 ก.ย.58	32	33	33.5
9	6 ก.ย.58	33	35.5	36
10	7 ก.ย.58	36	37.5	35.5
11	8 ก.ย.58	34.5	38	34
12	9 ก.ย.58	31.5	37	33
13	19 ก.ย.58	27	30	29.5
14	10 ต.ค.58	29.5	30.5	28.5
15	24 ต.ค.58	29.5	32	30
16	8 พ.ย. 58	25.8	26.3	25.9
17	21 พ.ย. 58	25.8	26.1	26.5



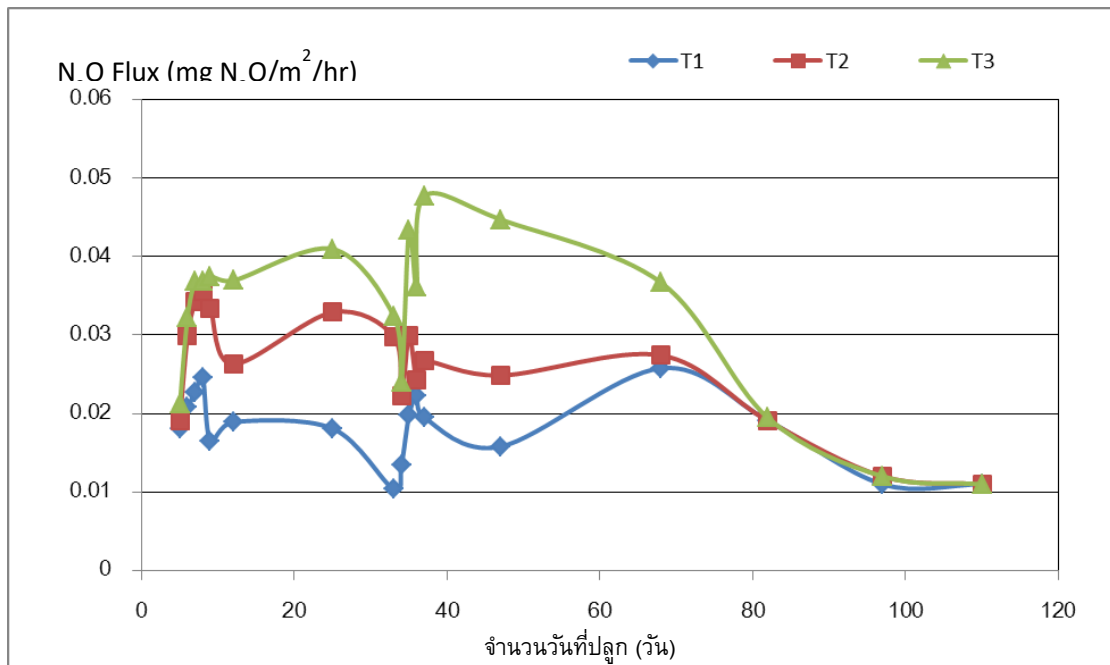
รูปที่ 4.23 อุณหภูมิดิน (องศาเซลเซียส)

4.4.4.3 ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O Flux)

ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T3) มีอัตราการการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สูงสุด รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T2) และตำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1) มีค่าเฉลี่ย 0.018 ± 0.004 , 0.026 ± 0.007 และ 0.032 ± 0.011 mg N₂O/m²/hr ตามลำดับ (ตารางที่ 4.43 และรูปที่ 4.24) ส่วนปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จะสูงที่สุดในวันแรกของการใส่ปุ๋ยรอบที่ 2 และลดลงตามจำนวนวันที่ใส่ปุ๋ยมากขึ้น (ตารางที่ 4.47 และรูปที่ 4.24)

ตารางที่ 4.47 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ค่า (N₂O Flux)

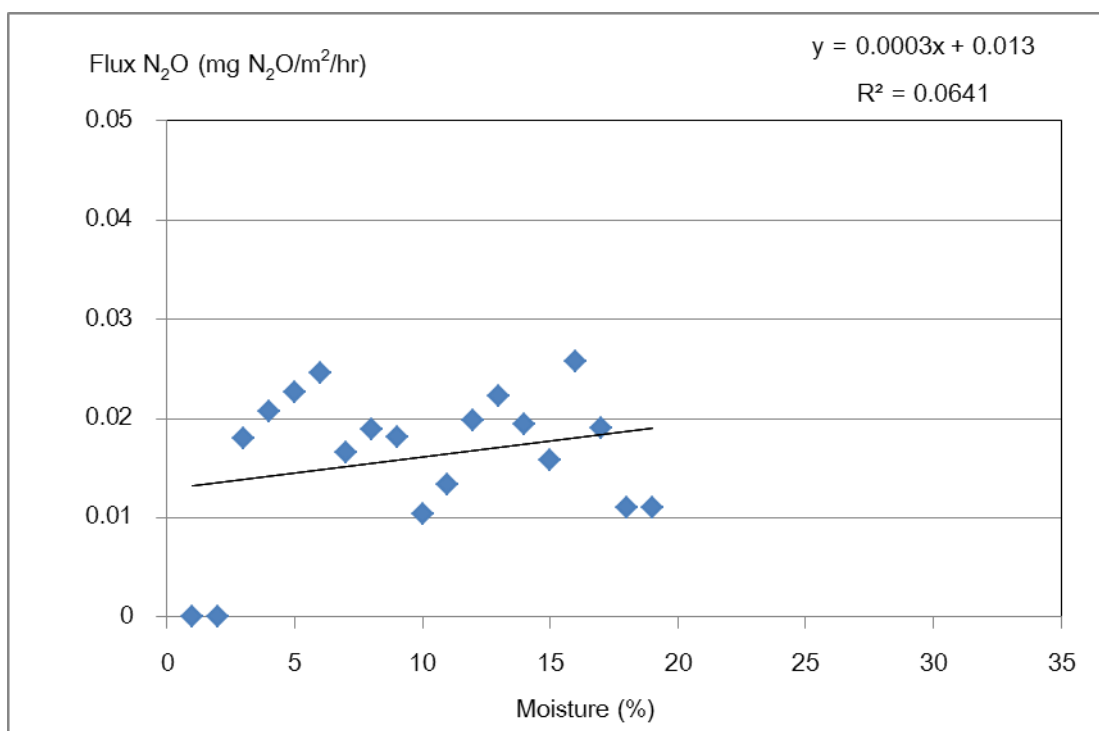
ครั้งที่	วัน เดือน ปี	T1 (control) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)	T2 (25 kg/rai) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)	T3 (40 kg/rai) Flux N ₂ O (mg N ₂ O/m ² /hr)
1	8 ส.ค.58	0.018	0.019	0.021
2	9 ส.ค.58	0.021	0.030	0.032
3	10 ส.ค.58	0.023	0.034	0.037
4	11 ส.ค.58	0.025	0.036	0.037
5	12 ส.ค.58	0.017	0.033	0.037
6	15 ส.ค.58	0.019	0.026	0.037
7	28 ส.ค.58	0.018	0.033	0.041
8	5ก.ย.58	0.010	0.030	0.032
9	6ก.ย.58	0.013	0.022	0.024
10	7ก.ย.-58	0.020	0.030	0.043
11	8ก.ย. 58	0.022	0.024	0.036
12	9ก.ย. 58	0.019	0.027	0.048
13	19ก.ย.58	0.016	0.025	0.045
14	10ต.ค.58	0.026	0.027	0.037
15	24ต.ค.58	0.019	0.019	0.019
16	8 พ.ย. 58	0.011	0.012	0.012
17	21 พ.ย. 58	0.011	0.011	0.011
Mean		0.018	0.026	0.032
S.D.		0.004	0.007	0.011
N		17	17	17



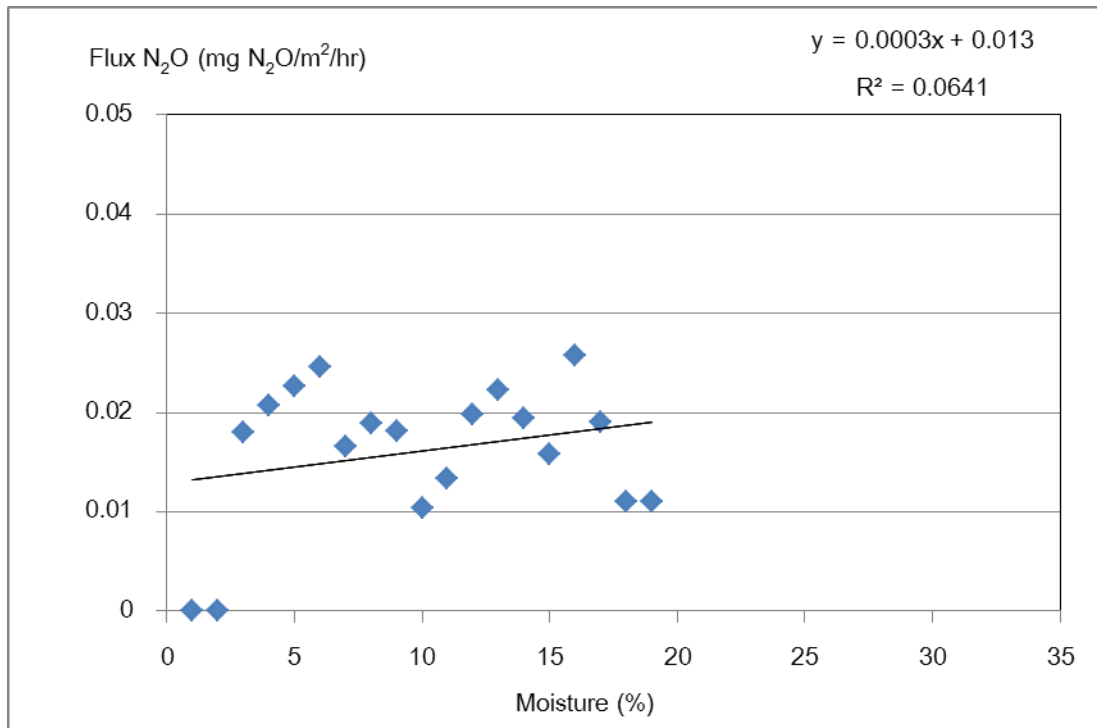
เดือนที่ 1	เดือนที่ 2	เดือนที่ 3	เดือนที่ 4
------------	------------	------------	------------

รูปที่ 4.24 ค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากดิน (N₂O Flux)

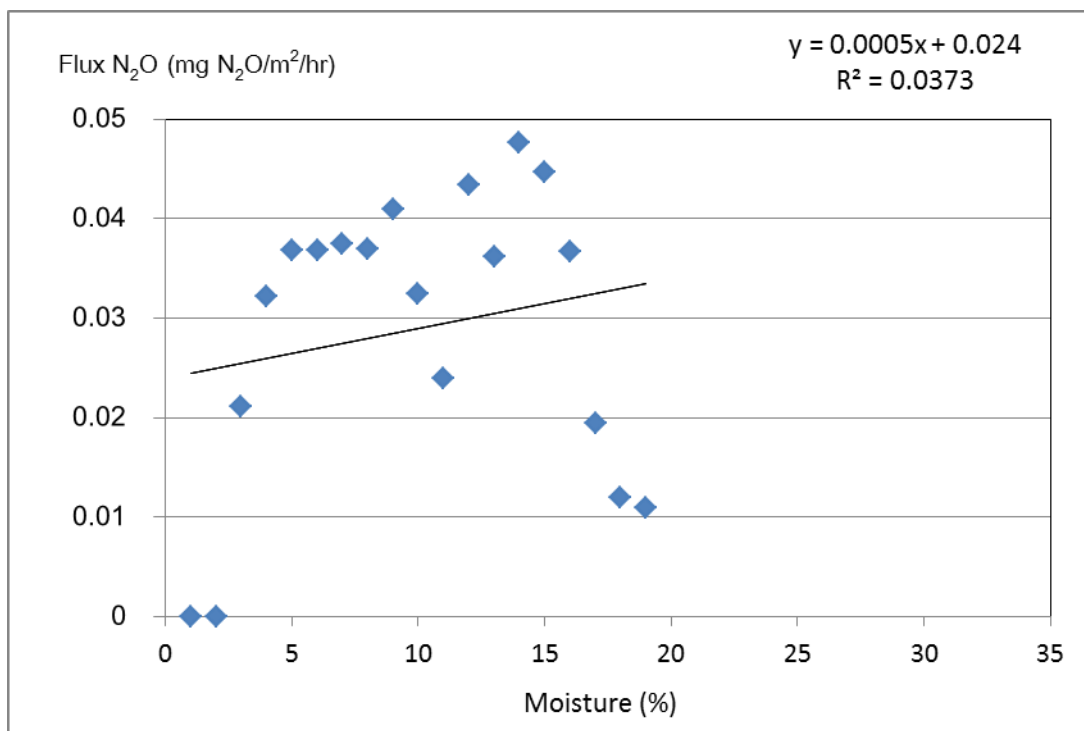
4.4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับความชื้นในดิน
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับความชื้นในดิน พบว่า มีความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.25



ก. Treatment 1



ข. Treatment 2

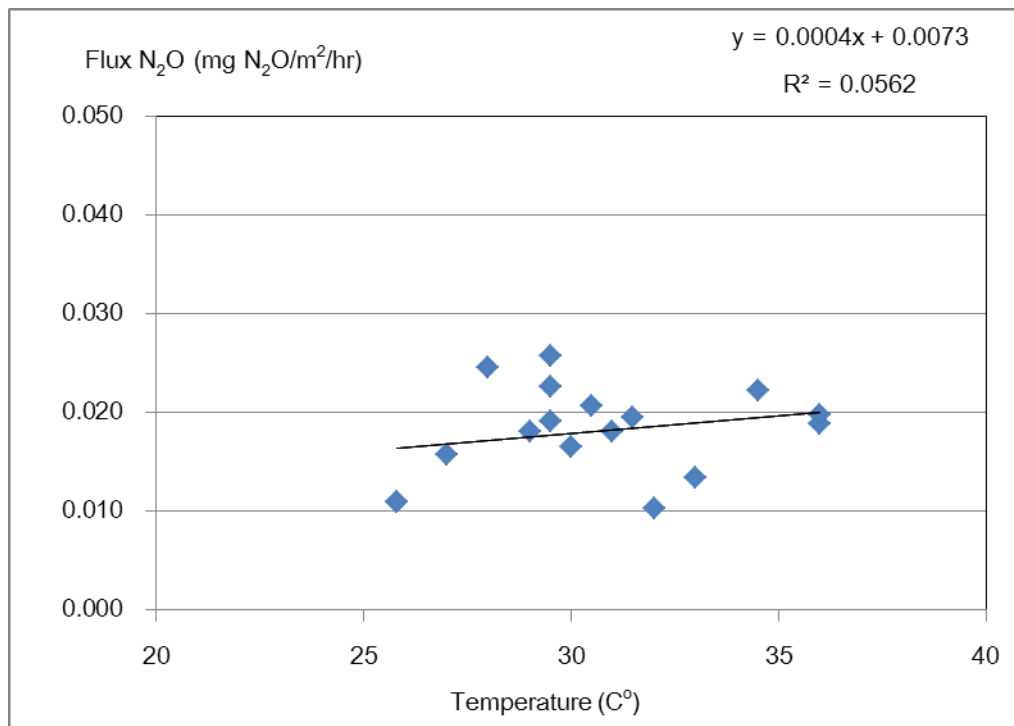


ค. Treatment 3

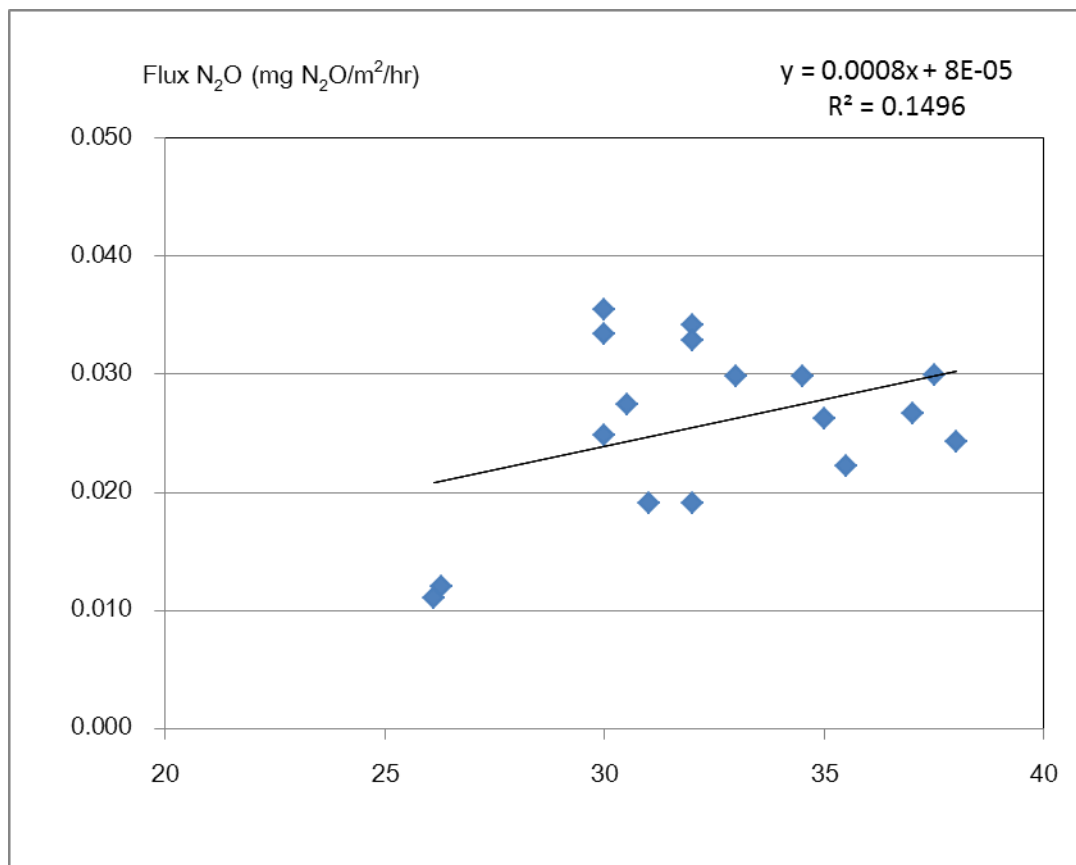
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับความชื้นในดิน

4.4.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับอุณหภูมิดิน

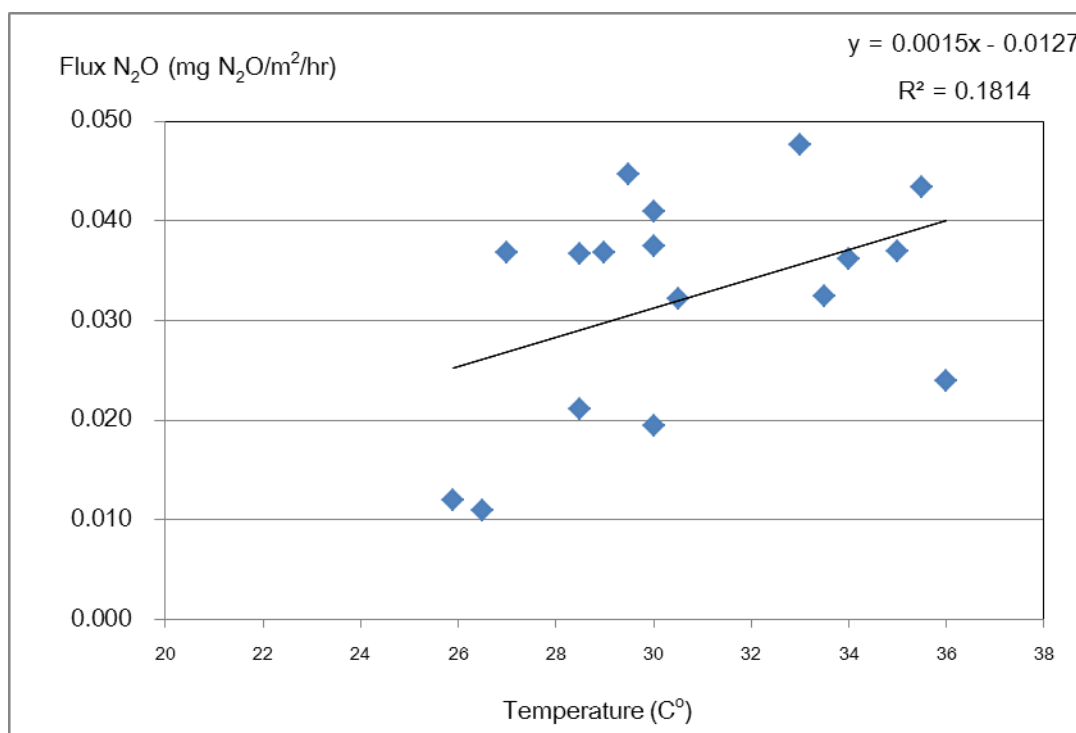
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับอุณหภูมิดินดังแสดงในรูปที่ 4.26 ซึ่งมีความสัมพันธ์น้อยกว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับความชื้นในดิน



ก. Treatment 1



ข. Treatment 2



ค. Treatment 3

รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินกับอุณหภูมิดิน ที่ระดับความลึกดิน 5 เซนติเมตร

4.4.5 สรุปผลการทดลองในรอบการเพาะปลูกครั้งที่ 3

ผลการทดลองปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ พบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ หรือ 155 kg N ha^{-1} (T3) มีอัตราการการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สูงที่สุด รองลงมา ได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ หรือ 97 kg N ha^{-1} (T2) และ ตำรับการทดลองที่ 1 ชุดควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T1) ซึ่งแสดงผลในทำนองเดียวกันทั้งหมด ได้แก่ ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ ปริมาณชีวมวลและการเจริญเติบโต

ทั้งนี้ผลการทดลองหากทำการเปรียบเทียบกับรอบการเพาะปลูกรอบที่ 1 และ 2 แล้วพบว่า รอบที่ 3 นี้ประสบกับปัญหายากแล้ง จึงส่งผลให้การเจริญเติบโตและปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินมีค่าน้อยด้วย

บทที่ 5

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลการศึกษาค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์ มีดำรับการทดลองทั้ง 3 ดำรับการทดลอง โดยมีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในอัตราที่แตกต่างกัน ดังนี้ ดำรับควบคุม (T1) ไม่ใส่ปุ๋ย ดำรับการทดลองที่ 2 (T2) ใส่ปุ๋ยอัตรา 97 kg N ha^{-1} และดำรับการทดลองที่ 3 (T3) ใส่ปุ๋ยอัตรา 155 kg N ha^{-1} ซึ่งผลการศึกษาเพื่อศึกษาการปล่อยไนตรัสออกไซด์ (N_2O flux) ค่าการปล่อย (Emission factor) และผลของสภาพแวดล้อมและคุณสมบัติของดินที่มีผลต่อการปล่อยไนตรัสออกไซด์ คุณสมบัติของชีวมวล ปริมาณผลผลิต สมดุลไนโตรเจน (Nitrogen balance) และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์จากการใช้ปุ๋ยเคมีในอัตราที่แตกต่างกัน

ส่วนที่ 2 เพื่อศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยเคมี การวิเคราะห์ความสัมพันธ์และการวิเคราะห์ทางสถิติ

5.1 สภาพภูมิอากาศและคุณสมบัติของดิน

5.1.1 สภาพภูมิอากาศ

สภาพภูมิอากาศของแปลงทดลองทั้งสามรอบการเพาะปลูกแสดงในตารางที่ 5.1 โดยปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรอบการเพาะปลูกที่ 1, 2 และ 3 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) ส่วนปริมาณน้ำฝนสะสมตลอดการเพาะปลูก (ตั้งแต่วันปลูกจนถึงวันเก็บเกี่ยว) พบว่ารอบการเพาะปลูกที่ 1 มีปริมาณฝนสะสมสูงที่สุด 480 มิลลิเมตร รองลงมาเป็นรอบการเพาะปลูกที่ 2 280 มิลลิเมตร และรอบการเพาะปลูกที่ 3 มีปริมาณฝนสะสมน้อยที่สุด 160 มิลลิเมตร ตามลำดับ เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวพบปัญหาภัยแล้ง อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย พบว่า รอบการเพาะปลูกที่ 2 มีอุณหภูมิอากาศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) โดยมีค่า 27.59 องศาเซลเซียส รองลงมาคือ รอบการเพาะปลูกที่ 1 และรอบการเพาะปลูกที่ 3 มีค่า 26.74 และ 26.13 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้ รอบการเพาะปลูกที่ 1 และรอบการเพาะปลูกที่ 3 มีอุณหภูมิอากาศต่ำกว่ารอบการเพาะปลูกที่ 2 เนื่องจากมีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง และมีฝนตกในช่วงฤดูฝน

อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยขณะเก็บตัวอย่างก๊าซไนตรัสออกไซด์ (เวลา 09.00-11.00 น.) รอบการเพาะปลูกที่ 1, 2 และ 3 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 0.05$) อุณหภูมิดินเฉลี่ยขณะเก็บตัวอย่างก๊าซเรือนกระจก (เวลา 09.00-11.00 น.) พบว่า รอบการเพาะปลูกที่ 3 มีอุณหภูมิอากาศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยมีค่า 27.86 องศาเซลเซียส รองลงมาได้แก่รอบการเพาะปลูกที่ 1 และรอบการเพาะปลูกที่ 2 มีค่า 26.71 และ 25.72 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ พบว่า ในรอบการเพาะปลูกที่ 1 มีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) โดยมีค่า 79.69% ลำดับถัดมา คือ รอบการเพาะปลูกที่ 3 และรอบการเพาะปลูกที่ 2 ตามลำดับ มีค่า 79.09 และ 69.27% ทั้งนี้ พบว่า การเพาะปลูกในรอบการเพาะปลูกที่ 1 และรอบการเพาะปลูกที่ 3 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง เนื่องจากอยู่ในช่วงการเพาะปลูกของช่วงฤดูฝน (ตารางที่ 5.1)

ตารางที่ 5.1 The average values of tropical savanna climatic data during the maize production

Parameters	Unit	Seasons		
		Wet season 2014: 1 st Crop (Sep-Nov, 2014)	Dry season 2015: 2 nd Crop (Mar-June, 2015)	Wet season 2015: 3 rd Crop (Sep-Nov, 2015)
Average precipitation	mm day ⁻¹	4.22±9.73 ^a	2.48±6.24 ^a	4.51±11.83 ^a
Total precipitation	mm	480	280	160
Air temperature during maize production	°C	26.74±0.80 ^c	27.59±1.70 ^{a**}	26.13±1.11 ^b
Air temperature at sampling time	°C	28.81±1.22 ^a	25.72±3.32 ^{ab}	30.05±1.03 ^b
Soil temperature at sampling time	°C	26.71±1.40 ^a	25.72±3.32 ^{ab}	27.86±1.44 ^{b*}
Relative Humidity	%	79.69±6.39 ^{a**}	69.27±9.88 ^c	79.09±7.22 ^b

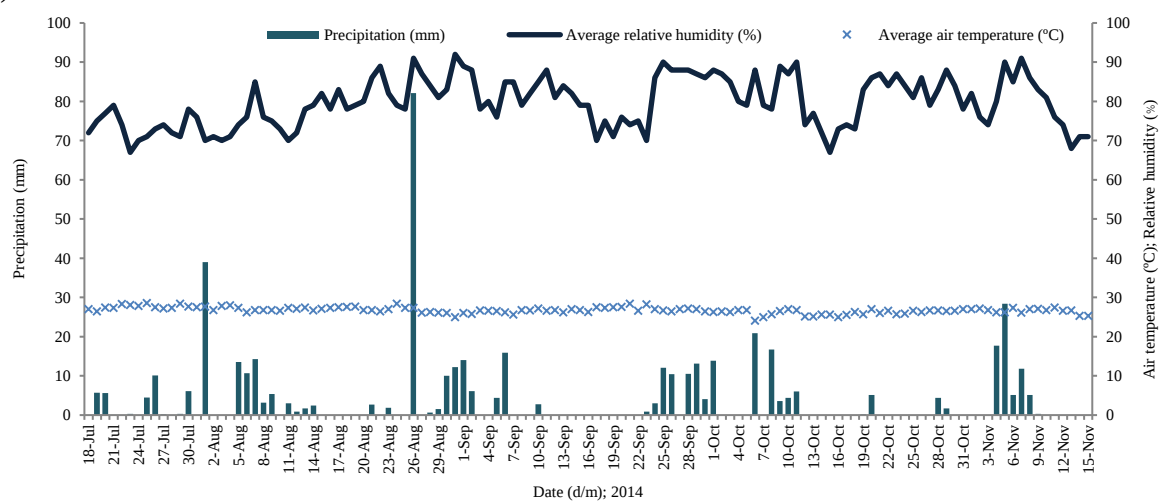
Different lowercase letters indicate significant differences between treatment ($P<0.05$) and ($P<0.01$).

The single asterisk (*) and double asterisk (**) indicate significant differences between the two season at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

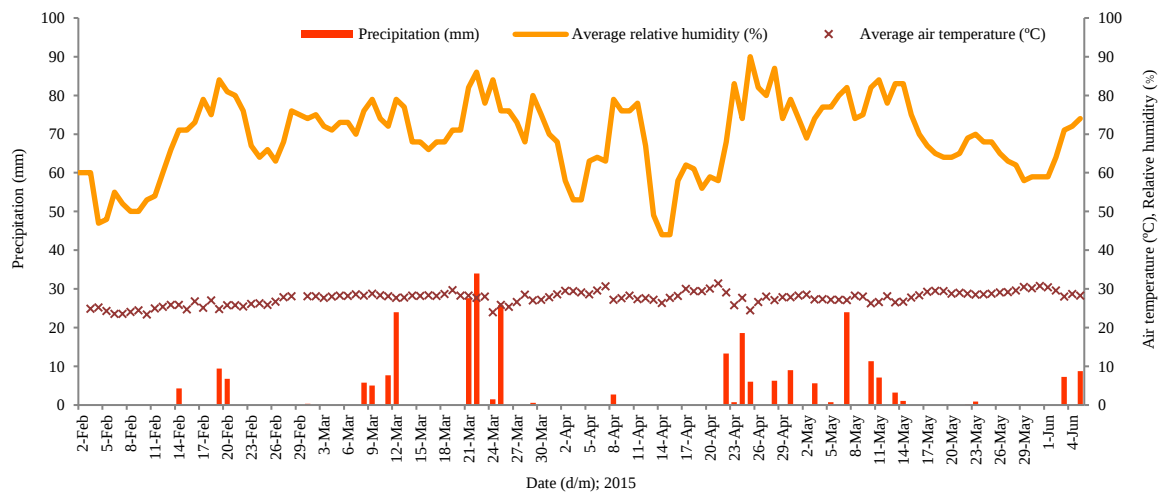
5.1.2 คุณสมบัติของดิน

ดินในพื้นที่ศึกษาเป็นชุดดินปากช่อง มีลักษณะและสมบัติของดิน โดยเป็นดินลิกมาก ดินบน เป็นดินเหนียวหรือดินเหนียวปนทรายแป้ง สีน้ำตาลปนแดงเข้ม ดินล่างเป็นดินเหนียว สีน้ำตาลปนแดงเข้มและสีแดง เนื้อดินเป็นดินร่วนปนทรายแป้ง

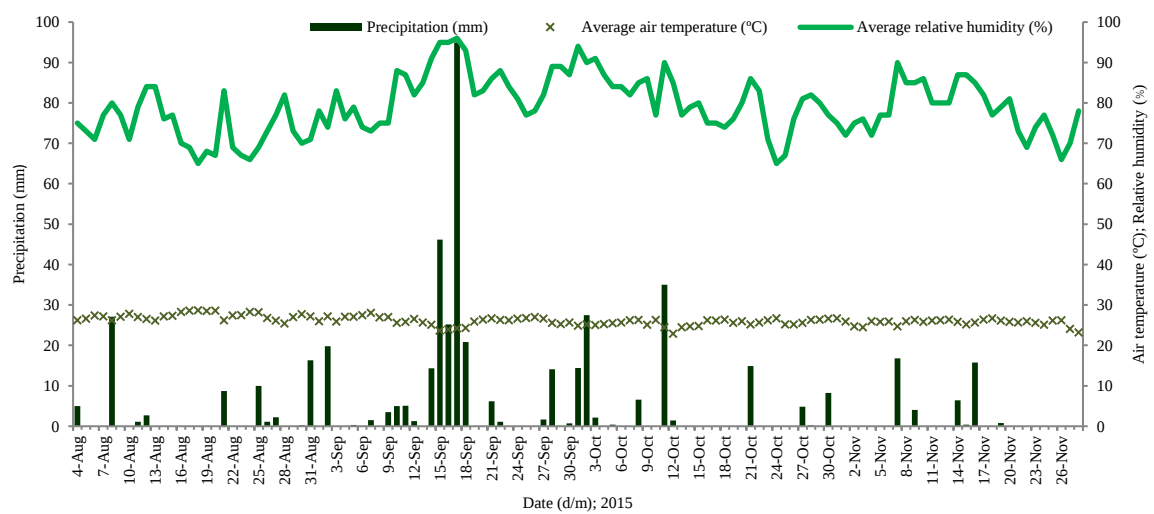
a)



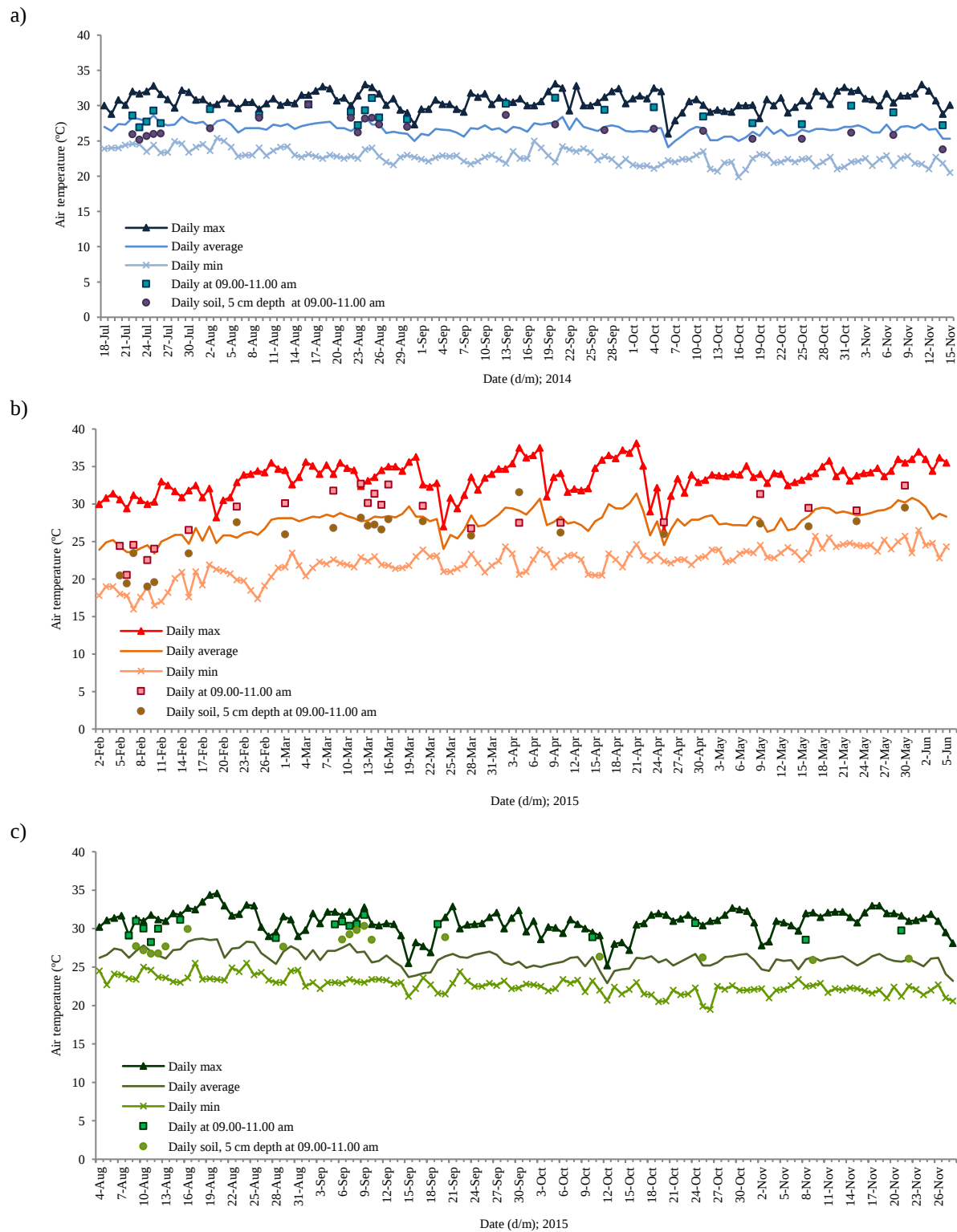
b)



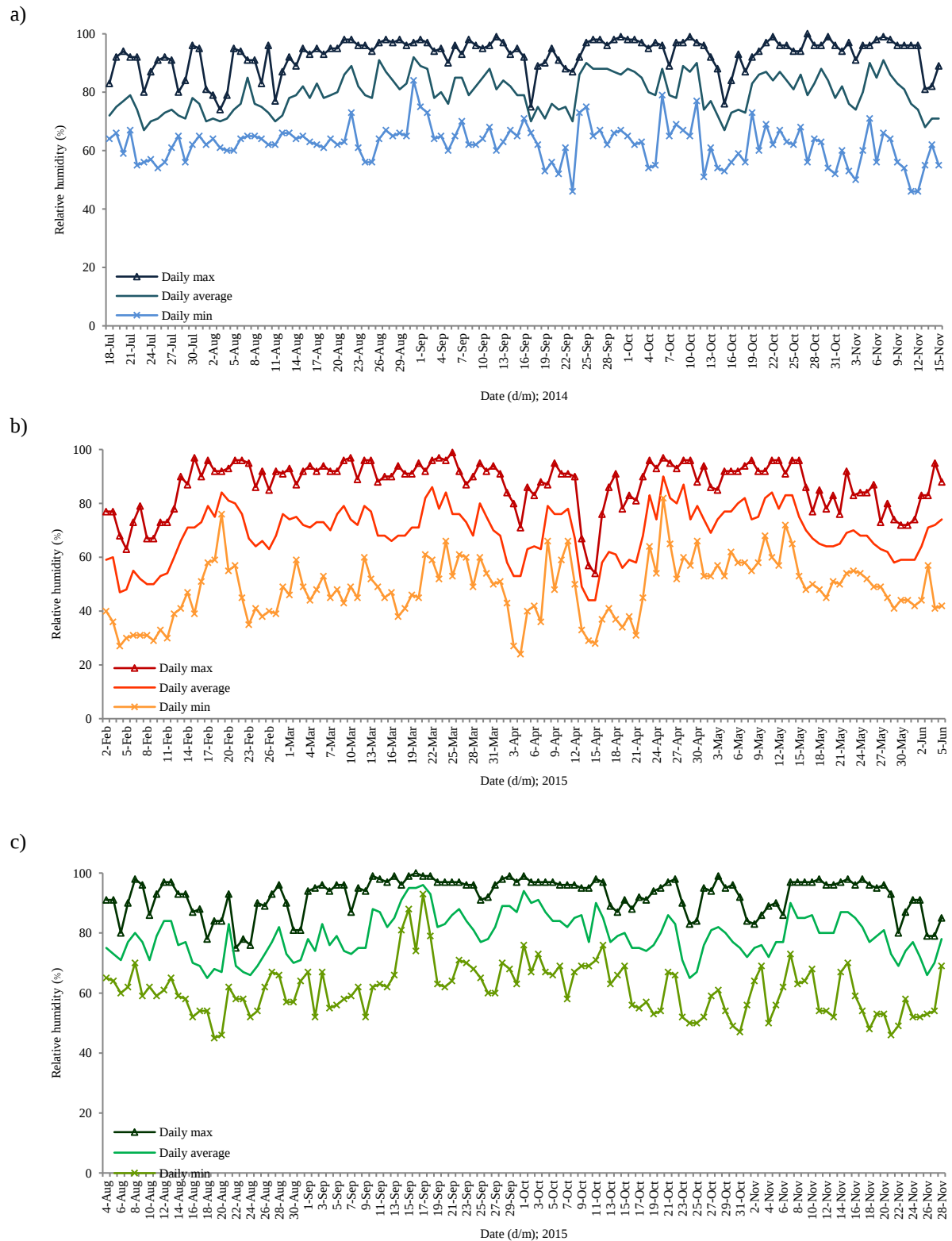
c)



รูปที่ 5.1 Precipitation, average humidity, and average temperature at study site during wet season 2014: 1stCrop (a), dry season 2015: 2ndCrop (b) and wet season 2015: 3rdCrop (c) on maize production.



รูปที่ 5.2 Daily maximum, daily minimum, daily average air temperature, daily average air temperature while sampling time and daily average soil temperature while sampling nitrous oxide during wet season 2014: 1stCrop (a), dry season 2015: 2ndCrop (b) and wet season 2015: 3rdCrop on maize production (c).



รูปที่ 5.3 Daily maximum, daily minimum and daily average relative humidity during wet season 2014: 1stCrop (a) dry season 2015: 2ndCrop (b) and wet season: 3rdCrop (c) on maize production.

ดินในแปลงทดลองเป็นดินสีแดงที่มีการระบายน้ำดี (reddish brown lateritic soil) นอกจากนี้ชั้นดินบนมีสีดาปนแดงเข้มมากกว่าชั้นดินล่างซึ่งพบว่ามีอินทรีย์วัตถุอยู่ปริมาณมาก โดยทั่วไปดินสีแดงพบมากในภูมิภาคเขตร้อน ดินมีสีแดงเนื่องจากมีส่วนผสมของเหล็กและอะลูมิเนียม ออกไซด์ (Wisawapipat *et al.*, 2010) ปริมาณเหล็กบนชั้นดินบนทำให้โครงสร้างดินเป็นเม็ดก้อนกลม ซึ่งทำให้ดินมีการระบายน้ำดี อัตราการอุ้มน้ำจึงค่อนข้างต่ำ (well drained water and low water holding capacity) (Trakoonyingcharoen *et al.*, 2012) ซึ่งทำให้ดินเก็บกักน้ำได้น้อยในฤดูแล้ง

ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH) อยู่ในช่วง 6.0-7.0 และเพิ่มขึ้นตามระดับความลึก ดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่ชั้นล่าง (subsoil) pH อยู่ระหว่าง 4.5-5.5 ส่วนความอุดมสมบูรณ์ของดิน มีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งดินมีการสูญเสียความชื้นและธาตุอาหารอย่างรวดเร็ว และการมีช่องว่างในดินน้อยทำให้ยากต่อการไหลพรุน เมื่อมีฝนตกลงมาการซาบซึมน้ำก็เกิดได้ค่อนข้างยาก ดินเป็นดินที่เหมาะสมต่อการปลูกพืชไร่ โดยเฉพาะปลูกข้าวโพด คุณสมบัติของดินทางกายภาพ ความอุดมสมบูรณ์ของดิน ปริมาณไนโตรเจนในดิน ในรูปของ NH_4^+ , NO_3^- และ NO_2^- และข้อมูลระหว่างการเพาะปลูกข้าวโพดเพื่อทำการทดลอง แสดงใน ตารางที่ 5.2 นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ความเป็นกรดต่างของดิน (pH), อินทรีย์คาร์บอนในดิน (SOC), ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (TKN), แอมโมเนียม (Ammonium), ไนเตรต (Nitrate) และไนไตรท์ (Nitrite) ของแต่ละดำรับการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) และค่า C:N ratio ของแต่ละดำรับการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

5.1.2.1 Soil water content and water filled pore space

โดยทั่วไป soil water content จะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ขึ้นอยู่กับปัจจัยของการระเหยน้ำ ปกติ soil water content จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน การระเหยของน้ำ การให้น้ำผิวดิน และค่าความสามารถในการอุ้มน้ำในดิน ผลการศึกษาพบว่า ในฤดูฝน Soil water content ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยของปริมาณน้ำฝนและการให้น้ำผิวดิน ระหว่างการผลิตข้าวโพดใน 1st crop และ 3rd crop (ฤดูฝน) มีฝนตกหนักปริมาณมากและมีน้ำผิวดินอยู่สูงในช่วงกลางของการเพาะปลูก และมีปริมาณ soil water content สูงในช่วงต้นถึงช่วงกลางของการเพาะปลูก เมื่อเข้าสู่ช่วงการเก็บเกี่ยว โดยพบว่ามีน้ำผิวดินและความชื้นในดินน้อยกว่าช่วงเริ่มฤดูการเพาะปลูก

อุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิดินจะลดลงระหว่างช่วงสิ้นสุดการเพาะปลูก และมีความชื้นในอากาศสูงการมีระเหยน้ำในดินน้อย นอกจากนี้ soil water content มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 5.4) จากผลการศึกษาพบว่า soil water content และ WFPS (Water filled pore space) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

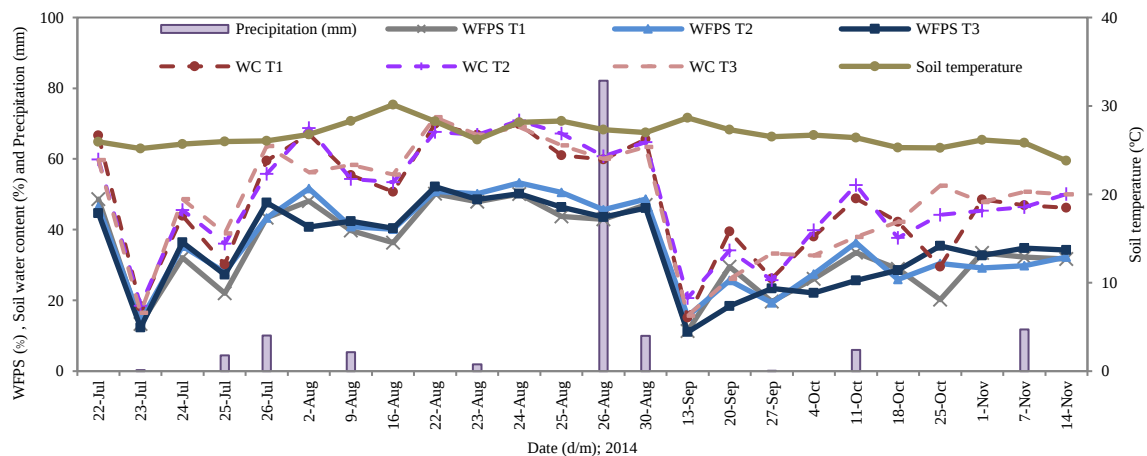
ในการเพาะปลูกใน 2nd crop (dry season) พบว่าดินมีความชื้นที่ผิวดินค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ (ฤดูฝน) ใน 1st crop และ 3rd crop %soil water content ในดินขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำฝน การระเหยน้ำที่ผิวดิน ในช่วง 2nd crop (ฤดูแล้ง) พบว่าการระเหยน้ำผิวดินในช่วงเริ่มต้นการเพาะปลูก มีปริมาณความชื้นน้อยกว่าช่วงกลางของการเพาะปลูกและช่วงเก็บเกี่ยวมีปริมาณน้ำผิวดินสูง เนื่องจากมีฝนตกและการที่อุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิดินมีค่าสูง และการระเหยน้ำของดินมีผลให้เกิดความแปรปรวนของ soil water content ด้วย

The water filled pore space (WFPS) มีผลเป็นแนวทางเดียวกับ soil water content ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนและพื้นที่รับน้ำ WFPS ของแต่ละตำรับการทดลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (รูปที่ 5.4) % soil water content และ %WFPS จะอยู่ในช่วงค่าความต้องการน้ำของพืชและสามารถใช้ได้ในดินที่มีเนื้อดินเป็นดินร่วน และ 30-65% ของ %WFSP กระบวนการไนตริฟิเคชัน จะสามารถทำงานภายใต้ภาวะมีอากาศและมากกว่า 65% ของ %WFSP ขบวนการไนตริฟิเคชันจะมีความสามารถในการทำงานในดินภายใต้สภาวะไร้อากาศ

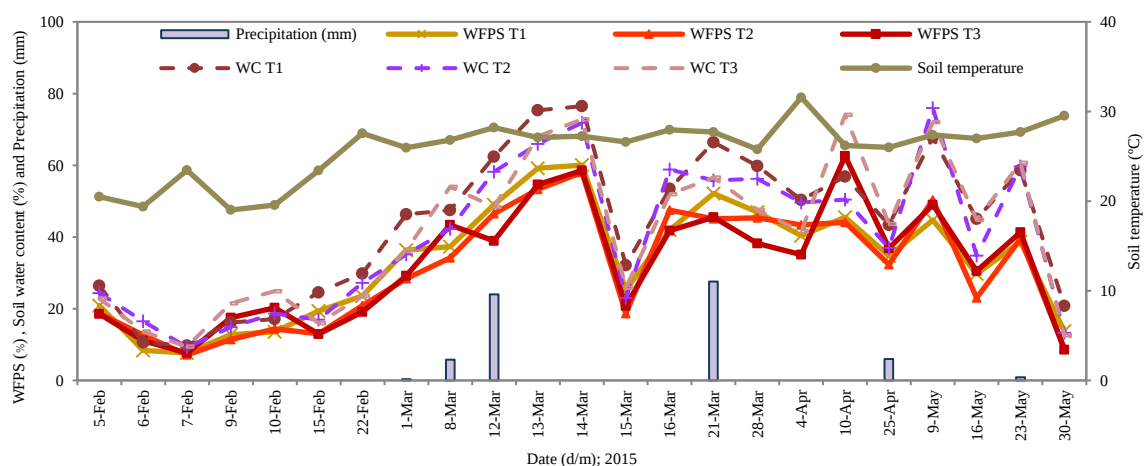
5.1.2.2 ความหนาแน่นของดิน (Bulk density)

ความหนาแน่นของดิน เป็นตัวชี้วัดระดับการอัดแน่นของอนุภาคดิน เมื่อดินมีการอัดตัวแน่น รากพืชจะไม่สามารถกระจายตัวออกไปรอบๆ และส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ความหนาแน่นของดินในรอบการเพาะปลูกที่ 1, 2 และ 3 มีค่า 1.18 ± 0.07 , 1.28 ± 0.11 และ 1.08 ± 0.07 gcm^{-1} ตามลำดับ (รูปที่ 5.5)

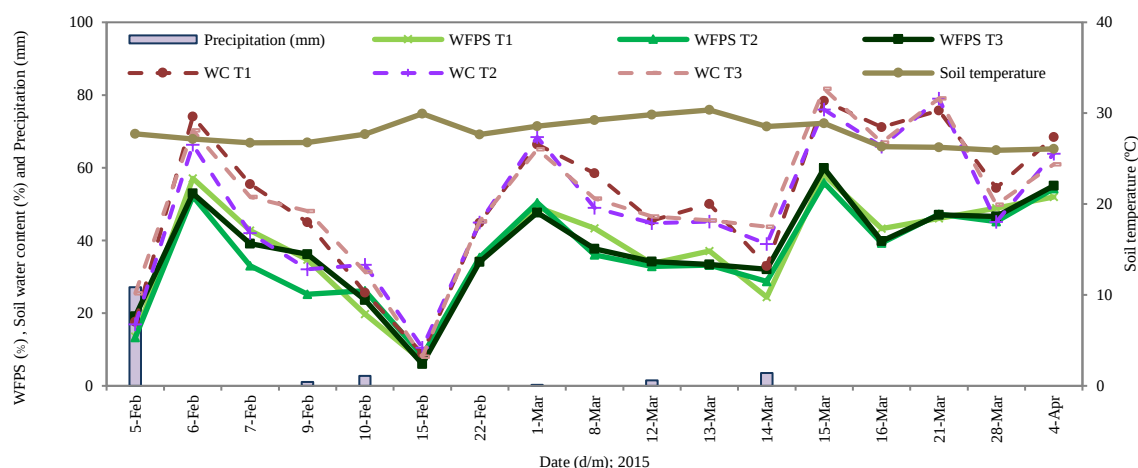
a)



b)



c)

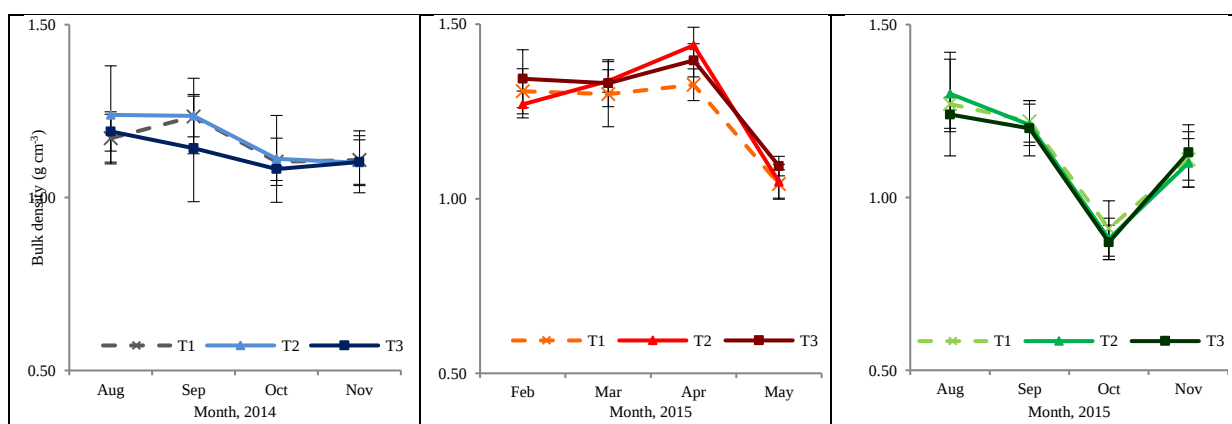


รูปที่ 5.4 Soil water content (WC) and water filled pore space (WFPS) compare with precipitation and daily average soil temperature in the wet season 2014: 1stCrop (a), dry season 2014: 2ndCrop (b) and wet season 2015: 3rdCrop (c) on maize production

a)

(b)

(c)



รูปที่ 5.5 Bulk density in the wet season 2014: 1stCrop (a), dry season 2015: 2ndCrop (b) and wet season 2015: 3rdCrop (c) on maize production

5.1.2.3 ความเป็นกรด-ด่างของดิน (Soil pH)

คุณสมบัติของดินและความอุดมสมบูรณ์ของดินระหว่างการเพาะปลูกในรอบการเพาะปลูกที่ 1, 2, และ 3 (1stCrop=wet season in 2014), (2ndCrop=dry season in 2015) และ (3rdCrop=wet season in 2015) ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินทั้ง 3 รอบฤดูกาลเพาะปลูกส่วนใหญ่อยู่ในช่วงกลาง คือ pH ประมาณ 6.0-7.0 (รูปที่ 5.6) ในรอบการเพาะปลูกที่ 1 (1stCrop=wet season in 2014) ความเป็นกรดเป็นด่างของดินไม่มีความแปรปรวนมากและมีค่าลดลงจาก 6.45-6.55 ไปถึง 6.35-6.39 ในช่วงท้ายของการเพาะปลูกหรือช่วงเก็บเกี่ยว ส่วนในรอบการเพาะปลูกที่ 2 (2ndCrop=dry season in 2015) ค่า soil pH มีค่าสูงขึ้นเข้าใกล้ค่ากลาง (pH ประมาณ 6.6-6.7) ส่วนในรอบการเพาะปลูกที่ 3 (3rdCrop=wet season in 2015) ค่า soil pH มีค่าค่อนข้างคงที่เข้า

ใกล้ค่ากลาง (pH ประมาณ 6.3-6.7) เนื่องจาก ammonium และ urea มีการแตกตัวสูง ไนโตรที่ และไนเตรต ด้วยขบวนการไนตริฟิเคชัน ด้วยการทำงานของจุลินทรีย์ และได้ผลพลพลอยได้ (by-product) เป็น H^+ มีผลทำให้ดินมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างใกล้เคียง soil acidic อย่างไรก็ตามความสามารถของ soil pH จะเป็นตัว buffering ซึ่งค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดินทั้ง 3 รอบการเพาะปลูกไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

5.1.2.4 ปริมาณอินทรีย์วัตถุและอินทรีย์คาร์บอน

ปริมาณอินทรีย์วัตถุมีค่าต่ำ (0.50-1.00%) และมีค่าต่ำปานกลาง (1.00-1.50%) ปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ระหว่าง 0.88-1.30% ในรอบการเพาะปลูกที่ 1 และ 0.8-1.13% ในรอบการเพาะปลูกที่ 2 และ 0.88-0.91% ในรอบการเพาะปลูกที่ 3 ตามลำดับ การที่อินทรีย์วัตถุมีปริมาณลดลงเนื่องจากการดูดซึมเพื่อการใช้ประโยชน์ของพืชและร่วมกับการมีการจัดการแปลงทดลอง เช่น การไถพรวน เป็นต้น (รูปที่ 5.6) พบว่าเศษซากที่เหลือ เช่น ชีวมวลบนผิวดินมีการย่อยสลาย นอกจากนี้อัตราการย่อยสลายและข้าวโพดด้วยการทำงานของจุลินทรีย์ นอกจากนี้พบว่าผลการศึกษานี้แสดงปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีค่าต่ำ

อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (C:N ratio) ที่มีอยู่ในอินทรีย์วัตถุ ซึ่งอินทรีย์วัตถุสัมพันธ์กับการหมุนเวียนของธาตุอาหารและความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity : CEC) โครงสร้างดิน (Soil structure) ปริมาณความชื้นที่คงเหลือ การลดลงของมลพิษ การปล่อยก๊าซเรือนกระจก และค่าความเป็นฉนวนของดิน อินทรีย์วัตถุย่อยสลายจากคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบของธาตุอาหารอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ โพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียม ประกอบในอินทรีย์สาร และในขณะเดียวกันอินทรีย์วัตถุส่งผลกระทบต่อหรือมีความสัมพันธ์ค่อนข้างน้อยกับธาตุอาหารพืช จุลธาตุสำหรับพืช การสะสมในพืชและดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ

อินทรีย์คาร์บอน มีค่าในทิศทางเช่นเดียวกับวัตถุอินทรีย์วัตถุ คือ มีค่าต่ำ ในช่วงการเพาะปลูกปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในรอบการเพาะปลูกที่ 1, 2, และ 3 มีค่าระหว่าง 0.51-0.75%, 0.48-0.65% และ 0.42-0.63% ตามลำดับ (รูปที่ 5.6) ทุกตำรับการทดลองในรอบการเพาะปลูกที่ 2 และ 3 มีค่าน้อยกว่ารอบการเพาะปลูกที่ 1 และอินทรีย์คาร์บอนในแต่ละตำรับการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$)

ดินในภูมิภาคเขตร้อนปกติอินทรีย์วัตถุจะมีค่าลดลงตามสภาพแวดล้อม เช่น จากกระบวนการย่อยสลาย กระบวนการ mineralization ของอินทรีย์วัตถุและอินทรีย์คาร์บอน (Rampel et al., 2006)

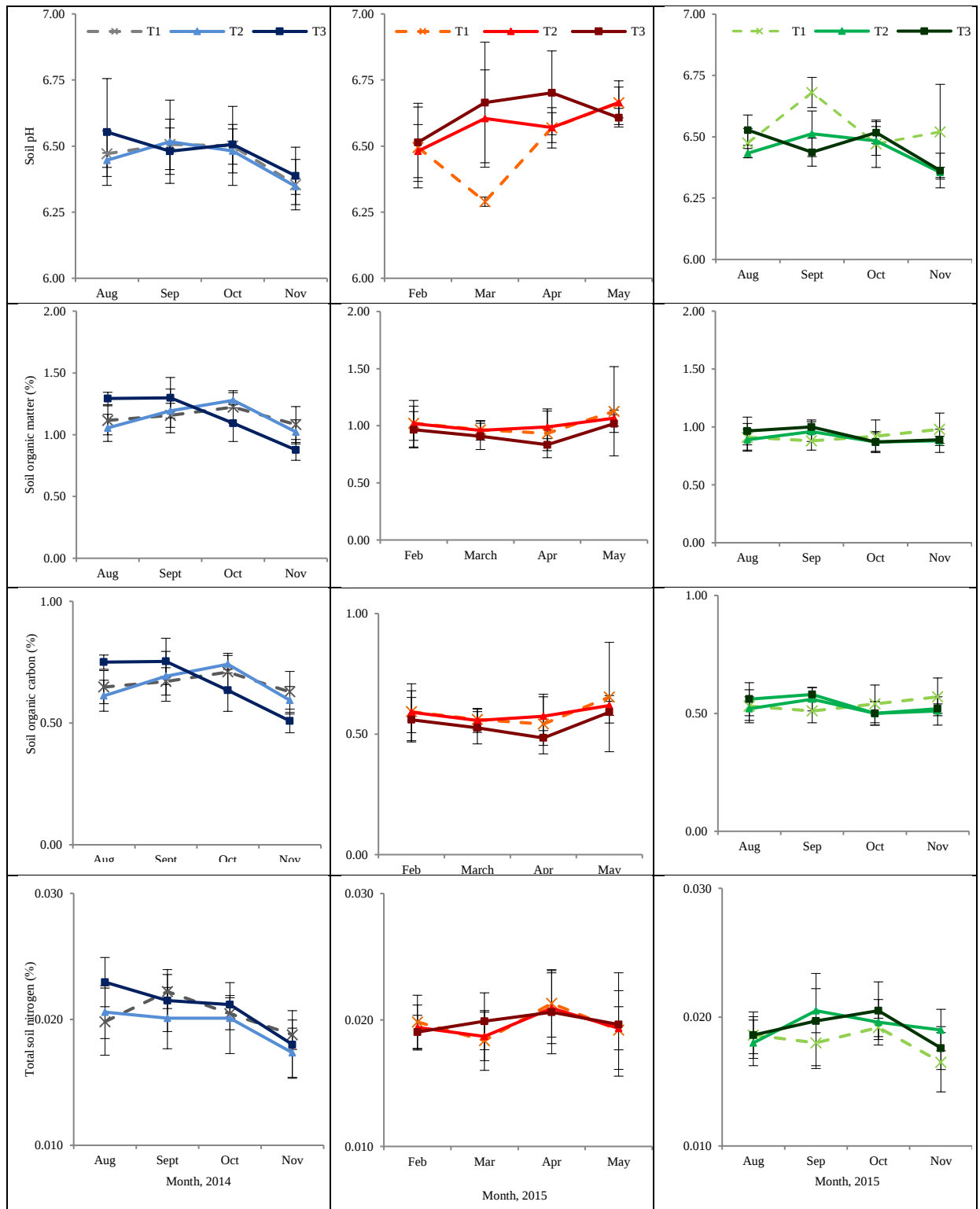
5.1.2.5 ปริมาณไนโตรเจนรวม (Total nitrogen)

ปริมาณไนโตรเจนรวมทั้งหมดในดินในช่วงของการเพาะปลูกข้าวโพด ทั้งสามรอบการเพาะปลูกพบว่า มีค่าต่ำมาก ($< 1.00\%$) และรอบการเพาะปลูกที่มีค่าต่ำที่สุด คือ รอบการเพาะปลูกที่ 3 (รูปที่ 5.6) และพบว่าปริมาณไนโตรเจนรวมในแต่ละตำรับการทดลอง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$)

5.1.2.6 อัตราส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจน (C: N ratio)

อัตราส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจน (C:N ratio) มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ มีค่าอยู่ระหว่าง 20:1 ถึง 30:1 เมื่อมีการย่อยสลายอินทรีย์สารในดิน กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการ mineralization กระบวนการ mineralization ปล่อยไนโตรเจนในรูปของ NH_4^+ โดยพืชสามารถดูดซับได้ ในกรณีที่ C:N ratio มากกว่า 30:1 จุลินทรีย์จะสะสมไนโตรเจน ในรูป NH_4^+ และ NH_3^- ออกจากดิน กระบวนการนี้เรียก immobilization

ในรอบการเพาะปลูกที่ 1 ค่า C:N ratio ทุกตำรับการทดลองอยู่ในช่วง $31.14 \pm 5.66\%$ ซึ่งมีความมากกว่ารอบการเพาะปลูกที่ 2 อยู่ในช่วง $23.30 \pm 5.42\%$ และรอบการเพาะปลูกที่ 3 อยู่ในช่วง $28.84 \pm 0.78\%$ แต่ละรอบการเพาะปลูกค่า C:N ratio ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตำรับการทดลอง พบว่าแต่ละตำรับการทดลองค่า C:N ratio มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสรุปพบว่า C:N ratio ในแปลงทดลอง มีค่าค่อนข้างสูงในระหว่างการเจริญเติบโตของข้าวโพดและสัมพันธ์กับการทำงานของจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งที่ผ่านมาโดยทั่วไปพบว่าอินทรีย์วัตถุ อินทรีย์คาร์บอน และไนโตรเจนในดิน ในภูมิภาคเขตร้อนจะมีค่าค่อนข้างคงที่ (ตารางที่ 5.2)



(a) 1stCrop in 2014 (wet season)

(b) 2ndCrop in 2015 (dry season)

(c) 3rdCrop in 2015 (wet season)

รูปที่ 5.6 Soil pH, soil organic matter, soil organic carbon and total soil nitrogen in the wet season 2014: 1stCrop (a), dry season 2015: 2ndCrop (b) and wet season 2015: 3rdCrop on maize production

ตารางที่ 5.2 The average values of soil physical, soil fertility and inorganic nitrogen during cropping experiment

Parameters	Unit	Seasons								
		Wet season 2014: 1 st Crop			Dry season 2015: 2 nd Crop			Wet season 2015: 3 rd Crop		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Soil pH (H ₂ O)		6.48±0.15 ^a	6.52±0.17 ^a	6.55±0.16 ^a	6.50±0.18 ^a	6.60±0.19 ^a	6.62±0.16 ^a	6.55±0.15 ^a	6.46±0.10 ^a	6.47±0.12 ^b
Soil water content	%	19.90±7.55 ^a	20.11±6.74 ^a	19.99±7.19 ^a	17.34±8.72 ^a	15.93±8.45 ^a	16.39±8.77 ^a	21.11±8.78 ^a	20.18±8.66 ^a	21.34±8.22 ^a
Bulk density	g cm ⁻³	1.17±0.44 ^b	1.20±0.90 ^b	1.16±0.05 ^a	1.26±0.10 ^a	1.28±0.12 ^{ab}	1.30±0.99 ^b	1.00±0.00 ^a	1.07±0.12 ^b	1.17±0.12 ^c
Water filled pore space (WFPS)	%	35.62±13.76 ^a	36.91±12.95 ^a	35.79±13.25 ^a	33.11±16.72 ^a	31.18±16.63 ^a	32.26±17.25 ^a	38.12±15.36 ^a	36.26±14.50 ^a	37.93±13.99 ^a
Soil organic matter	%	1.08±0.19 ^a	1.07±0.15 ^a	1.04±0.20 ^a	1.01±0.23 ^a	1.01±0.13 ^a	0.93±0.12 ^a	0.91±0.10 ^a	0.91±0.09 ^a	0.91±0.10 ^a
Soil organic carbon	%	0.63±0.11 ^a	0.62±0.09 ^a	0.60±0.12 ^a	0.59±0.13 ^a	0.58±0.07 ^a	0.54±0.07 ^a	0.53±0.06 ^a	0.53±0.05 ^a	0.56±0.05 ^b
Total soil nitrogen	%	0.199±0.002 ^a	0.196±0.002 ^a	0.204±0.003 ^a	0.197±0.003 ^a	0.196±0.002 ^a	0.198±0.003 ^a	0.182±0.002 ^a	0.192±0.02 ^b	0.191±0.02 ^b
C:N ratio	Ratio	31.44±5.20 ^a	32.21±6.01 ^a	29.78±5.63 ^a	30.05±6.26 ^a	30.11±4.74 ^a	27.74±5.14 ^a	29.17±4.32 ^{ab}	27.76±3.68 ^a	29.59±4.91 ^b
NH ₄ ⁺	mg N kg ⁻¹	8.57±3.69 ^a	9.73±4.02 ^{ab}	10.42±3.34 ^b	7.10±3.14 ^a	8.42±3.09 ^b	10.69±2.86 ^c	3.93±1.03 ^a	9.94±2.29 ^b	13.59±2.87 ^c
Significance				*		*	**		**	**
NO ₃ ⁻	mg N kg ⁻¹	29.38±10.87 ^a	34.85±10.12 ^b	39.28±11.17 ^c	14.85±7.73 ^a	26.50±14.89 ^b	30.45±13.67 ^b	34.04±9.80 ^a	42.99±13.30 ^b	48.68±12.67 ^c
Significance			*	**		**	**		**	**
NO ₂ ⁻	mg N kg ⁻¹	8.04±3.29 ^a	12.02±4.89 ^b	12.26±5.41 ^b	6.59±5.36 ^a	8.86±6.05 ^b	9.86±5.18 ^b	1.96±0.67 ^a	6.30±1.97 ^b	12.48±3.37 ^c
Significance			**	**		**	**		**	**

The values presented are mean ± SD. The different lowercase letters indicate significant differences between treatment and the single asterisk (*) and double asterisk (**) indicate significant differences compared between the treatment T1 at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

5.1.2.7 Inorganic nitrogen

ไนโตรเจนในดินส่วนใหญ่มาจากอินทรีย์ไนโตรเจน มีเพียงส่วนน้อยที่มาจากอนินทรีย์ไนโตรเจน ซึ่งประกอบด้วย แอมโมเนียม (NH₄⁺) ไนเตรต (NO₃⁻) และไนไตรต์ (NO₂⁻) รวมแล้วน้อยกว่า 5% ของปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (Brady and Weil, 2008) พืชสามารถใช้อนินทรีย์ไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์เพื่อการเจริญเติบโตของพืช ปริมาณอนินทรีย์ไนโตรเจนในดินคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นจากปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม อนินทรีย์ไนโตรเจนปลดปล่อยมาจากกระบวนการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุ

ผลการทดลองค่าของอนินทรีย์ไนโตรเจนในดินในการเพาะปลูก ตรวจวัดแอมโมเนียม ไนเตรตและไนไตรท์ (รูปที่ 5.7) และสรุปผลการศึกษาค่าเฉลี่ยของอนินทรีย์ไนโตรเจนต่อน้ำหนักดินแห้ง (±SD) โดยมีการเก็บข้อมูลทุกเดือนตลอดรอบการเพาะปลูก ทั้ง 3 รอบการ

เพาะปลูก อินทรีย์ไนโตรเจนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น เนื้อดิน การชะล้าง การใช้จากพืช อุณหภูมิ ความชื้นในดิน และกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ในสภาวะมีอากาศและไร้อากาศ

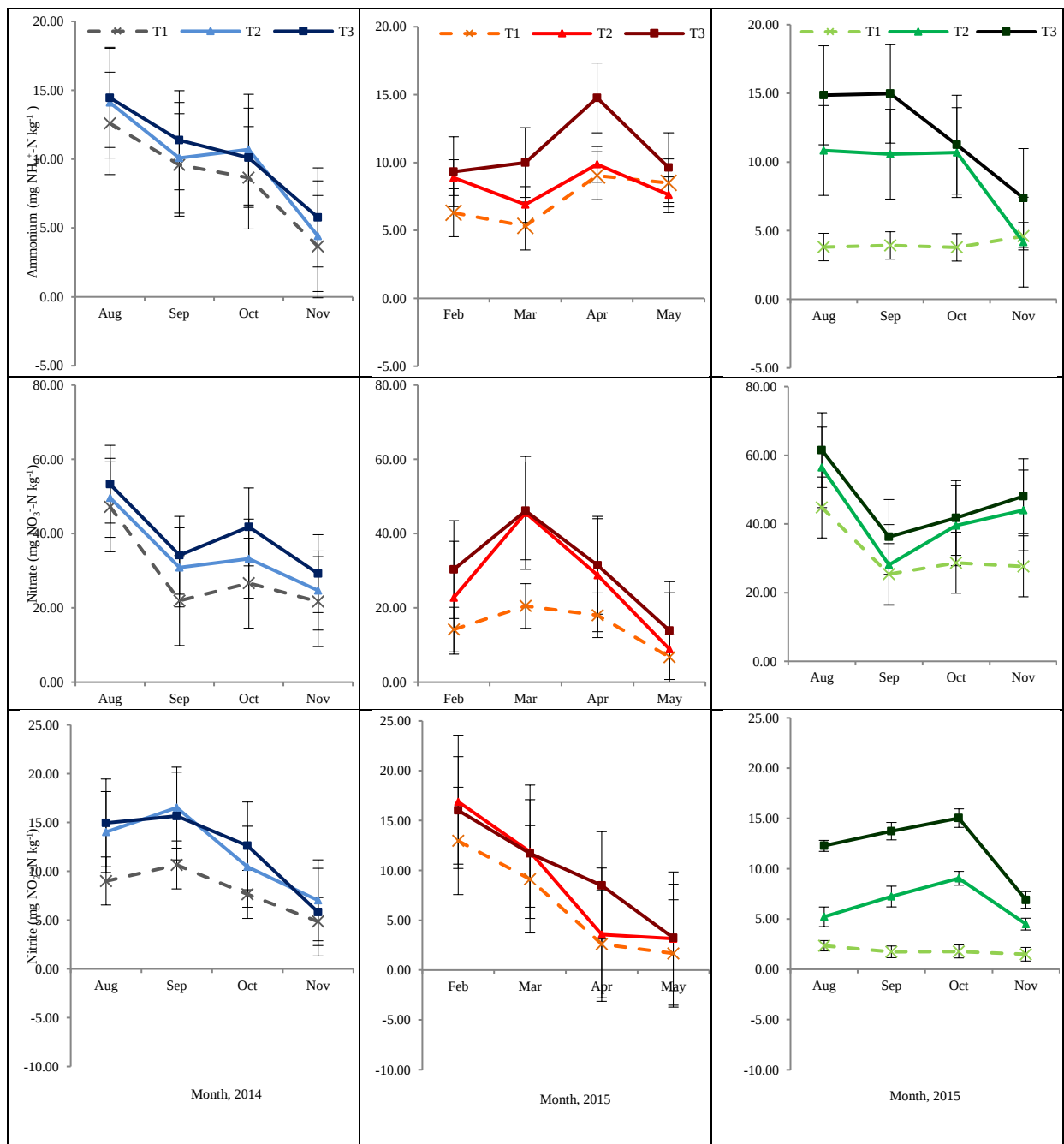
ปริมาณแอมโมเนียมในดิน (NH_4^+) ในตำรับการทดลองที่ 2 และ 3 มีค่าเฉลี่ย แอมโมเนียม (NH_4^+) สูงกว่าตำรับการทดลองที่ 1 ($p \leq 0.05$) และตำรับการทดลองที่ 3 มีปริมาณ แอมโมเนียมมากที่สุดที่ระดับ โดยปริมาณแอมโมเนียมสูงสุดของตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่า 10.42 ± 3.34 , 10.69 ± 2.68 และ $13.59 \pm 2.87 \text{ mg NH}_4^+ \cdot \text{Nkg}^{-1}$ ตามลำดับ ส่วนปริมาณ แอมโมเนียมที่น้อยที่สุดพบว่าในตำรับการทดลองที่ 1 และปริมาณแอมโมเนียมน้อยที่สุดในรอบการ เพาะปลูกที่ 1, 2 และ 3 ที่มีค่า 8.57 ± 3.69 , 7.10 ± 3.14 , และ $3.93 \pm 1.03 \text{ mg NH}_4^+ \cdot \text{Nkg}^{-1}$ ตามลำดับ ในทุกเดือนของการเพาะปลูกข้าวโพด ตำรับการทดลองที่ 3 จะมีค่าเฉลี่ยของ NH_4^+ สูง ที่สุด และมีค่าลดลงซึ่งปริมาณแอมโมเนียมจะสูงในช่วงแรกและลดลงจนถึงรอบสุดท้ายของการเก็บเกี่ยวและปริมาณแอมโมเนียมจะสูงในช่วงแรกของการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 และพบว่าทุกตำรับการทดลองปริมาณแอมโมเนียมมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) (ตารางที่ 5.2)

สำหรับปริมาณไนเตรตในดิน (NO_3^-) ผลการศึกษาพบว่าในตำรับการทดลองที่ 2 และ 3 มีความแตกต่างจากตำรับการทดลองที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยตำรับการทดลองที่ 3 มีการใส่ปุ๋ยมากที่สุด ปริมาณไนเตรตมีค่า 39.28 ± 11.77 และ $30.45 \pm 13.67 \text{ mg NH}_4^+ \cdot \text{Nkg}^{-1}$ และตำรับควบคุมไม่มีการใส่ปุ๋ยมีปริมาณไนเตรตน้อยที่สุด 29.38 ± 10.87 และ $14.85 \pm 7.73 \text{ mg NH}_4^+ \cdot \text{Nkg}^{-1}$ โดยพบว่าตำรับการทดลองที่ 1 ไนเตรตมีการลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของข้าวโพด เพราะข้าวโพดสามารถใช้ไนโตรเจนในรูปของไนเตรต พบว่าทุกตำรับการทดลองปริมาณไนเตรตมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) (ตารางที่ 5.2)

จากการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยของแอมโมเนียมน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของไนเตรตในดิน เนื่องจากแอมโมเนียมมีการออกซิไดซ์จากไนโตรที่ไปเป็นไนเตรตและมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันในสภาพมีอากาศ ศักยภาพของอัตราไนตริฟิเคชันในรอบการเพาะปลูกที่ 1 สูงกว่ารอบการเพาะปลูกที่ 2 และค่าเฉลี่ยไนโตร ($\pm \text{SD}$) มีค่าน้อยมากในตำรับการทดลองที่ 1 ของรอบการเพาะปลูกที่ 1, 2 และ 3 มีค่า 8.04 ± 3.29 , 6.59 ± 5.36 และ $1.96 \pm 0.67 \text{ mg NH}_4^+ \cdot \text{Nkg}^{-1}$ ตามลำดับ ส่วนตำรับการทดลองที่ 3 มีค่าสูงที่สุดของรอบการเพาะปลูกที่ 1, 2 และ 3 มีค่า 12.26 ± 5.41 , 9.86 ± 5.18 และ $12.48 \pm 3.37 \text{ mg NH}_4^+ \cdot \text{Nkg}^{-1}$ ตามลำดับ พบว่าทุกตำรับการทดลองปริมาณไนโตร มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) (ตารางที่ 5.2)

อินทรีย์ไนโตรเจนในดิน มีการสูญเสียได้ง่ายด้วยกระบวนการต่างๆ เช่น ammonium volatilization, Nitrification และ Denitrification ในดินเกษตร อินทรีย์วัตถุและอนุภาคดินเหนียวมีอนุภาค anions (-) ก็จะจับอนุภาคของ cations (+) ได้ง่าย ซึ่งมี NH_4^+ และ NO_3^-

มีการศึกษาพบว่าปุ๋ยไนโตรเจนที่ใส่สำหรับการปลูกข้าวโพด ขนาดพื้นที่ $100\text{--}275 \text{ kg N ha}^{-1}$ มีปริมาณไนโตรเจน 70% และพืชสามารถดูดไปใช้ได้ (Ma et al., 1995) และส่วนที่เหลือที่อยู่ในดิน (Borin and Tocchetto, 2007) และ NH_3^+ volatilization (Cai et al., 2002) และ 25% สูญหายไปโดยเป็นไนเตรตลงสู่ใต้ดิน (Zhao et al., 2011) และ 2-7% สูญหายไปด้วยกระบวนการ denitrification (Cai et al., 2002; Borin and Tocchetto, 2007) และผลที่เหลือคือไนเตรตที่พืชดูดไปใช้หรือการสูญเสียด้วยกระบวนการชะล้าง (leaching) และชะละลาย (runoff) ซึ่งทำให้มีการสูญเสียธาตุอาหารด้วย

(a) 1stCrop 2014 (wet season)(b) 2nd Crop 2015 (dry season)(c) 3rd Crop 2015 (wet season)

รูปที่ 5.7 The inorganic nitrogen in the wet season 2014: 1stCrop (a), dry season 2015: 2ndCrop (b) and wet season 2015: 3rdCrop (c) on maize production

5.2 การปล่อยไนตรัสออกไซด์ (N₂O fluxes and N₂O emissions)

N₂O fluxes จากการเพาะปลูกข้าวโพดทั้ง 3 รอบการเพาะปลูก ภายใต้การจัดการปุ๋ยที่มีปริมาณแตกต่างกัน สรุปผลการทดลองเป็นค่าเฉลี่ย (n=4) และค่าการปล่อยสะสม (accumulated emission) ของสามรอบการเพาะปลูก รอบการเพาะปลูกที่ 1 (กรกฎาคม-พฤศจิกายน 2558) รอบ

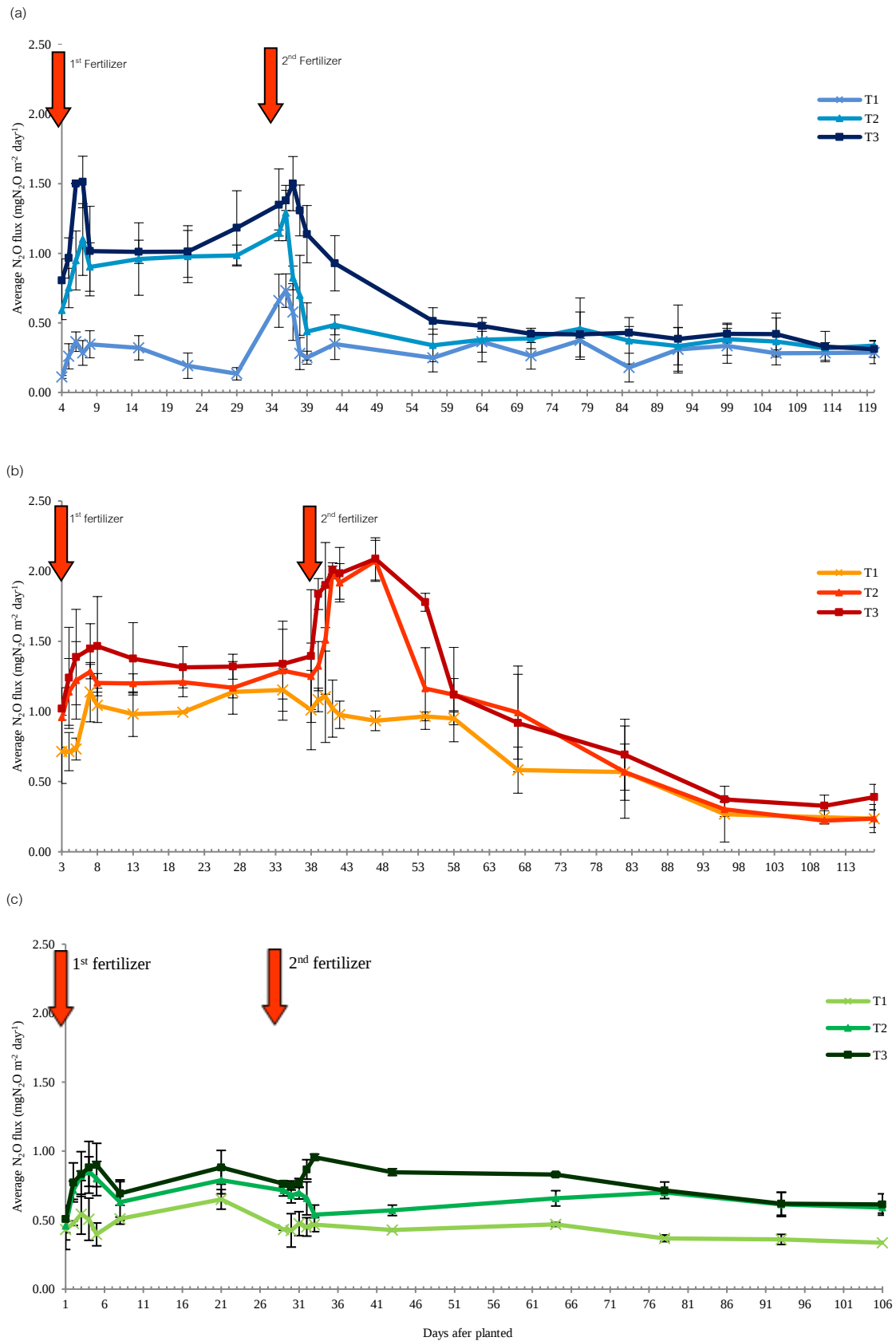
การเพาะปลูกที่ 2 (กุมภาพันธ์-มิถุนายน 2559) และรอบการเพาะปลูกที่ 3 (สิงหาคม-พฤศจิกายน 2559) ซึ่งมีการจัดการปุ๋ยที่มีปริมาณแตกต่างกัน แต่มีการจัดการปลูกในประเด็นอื่น ๆ ที่เหมือนกัน ทั้ง 3 รอบการเพาะปลูก เช่น การให้น้ำ การไถพรวน วิธีการปลูก และการกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น

5.2.1 N₂O fluxes

การวางแผนการทดลองมีทั้งหมด 3 ดำรับการทดลอง มีการใส่ปุ๋ยปริมาณแตกต่างกัน ดังนี้ (1) ดำรับควบคุม ไม่ใส่ปุ๋ย (T1) (2) ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 97 kg N ha⁻¹ (T2) และ (3) และดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 155 kg N ha⁻¹ (T3) ตามลำดับ มีการใส่ปุ๋ย 2 ครั้ง ต่อบรอบการเพาะปลูก การใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 ปุ๋ยสูตร 16-20-0 และการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 ปุ๋ยยูเรีย สูตร 46-0-0

ในรอบการเพาะปลูกที่ 1 พบว่า ดำรับการทดลองที่ 1 มีค่าเฉลี่ยของ N₂O flux มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกดำรับการทดลอง (2 และ 3) ($P < 0.01$) N₂O flux ของดำรับการทดลองที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.33 ± 0.19 mg N₂O m⁻².day⁻¹ ส่วนดำรับการทดลองที่ 2 และ 3 มีค่า 0.65 ± 0.35 และ 0.88 ± 0.45 mg N₂O m⁻².day⁻¹ ตามลำดับ N₂O flux ของดำรับการทดลองที่ 2 และ 3 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) และมีค่าสูงกว่าดำรับการทดลองที่ 1 และ 3 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) และสูงกว่าดำรับการทดลองที่ 2 ผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบด้วยวิธี LSD และ DMRT test (รูปที่ 5.8 และตารางที่ 5.3)

ในรอบการเพาะปลูกที่ 2 พบว่า ดำรับการทดลองที่ 1 มีค่าต่ำที่สุดและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกดำรับการทดลอง ($P < 0.01$) ดำรับการทดลองที่ 1 มีค่า 0.83 ± 0.32 mg N₂O m⁻².day⁻¹ ส่วนดำรับการทดลองที่ 2 และ 3 มีค่า 1.11 ± 0.53 และ 1.29 ± 0.55 mg N₂O m⁻².day⁻¹ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบ N₂O fluxes จากดำรับการทดลองที่ 2 และ 3 พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) แต่สูงกว่าดำรับการทดลองที่ 1 และ 3 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกัน ($P < 0.05$) และสูงกว่าดำรับการทดลองที่ 2 จากการเปรียบเทียบหลายปัจจัยโดยใช้วิธี LSD และ DMRT tests ค่าเฉลี่ยของ N₂O fluxes จากรอบการเพาะปลูกที่ 1 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับรอบการเพาะปลูกที่ 2 ($P < 0.01$) และสูงกว่า 1.08 ± 0.51 mg N₂O m⁻².day⁻¹ (รอบการเพาะปลูกที่ 1) และ 0.63 ± 0.41 mg N₂O m⁻².day⁻¹ ทุกดำรับการทดลองด้วยการเปรียบเทียบหลายปัจจัยโดยใช้ LSD และ DMRT tests รอบการเพาะปลูกที่ 3 N₂O flux ของรอบการเพาะปลูกที่ 3 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่า 0.46 ± 0.16 , 0.68 ± 0.18 และ 0.78 ± 0.21 mg N₂O m⁻².day⁻¹ และทุกดำรับการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) โดยดำรับการทดลองมีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ ดำรับการทดลองที่ 2 และ 3 มีการปล่อย N₂O flux มากกว่าดำรับการทดลองที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) และพบว่า N₂O flux จะมีค่าสูงในช่วงของการใส่ปุ๋ยและหลังจากนั้นจะลดลงโดยในการใส่ปุ๋ยครั้งแรก N₂O flux จะลดลงในช่วง 7 วันและส่วนรอบการเพาะปลูกที่ 2 และ 3 ใช้เวลาประมาณ 5 วัน (รูปที่ 5.8 และตารางที่ 5.3)



รูปที่ 5.8 Variations of mean N₂O fluxes of maize field experiments during applied different fertilizer in wet season 2014: 1stCrop (a), dry season 2015: 2ndCrop (b) and wet season 2015: 3rdCrop on maize cultivation

N_2O flux ในรอบการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 จะมีแนวโน้มสูงกว่ารอบการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 เนื่องจากการใส่ปุ๋ยรอบที่ 2 ใส่ปุ๋ยสูตร 46-0-0 ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจน 46% มากกว่า จากปุ๋ยสูตร 16-20-0 ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนเพียง 16% พบว่าปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) มีการละลายอย่างรวดเร็วและทำให้ค่า N_2O flux มีค่าสูงแต่เป็นช่วงระยะเวลาสั้นๆ จากการผลิต N_2O ระหว่าง 5-7 วัน ภายหลังจากใส่ปุ๋ยไปและมีผลต่อปริมาณการปล่อย N_2O ถึง 18.18-31.78%

ค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์ (N_2O flux) ที่มีค่าสูงที่สุดคือจากตำรับการทดลองที่ 3 และพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกตำรับการทดลอง ($P < 0.01$) และตำรับการทดลองที่มีค่า N_2O flux สูงรองลงมาได้แก่ ตำรับการทดลองที่ 2 และ 1 ตามลำดับ และพบว่าค่า N_2O fluxes ในตำรับการทดลองที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองที่ 1 มีการเพิ่มขึ้นของ N_2O flux ประมาณ 96.97 และ 33.73% และเมื่อเปรียบเทียบกับจากตำรับการทดลองที่ 3 และ 1 มีการเพิ่มขึ้นประมาณ 166.67 และ 55.42% ($P < 0.01$) (ตารางที่ 5.3)

ในรอบการเพาะปลูกที่ 1 มีการเจริญเติบโตมากกว่ารอบการเพาะปลูกที่ 2 โดยปกติแล้ว N_2O ที่เป็นค่า baseline ที่มีอยู่ในดิน ในการทดลองนี้แทนด้วยตำรับการทดลองที่ 1 ซึ่งจากการวิจัยที่ผ่านมารายงานว่าในดินจะมีกระบวนการที่ทำให้เกิด N_2O โดยกระบวนการที่เกี่ยวข้องเกิดขึ้น 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน (Xu et al, 2008; Lognoul et al., 2017)

การปล่อย N_2O ในดินเกษตรเกิดจากกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ดิน ด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน Nitrification เป็นกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ในสภาวะมีอากาศ จะเกิดการออกซิเดชัน NH_4^+ ไม่เป็น NO_3^- เมื่อมีออกซิเจนจำกัด NH_4^+ จะออกซิไดซ์เป็น NO_2^- และผลิต N_2O ส่วนกระบวนการ denitrification เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแบบไร้อากาศ จุลินทรีย์จะเปลี่ยน NO_3^- ไปเป็น NO_2^- และก๊าซ NO , N_2O และ N_2 ตามลำดับ ปริมาณไนโตรเจนที่ใส่ลงไปในดินเป็นตัวควบคุมการปล่อย N_2O และเมื่อมีการเพิ่มไนโตรเจนลงในดินก็จะมีผลไปเพิ่มขบวนการทั้งสองกระบวนการ (ไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน) ปุ๋ยไนโตรเจนมาจากการใส่ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยอนินทรีย์ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการปล่อย N_2O ในปริมาณสูง โดยเฉพาะการปล่อยทางตรง (direct emissions) การใส่ปุ๋ยปกติจะเป็นการเพิ่มปริมาณการปล่อย N_2O สู่บรรยากาศ (Denman et al. 2007) ปุ๋ยไนโตรเจนมีผลให้เกิดการปล่อย N_2O ทางตรง และเป็นแหล่งการปล่อยทางอ้อม ถ้าเปรียบเทียบการปล่อย N_2O ในภูมิภาคเขตร้อน (Tropical zone) จะมีค่าการปล่อยสูงกว่าเขตอบอุ่น (Temperate zone) (Veldkamp et al. 1998) N_2O flux ในดินเกษตรเขตร้อน มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยไนตรัสออกไซด์ ได้แก่ คุณสมบัติของดินและการใส่ปุ๋ย

5.2.2 การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสม (N_2O fluxes accumulation)

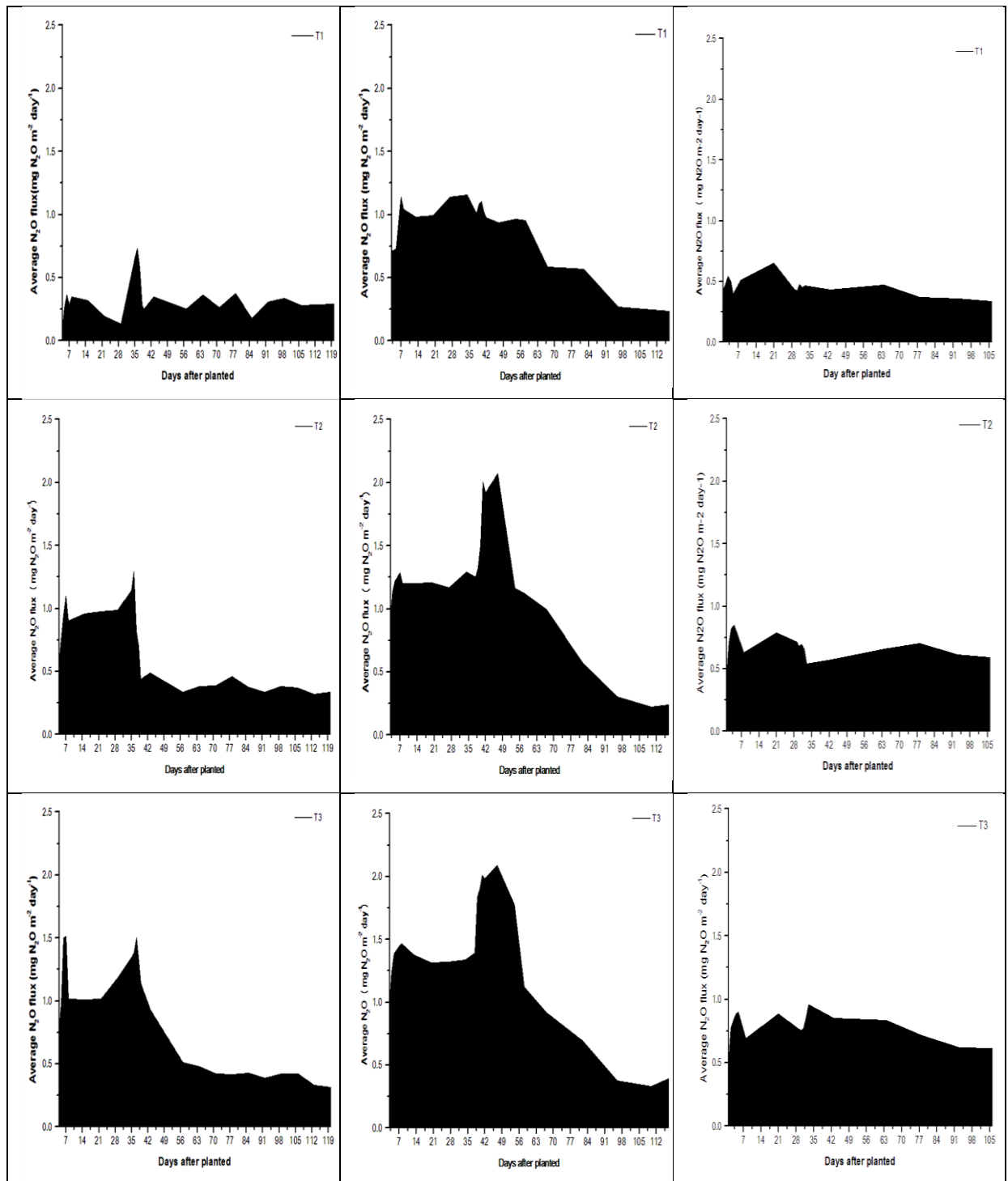
ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสม (N_2O fluxes accumulation) พบว่าในรอบการเพาะปลูกที่ 1, 2 และ 3 ตำรับการทดลองที่ 1 มีการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสมต่ำที่สุดมีค่า 0.35, 0.82 และ 0.47 $kg N_2O ha^{-1} crop^{-1}$ ตำรับการทดลองที่ 2 มีค่า 0.65, 1.07 และ 0.69 $kg N_2O ha^{-1} crop^{-1}$ และตำรับการทดลองที่ 3 มีค่า 0.80, 1.20 และ 0.81 $kg N_2O ha^{-1} crop^{-1}$ (ตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.9) โดยทั่วไปปุ๋ยไนโตรเจนและไนโตรเจนในดินเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการปล่อย N_2O จากภาคการเกษตร (Bouwman et al., 2002)

ตารางที่ 5.3 N₂O fluxes, N₂O accumulation fluxes and N₂O direct emission factor during applied different fertilizer in wet season and dry season

T ¹⁾	Wet season 2014: 1 st Crop				Dry season 2015: 2 nd Crop				Wet season 2015: 3 rd Crop				Mean of EFs
	Ave. N ₂ O	Com. T1	Accum	EFs	Ave. N ₂ O	Com. T1	Accum	EFs	Ave. N ₂ O	Com. T1	Accum	EFs	
T1	0.33 ±0.17 ^a	-	0.35	-	0.83 ±0.32 ^a	-	0.82	-	0.46 ±0.16 ^a	-	0.47	-	-
T2	0.65 ±0.35 ^b	96.97	0.65	0.67	1.11 ±0.53 ^b	33.73	1.07	1.11	0.68 ±0.18 ^b	47.83	0.69	0.71	0.83
T3	0.88 ±0.45 ^c	166.67	0.80	0.52	1.29 ±0.55 ^c	55.42	1.20	0.78	0.78 ±0.21 ^c	69.57	0.81	0.52	0.61

¹⁾ T, Treatment; Ave. N₂O, Average N₂O flux (mg N₂O m⁻² day⁻¹); Com. T1, Compared average N₂O flux to T1 treatment (%); Accum, N₂O flux accumulation (kg N₂O ha⁻¹ crop⁻¹); EF, emission factor (%).

Data are given as mean ± standard error of mean deviation (n=4). Different lowercase letters indicate significant differences between treatment ($P<0.01$).



(a) 1stCrop in 2014 (Wet season)

(b) 2ndCrop in 2015 (Dry season)

(c) 3rdCrop in 2015 (Wet season)

รูปที่ 5.9 N₂O fluxes accumulation calculated from the area under the curve

% WFPS ในดินในรอบการเพาะปลูกที่ 1 จะมีค่าต่ำกว่ารอบการเพาะปลูกที่ 2 ซึ่งผลการทดลองมีค่าแตกต่างจากการทดลองอื่นๆ โดยแนะนำว่าในภาวะไร้อากาศจะมีศักยภาพในการลดการปล่อย N₂O และในสภาพที่มีความชื้น N₂O มีการสูญเสียจากดินปริมาณสูงกว่า ผลการศึกษาของ (de Klein et al. (2003) พบว่า N₂O flux จะมีการปล่อยสูงกว่าเมื่อมีฝน อย่างไรก็ตามปริมาณการปล่อย N₂O ที่สูงนี้จะเกิดในช่วงสั้นๆ และจะมี %WFPS ต่ำ (Bell et al., 2015) D.J. Krol et al., 2016

พบว่าการปล่อย N_2O ปริมาณสูงในช่วงฤดูร้อนจะมี %WFPS ต่ำ น้อยกว่านี้ Carter (2007) พบว่า ขบวนการ Nitrification และ Denitrification มี %WFPS 45% โดยมีการยืนยันว่าทั้งสองขบวนการ จะสร้าง N_2O ในช่วงฤดูร้อน

ในช่วงฤดูแล้ง (2^{nd} crop) ภายหลังจากมีการใส่ปุ๋ยมีการเกิดขบวนการ Nitrification อย่าง รวดเร็วและมีระดับของ NH_4^+-N ในดิน ในขณะเดียวกันก็มีอัตราการปล่อย N_2O ปริมาณสูง โดยเป็น ตัวชี้วัดว่ามีการสูญเสียไนโตรเจนจากดินอย่างรวดเร็วและยังพบว่ามีปริมาณ NO_3^--N ในดินปริมาณต่ำ เช่นกัน

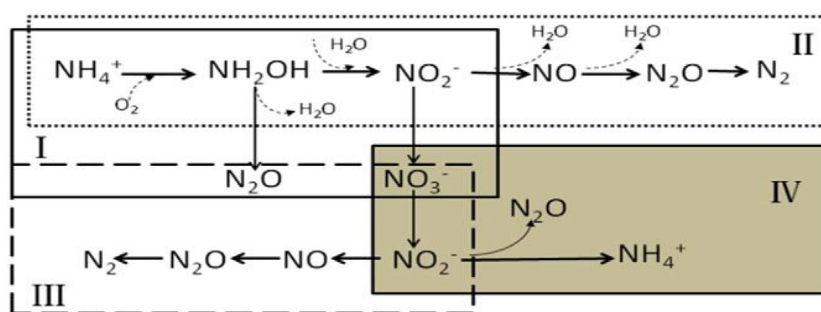
60% ของ %WFPS จะสัมพันธ์กับขบวนการ denitrification และโดยทั่วไปพบว่าปริมาณ N_2O fluxes ที่สูงจะสัมพันธ์กับจำนวนวันของ wet season (2^{nd} crop) ที่มีปริมาณสูง อย่างไรก็ตาม ใน wet season ก็แสดงค่า peak fluxes น้อย

ในช่วง 2^{nd} crop มีค่าการปล่อยสูง ซึ่งจากการทดลองพบว่าช่วง 2^{nd} crop (dry season in 2015) มีปริมาณฝนมากและมี %WFPS ปานกลาง และดินในช่วง 2^{nd} crop (dry season) แห้งกว่า 1^{st} crop และ 3^{rd} crop (wet season) เนื่องจากว่ามีอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิดินสูง เมื่อมีค่าการ ปล่อย N_2O ต่ำ แสดงว่า ในช่วงกลางๆ ของ 1^{st} crop (wet season)

1^{st} crop (wet season) พบว่า %WFPS และอุณหภูมิดินเด่นชัดมากและสัมพันธ์กับ ปริมาณ N_2O production ซึ่งเป็นในทางเดียวกันกับการศึกษาที่ผ่านๆ มาของ Weitz et al. (2001) และ Schaufler et al. (2010) ภายหลังจาก %WFPS ที่มากกว่า 60% (Bateman and Baggs, 2005) ในช่วงของ 1^{st} crop (wet season) พบว่าปริมาณทั้งหมดของการปล่อย N_2O เป็นผลพลอยได้ที่ผลิต จากขบวนการ denitrification ซึ่งมี %WFPS > 80% ทำให้ denitrifying bacteria ใช้ออกซิเจน จาก N_2O เป็นตัวรับ electron (electron acceptor) และผลิตก๊าซ N_2 ขึ้น (Veldkamp et al., 1998) มีการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า N_2O flux เพิ่มขึ้นแบบ exponentially สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของ %WFPS และอุณหภูมิดิน (Schaufler et al., 2010; Schindlbacher et al., 2004) และสัมพันธ์กับ Gaussian function และทฤษฎีของการพัฒนา anaerobic zone development (Smith et al., 2003) การปล่อย N_2O ด้วยขบวนการ Nitrification พบช่วงต้นของ 1^{st} crop (wet season) และ พบมากใน 2^{nd} crop (dry season) ในช่วงนี้มีปริมาณน้ำฝน ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนอินทรีย์ไนโตรเจน (organic nitrogen) ไปเป็น NH_4^+ ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าขบวนการ denitrification มีผล โดยตรงหรือเป็นขบวนการหลักต่อการปล่อย N_2O ใน 1^{st} crop และ 3^{rd} crop (wet season) และ ขบวนการ nitrification มีผลต่อการปล่อย N_2O ในช่วงของ 2^{nd} crop (dry season) (Kachenchart et al., 2012).

Microorganism-induced nitrification และ denitrification N_2O เป็นขบวนการหลักและ ผลผลิตหลัก ซึ่งคิดเป็น 90% ของการปล่อย N_2O ในบรรยากาศ (De Boer and Kowalchuk, 2001) N_2O เป็นตัวตั้งต้น เมื่อ N_2 ผลิตจาก Nitrate denitrification และเป็นตัวตั้งต้นระหว่าง hydroxylamine oxidation (Shiba and Smith, 1993; Peng and Chu, 2006) (รูปที่ 5.10) N_2O production ในดินและโดยทั่วไปพบว่า กระบวนการใช้อากาศ (aerobic conditions) คือ Nitrification process และแอมโมเนียจะเปลี่ยนรูปไปเป็น Nitrate ได้ง่ายมากจากการออกซิเดชัน ซึ่งประกอบด้วย 2 ระยะ ระยะที่ 1 แอมโมเนียจะออกซิไดส์ไปเป็นไนเตรตและ N_2O เปลี่ยนรูปโดย Nitrite bacteria ระยะที่ 2 nitrite เปลี่ยนรูปไปเป็น nitrate ด้วย nitrobacteria ซึ่งขบวนการ denitrification จะลดรูป nitrate ไปเป็น N_2 ซึ่งเป็นตัวตั้งต้นของ แหล่งปล่อย N_2O จากดิน (Opdyke et al., 2009) ขบวนการ denitrification เกิดในสภาพไร้อากาศ (anaerobic

conditions) และ 3 models ดังนี้ (1) มี denitrifier denitrification โดย denitrification bacteria ลด NO_3^- , NO_2^- , NO และ N_2O สู่รูป N_2 และ N_2O เป็นผลพลอยได้จากดิน (2) aerobic denitrification ด้วย heterotrophic nitrifiers ชื่อ pseudomonas denitrification สามารถ กระตุ้นทั้งสองขบวนการ nitrification และ denitrification ภายใต้สภาพมีอากาศ (aerobic conditions) และ N_2O ผลิตโดยเป็นตัว intermediate หรือ precursor (3) nitrification-denitrification หมายถึง ammonia หรือ hydroxylamine เป็นตัว oxidized ตั้งต้นและเปลี่ยนไป เป็น NO_2^- ซึ่งจะปลดปล่อย NO , N_2O และ N_2 โดย nitrifiers เป็น Nitrosomonas europaea, Nitroso spiramultiformis, และ methylosinus trichosporium (Sutka et al., 2006) ปัจจุบัน marine ammonia จะออกซิไดซ์ archaea สามารถ emulate nitrifier denitrification process (Santoro et al., 2011)



รูปที่ 5.10 N_2O productions in soils.

ผลผลิต N_2O ในดิน มีความซับซ้อนของขบวนการจาก nitrification และ denitrification process มีผลต่อการปล่อย N_2O ซึ่งจะสัมพันธ์กับ %ความชื้นในดิน และ %WFPS (Wunderlin et al., 2013) มีศักยภาพในการ oxidation reduction (Yu et al., 2001; Santoro et al., 2011) ความหลากหลายของจุลินทรีย์และกิจกรรมที่เกิดขึ้น (Conrad, 1996; Wunderlin et al., 2013) และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ในดิน (Ma et al., 2007) กระบวนการ nitrification และ denitrification มาจาก N_2O ในดินจากหลายแหล่งซึ่งมีผลต่อการเพิ่มขึ้น N_2O ในบรรยากาศ เป็นมาจากการใส่ปุ๋ยในภาคเกษตร

สภาพความเป็นกรดเป็นด่างในดิน (pH) เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อการปล่อย N_2O เพราะจะโดนยับยั้งถ้ามี pH ต่ำ และมี O_2 ในกระบวนการใช้อากาศ ในขบวนการ denitrification เป็นขบวนการที่ทำให้เกิด N_2O ถ้า pH สูงจะไม่ยับยั้งการปล่อย N_2O แต่ถ้า nitrification เป็นขบวนการหลักที่ผลิต N_2O การเพิ่ม pH จะ stimulates N_2O production (Signor and Cerri, 2013) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสภาพความเป็นกรดในดิน (pH ต่ำลง) เกิดจากการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนซึ่งจะส่งผลต่อการปล่อย N_2O จากดินได้เช่นกัน (Thomson et al., 2012) โดยกระบวนการ nitrification จะลดความเป็นกรดเป็นด่างในดิน (pH) ส่วนขบวนการ denitrification สามารถเพิ่มความเป็นกรดเป็นด่างในดิน (pH) (Khalil et al., 2004)

สำหรับ N_2O flux ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่า ผลของการศึกษามีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาในพื้นที่ประเทศจีน โดยการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในอัตรา $100\text{-}300 \text{ kg N ha}^{-1}$ จะมีปริมาณ N_2O flux ประมาณ $0.45\text{-}6.44 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2}\text{day}^{-1}$ (Ding et al., 2007; Sun et al., 2008; Wang et al., 2009)

5.2.3 ค่าการปล่อย (Emission factor)

ค่าการปล่อยทางตรง (Direct emission factor, (EFs) ค่าการปล่อยทางตรงจากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจน รอบการเพาะปลูกที่ 1 มีค่า 0.67 และ 0.52% สำหรับดำรับการทดลองที่ 2 และ 3 รอบการเพาะปลูกที่ 2 มีค่า 1.11 และ 0.78% สำหรับดำรับการทดลองที่ 2 และ 3 และ รอบการเพาะปลูกที่ 3 มีค่า 0.71 และ 0.52% สำหรับดำรับการทดลองที่ 2 และ 3 ส่วนค่าเฉลี่ย 0.83 และ 0.61% ของทั้ง 3 รอบการเพาะปลูก (ตารางที่ 5.3)

ค่าการปล่อยตรง (EFs) มีค่าสูงที่สุดที่รอบการเพาะปลูกที่ 2 ที่ดำรับการทดลองที่ 2 มีอัตราการใส่ปุ๋ย 97 kg N ha⁻¹ มีค่า 1.11% และมีค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 รอบการเพาะปลูก เป็น 0.83 และ 0.61% ของดำรับการทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ (ตารางที่ 5.3) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่า EFs ของ IPCC default มีค่า 1.0% และค่าเฉลี่ยระดับโลกสำหรับการผลิตข้าวโพดเป็น 1.10% (Linguist et al, 2012) จากที่ผ่านมาพบว่าค่า EFs ของ IPCC มีค่าสูงกว่าค่าที่เป็นจริง ถ้ามีการศึกษาโดยศึกษาในเขตภูมิภาคของตนเองโดยใช้ค่า EFs ในระดับ Tier 2 จะสามารถทำให้ค่า EFs เพื่อใช้ในการประเมินมีค่าที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ค่า EFs ที่ต้องการการพัฒนา เช่น จากตัวอย่างการศึกษานี้ ศึกษาค่า EFs จากการใส่ปุ๋ย ก็ยังมีค่า EFs อื่นๆ ที่ควรจะสนใจศึกษาเพิ่มเติมอีกเช่น EFs จากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน เป็นต้น (Metay et al., 2007) ศึกษาค่า EFs มีค่า 0.03% โดยมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยและมีค่า 0.18% ส่วน Marcio et al. (2015) พบว่า EFs ที่ 0.13% มาจากการใส่ปุ๋ยยูเรีย ในดินที่ไม่มีการไถพรวนและเป็นดิน oxisol ในประเทศบราซิล ส่วนในประเทศจีนก็มีการศึกษาเช่นเดียวกันพบว่า EFs ของ N₂O มีค่าต่ำกว่าประเทศบราซิล ซึ่งมีค่าเพียง 0.10-0.48% (Ju et al. (2011) และ Meng et al. (2005)) และมีค่าใกล้เคียงกับ EFs ของการใส่ปุ๋ยยูเรียอัตรา 0.19-0.20% (Yang et al., 2004) เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาอื่นๆ ที่ศึกษาในเขตภูมิภาคเขตร้อนมีค่า free drainage โดยทั่วไปศึกษาว่าดิน poor drainage ซึ่งเป็นค่าที่ใช้โดย IPCC ดังนั้นจึงทำให้ IPCC default มีค่าสูงกว่าค่าการปล่อยจริงและยังพบอีกว่า free drainage ในดินภูมิภาคเขตร้อน จึงมีส่วนช่วยลด N₂O emission นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลในทำนองเดียวกัน ได้แก่ อัตราการระเหยน้ำสูงในภูมิภาคนี้จะทำให้ดินแห้งเร็วขึ้นซึ่งช่วยลดการปล่อย N₂O และค่าสูงสุดของขบวนการ denitrification ส่วน nitrification เกิดใน aerated soils การระบายน้ำอย่างรวดเร็วใน aerated soils โดยเฉพาะในช่วง ฤดูฝน จะทำให้เกิดค่าคงที่ของ micro aggregation คุณลักษณะนี้จะเกิดขึ้นในดิน oxisols ซึ่งเป็นการบอกคุณลักษณะโดยมีสารเชื่อม Fe oxides (Cementing action of oxides)

สำหรับผลการศึกษาี้ แสดงให้เห็นว่ามีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลให้ค่า EFs N₂O-direct emissions มีค่าแตกต่างกันออกไป เช่น ความสามารถในการระบายน้ำ (soil drainage capacity) เนื้อดิน (soil texture) และการไม่ไถพรวน (no-till) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเช่นเดียวกัน ดังนั้น ขั้นตอนการระบายน้ำและเนื้อดิน ควรเป็นปัจจัยอีกหลายๆ ปัจจัย เพื่อนำมาประกอบการศึกษา EFs N₂O direct emissions ด้วย เพื่อให้ได้ค่าการปล่อยทางตรงจากการใช้ปุ๋ย ซึ่งเป็นตัวแทนของประเทศมีความแม่นยำขึ้น

5.2.4 N₂O emissions

ค่าการปล่อย N₂O ทางตรงจากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนและ EFs จากการศึกษาแสดงในตารางที่ 5.4 ผลการศึกษาพบว่า ค่าการปล่อยทางตรงของรอบการเพาะปลูกที่ 2 มีค่าสูงกว่ารอบการเพาะปลูกที่ 1 และ 3 โดย รอบการเพาะปลูกที่ 2 มีค่า 1.08-1.21 kg N₂O-N ha⁻¹ รอบการเพาะปลูกที่ 1 มีค่า 0.65-0.81 kg N₂O-N ha⁻¹ และรอบการเพาะปลูกที่ 3 มีค่า 0.69-0.81 kg N₂O-N ha⁻¹ ตามลำดับนอกจากนี้พบว่าในตำรับการทดลองที่ 3 ที่มีการใส่ปุ๋ยอัตรา 155 kg N ha⁻¹ จะมีการปล่อย N₂O ทางตรงสูงที่สุดที่ค่าเฉลี่ย 0.94 kg N₂O -N ha⁻¹ การคำนวณการปล่อยโดยใช้ค่า EF Tier 1 จาก IPCC ที่มี EF 1.0% ของการปล่อยโดยตรง จากอัตราปุ๋ยที่ใส่จะมีการปล่อยเท่ากับ 0.97 และ 1.55 kg N₂O-N ha⁻¹ ในตำรับการทดลองที่ 2 และ 3 ตามลำดับ แต่ถ้าเป็นจากการทดลองสำหรับการศึกษานี้มีค่า 0.81 และ 0.94 kg N₂O-N ha⁻¹

ในปี 2558 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวโพดทั้งหมด 1,145,000 แยกตาร์ (1 แยกตาร์=6.25 ไร่) ปริมาณผลผลิต 4,610,992 ตัน และผลผลิตข้าวโพดต่อแยกตาร์ประมาณ 4.15 ตัน ในภาคเหนือของประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกข้าวโพด 793,266 แยกตาร์และภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีพื้นที่ 239,538 แยกตาร์ ตามลำดับ จังหวัดนครราชสีมาพื้นที่ปลูกข้าวโพด 108,371 แยกตาร์ และมีปริมาณผลผลิต 434,839 ตัน คิดเป็น 10% ของพื้นที่ปลูกข้าวโพดทั้งหมดในประเทศ (Office of agricultural economics, 2016)

ตารางที่ 5.4 Direct N₂O emissions from inorganic nitrogen fertilizer input to the soil

Treatment	Rate of N fertilizer (kg N ha ⁻¹)	N ₂ O (kg N ₂ O-N ha ⁻¹)			Mean annual N ₂ O (kg N ₂ O-N ha ⁻¹ yr ⁻¹) from this study	Mean annual N ₂ O (kg N ₂ O-N ha ⁻¹ yr ⁻¹) *used EF Tier 1
		Wet season 2014:1 st Crop	Dry season 2015:2 nd Crop	Wet season 2015:3 rd Crop	0.81	0.97
T2	97	0.65	1.08	0.69	0.81	0.97
T3	155	0.81	1.21	0.81	0.94	1.55

จากการประมาณค่าการปล่อย N₂O ทางตรงจากการใช้ปุ๋ยในพื้นที่ปลูกข้าวโพด (สำหรับการศึกษานี้) พบว่าจากพื้นที่ปลูกข้าวโพดทั้งหมดในประเทศมีการปล่อย N₂O ประมาณ 858.75 และ 1,030.50 N₂O ha⁻¹.yr⁻¹ ที่อัตราการใส่ปุ๋ย 97 และ 15 kg N ha⁻¹.tons (ในตำรับการทดลองที่ 2 และ 3) ของการทดลองนี้ (ตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.11) ภาคเหนือของประเทศไทยมีการปล่อย N₂O ทางตรงสูงสุด 594.95 และ 713.94 tons N₂O ha⁻¹.yr⁻¹ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 179.65 และ 215.58 tons N₂O ha⁻¹.yr⁻¹ ภาคกลางมีการปล่อยน้อยที่สุด 84.21 และ 101.05 tons N₂O ha⁻¹.yr⁻¹ ด้วยอัตราการใส่ปุ๋ย 97 และ 115 kg N ha⁻¹ (ในตำรับการทดลองที่ 2 และ 3) ตามลำดับ เมื่อใช้ค่าการปล่อยจากการศึกษาเพื่อมาประเมินภาพรวมของจังหวัดนครราชสีมาค่าการปล่อย N₂O ทางตรง 81.28 และ 97.53 tons N₂O ha⁻¹.yr⁻¹

ตารางที่ 5.5 Annual direct N₂O emissions by region and Nakhon Ratchasima province

Treatment	Rate of N fertilizer (kg N ha ⁻¹)	Mean annual N ₂ O (kg N ₂ O ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Maize planted areas (ha)				
			Whole kingdom	Northern	Northeastern	central	Nakhon Ratchasima province
			1,145,000	793,266	239,538	112,281	108,371
			Total annual N ₂ O per maize planted areas (tons N ₂ O ha ⁻¹ yr ⁻¹) from EF this study				
T2	97	0.81	927.45	642.55	194.03	90.95	87.78
T3	155	0.94	1,076.30	745.67	225.17	105.54	101.87
			Total annual N ₂ O per maize planted areas (tons N ₂ O ha ⁻¹ yr ⁻¹) * used EF Tier 1				
T2	97	0.97	1,110.65	769.47	232.35	108.91	105.12
T3	155	1.55	1,774.75	1,229.56	371.28	174.04	167.98

5.2.5 ค่าศักยภาพทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming potential)

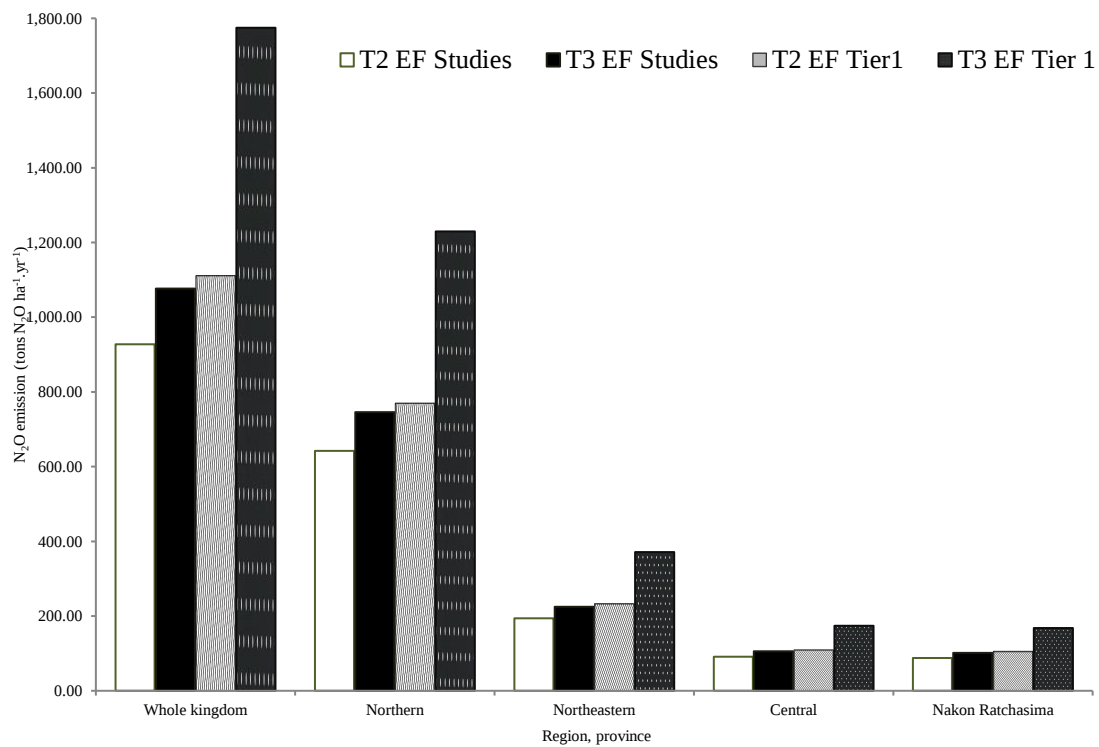
เมื่อประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยใช้ค่าศักยภาพที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของ N₂O ที่ GWP 100 years มีค่า 298 เท่าของ CO₂ N₂O จากการคำนวณค่าทั้งหมดในประเทศมีค่า 0.256 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่ 97 kg N ha⁻¹ และ 0.307 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่ 155 kg N ha⁻¹ ตามลำดับ (ตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.12)

ในปี 2543 ประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 229.08 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ในภาคการเกษตรและดินเกษตรมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 51.88 และ 7.60 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ตามลำดับ ถ้าคิดจากการปล่อย N₂O จากการปลูกข้าวโพดทั้งหมดมีค่าการปล่อย 0.256-0.307 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าและคิดเป็น 0.11-0.13, 0.49-0.59 และ 3.37-4.04% ของการปล่อยทั้งประเทศในภาคเกษตรและดินเกษตร ตามลำดับ

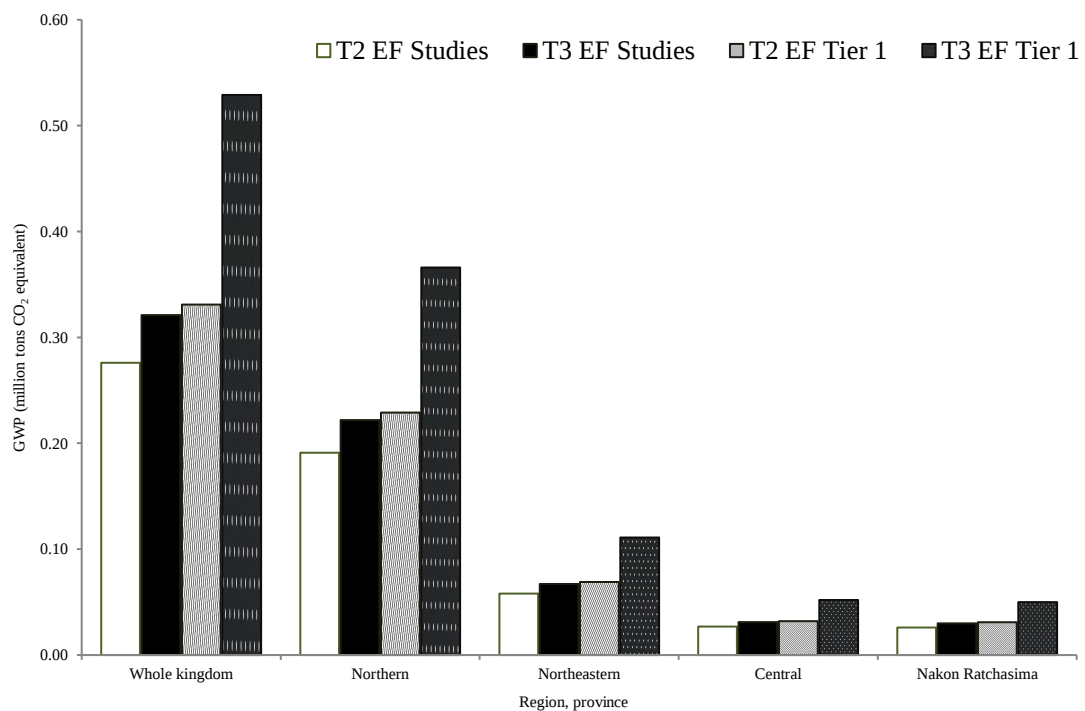
การเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เป็นแหล่งที่ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในดินเกษตรจากการใช้ปุ๋ยเคมี ถ้ามีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนน้อยก็ส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากดินน้อยเช่นเดียวกัน ดังนั้นการใส่ปุ๋ยในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้ข้าวโพดได้รับปุ๋ยปริมาณเพียงพอต่อการเจริญเติบโตและมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเกิดขึ้นในปริมาณไม่มาก

ตารางที่ 5.6 The global warming potential of maize production

Treatment	Rate of N fertilizer (kg N ha ⁻¹)	GWP of N ₂ O emissions (million ton CO ₂ equivalent) from this study				
		Whole kingdom	Northern	Northeastern	central	Nakhon Ratchasima province
T2	97	0.276	0.191	0.058	0.027	0.026
T3	155	0.321	0.222	0.067	0.031	0.030
		GWP of N ₂ O emissions (million ton CO ₂ equivalent) * used EF Tier 1				
T2	97	0.331	0.229	0.069	0.032	0.031
T3	155	0.529	0.366	0.111	0.052	0.050



รูปที่ 5.11 Direct N₂O emissions by the region and the province of maize planted areas



รูปที่ 5.12 The global warming potential of direct N₂O emissions by the region and the province of maize planted areas

5.3 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากดิน

5.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างไนตรัสออกไซด์และอนินทรีย์ไนโตรเจน

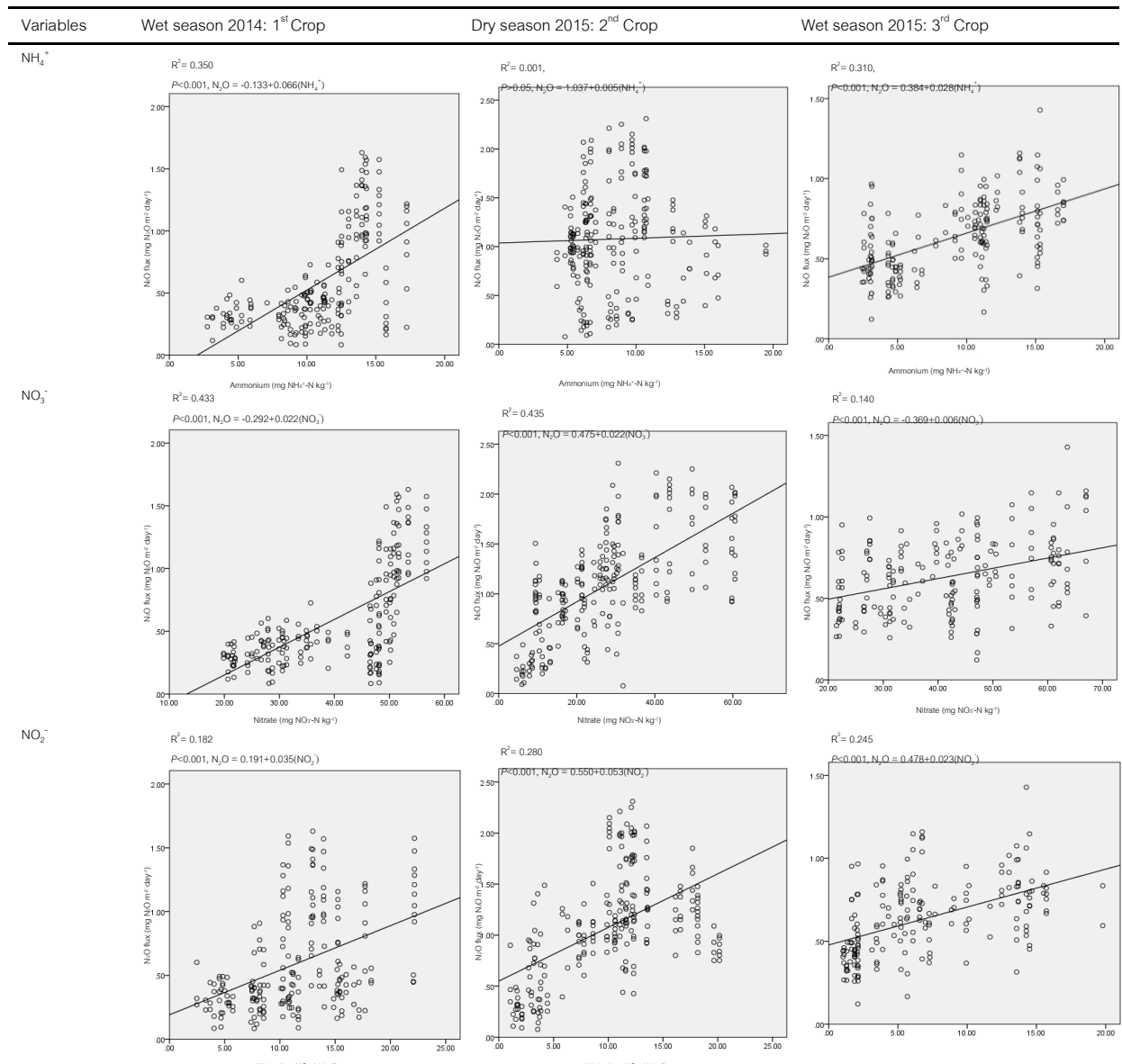
Soil N_2O emission มีความสัมพันธ์กับปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม มีการศึกษาหลายการศึกษาพบว่า Soil N_2O emission จะมีความสัมพันธ์เชิงบวกและเป็นเส้นตรงกับ N_2O emission และอนินทรีย์ไนโตรเจน (Inorganic nitrogen) (Ding et al. 2007; Martin et al. 2008; Tapia et al. 2008; Lin et al. 2010) และคุณสมบัติของดิน เช่น ความชื้นในดิน และ %WFPS (Ball et al. 1999; Sehy et al. 2003; Ding et al. 2007; Dmitri and Jorgen 2007; Metay et al. 2007; Trujillo et al. 2008)

N_2O เป็น by-product หรือผลผลิตพลอยได้ที่เกิดจากขบวนการ nitrification ด้วยสภาวะที่มีอากาศ (aerobic condition) โดยการทำงานของ nitrifying bacteria ในทางตรงกันข้ามภาวะไร้อากาศ (anaerobic condition) ระหว่าง water irrigation และปริมาณน้ำฝนที่มีมาก ผลิต N_2O จากขบวนการ denitrification ด้วย denitrifying bacteria ความสัมพันธ์ระหว่าง N_2O และอนินทรีย์ไนโตรเจน (inorganic nitrogen) (NH_4^+ , NO_3^- และ NO_2^-) ในดินสามารถอธิบายความสัมพันธ์ทางสถิติด้วยวิธี stepwise linear regression analysis ($n=210$)

รูปที่ 5.13 พบว่า soil N_2O fluxes มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่าง N_2O fluxes กับ NH_4^+ , NO_3^- และ NO_2^- ในรอบการเพาะปลูกที่ 1 ($R^2 = 0.182-0.433$, $p<0.001$) และมีความสัมพันธ์อย่างมากกับ NO_3^- ($R^2 = 0.433$, $p<0.001$) และไม่มีความสัมพันธ์เฉพาะ NH_4^+ ในรอบการเพาะปลูกที่ 2 soil N_2O fluxes มีความสัมพันธ์ทางสถิติกับ NO_3^- และ NO_2^- ในรอบการเพาะปลูกที่ 2 ($R^2 = 0.280-0.435$, $p<0.001$) N_2O emissions มีความชัดเจนที่ความสัมพันธ์กับในดินกับ NH_4^+ ความเข้มข้นของ NH_4^+ และ NO_3^- ความเข้มข้นของ NO_3^- (Groffman et al., 2000; Hefting et al., 2003; Vilain et al., 2010)

จากการศึกษาพบว่า NH_4^+ และ NO_3^- จะสัมพันธ์อย่างมากกับ N_2O emission ในช่วงเดือนแรกของรอบการเพาะปลูกที่ 1 ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า NH_4^+ และ NO_3^- ที่เป็นประโยชน์สำหรับจุลินทรีย์ในดินและไม่ได้ไปยับยั้งการเกิด N_2O ในช่วงการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 และการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 ซึ่งมีปัจจัยอื่น เช่น ปริมาณน้ำฝน และ %WFPS อยู่สูง

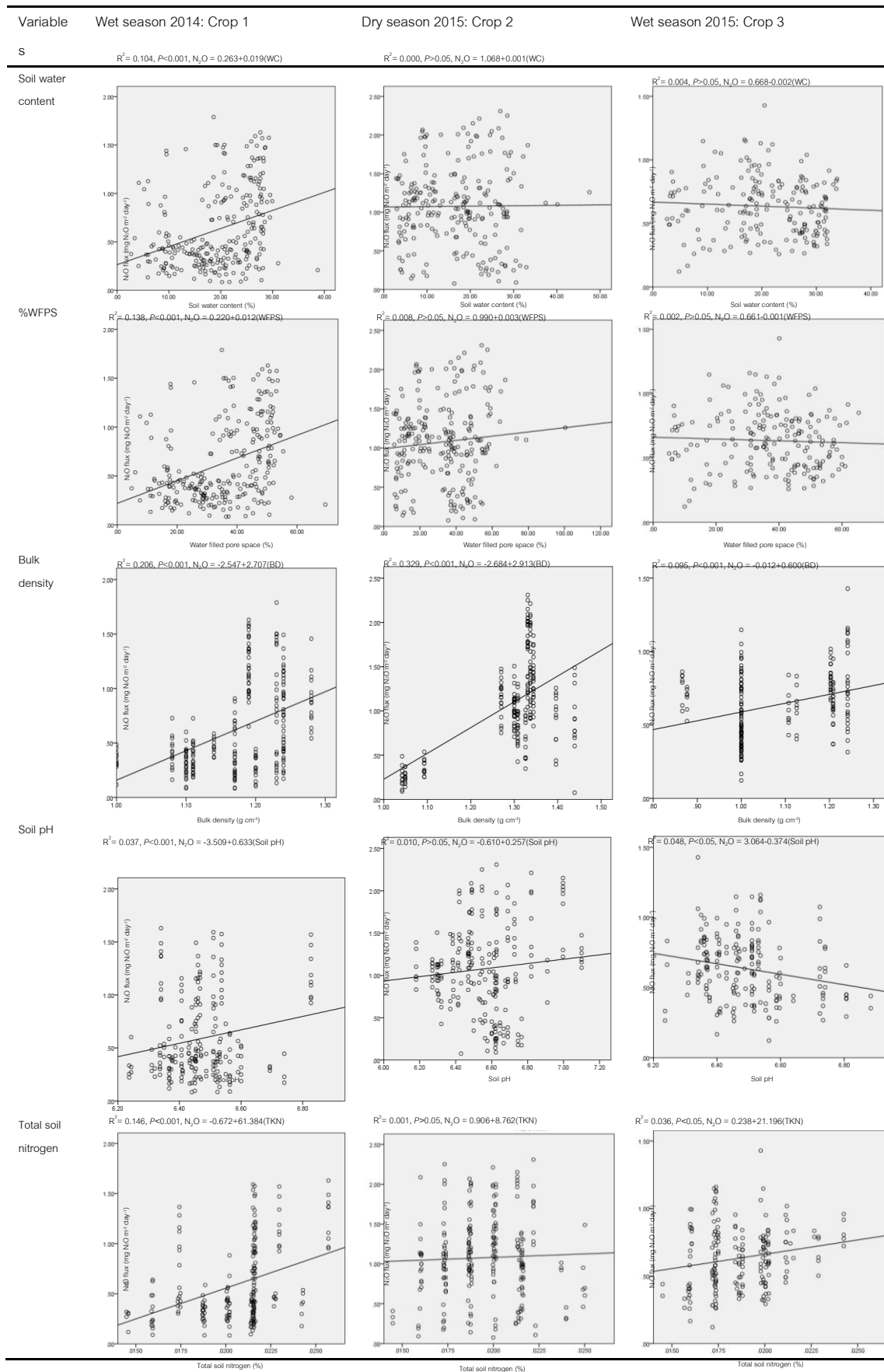
ในรอบการเพาะปลูกที่ 2 ค่า NO_3^- มีค่าสูง กิจกรรมของจุลินทรีย์ผลิต N_2O โดยมี high soil water content, มีอัตรา O_2 diffusion สูงและการ N เปลี่ยน NO_2^- อย่างรวดเร็วสู่ N_2O แต่ในส่วน of NH_4^+ ไม่ปรากฏให้เห็น สามารถอธิบายได้ว่าความเข้มข้นของ NO_3^- ในดินจากการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าการศึกษาอื่นๆ ที่มีการรายงานมาก่อนหน้านี้ในดินในภูมิภาคเขตร้อน (Kachenchart et al., 2012) ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่าง N_2O flux กับ NH_4^+ และ NO_3^- (รูปที่ 5.13)



รูปที่ 5.13 Stepwise single linear regression analysis relationships between N_2O and inorganic nitrogen

5.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนออกไซด์และคุณสมบัติของดิน

รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_2O fluxes กับคุณสมบัติของดิน N_2O fluxes มีความสัมพันธ์กับ soil water content, %WFPS, ความหนาแน่นของดิน (bulk density), ความเป็นกรดเป็นด่างในดิน (soil pH) และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน (total soil nitrogen) ในรอบการเพาะปลูกที่ 1 (wet season) ($R^2 = 0.037-0.206$, $p < 0.001$) ในรอบการเพาะปลูกที่ 2 (dry season) ($R^2 = 0.037-0.206$, $p < 0.001$) และในรอบการเพาะปลูกที่ 3 (wet season) ($R^2 = 0.001-0.036$, $p < 0.05$) พบว่าทุกปัจจัยไม่มีความสัมพันธ์ทางสถิติ ยกเว้น ความหนาแน่นของดิน ($R^2 = 0.329$, $p < 0.001$)



รูปที่ 5.14 Stepwise single linear regression analysis relationships between N_2O and soil properties

ตารางที่ 5.7 Stepwise multiple regression analysis relationship between average N₂O fluxes and environment variables during the wet season 2014: 1st Crop, dry season 2015: 2nd Crop and wet season 2015: 3rd Crop

Seasonal	Wet season 2014: 1 st Crop
Model	$N_2O = -1.053 + 33.421(TKN) + 0.016(NO_2^-) + 0.013(NO_3^-) + 0.008(\%WFPS) - 0.003(Pp.)$ ¹⁾
	$R^2 = 0.538, P\text{-value} = 0.01$
Seasonal	Dry season 2015: 2 nd Crop
Model	$N_2O = -7.066 + 2.444(BD) + 0.314(pH) + 0.124(Ave. \text{ air temp.}) + 0.036(NO_2^-) + 0.007(NO_3^-) - 0.037(Ave. \text{ air temp. at sampling time})$ ¹⁾
	$R^2 = 0.650, P\text{-value} = 0.01$
Seasonal	Wet season 2015: 3 rd Crop
Model	$N_2O = 0.268 + 0.023(NH_4^+) + 0.004(NO_3^-) - 0.009(Pp.)$
	$R^2 = 0.391, P\text{-value} = 0.01$

1) TKN, Total soil nitrogen, NO₂⁻, Nitrite, NO₃⁻, Nitrate, NH₄⁺, Ammonium, %WFPS, %Water filled pore space, Pp., Precipitation, BD, Bulk density, pH, Soil pH, Ave. air temp, Average daily air temperature, Ave. air temp. at sampling time, Average air temperature at sampling time.

ตารางที่ 4.7 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ N₂O flux กับปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและคุณสมบัติของดินด้วย multi regression analysis พบว่าในรอบการเพาะปลูกที่ 1 (wet season 2014) พบว่า total nitrogen, inorganic nitrogen และ %WFPS จากปริมาณน้ำฝนและการให้น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญที่กระตุ้นให้เกิด N₂O fluxes ในรอบการเพาะปลูกที่ 2 (dry season 2015) ปัจจัยที่มีความสำคัญในการกระตุ้นให้เกิด N₂O flux ได้แก่ inorganic nitrogen และอุณหภูมิ ส่วนรอบการเพาะปลูกที่ 3 (wet season 2015) ปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลให้เกิด N₂O ได้แก่ NH₄⁺ และ NO₃⁻ และปริมาณน้ำฝน

N₂O production เกิดจากกระบวนการใช้อากาศในช่องว่างในดิน และใช้ %WFPS (Robertson and Groffman, 2007) ไนโตรเจนในดินเป็น substrate ที่สำคัญสำหรับกระบวนการ nitrification และ denitrification และแหล่งคาร์บอนสำหรับจุลินทรีย์กลุ่ม heterotrophic microorganism (Wang and Dalal, 2015) ความเป็นกรดเป็นด่างในดิน อุณหภูมิ เนื้อดิน และช่องว่างในดิน ที่มีบทบาทสำคัญต่อ N₂O emissions ซึ่งจะมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์และการใช้น้ำในดิน (Rees et al., 2013; Stehfest and Bouwman, 2006).

Harmanjit et al. (2016) พบว่าการให้น้ำและปริมาณน้ำฝนจะเพิ่มสัดส่วนของน้ำและอุณหภูมิดินที่สูงขึ้นและอุณหภูมิอากาศที่มีการรับแสงแดดเวลานานหลายชั่วโมงก็ส่งผลต่อ N₂O ในข้าวโพด ผลจากการวิเคราะห์ multiple linear regression analysis Ding et al. (2013) พบว่าถ้าอุณหภูมิดินสูงในช่วงการเพาะปลูกข้าวโพดจะส่งผลต่อชีวเคมีในดินและกระบวนการ Denitrification ในดิน

5.4 การเจริญเติบโต คุณสมบัติของชีวมวล และผลผลิต

การวัดการเจริญเติบโต คุณสมบัติของมวลชีวภาพ ผลผลิต มีรายละเอียดดังนี้

5.4.1 การเจริญเติบโตของข้าวโพด (Maize growth)

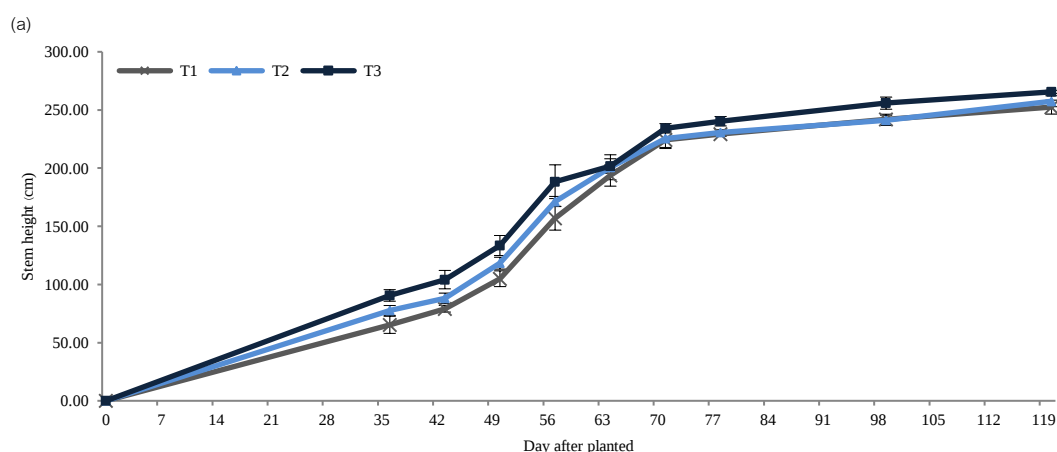
การวัดการเจริญเติบโตของข้าวโพดวัดที่ความสูงของต้น ความสูงของต้นเพิ่มขึ้นตามอายุของข้าวโพด ในแต่ละรอบการเพาะปลูกข้าวโพดจะเก็บเกี่ยวอายุประมาณ 120 วัน ในรอบการเพาะปลูกข้าวโพดออกดอกประมาณ 40-50 วันหลังปลูก และจะมีช่อดอก 5-8 วัน เมื่อออกดอกช่วงท้ายจนเป็นฝัก (ซึ่งเป็นช่วงท้ายๆ ของการเพาะปลูก) การเจริญเติบโตช่วงท้ายๆ จะค่อนข้างคงที่

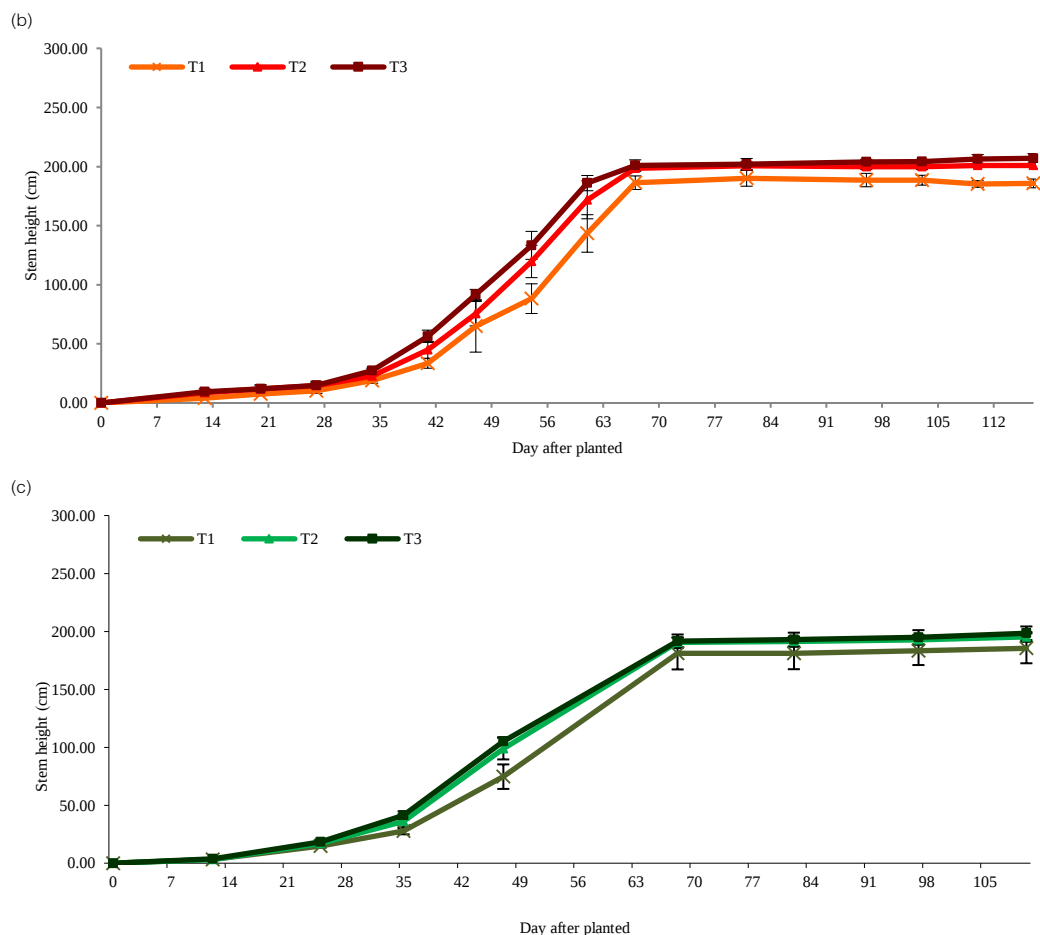
5.4.1.1 การเจริญเติบโตในรอบการเพาะปลูกที่ 1 (1st crop: 2014 wet season)

การเจริญเติบโตของตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 หลังจากเก็บข้อมูลชีวมวล (50 วันหลังจากปลูก) มีค่าเฉลี่ยความสูง 104.92 ± 6.76 , 118.33 ± 5.08 และ 133.50 ± 8.60 ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยความสูงในวันที่เก็บเกี่ยว 252.50 ± 5.99 , 257.5 ± 4.69 และ 268.58 ± 1.34 cm. ตามลำดับ (รูปที่ 5.15a และรูปที่ 5.18 และตารางที่ 5.8) เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติพบว่า ตำรับการทดลองที่ 3 มีค่ามากกว่าตำรับการทดลองที่ 1 และมีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) สามารถสรุปได้ว่าอัตราการใส่ปุ๋ยส่งผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดโดยเฉพาะเรื่องของความสูง

5.4.1.2 การเจริญเติบโตในรอบการเพาะปลูกที่ 2 (2nd crop: 2015 dry season)

ผลการศึกษาพบว่า ตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 เก็บข้อมูลชีวมวลครั้งที่ 1 (47 วันหลังปลูก) มีค่าเฉลี่ยความสูงเท่ากับ 64.92 ± 21.87 , 75.5 ± 10.36 และ 91.75 ± 4.36 cm. ตามลำดับ และความสูงก่อนเก็บเกี่ยว ตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 185.75 ± 3.74 , 200.92 ± 0.83 และ 207.00 ± 3.97 cm. ตามลำดับ พบว่าความสูงของข้าวโพดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกตำรับการทดลองที่ ($p < 0.01$) (รูปที่ 5.15b และรูปที่ 5.19, และตารางที่ 5.8)





รูปที่ 5.15 Variations of average maize growth of maize field experiments during applied different fertilizer rates in the wet season 2014: 1st Crop (a), dry season 2015: 2nd Crop (b), and wet season 2105: 3rd Crop (c).

5.4.1.3 การเจริญเติบโตในรอบการเพาะปลูกที่ 3 (3rd crop; 2015)

ผลการศึกษพบว่า ตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ความสูงก่อนเก็บเกี่ยวของตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 185.42 ± 12.91 , 195.25 ± 4.20 และ 198.42 ± 5.86 cm. ตามลำดับ และทั้งสามตำรับการทดลอง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (รูปที่ 5.15b, รูปที่ 5.19 และตารางที่ 5.8)

มีการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ปากช่องของข้าวโพด Suwan 4452 ใช้ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา $57.5 \text{ kg N ha}^{-1}$ ค่าเฉลี่ยความสูงของข้าวโพด 189 cm. (Somchai et al., 2004) และการใส่ปุ๋ยสูตร 16-16-8 อัตรา 50 kg N ha^{-1} และปุ๋ยยูเรียอัตรา $28.75 \text{ kg N ha}^{-1}$ พบค่าเฉลี่ยความสูง 222 cm. (Krich, 2009) ซึ่งผลการศึกษพบว่าค่าเฉลี่ยความสูงของข้าวโพดอยู่ในช่วงเดียวกับการศึกษาอื่นๆ ก่อนหน้านี้

5.4.2 น้ำหนักแห้งชีวมวล (Dry weight of biomass)

ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักแห้ง ($\pm$ SD) ประกอบด้วยต้น, ใบ และ ear of corn แสดงในตารางที่ 5.8

5.4.2.1 น้ำหนักแห้งลำต้น (Stem biomass)

ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของลำต้นหลังเก็บเกี่ยวในรอบการเพาะปลูกที่ 1 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 น้ำหนักแห้งเท่ากับ 42.37 ± 18.41 , 101.92 ± 22.58 , และ 119.43 ± 24.33 กรัม ตามลำดับ และรอบการเพาะปลูกที่ 2 น้ำหนักแห้งเท่ากับ 52.98 ± 21.17 , 69.57 ± 21.96 และ 132.70 ± 16.01 กรัม ตามลำดับ น้ำหนักแห้งลำต้นรอบการเพาะปลูกที่ 3 น้ำหนักแห้งเท่ากับ 51.67 ± 24.69 , 67.81 ± 32.73 และ 81.10 ± 13.21 กรัม ตามลำดับ

5.4.2.2 น้ำหนักแห้งใบ (Leaf biomass)

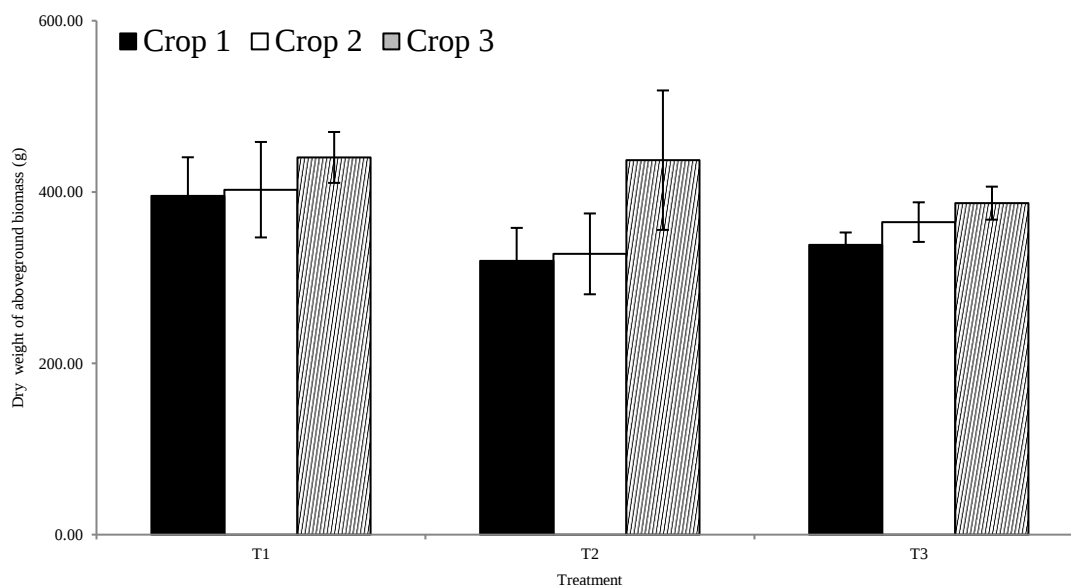
ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งใบของรอบการเพาะปลูกที่ 1: ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 30.75 ± 16.05 , 42.09 ± 11.16 และ 49.07 ± 8.40 กรัม ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 2: ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 25.32 ± 10.54 , 39.90 ± 10.54 และ 69.09 ± 2.73 กรัม ตามลำดับ การเพาะปลูกที่ 3: ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 48.28 ± 7.32 , 58.58 ± 14.33 และ 64.45 ± 4.06 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 5.8)

5.4.2.3 น้ำหนักแห้งฝัก (ear of corn biomass)

ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักแห้งฝัก (ear of corn biomass) ของรอบการเพาะปลูกที่ 1: ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 90.64 ± 29.72 , 229.35 ± 59.27 และ 234.28 ± 36.51 กรัม ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 2: ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 95.10 ± 46.02 , 163.76 ± 42.48 และ 235.43 ± 6.22 กรัม ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 3: ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 185.24 ± 28.46 , 238.51 ± 37.95 และ 241.49 ± 12.81 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 5.8)

5.4.2.4 น้ำหนักแห้งทั้งหมด (above ground of biomass)

ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักแห้งทั้งหมด (above ground biomass) ของรอบการเพาะปลูกที่ 1: ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 395.46 ± 45.14 , 402.74 ± 38.58 และ 440.41 ± 14.34 กรัม ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 2: ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 319.59 ± 55.73 , 327.83 ± 47.19 และ 437.22 ± 23.11 กรัม ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 3: ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 338.47 ± 29.71 , 364.90 ± 81.40 และ 387.04 ± 19.25 กรัม ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติพบว่ารอบการเพาะปลูกที่ 1 และรอบการเพาะปลูกที่ 3 ในแต่ละดำรับการทดลอง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่รอบการเพาะปลูกที่ 2 ในแต่ละดำรับการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) (รูปที่ 5.16 และตารางที่ 5.8)



รูปที่ 5.16 Variations of average dry weight of above ground biomass of maize field experiments during applied different fertilizer rates

ตารางที่ 5.8 Variations of average maize growth, dry weight of biomass, dry weight of above ground biomass and dry weight of crop yield at harvest time

Variation		Treatments								
		Wet season 2014: 1 st Crop			Dry season 2015: 2 nd Crop			Wet season 2015: 3 rd Crop		
		T1	T2	T1	T2	T3	T3	T1	T2	T1
Height	cm	252.50 ±5.99 ^a	257.50 ±4.69 ^a	268.58 ±1.34 ^b	185.75 ±3.74 ^a	200.92 ±0.83 ^b	207.00 ±3.97 ^c	185.42 ±12.91 ^a	195.25 ±4.20 ^a	198.42 ±5.86 ^a
Stem	g	42.37 ±18.41	101.92 ±22.58	119.43 ±24.33	52.98 ±21.17	69.57 ±21.96	132.70 ±16.01	51.67 ±24.69	67.81 ±32.73	81.10 ±13.21
Leaf	g	30.75 ±16.05	42.09 ±11.26	49.07 ±8.40	25.32 ±10.54	39.90 ±10.54	69.09 ±2.73	48.28 ±7.32	58.58 ±14.33	64.45 ±4.06
Ear of corn	g	90.64 ±29.72	229.35 ±59.27	234.28 ±36.51	95.10 ±46.02	163.76 ±42.48	235.43 ±6.22	185.24 ±28.46	238.51 ±37.95	241.49 ±12.81
Above ground biomass	g	395.46 ±45.14 ^a	402.74 ±38.58 ^a	440.41 ±14.34 ^a	319.59 ±55.73 ^a	327.83 ±47.19 ^b	437.22 ±23.11 ^c	338.47 ±29.71 ^a	364.90 ±81.40 ^a	387.04 ±19.25 ^a
Yield (grain)	kg ha ⁻¹	5,583.33 ±396.75 ^a	8,666.67 ±490.65 ^b	9,000.00 ±561.08 ^b	5,791.67 ±599.00 ^a	5,958.33 ±478.71 ^a	7,166.67 ±304.29 ^b	5,041.67 ±209.72 ^a	7,750.00 ±726.40 ^b	8,541.67 ±497.68 ^b

The subscript small letters indicated the significant differences among fertilizer rates ($p \leq 0.01$). The values presented are

mean±SD for all samples (n=4).

5.4.3 คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวล

ค่าเฉลี่ยของอินทรีย์คาร์บอนและปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในชีวมวล (N=12) ใน ใบ, ต้น และฝัก ในการเก็บตัวอย่างชีวมวลครั้งที่ 1 และหลังเก็บเกี่ยว แสดงในตารางที่ 5.9

5.4.3.1 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด

ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในลำต้นในรอบการเพาะปลูกที่ 1 ครั้งที่ 1 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเฉลี่ย 50.83 ± 0.91 , 50.10 ± 0.63 และ $48.39 \pm 0.38\%$ ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 1 ครั้งที่ 2 หลังเก็บเกี่ยว ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่า 46.77 ± 0.93 , 48.03 ± 0.48 และ $47.36 \pm 0.95\%$ ตามลำดับ โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าเฉลี่ยทั้งรอบการเพาะปลูกที่ 1-3 อยู่ในช่วง 46.01 ± 0.83 - $52.88 \pm 0.81\%$ (ตารางที่ 4.9)

ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในใบพบว่า ในรอบการเพาะปลูกที่ 1 ครั้งที่ 1 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเฉลี่ย 45.09 ± 0.95 , 44.21 ± 1.11 และ $43.07 \pm 0.49\%$ ตามลำดับ ในรอบการเพาะปลูกที่ 1 ครั้งที่ 2 หลังเก็บเกี่ยว ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่า 47.93 ± 0.87 , 49.35 ± 0.85 และ $44.61 \pm 0.78\%$ ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยของรอบการเพาะปลูกที่ 1, 2 และ 3 อยู่ในช่วง 43.03 ± 0.98 - $49.35 \pm 0.85\%$

ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนในฝักข้าวโพด ในรอบการเพาะปลูกที่ 1 ครั้งที่ 1 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ในรอบเก็บข้อมูลหลังเก็บเกี่ยวมีค่าเฉลี่ย 54.30 ± 0.25 , 53.67 ± 0.46 และ $54.12 \pm 0.24\%$ ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 2 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเฉลี่ย 53.47 ± 0.55 , 54.01 ± 0.68 และ $53.61 \pm 0.24\%$ ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 3 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเฉลี่ย 54.00 ± 0.71 , 54.13 ± 0.25 และ $53.41 \pm 0.72\%$ ตามลำดับ (ตารางที่ 5.9 และรูปที่ 5.17)

5.4.3.2 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen)

ปริมาณไนโตรเจนในรอบแรก (1^{st} collected) ในต้นและใบ มีค่าสูงกว่ารอบที่ 2 หลังเก็บเกี่ยว (2^{nd} collected) โดยปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในต้น รอบการเพาะปลูกที่ 1 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 รอบที่ 1 มีดังนี้ 0.27 ± 0.01 , 0.36 ± 0.01 และ $0.32 \pm 0.04\%$ ตามลำดับ ในรอบการเพาะปลูกที่ 2 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 0.26 ± 0.15 , 0.30 ± 0.18 และ $0.28 \pm 0.02\%$ ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 3 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 0.27 ± 0.00 , 0.36 ± 0.03 และ $0.28 \pm 0.02\%$ ตามลำดับ

ปริมาณไนโตรเจนในลำต้น (หลังเก็บเกี่ยว) รอบการเพาะปลูกที่ 1 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 0.16 ± 0.01 , 0.15 ± 0.01 และ $0.16 \pm 0.01\%$ ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 2 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 0.16 ± 0.01 , 0.17 ± 0.01 และ $0.16 \pm 0.01\%$ ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 3 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 0.11 ± 0.06 , 0.16 ± 0.00 และ $0.17 \pm 0.00\%$ ตามลำดับ

ปริมาณไนโตรเจนในใบ (รอบที่ 1) รอบการเพาะปลูกที่ 1 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 0.44 ± 0.03 , 0.52 ± 0.02 และ $0.48 \pm 0.04\%$ ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 2 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 0.35 ± 0.21 , 0.54 ± 0.03 และ $0.43 \pm 0.25\%$ ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 3 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 0.38 ± 0.03 , 0.38 ± 0.17 และ $0.50 \pm 0.01\%$ ตามลำดับ

ปริมาณไนโตรเจนในใบ (รอบที่ 2 หลังเก็บเกี่ยว) รอบการเพาะปลูกที่ 1 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 0.31 ± 0.01 , 0.33 ± 0.01 และ $0.28 \pm 0.01\%$ ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 2 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 0.30 ± 0.01 , 0.24 ± 0.01 และ $0.16 \pm 0.01\%$

ตามลำดับ รอบการเพาะปลูกที่ 3 ดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ 0.26 ± 0.01 , 0.25 ± 0.18 และ $0.19 \pm 0.01\%$ ตามลำดับ (ตารางที่ 5.9)

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในพืชมีค่าสูงกว่า ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดิน โดยพืชดูดซับไนโตรเจนจากดินเพื่อการเจริญเติบโต นอกจากนี้คุณสมบัติของชีวมวลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

5.4.4 ผลผลิตข้าวโพด

รอบการเพาะปลูกที่ 1 ผลผลิตในดำรับการทดลองที่ 1 มีค่าต่ำที่สุดและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับดำรับการทดลองที่ 2 และ 3 โดยมีค่าเฉลี่ยของผลผลิตดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ดังนี้ $5,583.33 \pm 396.75$, $8,666.67 \pm 490.65$ และ $9,000 \pm 561.08 \text{ kg ha}^{-1}$ ตามลำดับ (รูปที่ 5.20 และตารางที่ 5.8)

รอบการเพาะปลูกที่ 2 ค่าเฉลี่ยของผลผลิตของดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ $5,791.67 \pm 599$, $5,958.33 \pm 478.71$ และ $7,166.67 \pm 304.29 \text{ kg ha}^{-1}$ ตามลำดับ (รูปที่ 5.20 และตารางที่ 5.8)

รอบการเพาะปลูกที่ 3 ค่าเฉลี่ยของผลผลิตของดำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีดังนี้ $5,041.67 \pm 209.72$, $7,750 \pm 726.40$ และ $8,541.67 \pm 497.68 \text{ kg ha}^{-1}$ ตามลำดับ (รูปที่ 4.20 และตารางที่ 5.8)

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดอย่างมาก อย่างไรก็ตามถ้าวิเคราะห์ทางสถิติแล้วพบว่า การใส่ปุ๋ยอัตรา 97 kg N ha^{-1} และ 155 kg N ha^{-1} ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) และจากผลการศึกษานี้สามารถเสนอแนะได้ว่าอัตราการใส่ปุ๋ยไม่มีผลต่อผลผลิตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ดังนั้นการเลือกใช้อัตราการใส่ปุ๋ยปริมาณที่น้อยกว่า (ใส่ปุ๋ยอัตรา 97 kg N ha^{-1}) จะช่วยลดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่สิ่งแวดล้อมได้กว่าอัตราการใส่ปุ๋ย 155 kg N ha^{-1}

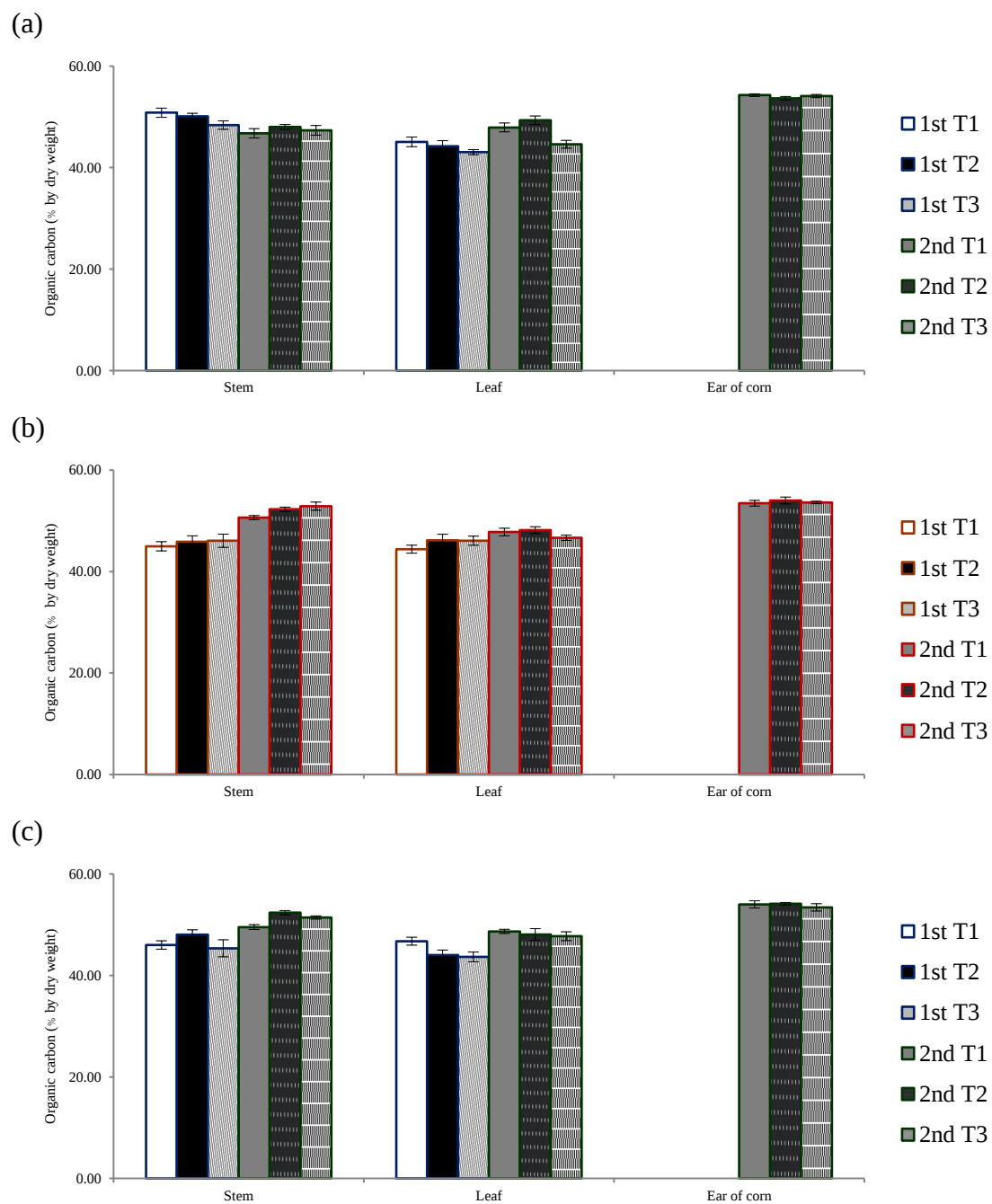
การสูญเสียไนโตรเจนสู่สิ่งแวดล้อมหรือการปล่อย N_2O สู่บรรยากาศ ปุ๋ยไนโตรเจนที่เหลืออยู่ในผลผลิตหรืออาหารภายใต้ข้อจำกัด ไนโตรเจนมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตและปริมาณไนโตรเจนที่ใส่ลงไปจะมีความสัมพันธ์กับการปล่อย N_2O ออกสู่สิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 5.9 คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวล

Parameters	Time	Biomass	Unit	Season								
				Wet season 2014: 1 st Crop			Dry season 2015: 2 nd Crop			Wet season 2015: 3 rd Crop		
				T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Total organic carbon	1 st collected	Stem	%	50.83	50.10	48.39	44.98	45.89	46.08	46.01	48.05	45.34
			by dry	±0.91 ^b	±0.63 ^b	±0.83 ^a	±0.90 ^a	±1.16 ^a	±1.30 ^a	±0.83 ^a	±0.94 ^b	±1.68 ^a
		Leaf	weight	45.09	44.21	43.07	44.41	46.17	46.08	46.75	44.03	43.66
				±0.95 ^b	±1.11 ^{ab}	±0.49 ^a	±0.79 ^a	±1.18 ^b	±0.90 ^b	±0.79 ^b	±0.98 ^a	±0.96 ^a
	2 nd collected	Stem	%	46.77	48.03	47.36	50.64	52.29	52.88	49.54	52.38	51.42
			by dry	±0.93 ^a	±0.48 ^a	±0.95 ^a	±0.39 ^a	±0.42 ^b	±0.81 ^b	±0.48 ^a	±0.41 ^c	±0.32 ^b
		Leaf	weight	47.93	49.35	44.61	47.79	48.17	46.66	48.68	48.07	47.74
				±0.87 ^b	±0.85 ^c	±0.78 ^a	±0.74 ^b	±0.67 ^b	±0.53 ^a	±0.42 ^a	±1.15 ^a	±0.87 ^a
	Ear of corn			54.30	53.67	54.12	53.47	54.01	53.61	54.00	54.13	53.41
				±0.25 ^b	±0.46 ^a	±0.24 ^{ab}	±0.55 ^a	±0.68 ^a	±0.24 ^a	±0.71 ^a	±0.25 ^a	±0.72 ^a
Total nitrogen	1 st collected	Stem	%	0.27	0.36	0.32	0.26	0.30	0.28	0.27	0.36	0.28
				±0.01 ^a	±0.01 ^b	±0.04 ^c	±0.15 ^a	±0.18 ^a	±0.02 ^a	±0.00 ^a	±0.03 ^b	±0.02 ^a
		Leaf		0.44	0.52	0.48	0.35	0.54	0.43	0.38	0.38	0.50
				±0.03 ^a	±0.02 ^b	±0.04 ^b	±0.21 ^a	±0.03 ^a	±0.25 ^a	±0.03 ^a	±0.17 ^a	±0.01 ^a
	2 nd collected	Stem	%	0.16	0.15±	0.16	0.16	0.17	0.16	0.11	0.16	0.17
				±0.01 ^b	0.01 ^a	±0.01 ^b	±0.01 ^{ab}	±0.01 ^b	±0.01 ^a	±0.06 ^a	±0.00 ^a	±0.00 ^a
		Leaf		0.31	0.33	0.28	0.30	0.24	0.16	0.26	0.25	0.19
				±0.01 ^b	±0.01 ^b	±0.01 ^a	±0.01 ^a	±0.01 ^a	±0.01 ^a	±0.01 ^b	±0.18 ^b	±0.01 ^a
	Ear of corn			0.40	0.43	0.41	0.44	0.42	0.38	0.40	0.44	0.40
				±0.03 ^a	±0.02 ^a	±0.02 ^a	±0.02 ^b	±0.01 ^b	±0.01 ^a	±0.15 ^a	±0.17 ^b	±0.17 ^a

The subscript small letters indicated the significant differences among fertilizer rates ($p \leq 0.05$).

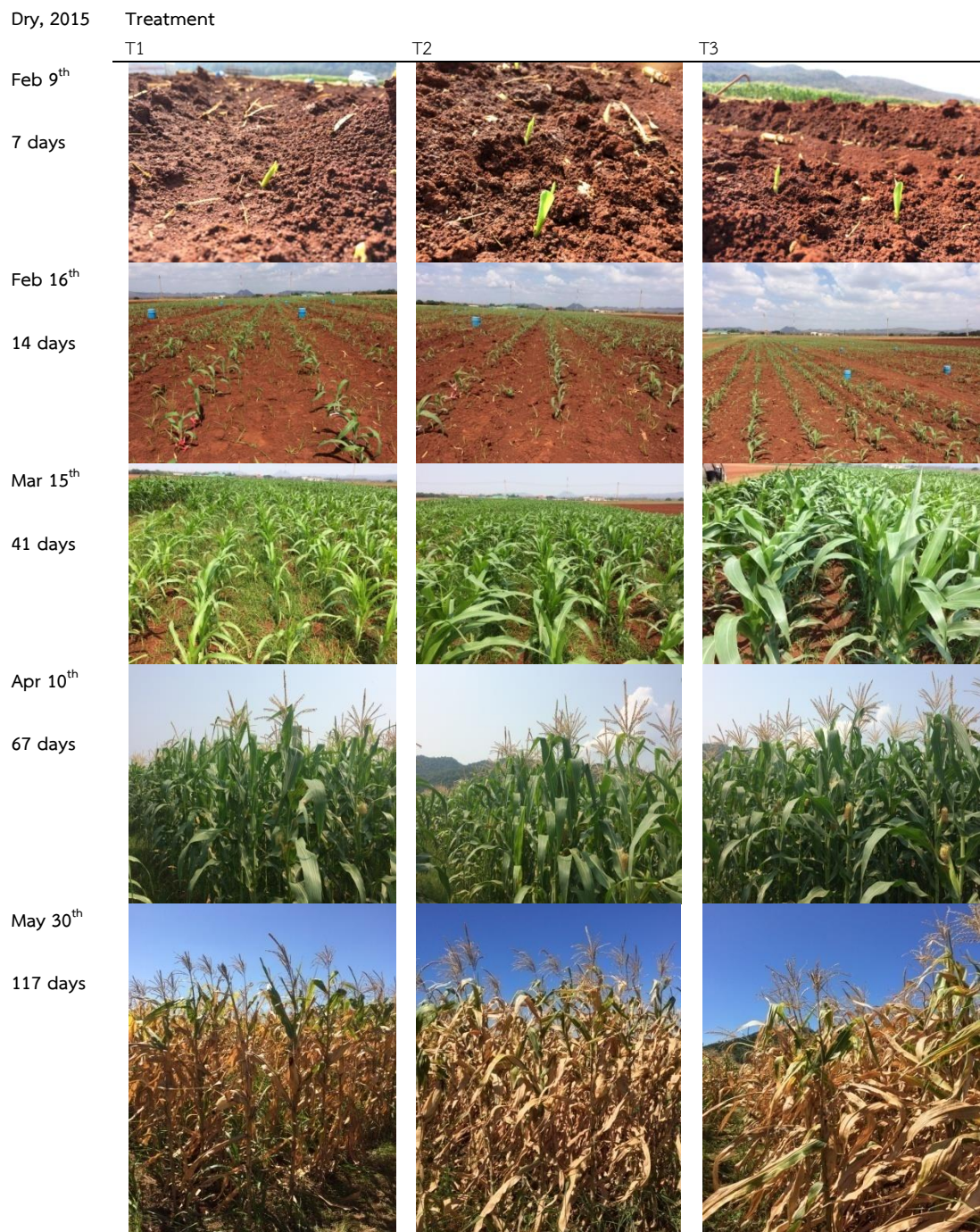
The values presented are mean $\pm$ SD for all samples ($n=12$).



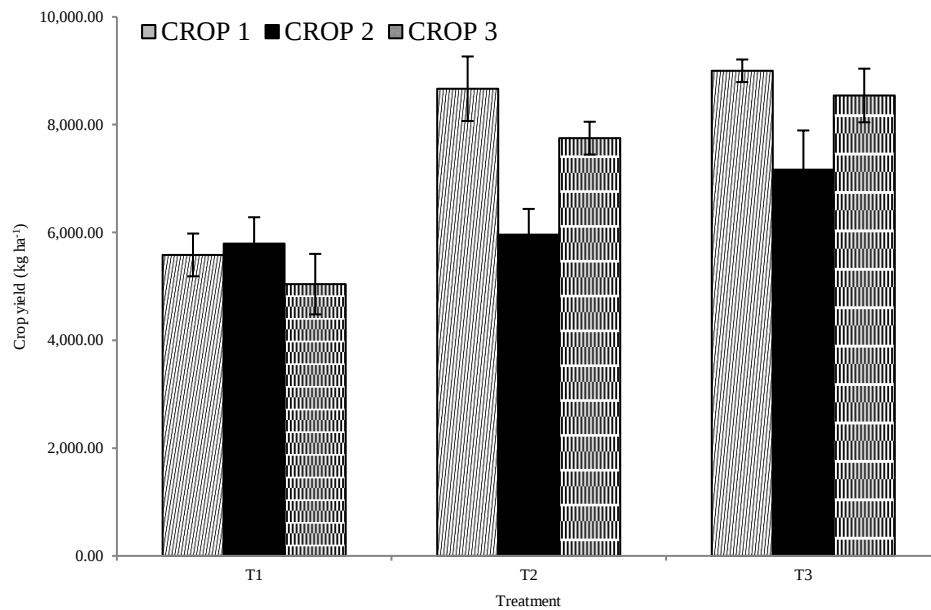
รูปที่ 5.17 Total organic carbon in leaf, stem and ear of corn biomass at the 1st and 2nd collected biomass in the wet season 2014: 1st Crop (a), dry season 2015: 2nd Crop (b) and wet season 2015: 3rd Crop (c).

Wet, 2014		Treatment		
		T1	T2	T3
Jul 22 th				
4 days				
Aug 16 th				
29 days				
Sep 13 th				
57 days				
Oct 18 th				
92 days				
Nov 8 th				
113 days				

រូបថត 5.18 Maize growths in the wet season 2014: 1st Crop



รูปที่ 5.19 Maize growths in the dry season 2015: 2nd Crop



រូបភាព 5.20 Variations of average crop yield of maize field experiments during applied different fertilizer rates in the wet season 2014: 1st Crop, dry season 2015: 2nd Crop, and wet season 2015: 3rd Crop

(a)

(b)



រូបភាព 5.21 Effects of fertilizer application on characteristic, length of un-husked ear of corn in the wet season (1st Crop and 3rd Crop) (a) and dry seasons (2nd Crop) (b)

5.5 สมดุลไนโตรเจน (Nitrogen balance)

สมดุลไนโตรเจน (Nitrogen balance) ศึกษาเพื่ออธิบายความสมดุลระหว่างปริมาณไนโตรเจนที่ใส่ในระบบกับไนโตรเจนที่เคลื่อนย้ายไปอยู่ในส่วนต่างๆ ไนโตรเจนที่ใส่เข้าระบบอยู่ในรูปของ ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ กระบวนการ wet deposition และการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของ การชะล้าง (leaching) ก๊าซ (gases) runoff การสูญเสียในรูปของก๊าซแอมโมเนีย (volatilization) การเก็บเกี่ยวผลผลิต (harvest) เป็นต้น ในการประเมินสมดุลไนโตรเจน (Nitrogen balance) จะรวมทั้ง Nitrogen input และ output เข้าและออกจากระบบ

จากการทดลองนี้การใส่ปุ๋ยจะมีผลต่อ Nitrogen input โดยดำรับการทดลองที่ 1 ไม่ใส่ปุ๋ย ดำรับการทดลองที่ 2 ใส่ปุ๋ยอัตรา 97 kg N ha⁻¹ และดำรับการทดลองที่ 3 ใส่ปุ๋ยอัตรา 155 kg N ha⁻¹ ส่วนการสูญเสียไนโตรเจนจากการศึกษาวิธีวัดในรูปของ N₂O emission การสูญเสียไนโตรเจนในดิน และปริมาณไนโตรเจนในชีวมวล (ใบ ลำต้น และฝัก) (ตารางที่ 5.10)

สมดุลไนโตรเจน (Nitrogen balance) ของการเพาะปลูกรอบที่ 1 อยู่ในช่วง -107.01-49.35 การเพาะปลูกรอบที่ 2 อยู่ในช่วง -109-64.82 และการเพาะปลูกรอบที่ 3 ในช่วง -95.35-59.64 ตามลำดับ พบว่าการสูญเสียไนโตรเจนจะเกิดมากที่สุดในการเพาะปลูกรอบที่ 3 และการสูญเสียจะอยู่สูงที่สุดและจะสะสมในชีวมวล ร่องลงมากคือในดิน และการสูญเสียในรูปของก๊าซ N₂O ตามลำดับ ในดำรับการทดลองที่ 2 การสูญเสียไนโตรเจนมีค่ามากกว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน (Nitrogen input) ในทุกๆ รอบการเพาะปลูกและมีค่าติดลบ รอบการเพาะปลูกรอบที่ 1, 2 และ 3 ดังนี้ -13.94, -6.07 และ -7.55 kg N ha⁻¹ ตามลำดับ สำหรับดำรับการทดลองที่ 3 สมดุลไนโตรเจน (Nitrogen balance) มีค่าบวกมีค่า 49.35, 64.82 และ 59.64 kg N ha⁻¹ เพราะว่ามีใส่ปุ๋ยไนโตรเจนปริมาณมากและมีปริมาณไนโตรเจนมากกว่าที่พืชสามารถดูดไปใช้ได้ เมื่อมีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนปริมาณสูงก็จะมีกาปล่อยก๊าซ N₂O สูงเช่นเดียวกัน (ตารางที่ 5.10)

ตารางที่ 5.10 สมดุลไนโตรเจน (System nitrogen balance)

Seasonal	Wet Season 2014: 1 st Crop			Dry Season 2015: 2 nd Crop			Wet Season 2015: 3 rd Crop		
Treatment	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
N input kg N ha ⁻¹									
N fertilizer	0	96.875	155	0	96.875	155	0	96.875	155
Total N input	0	96.875	155	0	96.875	155	0	96.875	155
N outputs kg N ha ⁻¹									
N in soils	19.90	19.60	20.40	19.70	19.60	19.80	18.20	19.20	19.10
N in biomass	87.00	91.00	85.00	90.00	83.00	70.00	77.00	85.00	76.00
N from N ₂ O gas	0.11	0.21	0.25	0.26	0.34	0.38	0.15	0.22	0.26
Total N outputs	107.01	110.81	105.65	109.96	102.94	90.18	95.35	104.42	95.36
System N balance	-107.01	-13.94	49.35	-109.96	-6.07	64.82	-95.35	-7.55	59.64

5.6 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic benefits) เพื่อใช้สำหรับตัดสินใจอัตราการใช้ปุ๋ยที่เหมาะสมเรียกว่า value cost ration (VCR) (ตารางที่ 5.11) VCR ถ้ามีค่ามากกว่า 2 แสดงถึงว่าการใช้ปุ๋ยในอัตรานั้นๆ ไม่มีความเหมาะสมสำหรับปลูกพืช พิจารณาประเด็นของความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Pervaiz et al., 2004) ส่วนผลการศึกษาจากการทดลองนี้พบว่าในรอบการเพาะปลูกที่ 1 ใช้ปุ๋ยอัตรา 97 kg N ha⁻¹ มีค่าสูงถึง 9.70 มากกว่า ค่ารับการทดลองที่ 3 เท่ากับ 6.19 ซึ่งใช้ปุ๋ยอัตรา 155 kg N ha⁻¹ ค่ารับการทดลองที่ 2 มีผลผลิต 3,083.34 kg ha⁻¹ และมีราคา 22,000 บาทต่อแกลตาร์ VCR ของค่ารับการทดลองที่ 2 เหมาะสมที่จะแนะนำให้เกษตรกรใช้ปุ๋ยอัตรานี้ในการปลูกข้าวโพด ซึ่งมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และปริมาณผลผลิต โดยสรุปผลการศึกษพบว่า ปริมาณการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 97 kg N ha⁻¹ ช่วยลด N₂O ที่ปล่อยออกมาจากดินและเพิ่มผลผลิต ซึ่งผลที่พบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 155 kg N ha⁻¹ (ตารางที่ 5.11)

ตารางที่ 5.11 Value cost ratio maize yield under various fertilizer application treatments

Season	Rate of fertilizer used	Yield (kg ha ⁻¹)	Increased yield obtained (kg ha ⁻¹)	Farm price of maize ¹⁾ (baht kg ⁻¹)	Value of increased yield obtained (baht ha ⁻¹)	Cost of total weight fertilizers used ²⁾ (baht ha ⁻¹)	VCR
Wet 2014: 1 st Crop	0	5,583.33	-	7.13	-	0	-
	97	8,666.67	3,083.34		21,984	2265.75	9.70
	155	9,000.00	3,416.67		34,361	3,625.00	9.48
Dry 2015: 2 nd Crop	0	5,791.67	-	7.73	-	0	-
	97	5,958.33	166.66		1,288.25	2,343.75	0.55
	155	7,166.67	1,375.00		10,628.75	3,750.00	2.83
Wet 2015: 3 rd Crop	0	5,041.67	-	7.73	-	0	-
	97	7,750.00	2,708.33		20,935.50	2,343.75	8.93
	155	8,541.67	3,500		27,055.00	3,750.00	7.21

¹⁾ Farm price of maize from price of maize reported by Office of Agricultural Economics in 2014 and 2015 that corresponds to a year of maize cultivation.

²⁾ Cost of total weight fertilizer (16-20-0) as 14.50 baht/kg and (46-0-0) as 15 baht/kg reported by Office of Agricultural Economics.

บทที่ 6
ผลการศึกษา
การศึกษากระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจน

ส่วนที่ 3 เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนในดินเกษตรในรูปของอัตรา nitrification denitrification และการสูญเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการ ammonia volatilization

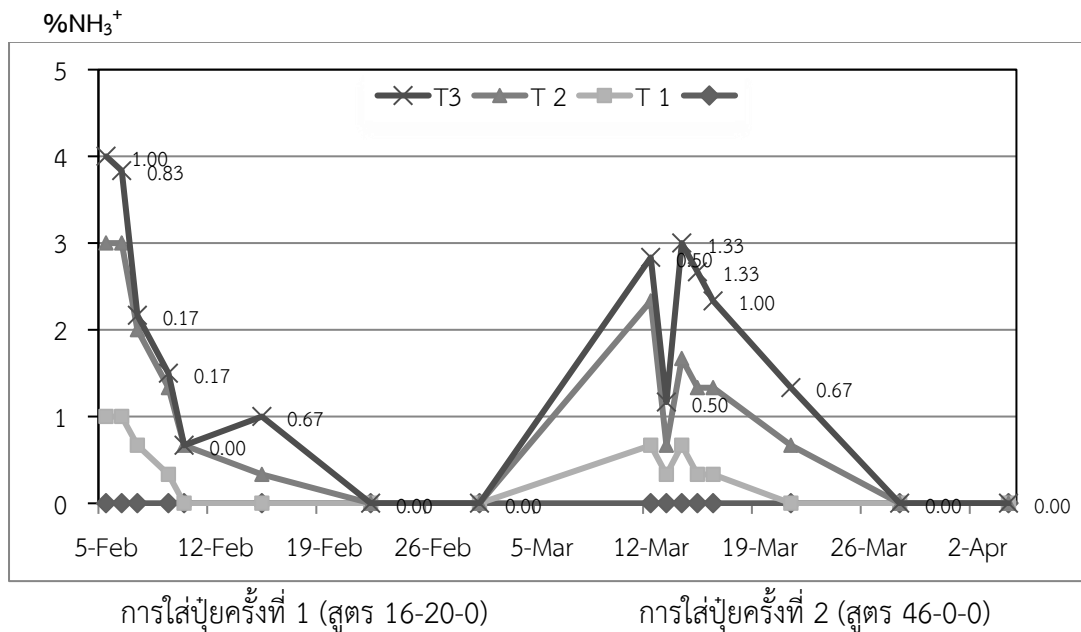
การศึกษาส่วนนี้เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนในดินเกษตรในรูปของอัตรา nitrification denitrification และการสูญเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการ ammonia volatilization

6.1 การสูญเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการ ammonia volatilization

การศึกษาการสูญเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการ ammonia volatilization จากการใช้ปุ๋ยเคมีที่มีต่อการทดลองเช่นเดียวกับการตรวจวัดก๊าซ N_2O จากแปลงทดลอง โดยใช้วิธี trap volatilized ammonia ด้วยกรดบอริก (Boric Acid) และนำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาปริมาณการสูญเสียไนโตรเจนในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษามีดังนี้ ผลของการสูญเสียไนโตรเจนจากการใช้ปุ๋ย โดยมี 2 ครั้งในการใส่ปุ๋ย การใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 (สูตร 16-20-0) พบว่า มีการทดลองที่ 1 การสูญเสียไนโตรเจนใช้เวลาประมาณ 4 วันหลังจากใส่ปุ๋ยที่มีการสูญเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการ ammonia volatilization ส่วนต่อการทดลองที่ 2 และ 3 ใช้เวลาประมาณ 7 วันหลังจากใส่ปุ๋ย (รูปที่ 6.1)

ส่วนการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 ด้วยปุ๋ยสูตร 46-0-0 พบว่า การสูญเสียไนโตรเจนในการทดลองที่ 1 ใช้เวลาประมาณ 5 วัน ส่วนต่อการทดลองที่ 2 และ 3 ใช้เวลา 7 วันเช่นเดียวกันกับการใส่ปุ๋ยครั้งแรกสูตร 16-20-0 และเมื่อเปรียบเทียบการสูญเสียไนโตรเจนของปุ๋ยทั้งสองสูตรพบว่า ปุ๋ยสูตร 16-20-0 มีการสูญเสียไนโตรเจนสูงกว่าปุ๋ยสูตร 46-0-0 (รูปที่ 6.1)

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การสูญเสียไนโตรเจน ด้วยกระบวนการ ammonia volatilization มีประมาณ 26 % ที่สูญเสียจากปริมาณการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนทั้งหมด ทั้งนี้ปริมาณการสูญเสียดังกล่าวขึ้นอยู่กับ ชนิดดิน ชนิดปุ๋ยที่ใส่ อัตราปุ๋ยที่ใส่ ปฏิกริยาดิน เป็นต้น นอกจากนี้ปุ๋ยที่มีส่วนผสมหลากหลายจะมีการสูญเสียน้อยกว่าปุ๋ยที่มีปุ๋ยไนโตรเจนเป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียว (Liyanage et., al, 2014)

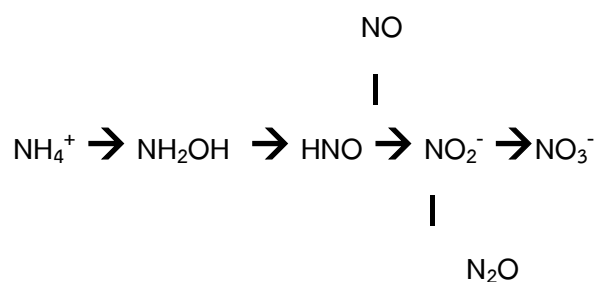


รูปที่ 6.1 การสูญเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการ ammonia volatilization

6.2 N₂O production study

การศึกษา pathways and rates of N₂O production ในดินที่ใช้ปลูกข้าวโพด มีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเข้าใจวัฏจักรไนโตรเจนในดินเกษตรในภูมิภาคเขตร้อน โดยทั่วไปมีสองกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการปล่อย N₂O คือ กระบวนการ nitrification และ denitrification การวิจัยนี้ใช้การศึกษาแบบ Incubation method ในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจตัวยับยั้ง (Inhibitor) หรือทำนายบทบาทของ nitrification และ denitrification จากกระบวนการสร้าง N₂O production ในดิน ปัจจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการศึกษา ได้แก่ % WHC (Water Holding Capacity) แบ่งเป็น 2 ระดับ ได้แก่ 30% WHC และ 60% WHC และปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจน (NH₄⁺, NO₃⁻ และ NO₂⁻) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง N₂O production และปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการ Nitrification เกิดขึ้นในสภาวะมีอากาศ โดยมีการออกซิไดซ์แอมโมเนียม (NH₄⁺) ไปเป็นไนเตรต (NO₃⁻) ขบวนการในการเกิด Nitrification แสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 Pathways of N₂O production by nitrification

กระบวนการ Denitrification (เปลี่ยน NO₃⁻ เป็น N₂) เกิดขึ้นในสภาวะไร้อากาศ Pathway of N₂O production by denitrification แสดงในรูปที่ 6.3

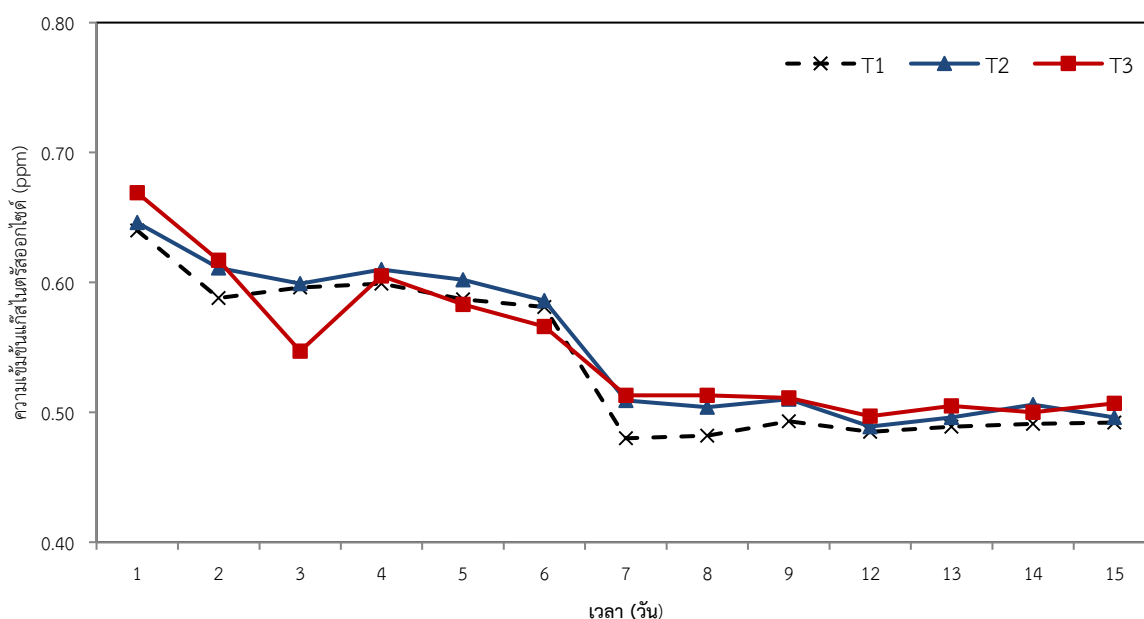


รูปที่ 6.3 Pathway of N₂O production by denitrification

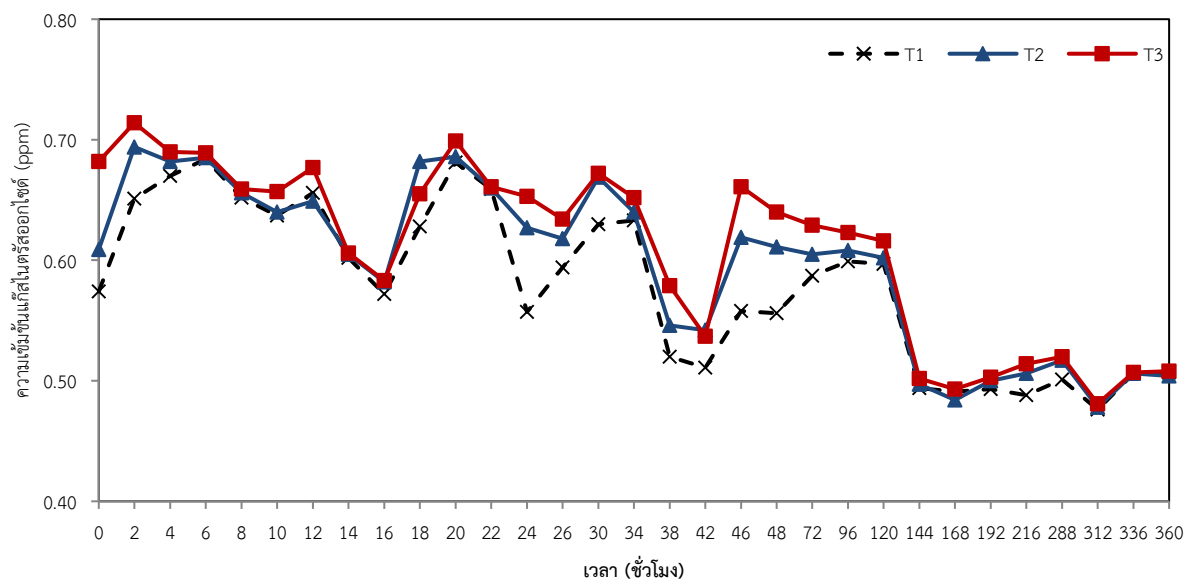
6.2.1 ความเข้มข้นแก๊สไนตรัสออกไซด์ (ppm) บ่มดินที่ 30% WHC (Water holding capacity) และ 60% WHC

ความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์ (ppm) บ่มดินที่ 30% WHC แสดงในรูปที่ 6.4 และตารางที่ 6.1 และความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์ (ppm) บ่มดินที่ 60% WHC แสดงในรูปที่ 6.5 และตารางที่ 6.2 พบว่า ที่ 30% WHC การลดลงของแก๊สไนตรัสออกไซด์ในตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 มีการลดลงในทิศทางเดียวกันและลดลงจนถึงค่อนข้างคงที่ในวันที่ 7 ของการทดลองและมีค่าคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในวันที่ 12 ของการทดลอง ความเข้มข้นของไนตรัสออกไซด์ของตำรับการทดลองที่ 1 มีค่าระหว่าง 0.640-0.480 ppm ตำรับการทดลองที่ 2 มีค่าระหว่าง 0.646-0.489 ppm และตำรับการทดลองที่ 3 มีค่าระหว่าง 0.669-0.497 ppm ตามลำดับ (ตารางที่ 6.1)

ที่ 60% WHC การลดลงของแก๊สไนตรัสออกไซด์ในตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ค่อนข้างมีการลดลงในทิศทางเดียวกันแนวโน้มของกราฟเป็นแนวทางเดียวกันและลดลงจนถึงค่อนข้างคงที่ในวันที่ 6 ของการทดลอง และความเข้มข้นของไนตรัสออกไซด์ของตำรับการทดลองที่ 1 มีค่าระหว่าง 0.684-0.476 ppm ตำรับการทดลองที่ 2 มีค่าระหว่าง 0.694-0.478 ppm และตำรับการทดลองที่ 3 มีค่าระหว่าง 0.714-0.481 ppm ตามลำดับ (ตารางที่ 6.2)



รูปที่ 6.4 ความเข้มข้นแก๊สไนตรัสออกไซด์ (ppm) บ่มดินที่ 30% WHC (Water holding capacity)



รูปที่ 6.5 ความเข้มข้นแก๊สไนโตรสออกไซด์ (ppm) บ่มดินที่ 60% WHC

ตารางที่ 6.1 ความเข้มข้นแก๊สไนโตรสออกไซด์ (ppm) ที่การบ่มดิน 30% WHC

เวลา (วัน)	ความเข้มข้นแก๊สไนโตรสออกไซด์ (ppm)		
	T1	T2	T3
0	0.000	0.000	0.000
1	0.640	0.646	0.669
2	0.588	0.611	0.617
3	0.596	0.599	0.547
4	0.599	0.610	0.605
5	0.587	0.602	0.583
6	0.581	0.586	0.566
7	0.480	0.509	0.513
8	0.482	0.504	0.513
9	0.493	0.510	0.511
12	0.485	0.489	0.497
13	0.489	0.496	0.505
14	0.491	0.506	0.500
15	0.492	0.496	0.507

ตารางที่ 6.2 ความเข้มข้นแก๊สไนตรัสออกไซด์ (ppm) ที่การบ่มดิน 60% WHC

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นแก๊สไนตรัสออกไซด์ (ppm)		
	T1	T2	T3
0	0.574	0.609	0.682
2	0.651	0.694	0.714
4	0.670	0.682	0.690
6	0.684	0.685	0.689
8	0.652	0.656	0.659
10	0.637	0.640	0.657
12	0.656	0.649	0.677
14	0.602	0.605	0.606
16	0.572	0.582	0.583
18	0.628	0.682	0.655
20	0.681	0.686	0.699
22	0.659	0.660	0.661
24	0.557	0.627	0.653
26	0.594	0.618	0.634
30	0.630	0.669	0.672
34	0.633	0.640	0.652
38	0.520	0.546	0.579
42	0.511	0.542	0.537
46	0.558	0.619	0.661
48	0.556	0.611	0.640
72	0.587	0.605	0.629
96	0.599	0.608	0.623
120	0.597	0.602	0.616
144	0.494	0.497	0.502
168	0.491	0.484	0.493
192	0.493	0.500	0.503
216	0.488	0.506	0.514
288	0.501	0.517	0.520
312	0.476	0.478	0.481
336	0.506	0.506	0.507
360	0.507	0.504	0.508

6.2.2 คุณสมบัติของอินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม, ไนไตรท์ และไนเตรท)

ปริมาณของอินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม, ไนไตรท์ และไนเตรท) ที่การบ่มดิน 30% WHC แสดงในตารางที่ 6.3-6.5 ส่วนปริมาณอินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท) ที่การบ่มดิน 60% WHC แสดงในตารางที่ 6.6-6.8 ผลการศึกษา พบว่า ความเข้มข้นแอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท ทุกตัวมีการทดลองและ % WHC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และในตำรับการทดลองที่ 3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงสุด รองลงมาเป็นตัวการทดลองที่ 2 และ 1 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.3 ความเข้มข้นแอมโมเนียม (ไมโครกรัมแอมโมเนียมต่อกรัมดิน) ที่การบ่มดิน 30% WHC

เวลา (วัน)	ความเข้มข้นแอมโมเนียม (ไมโครกรัมแอมโมเนียมต่อกรัมดิน)		
	T1	T2	T3
1	616.23	639.29	739.45
2	624.55	725.37	860.98
3	637.75	745.99	824.94
4	729.57	750.60	758.89
5	749.78	761.31	761.72
6	762.53	761.27	774.17
7	739.66	764.34	777.10
8	729.44	782.97	767.76
9	780.16	809.37	769.08
10	790.74	820.22	789.65
11	810.73	808.02	836.45
12	704.75	770.22	794.84
13	730.52	743.14	800.97
14	740.02	776.10	817.86
15	752.36	731.74	799.93
ค่าเฉลี่ย	726.59	759.33	791.58

ตารางที่ 6.4 ความเข้มข้นไนโตรเจน (ไมโครกรัมไนโตรเจนต่อกรัมดิน) ที่การบ่มดิน 30% WHC

เวลา (วัน)	ความเข้มข้นไนโตรเจน (ไมโครกรัมไนโตรเจนต่อกรัมดิน)		
	T1	T2	T3
1	1.88	3.56	5.45
2	3.50	4.85	5.40
3	2.98	6.17	4.61
4	2.80	2.61	4.98
5	3.01	2.74	6.55
6	3.31	9.71	9.04
7	3.57	7.39	8.45
8	3.01	7.18	9.02
9	2.97	7.90	4.72
10	3.17	7.58	4.77
11	2.61	3.78	3.13
12	2.01	5.95	6.03
13	1.76	6.85	6.20
14	2.63	4.07	6.44
15	3.61	5.12	3.17
ค่าเฉลี่ย	2.86	5.70	5.86

ตารางที่ 6.5 ความเข้มข้นไนเตรท (ไมโครกรัมไนเตรทต่อกรัมดิน) ที่การบ่มดิน 30% WHC

เวลา (วัน)	ความเข้มข้นไนเตรท (ไมโครกรัมไนเตรทต่อกรัมดิน)		
	T1	T2	T3
1	186.25	245.97	271.69
2	254.81	307.46	360.01
3	212.93	324.25	503.65
4	267.71	371.87	464.93
5	266.47	348.02	554.36
6	289.71	342.80	504.02
7	287.94	378.94	590.31
8	287.05	349.78	596.03
9	240.14	422.94	601.38
10	242.79	436.10	609.67
11	269.65	453.07	727.03
12	262.32	463.05	716.99
13	291.83	635.96	756.63
14	252.42	654.95	784.29
15	271.24	601.23	648.30
ค่าเฉลี่ย	258.88	422.43	579.29

ตารางที่ 6.6 ความเข้มข้นแอมโมเนียม (ไมโครกรัมแอมโมเนียมต่อกรัมดิน) ที่การบ่มดิน 60% WHC

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นแอมโมเนียม (ไมโครกรัมแอมโมเนียมต่อกรัมดิน)		
	T1	T2	T3
0	627.51	654.13	656.87
2	625.57	728.25	830.25
4	625.69	712.55	950.41
6	640.31	743.10	962.17
8	645.33	809.35	969.60
10	635.17	890.10	967.20
12	658.92	916.03	968.34
14	848.41	938.76	1037.55
16	851.38	919.80	1065.54
18	849.67	931.90	1101.52
20	826.14	942.41	1153.71
22	879.76	990.38	1157.94
24	853.78	986.39	1128.81
26	786.85	972.91	1066.00
28	817.46	938.70	984.44
30	808.15	923.22	959.20
32	813.23	924.31	979.65
34	810.95	926.19	946.18
36	833.10	950.86	949.15
38	805.46	964.34	974.28
40	785.02	956.52	973.99
42	764.12	936.64	977.76
44	779.08	937.16	972.68
46	825.22	929.28	968.11
48	839.73	929.39	961.14
ค่าเฉลี่ย	769.44	898.11	986.50

ตารางที่ 6.7 ความเข้มข้นไนโตรเจน (ไมโครกรัมไนโตรเจนต่อกรัมดิน) ที่การบ่มดิน 60% WHC

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นไนโตรเจน (ไมโครกรัมไนโตรเจนต่อกรัมดิน)		
	T1	T2	T3
0	1.21	0.26	2.13
2	0.93	2.06	8.24
4	2.65	1.54	4.49
6	0.80	4.95	6.85
8	1.51	7.09	8.13
10	1.12	6.32	6.83
12	0.76	11.01	9.00
14	1.64	9.48	11.43
16	0.78	6.45	12.32
18	0.97	1.92	6.74
20	1.52	2.25	2.47
22	1.83	1.89	3.84
24	1.59	1.42	1.84
26	1.38	1.76	2.49
28	1.01	1.77	4.31
30	1.71	4.43	3.39
32	1.74	5.22	3.00
34	0.97	2.43	2.50
36	1.35	1.29	1.44
38	0.97	1.83	4.03
40	0.27	1.78	2.18
42	1.42	1.88	1.89
44	1.01	2.04	2.70
46	0.96	2.25	2.01
48	0.51	3.84	4.24
ค่าเฉลี่ย	1.22	3.49	4.74

ตารางที่ 6.8 ความเข้มข้นไนเตรท (ไมโครกรัมไนเตรทต่อกรัมดิน) ที่การบ่มดิน 60% WHC

เวลา (ชั่วโมง)	ความเข้มข้นไนเตรท (ไมโครกรัมไนเตรทต่อกรัมดิน)		
	T1	T2	T3
0	237.82	245.19	424.09
2	240.73	304.45	681.55
4	239.28	576.20	675.53
6	239.83	509.91	786.13
8	273.43	434.47	671.06
10	261.26	469.18	653.32
12	300.21	583.68	635.24
14	292.06	614.15	713.92
16	336.15	631.33	717.38
18	319.85	708.00	710.12
20	314.83	710.79	708.56
22	305.34	664.03	668.83
24	274.65	682.78	670.06
26	300.43	679.66	650.64
28	319.41	676.31	683.56
30	329.23	760.23	772.73
32	245.97	744.39	834.11
34	288.38	683.12	811.35
36	312.49	741.26	788.92
38	257.47	721.06	718.49
40	285.92	714.03	629.77
42	317.40	643.05	568.17
44	269.30	677.43	621.99
46	308.69	670.06	594.06
48	289.27	673.97	593.17
ค่าเฉลี่ย	286.38	620.75	679.31

6.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์และอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท)

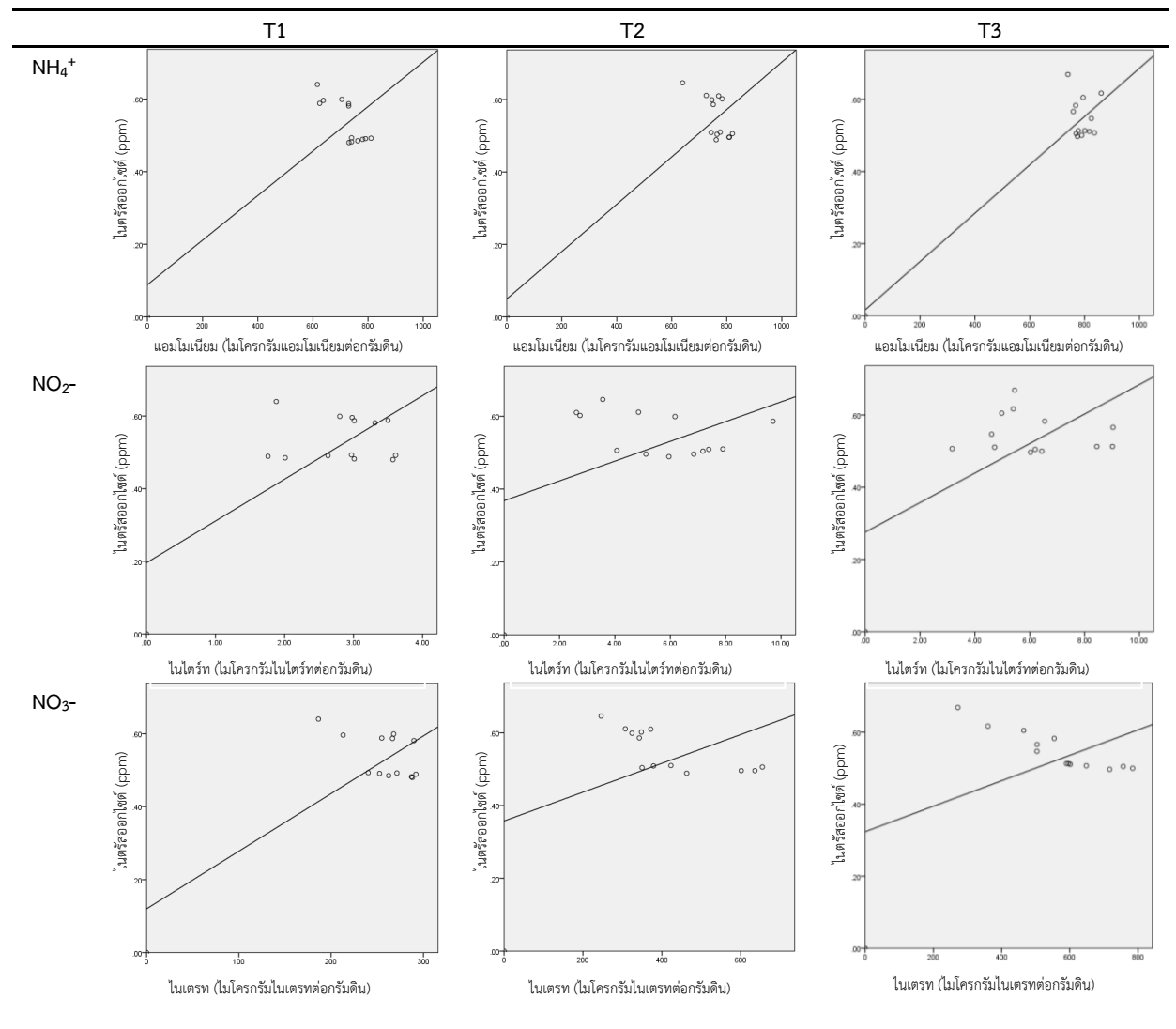
การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สไนตรัสออกไซด์และอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท) ที่ 30% WHC แสดงในตารางที่ 6.9 และรูปที่ 6.6 และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแก๊สไนตรัสออกไซด์และอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท) ที่ 60% WHC แสดงในตารางที่ 6.10 และรูปที่ 6.7

ผลการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สไนโตรสออกไซด์และแอมโมเนียม ที่ 30% WHC มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันและมีความสัมพันธ์ค่อนข้างมาก มีค่า $R^2 = 0.64, 0.75$ และ 0.85 ในตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สไนโตรสออกไซด์กับปริมาณไนเตรตและไนไตรท์ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันเช่นกัน แต่มีความสัมพันธ์ไม่สูงนัก ไนเตรต $R^2 = 0.59, 0.18, 0.22$ ในตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนไนไตรท์ $R^2 = 0.59, 0.19$ และ 0.39 ในตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (ตารางที่ 6.9)

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สไนโตรสออกไซด์และแอมโมเนียม ที่ 60% WHC มีความสัมพันธ์ค่อนข้างน้อยมาก แอมโมเนียม $R^2 = 0.152, 0.124$ และ 0.045 ในตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ไนเตรต $R^2 = 0.034, 0.034, 0.034$ ในตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ และไนไตรท์ $R^2 = 0.065, 0.00$ และ 0.005 ในตำรับการทดลองที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (ตารางที่ 6.10)

ตารางที่ 6.9 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแก๊สไนโตรสออกไซด์และอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรต) บ่มดินที่ 30% WHC

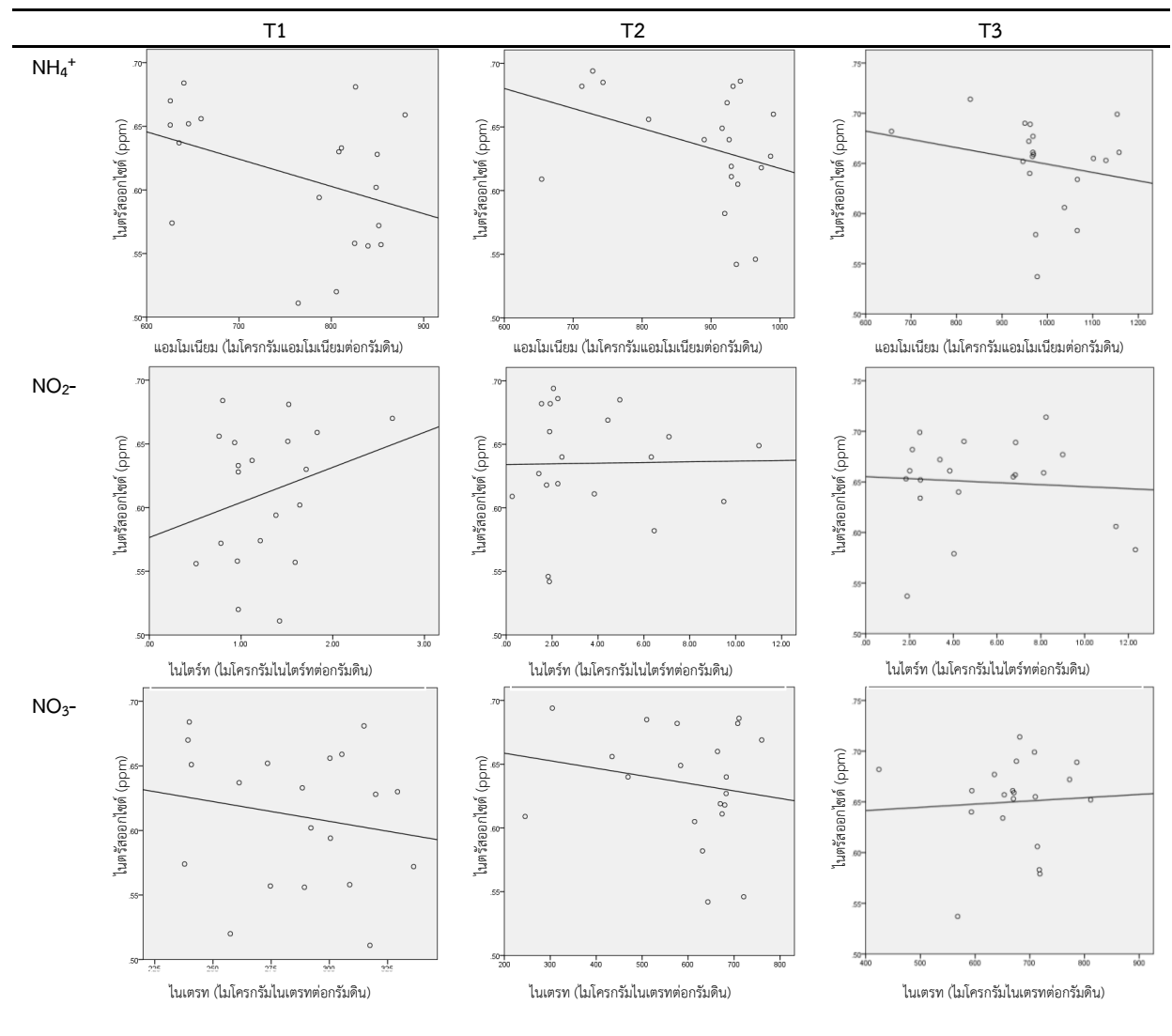
Parameter	Intercept	Slope	R^2	P-Value
NH₄⁺				
T1	0.089	0.001	0.64	0.000
T2	0.050	0.001	0.75	0.000
T3	0.001	0.001	0.85	0.000
NO₂⁻				
T1	0.196	0.115	0.52	0.01
T2	0.368	0.270	0.19	>0.05
T3	0.276	0.041	0.39	0.01
NO₃⁻				
T1	0.120	0.002	0.59	0.001
T2	0.358	0.000	0.18	>0.05
T3	0.324	0.000	0.22	>0.05



รูปที่ 6.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแก๊สไนตรัสออกไซด์ (ppm) และอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท) (ไม่โครกรัมต่อกรัมดิน) บ่มดินที่ 30% WHC

ตารางที่ 6.10 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแก๊สไนตรัสออกไซด์และอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท) บ่มดินที่ 60% WHC

Parameter	Intercept	Slope	R^2	<i>P-Value</i>
NH_4^+				
T1	0.774	0.000	0.152	>0.05
T2	0.774	0.000	0.124	>0.05
T3	0.732	-0.001	0.045	>0.05
NO_2^-				
T1	0.577	0.028	0.065	>0.05
T2	0.634	0.000	0.000	>0.05
T3	0.655	-0.001	0.005	>0.05
NO_3^-				
T1	0.699	0.000	0.034	>0.05
T2	0.670	-0.001	0.034	>0.05
T3	0.629	-0.001	0.004	>0.05



รูปที่ 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นแก๊สไนตรัสออกไซด์ (ppm) และอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท) (ไม่โครกรัมต่อกรัมดิน) บ่มดินที่ 60% WHC

6.2.4 N₂O Production ที่การบ่มดิน 30% WHC และ 60% WHC

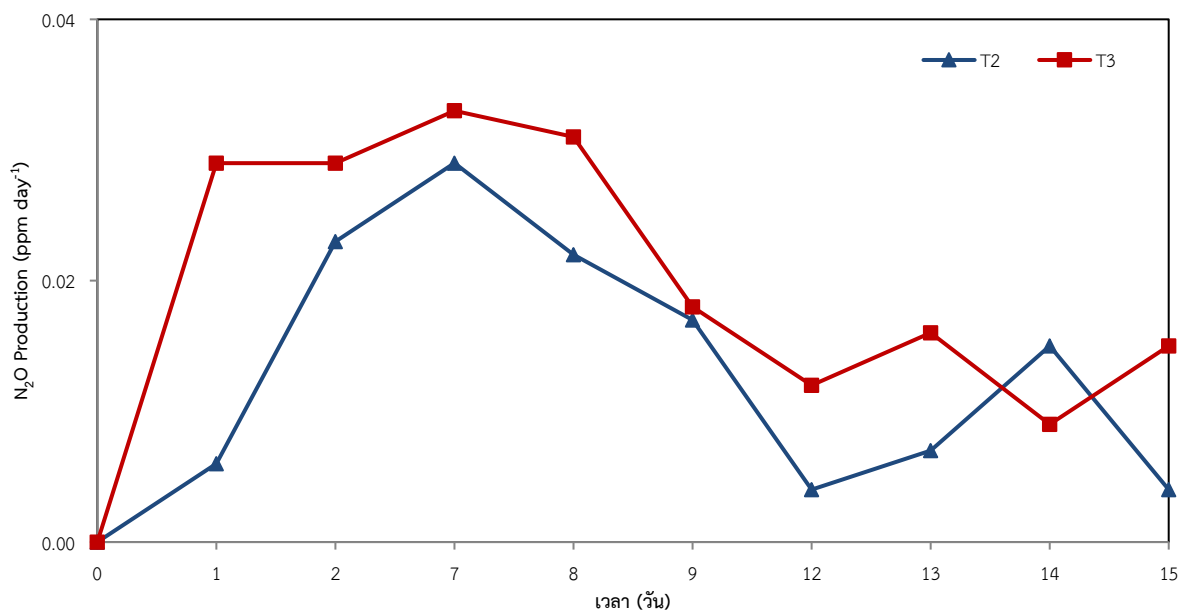
เมื่อพิจารณา N₂O production ที่การบ่มดิน 30% WHC และ 60% WHC ผลผลิตที่เกิดขึ้นจะค่อย ๆ ลดลงตามเวลา การบ่มดิน 30% WHC ลดลงอย่างมากในวันที่ 12 ของการทดลอง ส่วนที่การบ่มดิน 60% WHC N₂O production ลดลงในวันที่ 7 ของการทดลองและมีค่าคงที่ หมายถึงกิจกรรมที่เกิดขึ้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (ตารางที่ 6.11, 6.12 รูปที่ 6.8 และ 6.9)

ตารางที่ 6.11 N₂O Production ที่การบ่มดิน 30% WHC

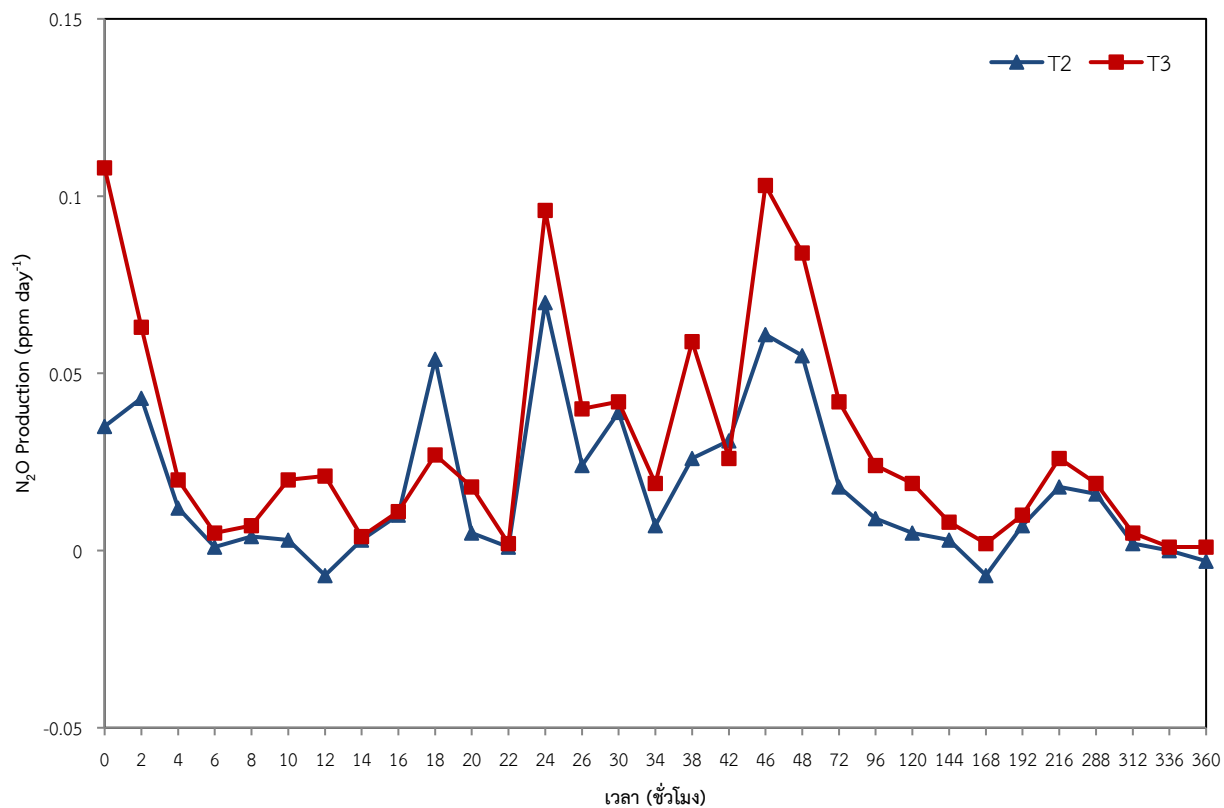
เวลา (วัน)	N ₂ O Production (ppm day ⁻¹)	
	T2	T3
0	0	0
1	0.006	0.029
2	0.023	0.029
4	0.011	0.006
7	0.029	0.033
8	0.022	0.031
9	0.017	0.018
12	0.004	0.012
13	0.007	0.016
14	0.015	0.009
15	0.004	0.015

ตารางที่ 6.12 N₂O Production ที่การบ่มดิน 60% WHC

เวลา (ชั่วโมง)	N ₂ O Production (ppm day ⁻¹)	
	T2	T3
0	0.035	0.108
2	0.043	0.063
4	0.012	0.020
6	0.001	0.005
8	0.004	0.007
10	0.003	0.020
12	-0.007	0.021
14	0.003	0.004
16	0.010	0.011
18	0.054	0.027
20	0.005	0.018
22	0.001	0.002
24	0.070	0.096
26	0.024	0.040
30	0.039	0.042
34	0.007	0.019
38	0.026	0.059
42	0.031	0.026
46	0.061	0.103
48	0.055	0.084
72	0.018	0.042
96	0.009	0.024
120	0.005	0.019
144	0.003	0.008
168	-0.007	0.002
192	0.007	0.010
216	0.018	0.026
288	0.016	0.019
312	0.002	0.005
336	0.000	0.001
360	-0.003	0.001



รูปที่ 6.8 N_2O Production ที่การบ่มดิน 30% WHC



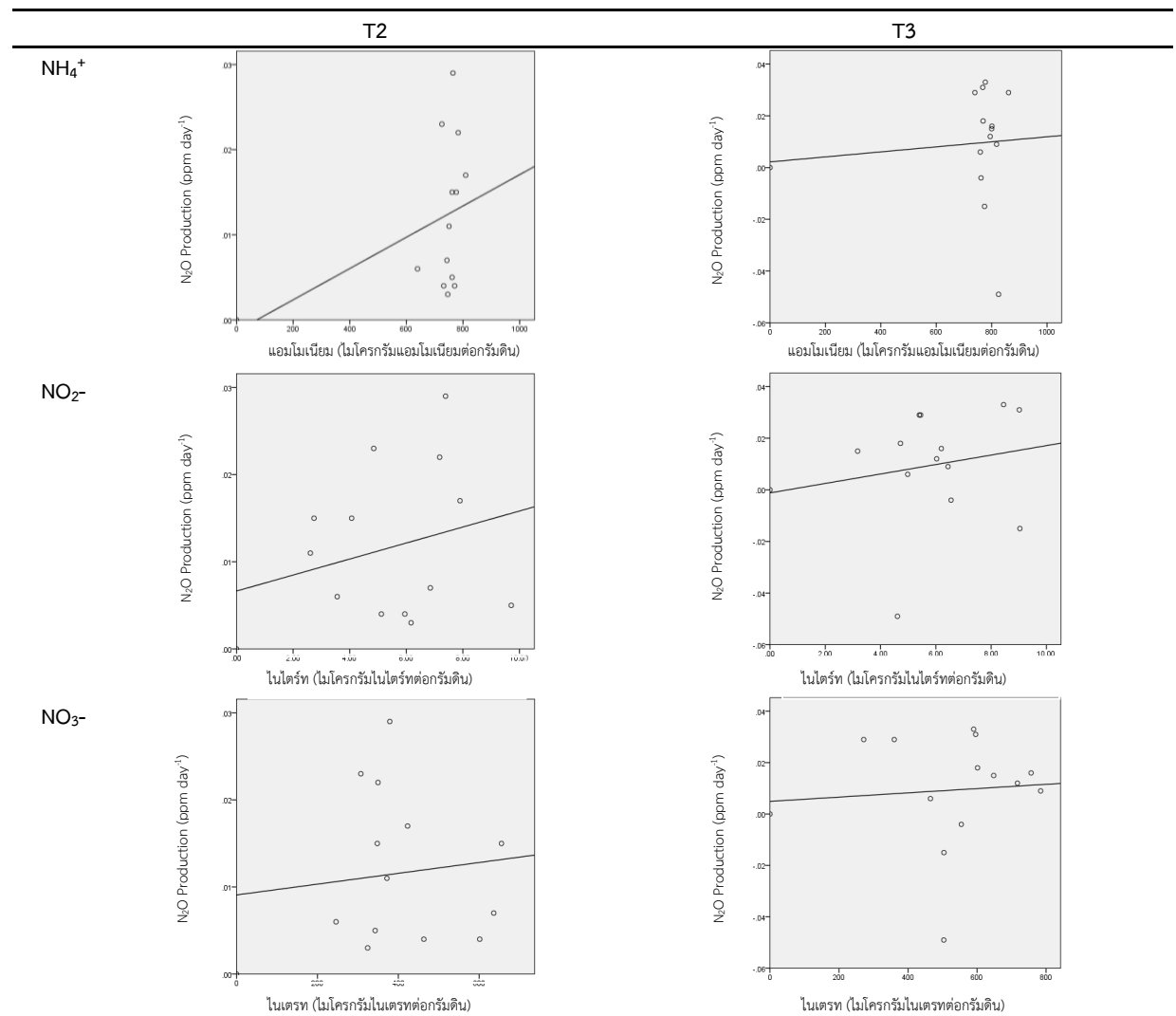
รูปที่ 6.9 N_2O Production ที่การบ่มดิน 60% WHC

6.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง N_2O Production ที่การบ่มดิน 30% WHC และ 60% WHC และอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท)

ความสัมพันธ์ระหว่าง N_2O Production และอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท) บ่มดินที่ 30 %WHC และ 60% WHC พบว่า มีความสัมพันธ์ค่อนข้างน้อย ในบางปัจจัย และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางที่ไม่สอดคล้องกัน (ตารางที่ 6.13, 6.14 รูปที่ 6.10 และ 6.11)

ตารางที่ 6.13 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง N_2O Production และอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท) บ่มดินที่ 30 %WHC

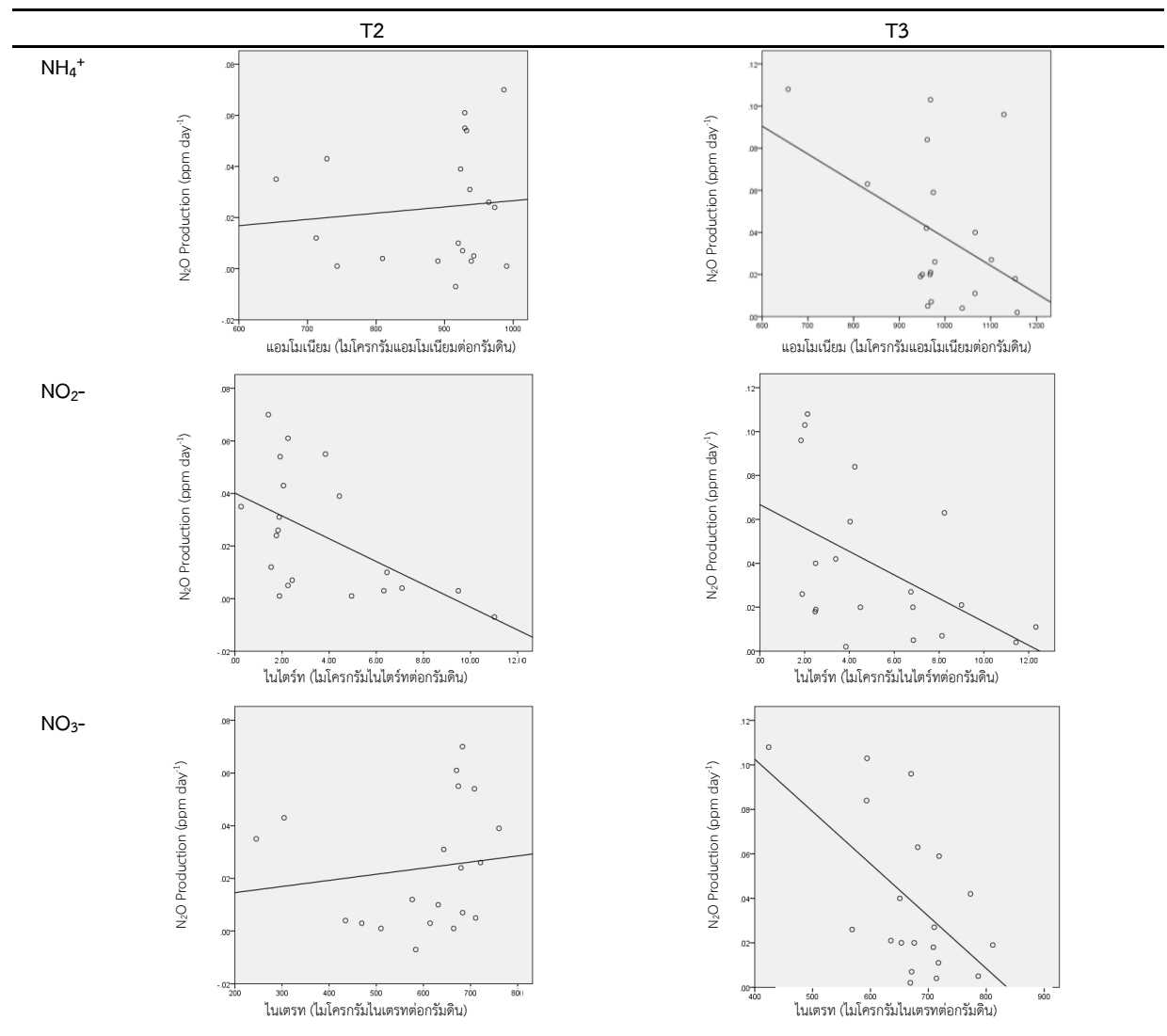
Parameter	Intercept	Slope	R^2	P-Value
NH_4^+				
T2	-0.001	0.001	0.181	>0.05
T3	0.002	0.001	0.009	>0.05
NO_2^-				
T2	0.007	0.001	0.070	>0.05
T3	-0.001	0.020	0.039	>0.05
NO_3^-				
T2	0.009	0.001	0.014	>0.05
T3	0.005	0.001	0.006	>0.05



รูปที่ 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_2O Production (ppm day^{-1}) และอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท) (ไมโครกรัมต่อกรัมดิน) บ่มดินที่ 30% WHC

ตารางที่ 6.14 ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง N_2O Production และอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท) บ่มดิน 60% WHC

Parameter	Intercept	Slope	R^2	P -Value	
NH_4^+	T2	0.002	0.001	0.011	>0.05
	T3	0.170	0.000	0.188	>0.05
NO_2^-	T2	0.400	0.004	0.294	<0.05
	T3	0.067	0.005	0.251	<0.05
NO_3^-	T2	0.010	0.001	0.019	>0.05
	T3	0.197	0.000	0.334	<0.05



รูปที่ 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_2O Production (ppm day^{-1}) และอนินทรีย์ไนโตรเจน (แอมโมเนียม ไนไตรท์ และไนเตรท) (ไม่โครกรัมต่อกรัมดิน) บ่มดินที่ 60% WHC

บทที่ 7

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินจากการใช้ปุ๋ยเคมี เพื่อปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนในดินเกษตรในรูปของอัตรา nitrification denitrification และการสูญเสียไนโตรเจนด้วยกระบวนการ ammonia volatilization สรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

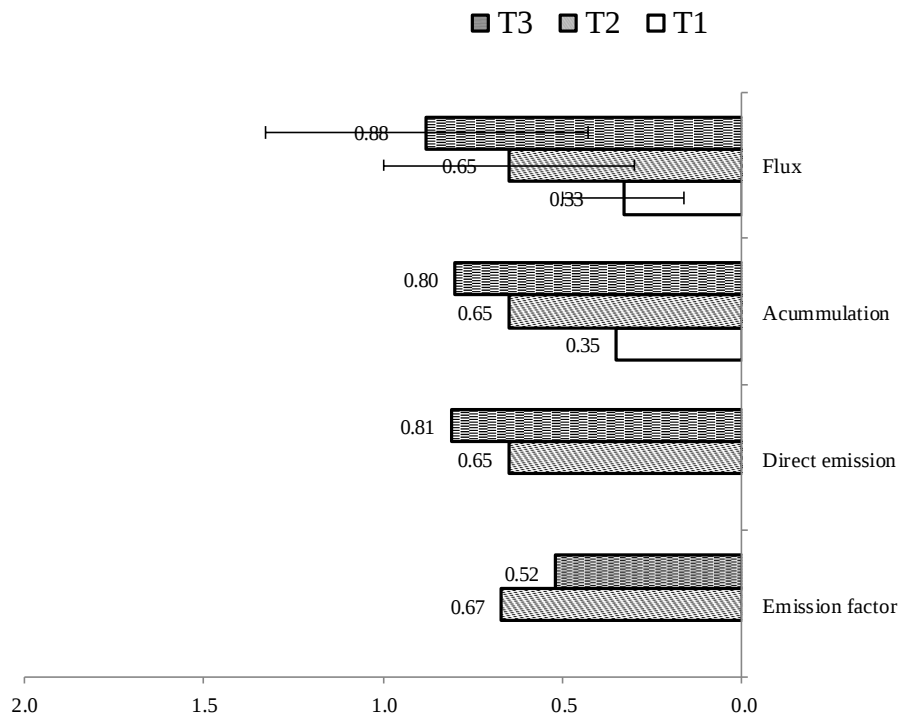
7.1 การปล่อยไนตรัสออกไซด์

การศึกษาค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในดินในประเทศไทยมีการศึกษาไม่มากนัก ซึ่งการศึกษานี้ศึกษาค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์ จากการใส่ปุ๋ยในอัตราที่แตกต่างกัน พบว่าค่าเฉลี่ยการปล่อยไนตรัสออกไซด์ในปุ๋ยอัตรา 155 kg N ha^{-1} มีการปล่อยไนตรัสออกไซด์สูงที่สุด ดำเนินการทดลองที่ 3 ที่มีค่าการปล่อยสูงสุดดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 0.88 ± 0.05 , 1.29 ± 0.06 และ $0.78 \pm 0.21 \text{ mg N}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ในรอบการเพาะปลูกที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ และไนตรัสออกไซด์สะสม มีค่า 0.80, 1.20 และ $0.81 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ crop}^{-1}$ ในรอบการเพาะปลูกที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับเช่นกัน และพบว่าหลังจากมีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนลงไป ค่าไนตรัสออกไซด์จะมีค่าสูงในช่วง 5-7 วัน หลังจากใส่ปุ๋ย และจะมีค่าลดลงตามลำดับ

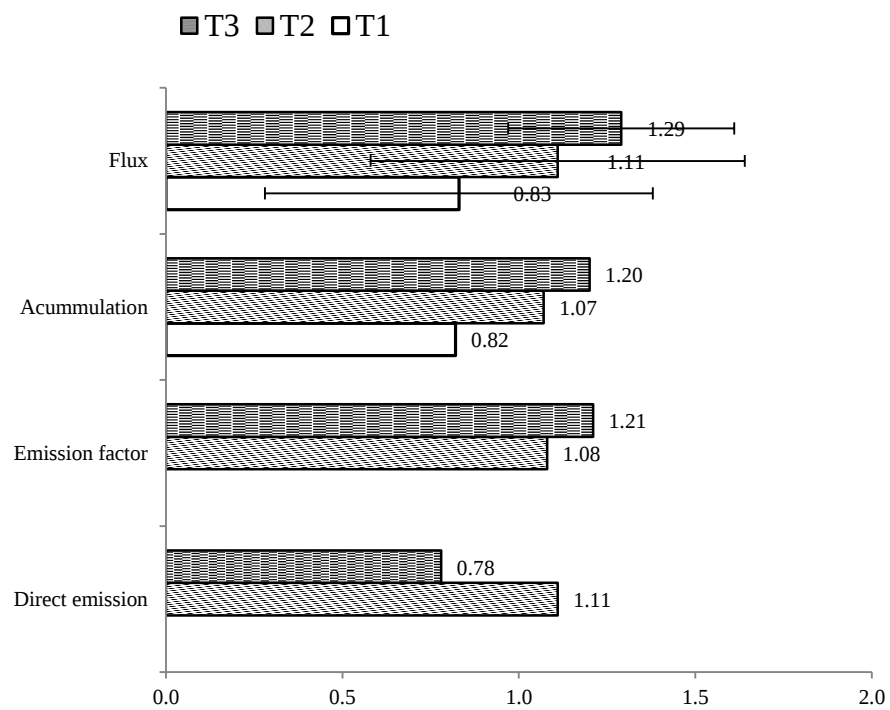
ในช่วง 2^{nd} crop มีค่าการปล่อยสูง ซึ่งจากการทดลองพบว่าช่วง 2^{nd} crop (dry season in 2015) มีปริมาณฝนมากและมี %WFPS ปานกลาง และดินในช่วง 2^{nd} crop (dry season) แห้งกว่า 1^{st} crop และ 3^{rd} crop (wet season) เนื่องจากว่ามีอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิดินสูง เมื่อมีค่าการปล่อย N_2O ต่ำ แสดงว่าในช่วงกลางๆ ของ 1^{st} crop (wet season) และการศึกษา nitrification และ denitrification ที่ %WFPS 45-60% เป็นการยืนยันว่าทั้งสองกระบวนการมีการสร้าง N_2O และในดินมีปริมาณ NH_4^+ ($7.10\text{-}10.69 \text{ mg NH}_4^+\text{-N kg}^{-1}$) ปริมาณ NO_3^- สูงเท่ากับ $14.85\text{-}30.45 \text{ mg NO}_3^-\text{-N kg}^{-1}$ พบในรอบการเพาะปลูกที่ 2 ซึ่งเกิดกระบวนการ nitrification อย่างรวดเร็ว โดยมี %WFPS และอุณหภูมิสูง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดกระบวนการทางชีวเคมีของ denitrification ได้ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่ากระบวนการ denitrification จะส่งผลโดยตรงกับการปล่อยไนตรัสออกไซด์ใน wet season และใน dry season จะเกิดได้ทั้งกระบวนการของ nitrification และ denitrification (รูปที่ 7.1)

ค่าการปล่อยทางตรง (Direct emission factor, (EFs) ค่าการปล่อยทางตรงจากการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน รอบการเพาะปลูกที่ 1 มีค่า 0.67 และ 0.52% สำหรับดำเนินการทดลองที่ 2 และ 3 รอบการเพาะปลูกที่ 2 มีค่า 1.11 และ 0.78% สำหรับดำเนินการทดลองที่ 2 และ 3 และรอบการเพาะปลูกที่ 3 มีค่า 0.71 และ 0.52% สำหรับดำเนินการทดลองที่ 2 และ 3 ส่วนค่าเฉลี่ย 0.83 และ 0.61% ของทั้ง 3 รอบการเพาะปลูก (รูปที่ 7.1) เมื่อประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยใช้ค่าศักยภาพที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนของ N_2O ที่ GWP 100 years มีค่า 298 เท่าของคาร์บอนไดออกไซด์ N_2O จากการคำนวณค่าทั้งหมดในประเทศมีค่า 0.256 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่ 97 kg N ha^{-1} และ 0.307 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่ 155 kg N ha^{-1} ตามลำดับ

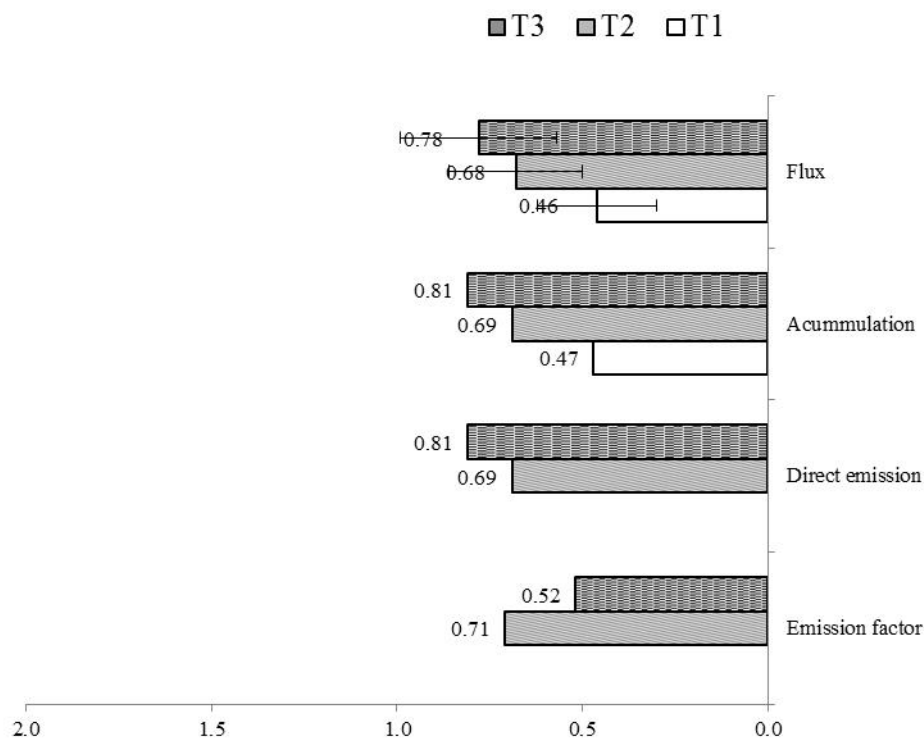
(a) 1st Crop



(b) 2nd Crop



(c) 3rd Crop



รูปที่ 7.1 Summary of average N₂O fluxes, N₂O fluxes accumulation, emission factor, and direct N₂O emission in the wet season 2014: 1st Crop (a), dry season 2015: 2nd Crop (b) and wet season 2015: 3rd Crop (c)

7.2 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์

ดินในพื้นที่ศึกษาเป็นดินสีแดงมีออกไซด์ของ Fe และ Al ซึ่งลักษณะที่พบนี้ทำให้ดินมีการระบายน้ำดี ความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ มีความชื้นต่ำ ส่วนความเป็นกรดและด่างของดินอยู่ในช่วง 6.0-7.0 ดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ มีอินทรีย์วัตถุประมาณ 1.0% ปริมาณน้ำฝนแต่ละรอบการเพาะปลูกมีความแตกต่างกันอยู่ระหว่าง 280-480 มม. ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มปริมาณความชื้นในดิน 38%, %WFPS ประมาณ 70% และทำให้เกิดขบวนการ denitrification ปล่อยไนตรัสออกไซด์ปริมาณสูงในรอบการเพาะปลูกที่ 2 ในรอบการเพาะปลูกนี้เป็นฤดูร้อนทำให้อุณหภูมิสูงส่งผลต่อ N₂O fluxes ด้วย

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดและอนินทรีย์ไนโตรเจน เป็นแหล่งที่สำคัญของการปล่อยไนตรัสออกไซด์ ใน wet season NH₄⁺ และ NO₃⁻ มีความสัมพันธ์อย่างมากกับปริมาณ N₂O fluxes ในช่วง 30-40 วันหลังปลูก NH₄⁺ และ NO₃⁻ จากปุ๋ยเป็น substrate ที่สำคัญของกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งจะผลิต N₂O เมื่อมีปริมาณฝนและ %WFPS สูง ใน dry season มีปริมาณ NO₃⁻ สูง ซึ่งจะเป็น substrate ของจุลินทรีย์ในดิน แต่จะเกิดในช่วงสั้นๆ เท่านั้น เกิดเมื่อมีปริมาณน้ำในดินสูงจากฝนตกหนักและมีปริมาณ %WFPS สูง และความหนาแน่นของดินสูง เมื่อปริมาณฝนน้อยลง O₂ ในดิน NO₂⁻

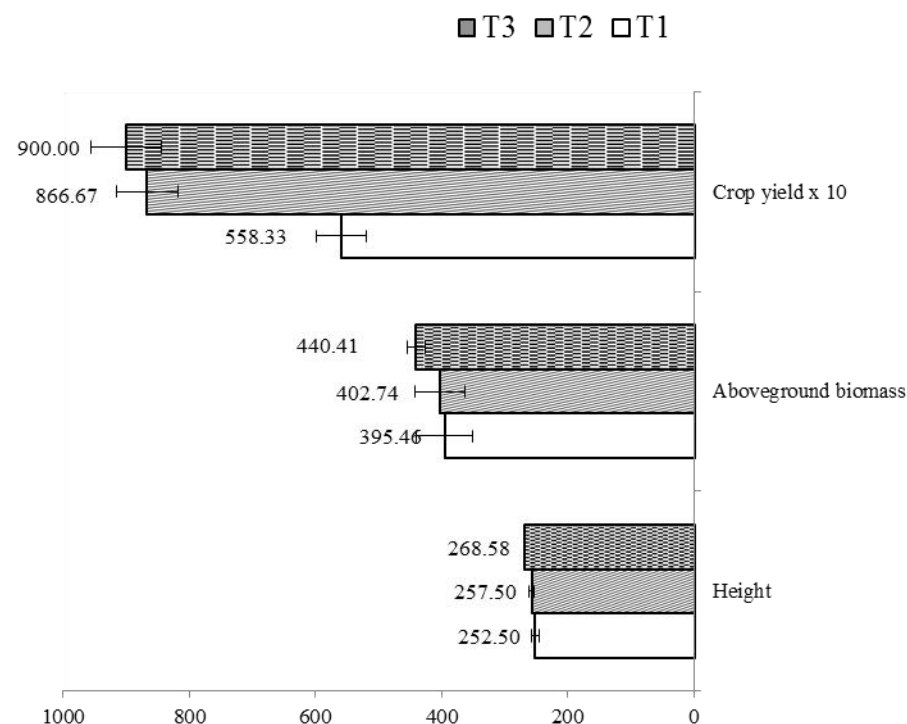
จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างรวดเร็วไปเป็น N_2O โดยเกิดในสภาวะที่อุณหภูมิในอากาศสูงและการระเหยน้ำจะ
ไปกระตุ้นให้เกิด N_2O ด้วยขบวนการ nitrification และ denitrification

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของดินและปริมาณ N_2O พบว่า ปริมาณ
ไนโตรเจนทั้งหมด อนินทรีย์ไนโตรเจน และ %WFPS มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ($R^2 =$
0.54) กับการเพิ่มของปริมาณ N_2O ถึง 0.003-33 เท่าของ N_2O ในสิ่งแวดล้อม ส่วนในช่วง wet
season ส่วน dry season คุณสมบัติของดินที่สำคัญที่มีความสัมพันธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ($R^2 =$
0.65) กับการเพิ่มปริมาณ N_2O ถึง 0.007-2.5 เท่าของ N_2O ในสิ่งแวดล้อม

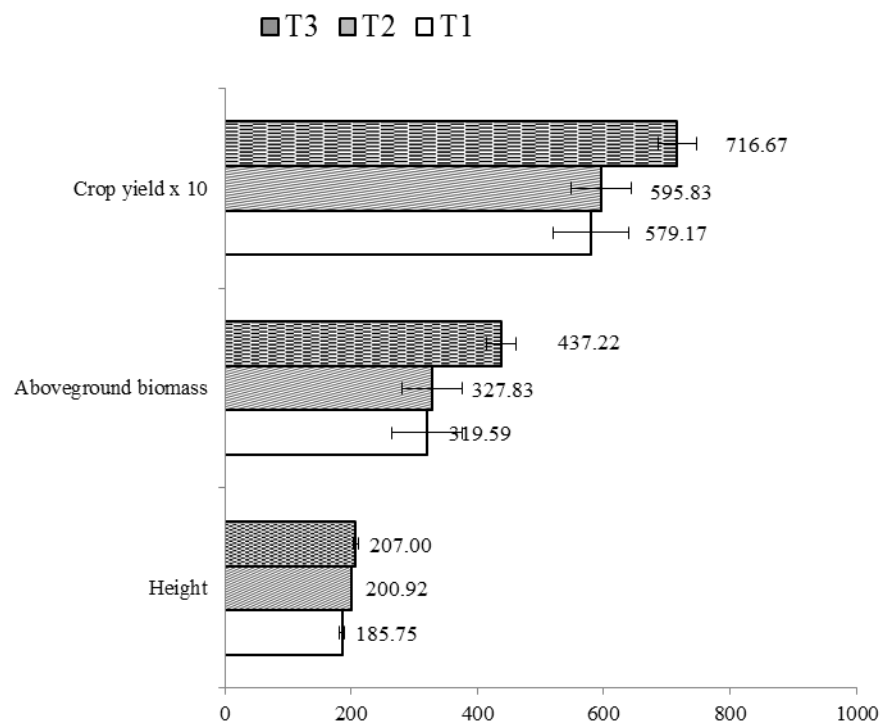
7.3 ผลผลิตและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic benefits) เพื่อใช้สำหรับ
ตัดสินใจอัตราการใช้ปุ๋ยที่เหมาะสมเรียกว่า value cost ration (VCR) ผลการศึกษาจากการทดลอง
นี้พบว่า ในรอบการเพาะปลูกที่ 1 ใช้ปุ๋ยอัตรา 97 kg N ha^{-1} มีค่าสูงถึง 9.70 มากกว่า ค่ารับการ
ทดลองที่ 3 เท่ากับ 6.19 ซึ่งใช้ปุ๋ยอัตรา 155 kg N ha^{-1} ค่ารับการทดลองที่ 2 มีผลผลิต 3,083.34 kg ha^{-1}
และมีราคา 22,000 บาทต่อแกลตาร์ VCR ของค่ารับการทดลองที่ 2 เหมาะสมที่จะแนะนำให้
เกษตรกรใช้ปุ๋ยอัตราในการปลูกข้าวโพด ซึ่งมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และปริมาณผลผลิต โดย
สรุปผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 97 kg N ha^{-1} ช่วยลด N_2O ที่ปล่อย
ออกมาจากดินและเพิ่มผลผลิต ซึ่งผลที่พบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการใส่ปุ๋ย
ไนโตรเจนอัตรา 155 kg N ha^{-1}

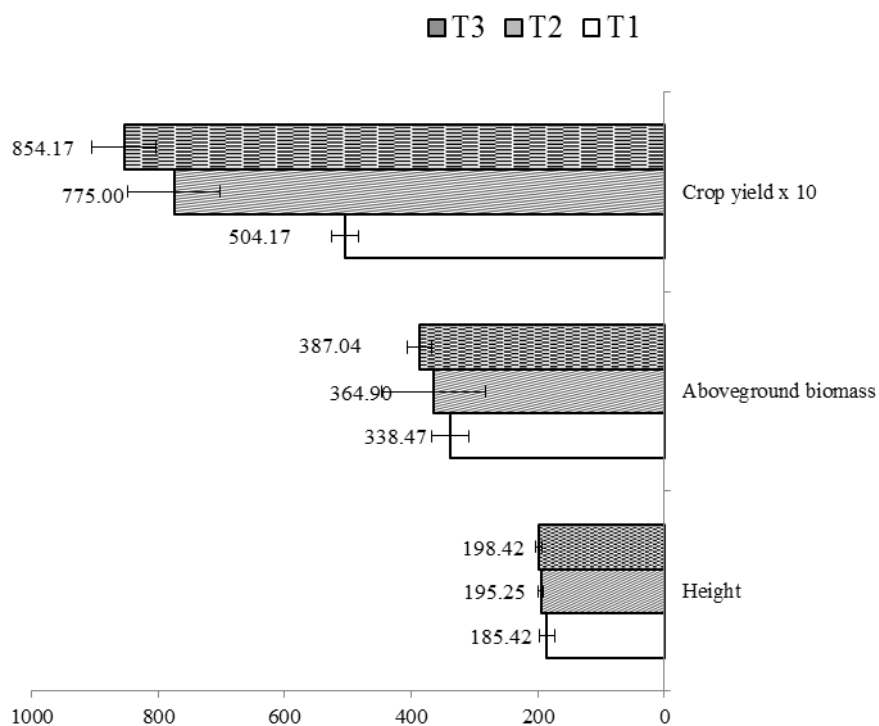
(a) 1st Crop



(b) 2nd Crop



(c) 3rd Crop



รูปที่ 7.2 Summary of crop yield and biomass properties in the wet season 2014: 1st Crop (a), dry season 2015: 2nd Crop (b) and wet season 2015: 3rd Crop

7.4 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากข้อมูลการวิจัยมีข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต ดังนี้

8.4.1 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปริมาณการปล่อยไนตรัสออกไซด์และค่าการปล่อย เพื่อจะใช้เป็นตัวแทนของประเทศไทย ดังนั้นควรจะมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องที่มีผลต่อค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากการใช้ปุ๋ยดังกล่าวในพื้นที่อื่นๆ ที่มีการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น ชนิดของดิน ชนิดของปุ๋ยไนโตรเจน อัตราการใส่ปุ๋ย การจัดการการเพาะปลูก เช่น การไถพรวน การไม่ไถพรวน การให้น้ำหรือการไม่ให้น้ำ นอกจากนี้ควรศึกษาปัจจัยสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น ความชื้น เพื่อให้ค่าที่ศึกษาได้เป็นตัวแทนและเป็นค่าการปล่อยของประเทศไทยที่แม่นยำมากขึ้น

8.4.2 การศึกษาการปล่อยทางอ้อม (Indirect emission) เช่น การปล่อยจากกระบวนการชะล้างและการไหลบ่า (leaching and runoff) เป็นต้น

ซึ่งการศึกษาและข้อเสนอแนะดังกล่าวข้างต้นนี้หากมีการศึกษาเพิ่มเติมก็คาดหวังว่าค่าการปล่อยไนตรัสออกไซด์จากดินเกษตรในประเทศไทยสำหรับการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมพัฒนาที่ดิน, 2535. ลักษณะและสมบัติของชุดดิน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ: ชุดดินปากช่อง. (ออนไลน์). ที่มา: http://www.ddd.go.th/thaisoils_museum/pf_desc/northeast/Pc.htm.
- กรมพัฒนาที่ดิน. สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรับปรุงดินและการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน.
- กรมวิชาการเกษตร, 2547. เอกสารวิชาการ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547. พืชเศรษฐกิจ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ยงยุทธ โอสดสภา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และชวลิต ธงประยูร. 2551. ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ, 2549. ข้าวโพดลูกผสมเดี่ยวพันธุ์สุวรรณ 4452. แหล่งที่มา: http://www.iicrd.ku.ac.th/output/ncsrc_4452.htm.
- ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2557. วารสารการพยากรณ์ผลผลิตการเกษตร, 29 (2), หน้า 11-13.
- สมชัย ลิ้มอรุณ, สดใส ช่างสลัก, โกศล เกิดโภคทรัพย์, สำราญ ศรีชมพร และ สมชาย โพธิสาร. 2547. การทดสอบพันธุ์ข้าวโพดการค้าในไร่เกษตรกร อ. ปากช่อง จ.นครราชสีมา. ใน: รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ประจำปี 2547: โครงการทดลองข้าวโพดข้าวฟ่างระดับไร่เกษตรกร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมชัย ลิ้มอรุณ, สดใส ช่างสลัก, โกศล เกิดโภคทรัพย์, สำราญ ศรีชมพร และสมชาย โพธิสาร. 2547. การทดสอบข้าวโพดลูกผสมกึ่งการค้าในไร่เกษตรกร ปี 2547. ใน: รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ประจำปี 2547: โครงการทดลองข้าวโพดข้าวฟ่างระดับไร่เกษตรกร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมชัย ลิ้มอรุณ, สดใส ช่างสลัก, โกศล เกิดโภคทรัพย์, สำราญ ศรีชมพร และสมชาย โพธิสาร. 2547. การทดสอบข้าวโพดลูกผสมพันธุ์ปรับปรุงใหม่ที่ดีเด่นในไร่เกษตรกร ปี 2547. ใน: รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ประจำปี 2547: โครงการทดลองข้าวโพดข้าวฟ่างระดับไร่เกษตรกร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สิริทรเทพ เต้าประยูร, 2554. สถานภาพการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย แนวโน้มการปล่อยในอนาคต. ใน: รายงานการสังเคราะห์และประมวลสถานภาพองค์ความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของไทย ครั้งที่ 1: องค์ความรู้ด้านการลดก๊าซเรือนกระจก. คณะทำงานกลุ่มที่ 3 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย [สิริทรเทพ เต้าประยูร, จำนง สรพิพัฒน์ และอำนาจ ชิดไธสง (บรรณาธิการ)].

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2553. รายงานแห่งชาติฉบับที่ 2 รายงานฉบับสมบูรณ์ การจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2557. สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2556. กรุงเทพฯ: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

หนึ่ง เตียอำรุง, แบบที่เรียตรึงไนโตรเจน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อภิชาติ โหมดตาด, 2555. ผลของสารยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชันที่มีต่อการเปลี่ยนรูปของปุ๋ยไนโตรเจนและการปล่อยแก๊สไนตรัสออกไซด์ในพื้นที่ปลูกข้าวโพด. (วิทยานิพนธ์) กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาษาอังกฤษ

Amer, F.M. and W.V. Bartholomew. 1951. Influence of oxygen concentration in soil air on nitrification. *Soil Science* 71: 215-219.

AOAC. (1990). *Official methods of analysis of the association of official analytical chemists*. 15th Ed. 1. AOAC.

Baggs, E.M. (2008). A review of stable isotope techniques for N₂O source partitioning in soils: recent progress, remaining challenges and future considerations', *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 22, 1164-1672.

Belser, L.W. 1979. Population ecology of nitrifying bacteria. *Annual Review of Microbiology* 33: 309-333.

Blake, G.R. (1965). Bulk density. In C.A. Blake. Et al. (Ed.). *Method of Soil Analysis*, Part 1. Wisconsin: American Society of Agronomy Monograph.

Bray, RH & Kurtz, LT. 1945, Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59: 39-45.

Bremner J.M. Nitrogen. (1965). In C.A. Black (Ed.) *Methods of soil analysis part 2 chemical and microbiological properties*. Wisconsin: Amer. Soc. of Agron. Inc.

Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. In: *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Edited by C. A. Black et al. Agron. Series 9. Amer. Soc. Agron. Madison, Wisconsin. pp. 1149-1178.

Butterbach-Bahl, K., Kock, M., Willibald, G., Hewett, B., Buhagiar, S., Papen, H., et al. 2004. Temporal variations of fluxes of NO, NO₂, N₂O, CO₂, and CH₄ in a tropical rain forest ecosystem. *Global. Biogeochem. Cycles*, 18 (3), 3012.

Bouwman, A.F., Boumans, L.J.M., Batjes, N.H., 2002a. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: summary of available measurement data. *Global Biogeochemical Cycles* 16.

- Bouwman, A.F., Boumans, L.J.M., Batjes, N.H., 2002b. Modeling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochemical Cycles* 16.
- Chen, G.X., Huang, G.H., Yu, K.W., Xu, H. 1997. Nitrous oxide and methane emissions from soil-plant systems. *Nutrient Cycling in Agro ecosystems*, 49, 41-45.
- Chen, S.T., Huang, Y. 2009. Soil respiration and N₂O emission in croplands under different ploughing practices, a case study in south-east China. *Australian Journal of Soil Research*, 47,198-205.
- Chen, S. T.; Huang, Y.; Zou, J. W. 2008. Relationship between nitrous oxide emission and winter wheat production. *Biology and Fertility of Soils*, 44 (7), 985-989.
- Cheng, K., Pan, G., Smith, P., Luo, T., Li, L., Zheng, J., Zhang, X., Han, X., Yan, M., 2011. Carbon footprint of China's crop production-An estimation using agro-statistics data over 1993-2007. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 142, 231-237.
- C. Liu, K. Wang, and X. Zheng. 2012. Responses of N₂O and CH₄ fluxes to fertilizer nitrogen addition rates in an irrigated wheat-maize cropping system in Northern China. *Biogeosciences* 9: 839–850.
- Conrad, R. 1996. Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO). *Microbiol. Rev.* 60 (4), 609-640.
- Conrad, R. 2002. Microbial and biogeochemical background of production and consumption of NO and N₂O in soil. In: Gasche, R., Papen, H., Rennenberg, H., (Ed.) Trace Gas Exchange in Forest Ecosystem. New York: Springer.
- Coyne, M.S. 2008. Biological denitrification. In: Schepers, J.S., Raun, W.R., (Ed.) Nitrogen in agricultural soils. Agronomy Monograph No. 49. WI: ASA-CSSA-SSSA,
- De Klein, C., Novoa, R.S.A., Ogle, S., Smith, K.A., Rochette, P., Wirth, T.C., McConkey, B.G., Mosier, A., Rypdal, K., Walsh, M., Williams, S.A., 2006. N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application (Chapter 11). In: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- De Klein, C.A.M., Barton, L., Sherlock, R.R., Li, Z., Littlejohn, R.P. 2003. Estimating a nitrous oxide emission factor for animal urine from some New Zealand pastoral soils. *Aust. J. Soil Res*, 41 (3), 381–399.
- Denman, K.L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P.M., Dickinson, R.E., et al. 2007. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

- Diana., S., Carlos., E., Pellegrino., C. 2013. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. *Pesq. Agropec. Trop.*, Goiânia 43 (3): 322-338.
- Ding, H., Cai, G.X., Wang, Y.S., Chen, D.L. 2002. Nitrification denitrification loss and N₂O emission from urea applied to crop-soil systems in North China Plain. *Agricultural Sciences in China*, 1 (2), 184-188.
- Ding, W.X., Cai, Y., Cai, Z.C., Yagi, K., Zheng, X.H. 2007. Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China Plain. *Science of the Total Environment*, 373, 501-511.
- Ding, W., Luo, L., Li, J., Yu, H., Fan, J., Liu, D. 2013. Effect of long-term compost and inorganic fertilizer application on background N₂O and fertilizer-induced N₂O emissions from an intensively cultivated soil. *Sci. Total Environ*, 465, 115-124.
- Dobbie, K.E., McTaggart, I.P., Smith, K.A. 1999. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors. *Journal of Geophysical Research*, 104 (21), 26891-26899.
- Dong, Y., Scharffe, D., Qi, Y.C., Peng, G.B. 2001. Nitrous oxide emissions from cultivated soils in the North China Plain. *Tellus*, 53 (1), 1-9.
- Dong, Y.H., Ouyang, Z., Li, Y.S., Zhang, L. 2005. Influence of fertilization and environmental factor on CO₂ and N₂O fluxes from agricultural soil. *Journal of Agro-Environmental Science*, 24 (5), 913-918.
- Duxbury, J.M., McConnaughey, P.K. 1986. Effect of fertilizer source on denitrification and nitrous oxide emissions in a maize field. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 (3), 644-648.
- Feng, C., Guangxuan, Y., Zaixing, Z., Xunhua, Z., Jia, D. 2012. Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from a wheat-maize cropping system on a silt loam calcareous soil in the North China Plain. *Soil Biology & Biochemistry*, 48, 10-19.
- Fenn, L.B. and D.E. Kissel., 1978. Ammonia Volatilization from Surface Application of Ammonium Compounds in Calcareous Soil: General Theory. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37: 855-859.
- Firestone, M., Davidson, E. 1989. *Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soil*. In: Andreae, M., Schimel (Ed.), *Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*. John Wiley.
- Flechard, C.R., Ambus, P., Skiba, U., Rees, R.M., Hensen, A., van Amstel, A., Dasselaar, A.v.d.P.-v., Soussana, J.F., Jones, M., Clifton-Brown, J., Raschi, A., Horvath, L., Neftel, A., Jocher, M., Ammann, C., Leifeld, J., Fuhrer, J., Calanca, P., Thalman, E., Pilegaard, K., Di Marco, C., Campbell, C., Nemitz, E., Hargreaves, K.J., Levy, P.E., Ball, B.C., Jones, S.K., van de Bulk, W.C.M., Groot,

- T., Blom, M., Domingues, R., Kasper, G., Allard, V., Ceschia, E., Cellier, P., Laville, P., Henault, C., Bizouard, F., Abdalla, M., Williams, M., Baronti, S., Berretti, F., Grosz, B., 2007. Effects of climate and management intensity on nitrous oxide emissions in grassland systems across Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 121 (1e2), 135e152.
- Forster, P. 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: SOLOMON, S. et al. (Eds.). *Climate change 2007: the physical science basis*. Cambridge: Cambridge University. 129-234.
- Galloways, J.N., Aber, J.D., Erismann, J.W., Seitzinger, S., Howarth, R.W., Cowling, E.B. et al. 2003. The nitrogen cascade. *BioScience*, 53, 341-356.
- Gasche, R., Papen, H. 1999. A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany. 2. NO and NO₂ fluxes. *J. Geophys. Res.-Atmos*, 104 (15), 18505-18520.
- Gilmour, J.T. 1984. The effect of soil properties on nitrification and nitrification inhibition. *Soil Science Society of America Journal* 48: 1262-1266.
- Hickman, J. E., M. Havlikova, C. Kroeze and C. A. Palm. 2011. Current and future nitrous oxide emissions from African agriculture. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 3: 370-373.
- Huang, J.X., Chen, Y.Q., Sui, P., Nei, S.W., Goa, W.S. 2014. Soil nitrous oxide emissions under maize-legume intercropping system in the North China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 13 (6), 1363-1374.
- IPCC. 1996. *Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Hayama, Japan: IGES.
- IPCC. 1997. *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. 2006. N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (eds.), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan: Published: IGES.
- IPCC. 2006. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES, Hayama, Japan Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.
- IPCC, 2006b. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES, Hayama, Japan Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.
- IPCC. 2007a. *Climate Change 2007: The physical science basis*. Contribution of

- working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Ed.). NY, USA: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
- IPCC, 2007b. In Core Writing Team, Pachauri, R.K., Reisinger, A. (Eds.), Climate Change 2007: Synthesis Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. 2014. Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., M., Rusticucci, L.V., Alexander, S., Brönnimann, Y., Charabi, F.J., Dentener, E.J., Dlugokencky, D.R., Easterling, A., Kaplan, B.J., Soden, P.W., Thorne, M., Wild, P.M., Zhai, 2013: Observations: Atmosphere and surface. In: Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M., Tignor, S.K., Allen, J., Boschung, A., Nauels, Y., Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Ed.)]. NY, USA: Cambridge University Press Cambridge, United Kingdom and New York.
- Jha, P. B., J. S. Singh and A. K. Kashyap. 1996. Dynamics of viable nitrifier community and nutrient availability in dry tropical forest habitat as affected by cultivation and soil texture. *Plant and Soil* 180: 277-285.
- Kroeze, C., Mosier, A., Bouwman, L. 1999. Closing the global N₂O budget: a retrospective analysis 1500–1994. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, 1-8.
- Le, T. H. 2007. Historical overview of climate change. In: SOLOMON, S.; QIN, D. et al. (Eds.). Climate change 2007: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University. 93-127.
- LI, H., QIU, J.J., WANG, L.G., XU, M.Y., LIU, Z.Q. and WANG, W. 2012. Estimates of N₂O Emissions and Mitigation Potential from a Spring Maize Field Based on DNDC Model. *Journal of Integrative Agriculture* 11 (12): 2067-2078.
- Linn, D.M., Doran, J.W. 1984. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and no-tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am.J*, 48 (6), 1267-1272.
- Li, Z.Q., Zhao, B., Zhang, J. 2016. Effects of Maize Residue Quality and Soil Water Content on Soil Labile Organic Carbon Fractions and Microbial Properties. *Soil Science Society of China*, 26 (6), 829-838.

- Liyanage, L.R.M.C., Jayakody, A. N., and Gunaratne, G, P., 2014. Ammonia volatilization from Frequently Applied Fertilizers for the Low-Country Tea Growing Soils of Sri Lanka. *Tropical Agriculture Research*, 26 (1), 48-61.
- Lokupitiya, E., Paustian, K. 2006. Agricultural soil greenhouse gas emissions: A review of National Inventory Methods. *J. Environ. Qual*, 35 (4), 1413-1427.
- Mackenzie, A.F., Fan, M.X., Cadrin, F. 1997. Nitrous oxide emission as affected by tillage, corn-soybean-alfalfa rotations and nitrogen fertilization. *Canadian Journal of Soil Science*, 77(2), 145-152.
- Manewan N., 2010. Agriculture sector develop maize...How to cultivate with high yield. *Journal of Land Development*. 47(415): 48 (In Thai).
- Meng, L., Ding, W. X., Cai, Z. C. 2005. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N₂O emissions soil quality and crop production in a sandy loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 2037-2045.
- Morrill. L. G., and J. E. Dawson. 1967. Patterns observed for the oxidation of ammonium to nitrate by soil organisms. *Soil Science Society of America Proceedings* 31: 757-760.
- Mortvedt J.J., L.S. Murphy and R.H. Follett. 1999. *Fertilizer Technology and Application*. Meister Publishing Company, Ohio, USA.
- Mosier, A., Kroeze, C., Nevison, C., Oenema, O., Seitzinger, S., van Cleemput, O. (1998). Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, 225-248.
- Mosier, A.R., Duxbury, J.M., Freney, J.R., Heinemeyer, O., Minami, K. (1996). Nitrous oxide emissions from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation. *Plant Soil*, 181 (1), 95-108.
- Mulvaney, R.L. 1996. Nitrogen-inorganic forms. In Bigham, J.M. ed. *Methods of soil analysis part 3: chemical methods*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI. pp. 1123-1184.
- Mulvaney, R.L., Khan, S.A., Mulvaney, C.S. 1997. Nitrogen fertilizers promote denitrification. *Biol. Fert. Soils*, 24 (2), 211-220.
- Novoa, R.S.A., Tejeda, H.R., 2006. Evaluation of the N₂O emissions from N in plant residues as affected by environmental and management factors. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 75 (1), 29e46.
- Office of Agricultural Economics. 2016. *Agricultural Statistics of Thailand 2015*. Bangkok, Thailand: Office of Agricultural Economics.
- Office of Natural Resources and Environmenttal Policy and Planning. 2010. *Greenhouse gas inventories of Thailand*. Bangkok, Thailand: King Mongkut's Institute of Technology.

- Orachos Napasintuwong. 2015. *Maize seed industry in Thailand: Development, current situation, and prospects*. Bangkok, Thailand: Department of Agricultural and resource Economics, Faculty of Economics, Kasetsart University,
- Prasad, R. and J.F. Power. 1997. *Soil fertility management for sustainable agriculture*. CRC/Lewis Publishers, Boca Raton (USA).
- Peech, M. 1965. Soil pH by glass electrode pH meter. *Methods of Soil Analysis. Amer. Soc. Agro. No.9. Part* , 60, 914-925.
- Peng, S., Yang, S., Xu, J., Gao, H. 2011. Field experiments on greenhouse gas emissions and nitrogen and phosphorus losses from rice paddy with efficient irrigation and drainage management. *Science China Technological Sciences*, 54, 1581-1587.
- Promega. 2009. Griess reagent system. Edition 4. USA: Promega Corporation.
- Schjonning, P., Thomsen, I.K., Moldrup, P., Christensen, B.T. 2003. Linking soil microbial activity to water-phase and air-phase contents and diffusivities. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 67 (1), 156-165.
- Schindlbacher, A., Zechmeister-Boltenstern, S., Butterbach-Bahl, K. 2004. Effects of soil moisture and temperature on NO, NO₂, and N₂O emissions from European forest soils. *J. Geophys. Res*, 109, 17302.
- Schmidt, E. L. and L. W. Belser. 1994. Autotrophic nitrifying bacteria, pp. 159-177. In R. W. weaver, S. Angle, P. Bottomley, D. Bezdiček, S. Smith, A Tabatabaia and A. Stehfest, E. and L., Bouwman, 2006. N₂O and NO emission from agriculture fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74, 207-228.
- Sehy, U., Ruser, R., Munch, J.C. 2003. Nitrous oxide fluxes from maize fields: relationship to yield, site-specific fertilization, and soil conditions. *Agric. Ecosyst. Environ*, 99, 97-111.
- Shcherbak, L., Millar. N., Robertson. G.P. 2014. Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen. *P Natl Acad Sci*, 111, 9199-9204.
- Shi, W., Norton, J.M. 2000. Effect of long-term, biennial, fall-applied anhydrous ammonia and nitrapyrin on soil nitrification. *Soil Sci. Soc. Am. J*, 64 (1), 228-234.
- Signor, D., Cerri, C.E.P. 2013. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. *Agropec. Trop*, 43 (3), 322-338.
- Skiba, U., Smith, K.A. 1993. Nitrification and denitrification as sources of nitric oxide and nitrous oxide in a sandy loam soil. *Soil Biol. Biochem*, 25 (11),

1527–1536.

- Skiba, U., Smith, K.A. 2000. The control of nitrous oxide emissions from agricultural and natural soils. *Chemosphere*, 2 (3–4), 379-386.
- Smith, K.A. 1980. A model of the extent of anaerobic zones in aggregated soils and its potential application to estimates of denitrification. *J. Soil Sci*, 31 (2), 263-277.
- Smith, K.A., Ball, T., Conen, F., Dobbie, K.E., Massheder, J., Rey, A. 2003. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *Eur. J. Soil Sci*, 54, 779-791.
- Smith, K.A., McTaggart, I.P., Tsuruta, H. 1997. Emissions of N₂O and NO associated with nitrogen fertilization in intensive agriculture, and the potential for mitigation. *Soil Use Manage*, 13(4), 296-304.
- Smith, K.A., McTaggart, I.P., Dobbie, K.E., Conen, F. 1998. Emissions of N₂O from Scottish soils, as a function of fertilizer N. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, 123-130.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P. et al. (2007). *Agriculture*. In: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. (Eds.), *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. NY, USA: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
- Somchai Lim-aroon, Sodsai Changsaluk, Samran Sichomporn, Kosol Kirdpoksub, Prapon Boonramphun, and Somchai Potisan. 2004. On-farm research on corn and sorghum. Kasetsart University.
- Sun, Y.L., Lu, P.L., Li, J., Yu, Q., Sun, S.B., Wang, J.S. 2008. Characteristics of soil N₂O flux in a winter wheat-summer maize rotation system in North China Plain and analysis of influencing factors. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 29 (1), 1-5.
- Tate, R.L. 2000. *Soil Microbiology*. 2. John Wiley & Sons, New York.
- Tiedje, J.M. 1988. *Ecology of denitrification and the dissimilatory nitrate reduction to ammonium*. In: Zehnder, J.B. (Ed.) *Biology of anaerobic microorganisms*. New York: Wiley.
- Ussiri, D.A.N., Lal, R. 2013. *Soil emissions of nitrous oxide and its mitigation*. NY, USA: Springer Dordrecht Heidelberg.
- Wang, S.B., Song, W.Z., Su, W.H., Zeng, J.H., Wang, Z.P., Zhang, Y.M. 1994. Release of N₂O from N-fertilized corn fields. *Rural Eco-Environment*, 10(4), 12–14.
- Wang, X.B., Liang, G.Q., Zhou, W., Sun, J.W., Pei, X.X., Xia, W.J. 2009. Effect of optimized nitrogen application on denitrification loss and N₂O emission

- from soil in winter wheat/summer corn rotation system in North China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 15, 48-54.
- Wollun, eds. Methods of Soil Analysis, Part 2 Microbiology and Biochemical Properties. SSSA Book series. 5. Madison, WI.
- Xiao-Kang Hu, Fang Su, Xiao-Tang Ju, Bing Gao, Oene Oenema, Peter Christie, Bin-Xiang Huang, Rong-Feng Jiang, Fu-Suo Zhang. 2013. Greenhouse gas emissions from a wheat-maize double cropping system with different nitrogen fertilization regimes. *Environmental Pollution* 176: 198-207.
- Yang, L., Wang, L.G., Li, H., Qiu, J.J., Liu, H.Y. 2014. Impacts of Fertilization Alternatives and Crop Straw Incorporation on N₂O Emissions from a Spring Maize Field in Northeastern China. *Journal of Integrative Agriculture*, 13 (4), 881-892.
- Yoshinari, T. 1993. Nitrogen oxide flux in tropical soils. *TREE*, 8, 155-156.
- Yuttitham, M., S.H. Gheewala and Chidthaisong., A. 2011. Carbon footprint of sugar produced from sugarcane in eastern Thailand, *Journal of Cleaner Production*, 19, 2119-2127.
- Zhang, Y.Y., Liu, J.F., Mu, Y.J., Zhu, X., Pei, S.W., Lun, X.X., et al. 2012. Nitrous oxide emissions from a maize field during two consecutive growing seasons in the North China Plain. *Journal of Environmental Sciences*, 24, 160-168.
- Zou, G.Y., Zhang, F.S., Chen, X.P., Li, X.H. 2001. Nitrification denitrification and N₂O emission from arable soil. *Soil and Environmental Sciences*, 10 (4), 273-276.

**N₂O fluxes and direct N₂O emission factors from agricultural soils
in Maize cultivation, Thailand**

Monthira Yuttitham ^{a,*}, Amnat Chidthaisong ^b, Ukrit Ruangchu ^a

^a Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Nakhon Phathom
73170, Thailand

^b The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's University of
Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand

*** Corresponding author:**

Monthira Yuttitham

Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Nakhon Phathom
73170, Thailand.

Tel.: +66 24415000 ext. 2201; fax +66 24419509–10.

E-mail address: monthira.yut@mahidol.ac.th (M. Yuttitham).

Research highlights

- This is the first report for N₂O emission and direct emission factor in maize cultivation in Thailand, it is a national emission factor.
- Maize production in Thailand is the 2nd important economic crop, but its maize production system is not well documented in term of N₂O emission and emission factor from N fertilizer application.
- Emission factor of maize is about T2 (EF = 0.81%) and T3 (EF = 0.94%) treatments was lower than the IPCC default EF value.
- T2 treatments can be recommended to farmers to use these N rate, it appropriated for farmers in term of N₂O emission, emission factor, yield and economic cost.

Abstract

The application of nitrogen (N) fertilizers to agricultural soils constitutes a primary source of nitrous oxide (N₂O) emissions to the atmosphere. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) established default emission factors (EF) at Tier 1 of 1.0% for fertilizers applied to agricultural soils. Amongst various environmental factors of releasing

N₂O emissions, application rates of synthetic N fertilizers are considered to be the main factor causing diverse EF values from maize production. The effect of the application of synthetic N fertilizers on N₂O emissions in silt loam soils under a tropical savanna climate was investigated using the static chamber method to evaluate their N₂O direct emission factors. Daily N₂O fluxes from three treatments: control (T1), 97 (T2) and 155 (T3) kg N ha⁻¹ were studied, with field experiments under maize (*Zea mays* L. var. Suwan 4452) cropping system in Nakhon Ratchasima Province, Thailand during the 3 crops in rainy season and dry season. Results indicated that the average N₂O fluxes in T1, T2 and T3 treatments during the 1st crop were 0.33, 0.65 and 0.88 mg N₂O m⁻² day⁻¹, in the 2nd crop these were 0.83, 1.11 and 1.29 mg N₂O m⁻² day⁻¹, whereas in the 3rd crop were 0.46, 0.68 and 0.78 mg N₂O m⁻² day⁻¹, respectively. The highest N₂O fluxes were observed in the T3 treatment and increased sharply after 5–7 days of N fertilization application, with the highest value corresponding to 18–32% of N₂O emissions. The average EF values for T2 (EF = 0.81%) and T3 (EF = 0.94%) treatments was less than the IPCC default EF value. With no different crop yields in the 1st and 3rd crop with rainy season, the T2 treatment had lower N₂O emissions than the T3 treatment and this fertilizer treatment could be applied for the sustainable maize farming. The results highlighted the importance of providing higher Tier 2 emission factors in terms of synthetic N fertilizer types for use in National Inventory. In addition, T2 treatments can be recommended to farmers to use these N rate, it appropriated for farmers in term yield and economic cost.

Keywords: N₂O emission; Emission factor; Nitrogen fertilizer; Maize; Static chamber

1. Introduction

Nitrous oxide (N₂O) is an important greenhouse gas (GHG), with 298 times the global warming potential of carbon dioxide (CO₂) over a 100-year period (Myhre et al, 2013). Nitrous oxide emissions are also a major source of stratospheric ozone depletion and its atmospheric concentrations continue to increase, mostly due to agriculturally related activities (Bouwman, 1990). Since 1750, its atmospheric concentration has increased by 20% and reached 324 nmol mol⁻¹ (IPCC, 2014). Agricultural soils constitute the major anthropogenic sources of N₂O, and the rise of its atmospheric concentration and highly variable in space associated with heterogeneity in soil properties (e.g. soil texture, organic carbon, soil moisture, water-filled pore space and nutrient) and agricultural management (e.g.

crop, tillage, land conversion and intensified use of nitrogen fertilizers) (Ussiri and Lal, 2013; Brown et al., 2001; Velthof and Oenema, 1995). The spatial variability of the agricultural soils variables and crop management results in also spatially variable N₂O emissions and uncertainties in overall estimates (Luo et al., 2013).

Most of N₂O emissions from agricultural soils are the result of nitrification and denitrification of synthetic nitrogen (N) fertilizers application. Nitrification is the oxidation of ammonium to nitrite and nitrate, and is performed by auto- and heterotrophic bacteria under aerobic conditions (Butterbach-Bahl et al., 2013). N₂O is a byproduct of nitrification. In contrast, denitrification is the reduction of nitrate to nitrite, NO, N₂O and finally N₂. It is performed by heterotrophic bacteria and fungi under anaerobic conditions (Robertson and Groffman, 2007). N₂O emissions production is driven by oxygenation conditions in soil pores, which can be approximated by the commonly used water-filled pore space (WFPS) (Robertson and Groffman, 2007). Soil nitrogen, organic matter and organic carbon contents are also important drivers as they are substrate of nitrification and denitrification, and carbon source of heterotrophic microorganisms (Wang and Dalal, 2015). Soil pH, temperature and soil texture also play a substantial role in N₂O emissions, by influencing microbial activity and the behavior of water in the soil matrix (Rees et al., 2013; Stehfest and Bouwman, 2006). N₂O emissions by agricultural soils show high spatial variability (Molodovskaya et al., 2012) and are characterized by low continuous background fluxes and intense sporadic emission peaks due to the intensification of microbial activity (Butterbach-Bahl et al., 2013).

National inventories employ emission factors (EFs) to determine N₂O emissions. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines (IPCC, 2006) treat direct emission (from soil microbial) and indirect emission (from volatilization, leaching and runoff). The default Tier 1 IPCC methodology (IPCC, 2006) for direct soil N₂O emission is a single EF based method for all types of arable drained agriculture, stating that N₂O emissions are 1% (0.3–3.0% uncertainty) of N applied to soil. This is based on a large and variable dataset, which makes it difficult to obtain accurate estimates (Bouwman et al., 2001; Lesschen et al., 2011). If more specific EFs are produced, the national inventory can use these disaggregated factors in a Tier 2 assessment of emissions (IPCC, 2006); these EFs can be developed for the major crop types by climate zone using country-specific activity data. These specific EFs yield a more accurate emission estimate for a specific region compared with the default IPCC value. This study is concerned with N₂O direct emission associated with maize cultivation applied synthetic N fertilizers.

Maize is a crop that are major source of food production and vital to the economic development in many countries. Approximately 221.95 million ha are cultivated for global maize production (FAOSTAT, 2014). In general, the maize production zone in temperate regions, sub-tropical and tropical climate. In Thailand, there were approximately 1.13 million ha of maize cultivated and more than 4.8 million tons of maize production in 2014 (FAOSTAT, 2014). The maize production areas are mainly distributed in the Northern, Central and Northeastern of Thailand. The maize cultivation areas are likely to rise due to the market demand, price of agricultural products and the animal feed industry. However, maize uses amounts of synthetic N fertilizer for growth but the low efficiency use of N mineral in agricultural soils. Maize cultivation in croplands, an extremely intensive cropping system, is exposed to excessive synthetic N fertilizer. High rates of N fertilizer applied accelerate N₂O emissions from agricultural soil by direct emissions (Zhang et al., 2012). Seasonal variation in maize production likely lead to significant temporal variation in N₂O fluxes in tropical savanna climate zone in Thailand.

Very few studies have been conducted in tropical savanna areas on the impact of a synthetic N fertilizer application in maize crop, in terms of N₂O emissions and direct N₂O emission factor. Moreover, there is no evidence that such a study more specific direct N₂O emission factors in Tier 2 assessment of N₂O emission from maize crop in tropical savanna have been conducted in Thailand. These EFs can be developed for the major crop types by climate zone using country specific activity data.

The purpose of this research is a measurement of the N₂O emissions and evaluate direct N₂O emission factor from agricultural soils in maize cultivation under tropical savanna climate in Thailand. The results from a study that brings to information for the on-going debate on N₂O emission and specific direct N₂O emission factors from maize crop in a tropical savanna in Thailand. This study introduced maize cultivation practices to low N₂O emission and applied farmers' conventional N fertilization application for the sustainable maize farming.

2. Materials and methods

2.1. Site description

The field experiments were conducted in 2014 and 2015 at the National Corn and Sorghum Research Center and the Suwan Wajokkasikit Field Crops Research Station (14° 38'

N, 101° 19' E) in Pak Chong District, Nakhon Ratchasima Province, Thailand. The soil at this site was classified using the Pak Chong (Pc) soil series described as follows: a dark reddish brown, (5YR3/3) silt loam with very fine soil texture and well drained but low ability to absorb water and a high amount of iron (Fe) oxide nodules (classification by Land Development Department). Other soil characteristics are as follows: 25.0% sand, 55.0% silt and 20.0% clay, with an initial pH 6.12 (1:1 water), 1.09 g cm⁻³ bulk density and 3.84% organic matter (Table 1) (Soil Analysis by Department of Silviculture, Faculty of Forestry, Kasetsart University).

The local climate during the experimental periods was observed from the National Corn and Sorghum Research Center, Pak Chong Agrometeorological Station, which was located 800 m from the experimental site. The studied area is characterized by a typical tropical savanna. Daily air temperatures and rainfall are shown in Fig.1. The means for daily air temperature in 2014 and 2015 were 26.0 °C and 26.3 °C, respectively. The means for daily maximum and minimum air temperatures were 31.6 °C and 21.7 °C in 2014, and 31.9 °C and 22.0 °C in 2015, respectively. The annual rainfall accumulation amounts were 775.6 mm in 2014 and 991.9 mm in 2015.

2.2. Field Experimental designs

The experiment was conducted in a field with a randomized complete block design (RCBD). The site containing twelve rectangular plots, each with a size of 6m × 10m. In all plots, maize was grown all 3 crops on July to November, 2014 represent rainy season in 1st crop, February to June, 2015 represent dry season in 2nd crop, and August to November, 2015 represent rainy season in 3rd crop. The treatment with four replications conducted of the following three treatments namely: (1) T1: control and no N fertilization, but with the similar irrigation method as the other treatments; (2) T2: traditional N fertilization, fertilized by rate 97 kg N ha⁻¹; and (3) T3: excess N fertilization, fertilized by rate 155 kg N ha⁻¹. Two fertilization events were conducted with N–P–K (N:P₂O₅:K₂O) fertilizer formula 16:20:0 after planted maize seeding and urea is 46:0:0 about 30–40 days after planting maize seeding cultivated as the basal fertilizer and topdressing. The maize crop cultivar used in this study was Suwan 4452 (*Zea mays* L.). The crop management practices are shown in Table 2. Maize was planted by direct seeding at a spacing of 75cm × 20cm by maize density of 66,670 seedling ha⁻¹. Maize was watered by sprinkler irrigation and pesticide application after maize cultivated.

2.3. N₂O emission measurement

N₂O emission was measured by using static chamber method. Each gas sampling chamber consisted of an acrylic cover resting on a stainless steel base measuring 30cm × 30cm square open at the bottom, with sides 5 cm above the ground and 10cm below the ground. The acrylic cover rested in a groove around the top of a square base filled with water as a gas seal. The acrylic cover was black to prevent photosynthesis in plants during the gas sampling and covered with white polystyrene foam sheeting for thermal insulation.

Gas samples were taken from the chambers' headspace once a week with a 20 mL gas-tight syringe and immediately transferred to pre-evacuated vials 20 mL glass vials. From the beginning of cropping to the end of harvest, gas samples were collected every other day for 5 days after the N fertilizer period. Samples were collected from 09:00 AM to 11:00 AM (local time) at time intervals of 0, 10, 20 and 30 min after chamber closure. Air temperature, soil temperature at 5cm below the soil surface was monitored in each chamber simultaneously while gas samples were collected. The gas concentrations were analyzed by a gas chromatograph (Agilent model 6890, Agilent Technologies, USA) equipped with an electron capture detector and Porapak column for measuring N₂O. Concentrations of N₂O from maize fields were calculated to determine gas emission fluxes by the following Eq. (1). (Ussiri et al., 2009).

$$F = \left(\frac{\Delta g}{\Delta t} \right) \left(\rho \frac{V}{A} \right) \left(\frac{273}{T+273} \right) k \quad (1)$$

Where $\Delta g/\Delta t$ is the average rate of change in gas concentration inside the chamber ($\text{mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$), ρ is the gas density, V is the volume of the chamber (m^3), A is the surface area circumscribed by the chamber (m^2), T is the temperature in the chamber ($^{\circ}\text{C}$) and k is the time conversion factor.

The net emission fluxes of N₂O were calculated using a liner fit to the gas concentration change inside the chamber over the sampling time (Nishimura et al., 2008). Linearity tests on gas concentration increases was performed on a subset of sampling occasions during the study for all treatments by taking samples after the closure of chambers, every 10 min for 30 min.

A seasonal cumulative emission of N₂O was computed according to the Eq. (2). (Xiang et al., 2015). Sample sets were rejected unless their yielded a linear regression value of R² greater than 0.9 for N₂O gas (Tang et al., 2006).

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \quad (2)$$

Where E is gas emissions (kg N₂O ha⁻¹), F_i and F_{i+1} are the gas efflux at the i th and $(i+1)$ th measurement time respectively, $t_{i+1} - t_i$ is the interval between the i th and $(i+1)$ th measurement time (d), and n is the total measurement time.

The direct N₂O emission factors were then calculated by dividing the treatment-induced emission by the amount of N fertilizers applied for each treatment (de Klein et al., 2014). The emission factor (EF) were calculated as the following Eq. (3):

$$EF = \frac{N_2O}{N \text{ input}} \times 100 \quad (3)$$

Where EF is the percentage of direct emissions factor from N₂O emissions, N_2O is N₂O cumulative (kg N₂O–N ha⁻¹), and $N \text{ input}$ is total amount of N fertilizer application (kg N ha⁻¹).

To understand the greenhouse effects of N₂O from maize field under different rate of N fertilization, N₂O emission was converted to global warming potential (GWP). On a 100-year time horizon, the GWP for N₂O is 298 (Nishimura et al., 2011). GWP of N₂O emission was calculated using the following Eq. (4):

$$GWP = \text{Cumulative } N_2O \text{ emission} \times 298 \quad (4)$$

2.3. Soil sample collection and soil characterization

The composite soil samples use the grid soil sampling method. Soil samples were collected once a month. The samples of surface (0–15 cm) soils, about 1 kg from each horizon (0–15 cm), were air dried, gently pulverized, and sieved to a particle size < 2000 μm by a stainless steel sieve before analysis. Soil pH was measured in water (soil: water, 1:1) (Peech, 1965). Organic carbon (OC) and organic matter (OM) were determined by a wet oxidation procedure (Walkley and Black, 1934). Total nitrogen (TN) was determined using a

Kjeldhal's distillation method (Bremner, 1965). Soil NO_3^- -N and NH_4^+ -N were extracted with a 2 M potassium chloride (KCl) solution and then filtered through a 0.45 mm filter. The extracted solutions were measured via colorimetric techniques at 645 nm and 420 nm to determine NO_3^- -N and NH_4^+ -N concentrations, respectively (Li et al., 2014).

Soil water content and soil bulk density were collected every week, which was measured from top soil (0–15 cm) of each plot by a core method using stainless steel cylinders with a 5cm internal diameter and 5 cm height. The soil cores were dried in an oven at 105 °C for 48 h.

The water-filled pore space (WFPS) was calculated using Eq. (5): assuming a particle density of 2.65 g cm⁻³ (Linn and Doran, 1984).

$$WFPS = \frac{\text{Soil water content (\%)}}{1 - \frac{\text{Soil bulk density}}{2.65}} \times 100\% \quad (5)$$

2.4. Biomass properties and crop yield

Biomass was collected at harvest time. In order to estimate the dry weight of the aboveground biomass of the crop harvest, 1m×1m areas in each plot were marked out and the crop yields collected at harvest time. The complete plants were dried in an oven at 80 °C for 48 h to determine dry weight. Harvested maize was used to calculate the crop yields. Maize growth is measurement of stem height (m) from bottom to top of main branches every week.

2.5. Economic of N fertilizer use

The value cost ratio (VCR) is the ratio between the values of increased yield obtained by fertilizer used per cost of fertilizer (Pervaiz et al., 2004) was calculated by using Eq. (6). The VCR was more than value as 2 showing satisfactory risk coverage against investment in fertilizer used.

$$VCR_t = \frac{(Y_t - Y_c) \times PG_t}{CF_t} \quad (6)$$

Where VCR_t is the value cost ratio for treatment t, $Y_t - Y_c$ is the incremental yield resulting from fertilizer use in treatment t and control c, PG_t is the yield price (Baht kg⁻¹) and CF_t is the cost of fertilizer per hectare (Baht ha⁻¹) in the treatment, t.

2.6. Statistical analysis

A statistical analysis was performed utilizing IBM SPSS Statistics 20 for Windows. One-way analysis of variance (ANOVA) calculations and Duncan's Multiple-Range Test (DMRT) ($P < 0.05$) were conducted in order to categorize the effects of different N fertilizer rate treatments on N_2O emission, soil properties, biomass and crop yield. Stepwise multiple linear regression analysis was carried out to test relationship between N_2O emission and environmental factors.

3. Results

3.1. Tropical savanna climatic characteristics and soil properties

Over the entire observation period of 3 crops (1st crop: July 2014–November 2014, 2nd crop: February 2015–June 2015 and 3rd crop: August 2015–November 2015), the soil temperatures (5 cm) ranged from 20.0 to 31.6 °C (mean: 26.7 °C). The annual precipitation amounted to 775.6 and 991.9 mm in 2014 and 2015, respectively. The maize crops with most rainfall occurring during the rainy season in 2014 and dry season in 2015. Periods with high soil moisture ($> 45\%$ WFPS) were observed following heavy rainfall or irrigation. The WFPS of soil particle had the same tendency of soil water content, depending on the amount of rainfall and irrigation in top soil. The mean WFPS in the 1st crop was 36.11% (range between 4.80–69.45%) which higher than the 2nd crop was 32.18% (range between 5.50–78.80%) but lower than the 3rd crop was 37.44% (range between 6.00–60.00%). The %WFPS was not significantly different between treatments ($P < 0.05$).

Data for soil physical and chemical properties after the seasonal maize crop in the different treatments are presented in Table 3. Soil pH, OM, SOC and TN contents are presented in Fig. 2a–c. Respectively for the T1, T2 and T3 treatments over the entire measurement period, the mean soil pH value was within slightly acid and neutral range (pH ~ 6.0–7.0). The mean OM and SOC was low (0.5–1.0%) and moderately low (1.0–1.5%). Total nitrogen in soil was very low ($< 1.0\%$). For each sampling month, the three variables was not differed significantly between treatments ($P < 0.05$), expected for treatment 3 on the 3rd crop.

Fig 3a–c was represented NH_4^+ , NO_3^- and NO_2^- concentrations in soil (0–15cm). The T3 treatment had most NH_4^+ in the soil was 10.42 ± 3.34 , 10.69 ± 2.68 and 13.59 ± 2.87 mg NH_4^+-N kg^{-1} . The NH_4^+ of T1 treatment was controlled to have the least NH_4^+ concentration were 8.57 ± 3.69 , 7.10 ± 3.14 and 3.93 ± 1.03 mg NH_4^+-N kg^{-1} in the 1st–3rd crop, respectively.

The T3 treatment has the most amount of NO_3^- was 39.28 ± 11.17 , 30.45 ± 13.67 and 48.68 ± 12.67 mg NO_3^--N kg^{-1} and T1 has a minimal amount of NO_3^- was 29.38 ± 10.87 , 14.85 ± 7.73 and 34.04 ± 9.80 mg NO_3^--N kg^{-1} , as well as the amount of NO_2^- in the 1st–3rd maize crop, respectively. The NH_4^+ , NO_3^- and NO_2^- concentrations in T2 and T3 had significant higher than T1 ($p \leq 0.05$). For the NH_4^+ , NO_3^- and NO_2^- concentrations, the results showed that T2 and T3 treatments had different treatments T1 which were statistically significant ($P < 0.05$).

3.2. N_2O fluxes

The N_2O fluxes during the maize growing period are illustrated in Fig. 4a–c and Table 4. In general, the nitrification process contributes to N_2O emission during the oxidation of ammonium (NH_4^+) to nitrate (NO_3^-) after the addition of synthetic N fertilizers application to upland soils. For N_2O emissions during the 1st crop, treatment T1 had the lowest average daily N_2O emission, which was significantly different ($P < 0.05$) from other treatments. N_2O emission of treatment T1 was 0.33 ± 0.17 , while treatment T2 and T3 were 0.65 ± 0.35 and 0.88 ± 0.45 mg N_2O $\text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, respectively. Concerning maize production in the 2nd crop, treatment T1 had the lowest average daily N_2O emission, which was significantly different ($P < 0.05$) from other treatments. The treatment T1 was 0.83 ± 0.32 , while treatment T2 and T3 were 1.11 ± 0.53 and 1.29 ± 0.55 mg N_2O $\text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, respectively. However, N_2O emissions in the 3rd crop it similar to the 1st crop. The treatment T1 was 0.46 ± 0.16 , while treatment T2 and T3 were 0.68 ± 0.18 and 0.78 ± 0.21 mg N_2O $\text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, respectively. N_2O fluxes, treatment T1 in all maize crops had the lowest N_2O fluxes, it was significantly different ($P < 0.05$) from other treatments.

N_2O background flux was found in treatment T1 because the biotic mechanisms involved in N_2O production share substrates and driven by common variables in nitrification and denitrification processes (Lognoul et al., 2017). One distinct N_2O flux peak and the difference of emission between treatments were observed in seasonal maize crop, appearing after synthetic N fertilizers application. During this period, N_2O flux increased sharply in the

basal and topdressing fertilizer application over approximately 5–7 days of both of fertilization, which contributed to 18–32% of total N₂O emissions. Basal fertilization alone only slightly stimulated immediate N₂O emissions at the beginning of each crop growth period, with maximum fluxes in treatment T3 amounting to 1.50±0.18, 1.47±0.35 and 0.90±0.31 mg N₂O m⁻².day⁻¹ in 1st–3rd crop, respectively and peak fluxes in treatment T3 of topdressing fertilization amounting to 1.50±0.19, 2.01±0.03 and 0.96±0.04 mg N₂O m⁻².day⁻¹ in 1st–3rd maize crop, respectively.

Flooding irrigation, which was scheduled approximately 2–3 days at a time after fertilization in dry season, led massive pulse emissions of N₂O with maximum fluxes. N₂O emissions following fertilization coupled with frequency irrigation after fertilization or rainfall (18th–21th February and March 7th–12th, 2015) in the 2nd crop resulted in an increase N₂O emission higher than those maize crop events in 1st and 3rd maize crop. Meanwhile, N₂O emissions in the 3rd crop were consistently low and exhibited only very weak emissions during the observation period. Peak N₂O emissions only appeared the following fertilization.

3.3. Cumulative emissions and N₂O Emission factors

The cumulative emission of N₂O from soil is presented in Table 4 and Fig.5. The 1st crop, treatment T1 had the lowest N₂O cumulative emission was 0.35 kg N₂O ha⁻¹, followed by treatment T2 and T3 had 0.65, and 0.80 kg N₂O ha⁻¹, respectively. In the 2nd crop, results shown treatment T1 had the lowest N₂O accumulated emission 0.82 kg N₂O ha⁻¹, followed by treatment T2 and T3 had 1.07, and 1.20 kg N₂O ha⁻¹, respectively. The 3rd crop, treatment T1 had 0.47 kg N₂O ha⁻¹, followed by treatment T2 and T3 had 0.69, and 0.81 kg N₂O ha⁻¹, respectively. The cumulative emission of N₂O from treatment T2 and T3 increased compared with that of T1.

The mean direct emission factors (EFs) from applied synthetic N fertilizer were 0.81 and 0.94% for the treatment T2 and T3. The EFs have ranged from 0.65 to 1.08% and 0.81 to 1.21% for the treatment T2 and T3 in all maize crops. The highest EFs measured was 1.21% for synthetic N fertilizer rate at 155 kg N ha⁻¹ in the 2nd crop which was less than the EF1 IPCC default value of 1.0% of N applied (Linguist et al, 2012).

N₂O emissions use to evaluate GHG emission as well as GWP. N₂O emission has a GWP of 298 over 100–year horizon, equivalent to CO₂. In 2015, Thailand had maize–planting areas throughout the Kingdom and in Nakhon Ratchasima Province of 1,145,000 and 108,371 hectares, respectively. N₂O emission from these maize–planting areas throughout

the Kingdom was 0.24 and 0.28 Tg CO₂ eq. at N fertilizer 97 and 155 kg N ha⁻¹, respectively. GWP from maize planted in the area of Nakhon Ratchasima Province was 0.02 and 0.03 Tg CO₂ eq. at N fertilizer 97 and 155 kg N ha⁻¹, respectively.

3.4. Effects of environmental variables and treatments on N₂O flux

A regression analysis was performed on N₂O fluxes and the other environmental variables measured (Fig.6). N₂O fluxes were significantly correlated with NH₄⁺ concentration in the 1st and 3rd maize crop in rainy season, explaining more than 30% of variability (Table 5) and were highly significantly correlated with NO₃⁻ in the 1st crop but were not significantly only NH₄⁺ in the 2nd crop. N₂O fluxes were significantly correlated only NO₃⁻ and NO₂⁻ in the 2nd crop (0.28 and 0.44%, $P < 0.001$). N₂O fluxes are frequently strongly related to NH₄⁺ and NO₃⁻ concentrations. The observed a strong correlated between NH₄⁺ and NO₃⁻ with N₂O fluxes for the heavy rainfall in rainy season. This result suggests that NH₄⁺ and NO₃⁻ concentrations availability to the N₂O production at the basal and top dressing fertilization period with high rainfall and %WFPS. In the 2nd crop, high levels of NO₃⁻ concentration stimulate to produce N₂O flux due to high soil water content from rainfall and irrigation and high rates of O₂ diffusion into the soil and high NO₂⁻ concentration, explaining 30% of variability and NO₂⁻ rapidly convert to N₂O gas but NH₄⁺ concentration was not availability. It should be noted that the NO₃⁻ concentration reported here were much higher than reported from previous tropical savanna climate zone studied (Kachenchart et al., 2012) which have indicated a positive correlated between the N₂O flux with NH₄⁺ and NO₃⁻.

Table 6 shows results a correlated between tropical savanna climatic characteristics, soil properties and inorganic N with N₂O fluxes especially NH₄⁺ and NO₃⁻ concentration in soil. In rainy season with the 1st and 3rd crop, NH₄⁺ and NO₃⁻ encourage N₂O production react with high WFPS and anaerobic condition when heavy rainfall. In the 2nd crop with the dry season, soil bulk density to compact soil texture when air dried stimulates the N₂O production interaction with NO₃⁻ concentration and high temperature. In the rainy season, inorganic N from fertilization, high rainfall and irrigation has an important factor to induced N₂O fluxes but on the dry season, bulk density, inorganic N and temperature have a major factor to induced N₂O fluxes.

The results from this study indicated that synthetic N fertilizer was a key factor regulating soil mineral N contents and N₂O flux. For example, the soil mineral N contents

and N₂O fluxes under the T3 treatment were significantly higher than those under all other treatments. The highest N₂O flux in this study was recorded following in the 2nd crop in the dry season.

3.5. Effect of treatment on crop yields

The statistical analysis found that mean height of maize for T3 treatment was higher than T1 treatment significantly different ($P<0.01$) (Table 7). It can be said that fertilizer application had affected to maize growth in terms of height. Dry weight of above ground biomass for all treatment in the 1st and 3rd crop were not significantly different ($P<0.01$) but in the 2nd crop were significantly different ($P<0.01$). It was found that the dry weight of corn pods was higher than that of leaves and stems. The mean crop yield (grain) of maize production, treatment T1 had the lowest crop yield (Fig. 7). The statistical analysis found that mean crop yield for T2 and T3 treatment in the rainy season with the 1st and 3rd crop more than the T1 treatment were significantly different ($P<0.01$). Crop yield in the 2nd crop was less productive than the rainy season (1st and 3rd crop) ($P<0.01$). The result shows that synthetic N fertilizer rate and rainfall affect the crop yields.

3.6 Nitrogen balance

The nitrogen balance is the simplest tools for estimating the mass flow of nitrogen in environment systems. Nitrogen balance compares the total nitrogen of a plant-soil system after other possible inputs and outputs of nitrogen compound in the system having been accounted for. The principal assumption of the method is that all nitrogen inputs (fertilizer, manure, wet deposition, etc.) and all nitrogen outputs (leaching, gasses, runoff, volatilization, harvest, etc.) of the system are accounted for. The amount of inorganic nitrogen fertilizer was the main contributors to nitrogen input. The three fertilizer rates with following; 1) no fertilizer (T1), 2) apply fertilizer at 97 kg N ha⁻¹ (T2), and 3) apply fertilizer at 155 kg N ha⁻¹. Losses of nitrogen have the main outputs of this study according to nitrogen from N₂O gas, nitrogen in soils and nitrogen in biomass (Table 8).

The system N balances were -107.01 to 49.35 kg N ha⁻¹, -109.96 to 64.82 kg N ha⁻¹ and -5.94 to 64.82 kg N ha⁻¹ in 1st, 2nd and 3rd crop, respectively. Nitrogen in biomass accounted for the largest proportion of nitrogen loss (70-91 kg N ha⁻¹) followed by nitrogen in soils (18.20-20.40 kg N ha⁻¹) and nitrogen from N₂O emissions (0.11-0.38 kg N ha⁻¹). The

nitrogen balance in T1 was a negative value (-107, -110 and -95.35 kg N ha⁻¹) because the T1 treatment did not applied nitrogen fertilizers input to the system (Table 8).

The nitrogen loss from T2 treatment was higher than the nitrogen entering the system so, the nitrogen balance in the T2 treatment as a negative value (-13.94, -6.07 and -7.55 kg N ha⁻¹ in 1st, 2nd and 3rd crop, respectively). However, the nitrogen balance in T2 was greater than T1, which values were close to zero that indicates a number of nitrogen inputs and outputs in the system had balanced between nitrogen input from fertilizers and nitrogen outputs from plants utilized, nitrogen stocked in soils and nitrogen emission released to the atmosphere. The results suggest that a high proportion of system nitrogen surplus input to agricultural soils systems in T3 treatment as a positive value (49.35, 64.82 and 59.64 kg N ha⁻¹ in 1st, 2nd and 3rd crop, respectively) because the nitrogen fertilizer inputs was a higher than necessary the plants utilized and also high nitrogen fertilizers input that released nitrous oxides more than other treatments.

3.7. Value cost ratio analysis

Analysis of economic benefit to a decision to use rate of fertilizer used the value cost ratio (VCR) analysis was shown in Table 9. VCR was more than 2.0 showing satisfactory risk coverage against investment in fertilizer used. In the 1st and 3rd crop, the T2 treatment used fertilizers rate as 97 kg N ha⁻¹ has a maximum VCR value were 9.70 and 8.93, respectively while in the 2nd crop, the T3 treatment used 155 kg N ha⁻¹ has a maximum VCR value was 2.83. In the 1st and 3rd crop, The T2 treatment has an excellent returns economic value more than the T3 treatment because that used rate of fertilizer less than nearly half of the T3 treatment.

4. Discussion

4.1. Seasonal variation and impact of fertilizer on N₂O emission

The N₂O flux patterns indicated significant temporal fluctuations between rainy and dry seasons. The highest peaks of N₂O emission occurred during the 2nd crop with dry season due to the combination of rainfall, high irrigation occupying the soil properties especially soil bulk density and soil temperature, the application of synthetic N fertilizer to the agricultural soils and the rapid mineralization of N in the crop area. This is exemplified

by the N₂O flux in topdressing fertilization in the 2nd crop on March–April 2015 being approximately 2-fold higher than in the 1st crop on August 2014. The lowest N₂O emissions occurred in the 3rd crop when the minimum rainfall occurred. The topdressing fertilization as urea was immediate dissolution fertilizer, thus the peak of N₂O flux from top dressing fertilization release short term less than the basal fertilization as N–P–K. N₂O flux from the topdressing fertilization release sharply trended emission higher than the basal fertilizer application because the topdressing fertilization used urea (46:0:0), which had 46% higher N element than the 16% of the N fertilizer formula 16:20:0.

The synthetic N fertilizer input is a principal control of N₂O emissions, and generally, an increase of N input increases both nitrification and denitrification rates in upland soil. Fertilizer N, as well as synthetic fertilizers, may lead to higher N₂O emissions directly after fertilizer application. Application of fertilizers generally results in increased emissions of N₂O to the atmosphere (IPCC, 2007). Fertilizers can be a direct N₂O emission. The results from this study indicate that synthetic N fertilization was a key factor regulating soil mineral N contents and N₂O flux. For example, the soil mineral N contents and N₂O fluxes under the T3 treatment were significantly higher than those under all other treatments with synthetic N fertilizer applications.

4.2. Environmental variations on N₂O emission

Soil %WFPS in the 2nd crop was also lower than in the 1st and 3rd crop. This conflict with other research suggests that avoiding anaerobic soil conditions provides the potential to reduce emissions and that greatest flux were observed when soils are at their wettest. These results related well to the study of de Klein et al. (2003), who found highest N₂O flux generated from poorly drained silt loam soil even under rainfall conditions lower than on the other sites. However, a large amount of N₂O emissions also occurred shortly after fertilizer application, even in low %WFPS conditions, following a rainfall event, which is in line with findings of Bell et al. (2015). Krol et al. (2016), who found the high N₂O fluxes, released in summer and low %WFPS. Carter (2007) observed equal amounts of nitrification and denitrification at %WFPS of 45%, confirming that both processes are likely to have produced N₂O emissions in summer. The low level of soil NH₄⁺–N recorded in the 2nd crop experiment after fertilization application suggests that rapid nitrification took place in the soil. This was correlated to the high rates of N₂O emissions recorded at this time, indicating

a rapid loss of N from the soil system. Low levels of soil NO_3^- -N were also recorded in the 2nd crop of this experiment.

The high N_2O emissions recorded in the dry season occurred following a period of heavy rainfall and moderate of %WFPS, but the soil in the 2nd crop was drier than that in the 1st and 3rd crop due to high air temperature and soil temperature when very low fluxes was recorded. These results suggest that nitrification and denitrification processes were the most dominant source of N_2O emissions, indicating that decisions made to N_2O emissions should not be based purely on the avoidance of conditions conducive to denitrification process. In the middle period of the 1st maize crop, it was found that the %WFPS and soil temperature also appeared to play a major role in regulating N_2O production in agreement with Weitz et al. (2001) and Schaufler et al. (2010). Previous studies have also shown that N_2O flux increase exponentially with increasing %WFPS and soil temperature (Schaufler et al., 2010; Schindlbacher et al., 2004). N_2O emissions by nitrification show that in the early rainy season in the 1st and 3rd crop and most of the 2nd crop. This period experiences rainfall stimulating the conversion of organic N to NH_4^+ . The results indicated that denitrification mainly contributed to N_2O emissions in the rainy season, while nitrification was responsible for the major N_2O flux in the dry season experiment period (Kachenchart et al., 2012) the results similar patterns from this experiment. N_2O flux from this study, the results showed that there is value in the same study in China and use synthetic N fertilizer between 100–300 kg N ha⁻¹, which are 0.45–6.44 mg N_2O m⁻² day⁻¹ (Ding et al., 2007; Sun et al., 2008; Wang et al., 2009).

4.3. Direct N_2O emission factor

This result suggested that use of IPCC default EFs would substantially overestimate direct N_2O emission. The highlights of the potential importance of countries moving to a tier 2 methodology use data system specific data to generate more accurate N_2O emission inventories. Martins et al. (2015) found that EFs of 0.13%, which use urea fertilizer applied to no-till maize in an oxisol in Brazil. The reported by other studies on annual EFs in wheat–maize rotation fields in the Northern China, the EFs of N_2O obtained in study is slightly lower than those (0.10–0.48%) presented by Ju et al. (2011) and Meng et al. (2005) and similar EFs values at 0.19–0.20% of urea fertilization at rate 265 kg N ha⁻¹ of maize production in Northeastern China given by Yang et al. (2014).

Other studies also indicated that the emissions for tropical savanna climate soils commonly having free drainage are significantly lower compared to soils with poor drainage and that use of IPCC default EFs over estimates significantly the real emissions. The main reason for these lower EFs obtained in literature and our study is most likely to be the free drainage of most tropical savanna climate soils, which mitigates N₂O emission. Additionally, high evapotranspiration in the region is another possible factor contributing to rapid soil drying and consequently to mitigation of N₂O emission. Therefore, the rare occurrence of denitrification peaks with more frequent N₂O emission derived from nitrification is usual for aerated soils. The rapid drainage of water in aerated soils, even in the rainy season, is due to their stable micro aggregation. This structure is a characteristic of oxisols and is explained by the cementing action of Fe oxides. It has a low water storage capacity and rapid loss of soil moisture. The soil is dry, it can be easily low soil moisture during dry season.

4.4. Economic value and productivity

The VCR test for decision to use rate of fertilizer recommended traditional rate of fertilizer can explain to agriculturists use for maize cultivation because it can be reduced N₂O emissions and great value for fertilizer used. The previous study in Pak Chong sub district, Nakhon Ratchasima Province, Thailand was shown in the rainy season of maize cultivar Suwan 4452 production used urea (46:0:0) fertilizer application by the rate of 57.5 kg N ha⁻¹ average stem height was 189 cm (Lim-aroon et al., 2004). The experimental maize cultivar Suwan 4452 production add synthetic N fertilizers application used 16:16:8 compound fertilizers at the rate of 50 kg N ha⁻¹ and urea at the rate of 28.75 kg N ha⁻¹ found that the average stem height was 222 cm (Sittichoketram, 2009). The results showed that the stem height (185–280 cm) was in the same range as the other studies.

In addition, it was found that the synthetic N fertilizer rate input in the 2nd crop was an important factor for increase crop yield production and maize growth. If, in the dry season has good irrigation management adequately and fertilizers used only 97 kg N ha⁻¹ may be appropriate for maize cropping to achieve food security and have economic value benefit value to a agriculturists decision for planting maize. The study represented the rate of fertilizer affected to a maize growth and crop yield. However, the amount of synthetic N fertilizer rate of 97 kg N ha⁻¹, the result does not different with the excess of synthetic N fertilizer application at a rate of up to 155 kg N ha⁻¹. Therefore, it cloud be recommended to

agriculturists to use an agricultural fertilizers rate at a reasonable rate of 97 kg N ha⁻¹, which is recommended rate by the Department of Agriculture, Thailand and traditional rate of fertilizer and also can reduce direct emissions of N₂O as well as compared with the excess rates of fertilizer application at 155 kg N ha⁻¹.

5. Conclusions

This study was measured N₂O emission and has tried to evaluate direct N₂O emission factor from maize cultivation with different N fertilizer application rate. The results indicate that the synthetic N fertilizer rate, soil properties and seasonal climate have a significant effect to the N₂O fluxes from agricultural soils in the dry season with the 2nd crop are higher than those in the rainy season maize crop with 1st and 3rd crop. The rates of synthetic N fertilizer application affected to N₂O emissions from maize cultivation, and T3 treatment at 155 kg N ha⁻¹ released higher N₂O fluxes when compared with T1 and T2 treatments. Fertilizer T2 treatment at 97 kg N ha⁻¹ could be reduced N₂O emissions compared with the T3 treatment and recorded similar aboveground biomass and crop yields during the rainy season. A direct N₂O EF for synthetic N fertilizer, EF equal to 0.81 and 0.94% at 97 and 155 kg N ha⁻¹, respectively and encourage the use of synthetic N fertilizer categories to account for the N₂O emissions from specific climatic group for maize farming. In addition, it can be concluded that variation of direct N₂O EF in agricultural soils in a tropical savanna climate are influenced mainly by the synthetic N fertilizer, mineral N content, rainfall and a seasonal environment. The data assembled and the approach followed in this study could, therefore, be used the IPCC EF tier 2 for soil N₂O emissions resulting from the synthetic N application to agricultural soil for maize cultivation in Thailand. Finally, the value cost ratio (VCR) analysis was shown the good recommended to farmers to use fertilizer rate at T2 treatments. It is appropriated in term of yield price and emission value.

Based on findings of this study, future researches and other studies are recommended. A study of the estimate the nitrous oxide emissions and the emission factor from maize in the country should study other maize field areas, soil types, types of nitrogen fertilizer and rate of fertilizer use, other maize cultivars and crop management such as tillage or no-till for more specific data on nitrous oxide emissions covers the entire country to make the national greenhouse gas inventories are accurate and completeness. Study on indirect emissions such as nitrogen volatilized and leaching/runoff from agricultural soil in maize for more

comprehensive and specific data for generating higher tier emission factor in terms of fertilizer rate and type for use in national inventories.

Acknowledgements

This research was supported by the Thailand Research Fund and Mahidol University, Thailand (Grant No. TRG5780178). Thanks are also extended to the Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Thailand and the National Corn and Sorghum Research Center and Suwan Wajokkasikit Field Crops Research Station, Kasetsart University, Thailand for access to research sites.

References

- Bell, M.J., Rees, R.M., Cloy, J.M., Topp, C.F.E., Bagnall, A., Chadwick, D.R., 2015. Nitrous oxide emissions from cattle excreta applied to a Scottish grassland: effects of soil and climatic conditions and a nitrification inhibitor. *Sci. Total Environ.* 508, 343–353.
- Bouwman, A.F., 1990. Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere, In: Bouwman, A.F. (Ed.), *Soils and the Greenhouse Effect*. JohnWiley & Sons, Chichester, UK, pp. 61–127.
- Bouwman, A.F., Boumans, L.J.M., Batjes, N.H., 2001. Global estimates of gaseous emissions of NH₃, NO and N₂O from agricultural land, In: *Food and Agriculture Organization Report*, ISBN 92-5-104698-1. International Fertilizer Industry Association and Food and Agriculture. Organization of the United Nations, City Rome.
- Bremner, J.M., 1965. Nitrogen, In: C.A. Blac. (Ed.) *Methods of soil analysis part 2 chemical and microbiological properties*. Wisconsin, Amer. Soc. of Agron. Inc.
- Brown, L., Brown, S.A., Jarvis, S.C., Syed, B., Goulding, K.W.T., Phillips, V.R., Sneath, R.W., Pain, B.F., 2001. An inventory of nitrous oxide emissions from agriculture in the UK using the IPCC methodology: emission estimate, uncertainty and sensitivity analysis. *Atmos. Environ.* 35, 1439–1449.
- Butterbach-Bahl, K., Baggs, E.M., Dannenmann, M., Kiese, R., Zechmeister- Boltenstern, S., 2013. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B Biol. Sci.* 368.

- Carter, M.S., 2007. Contribution of nitrification and denitrification to N₂O emissions from urine patches. *Soil Biol. Biochem.* 39, 2091–2102.
- Krol, D.J., Carolan, R., Minet, E., McGeough, K.L., Watson, C.J., Forrester, P.J., Lanigan, G.J., Richards, K.G., 2016. Improving and disaggregating N₂O emission factors for ruminant excreta on temperate pasture soils. *Science of the Total Environment*. 568, 327–338.
- de Klein, C.A.M., Barton, L., Sherlock, R.R., Li, Z., Littlejohn, R.P., 2003. Estimating a nitrous oxide emission factor for animal urine from some New Zealand pastoral soils. *Aust. J. Soil Res.* 41 (3), 381–399.
- de Klein, C.A.M., Luo, J., Woodward, K.B., Styles, T., Wise, B., Lindsey, S., Cox, N., 2014. The effect of nitrogen concentration in synthetic cattle urine on nitrous oxide emissions. *Agric. Ecosyst. Environ.* 188, 85–92.
- Ding, W.X., Cai, Y., Cai, Z.C., Yagi, K., Zheng, X.H., 2007. Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China Plain. *Science of the Total Environment*. 373, 501–511.
- FAOSTAT, 2014. FAOSTAT database. <http://faostat.fao.org/> (accessed 30.05.17).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. IPCC /IGES, Hayama, Japan.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014. Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., M., Rusticucci, L.V., Alexander, S., Brönnimann, Y., Charabi, F.J., Dentener, E.J., Dlugokencky, D.R., Easterling, A., Kaplan, B.J., Soden, P.W., Thorne, M., Wild, P.M., Zhai, 2013: Observations: Atmosphere and surface. In: *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M., Tignor, S.K., Allen, J., Boschung, A., Nauels, Y., Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Ed.)]. NY, USA: Cambridge University Press Cambridge, United Kingdom and New York.

669 Ju, X.T., Lu, X., Gao, Z.L., Chen, X.P., Su, F., Kogge, M., Römheld, V., Christie, P., Zhang,
 670 F., 2011. Processes and factors controlling N₂O production in an intensively managed
 671 low carbon calcareous soil under sub-humid monsoon conditions. *Environment*
 672 *Pollution*. 159, 1007– 1016.

673 Kachenchart, B., Davey, L.J., Nantana, G., Gareth, E.J., Atsamon, L., 2012. Seasonal nitrous
 674 oxide emissions from different land uses and their controlling factors in a tropical
 675 riparian ecosystem. *Agric. Ecosyst. Environ*. 158, 15–30.

676 Sittichoketram, K., 2009. Effects of combined of manure and chemical fertilizer application
 677 on the growth and yields of field corn cv. Suwan 4452. Kasetsart University.

678 Lesschen, J.P., Velthof, G.L., de Vries, W., Kros, J., 2011. Differentiation of nitrous oxide
 679 emission factors for agricultural soils. *Environ. Pollut*. 159, 3215–3222.

680 Li, M., Zhou, X., Zhang, Q., Cheng, X., 2014. Consequences of afforestation for soil nitrogen
 681 dynamics in Central China. *Agr. Ecosyst. Environ*. 183, 40–46.

682 Linn, D.M., Doran, J.W., 1984. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and
 683 nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48 (6),
 684 1267–1272.

685 Lognoul, M., Theodorakopoulos, N., Hiel, M.R., Regaert, D., Broux, F., Heinesch, B., 2017.
 686 Impact of tillage on greenhouse gas emissions by an agricultural crop and dynamics
 687 of N₂O fluxes: Insights from automated closed chamber measurements. *Soil &*
 688 *Tillage Research*. 167, 80–89.

689 Luo, G.J., Kiese, R., Wolf, B., Butterbach-Bahl, K., 2013. Effects of soil temperature and
 690 moisture on methane uptake and nitrous oxide emissions across three different
 691 ecosystem types. *Biogeosciences*. 10, 3205–3219.

692 Martins, M.R., Jantalia, C.P., Polidoro, J.C., Batista, J.N., Alves, B.J.R., Boddey, R.M.,
 693 Urquiaga, S., 2015. Nitrous oxide and ammonia emissions from N fertilization of
 694 maize crop under no-till in a Cerrado soil. *Soil & Tillage Research*, 151, 75–81.

695 Meng, L., Ding, W.X., Cai, Z.C., 2005. Long-term application of organic manure and
 696 nitrogen fertilizer on N₂O emissions soil quality and crop production in a sandy loam
 697 soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 37, 2037–2045.

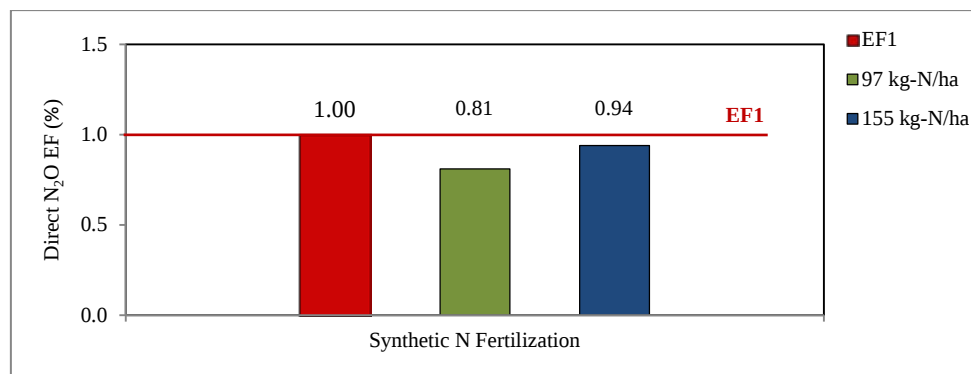
698 Molodovskaya, M., Singurindy, O., Richards, B.K., Warland, J., Johnson, M.S., Steenhuis,
 699 T.S., 2012. Temporal variability of nitrous oxide from fertilized croplands: hot
 700 moment analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 1728–1740.

701 Myhre, G., Shindell, D., Br_eon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D.,
 702 Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G.,

- Takemura, T., Zhang, H., 2013. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., et al. (Eds.), *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Nishimura, S., Akiyama, H., Sudo, S., Fumoto, T., Cheng, W., Yagi, K., 2011. Combined emission of CH₄ and N₂O from a paddy field was reduced by preceding upland crop cultivation. *Soil Sci. Plant Nutr.* 57, 167–178.
- Peech, M. 1965. Soil pH by glass electrode pH meter. *Methods of Soil Analysis*. Amer. Soc. Agro. 60, 914–925.
- Pervaiz, Z., Hussain, K., Kazmi, S.S.H., Gill, K.H., 2004. Agronomic efficiency of different N: P ratios in rain fed wheat. *International Journal of Agriculture & Biology*. 3, 455–457.
- Rees, R.M., Augustin, J., Alberti, G., Ball, B.C., Boeckx, P., Cantarel, a., Castaldi, S., Chirinda, N., Chojnicki, B., Giebels, M., Gordon, H., Grosz, B., Horvath, L., Juszczak, R., Kasimir Klemedtsson, Å., Klemedtsson, L., Medinets, S., Machon, a., Mapanda, F., Nyamangara, J., Olesen, J.E., Reay, D.S., Sanchez, L., Sanz Cobena, a., Smith, K. a., Sowerby, a., Sommer, M., Soussana, J.F., Stenberg, M., Topp, C.F.E., Van Cleemput, O., Vallejo, a., Watson, C. a., Wuta, M., 2013. Nitrous oxide emissions from European agriculture – an analysis of variability and drivers of emissions from field experiments. *Biogeosciences*. 10, 2671–2682.
- Robertson, G.P., Groffman, P.M., 2007. Nitrogen Transformation. In: Paul, E.A. (Ed.), *Soil Microbiology, Biochemistry, and Ecology*. Springer, New York, USA, pp. 341–364.
- Schaufler, G., Kitzler, B., Schindlbacher, A., Skiba, U., Sutton, M.A., Zechmeister-Boltenstern, S., 2010. Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature. *Eur. J. Soil Sci.* 61, 683–696.
- Schindlbacher, A., Zechmeister-Boltenstern, S., Butterbach-Bahl, K., 2004. Effects of soil moisture and temperature on NO, NO₂, and N₂O emissions from European forest soils. *J. Geophys. Res.* 109, D 17302.
- Lim-aroon, S., Changsaluk, S., Sichomporn, S., Kirdpoksab, K., Boonramphun, P., Potisan. S., 2004. On-farm research on corn and sorghum. Kasetsart University.
- Sun, Y.L., Lu, P.L., Li, J., Yu, Q., Sun, S.B., Wang, J.S., 2008. Characteristics of soil N₂O flux in a winter wheat-summer maize rotation system in North China Plain and analysis of influencing factors. *Chinese Journal of Agrometeorology*. 29(1), 1–5.

- Tang, X., Liu, S., Zhou, G., Zhang, D., Zhou, C., 2006. Soil atmospheric exchange of CO₂, CH₄ and N₂O in three subtropical forest ecosystems in southern China. *Glob. Change Biol.* 12, 546–560.
- Ussiri, D.A.N., Lal, R., 2013. *Soil emissions of nitrous oxide and its mitigation*, Springer Dordrecht Heidelberg, New York.
- Ussiri, D.A.N., Lal, R., Jarecki, M.K., 2009. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. *Soil & Tillage Research.* 104(2), 247–255.
- Velthof, G.L., Oenema, O., 1995. Nitrous oxide fluxes from grassland in Netherlands: II. Effects of soil type, nitrogen fertilizer application and grazing. *Eur. J. Soil Sci.* 46, 541–549.
- Walkley A., Black I.A., 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, 29–38.
- Wang, W., Dalal, R.C., 2015. Nitrogen management is the key for low-emission wheat production in Australia: a life cycle perspective. *Eur. J. Agron.* 66, 74–82.
- Wang, X.B., Liang, G.Q., Zhou, W., Sun, J.W., Pei, X.X., Xia, W.J., 2009. Effect of optimized nitrogen application on denitrification loss and N₂O emission from soil in winter wheat/summer corn rotation system in North China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science.* 15, 48–54.
- Weitz, A.M., Linder, E., Frolking, S., Crill, P.M., Keller, M., 2001. N₂O emissions from humid tropical agricultural soils: effects of soil moisture, texture and nitrogen availability. *Soil Biol. Biochem.* 33, 1077–1093.
- Yang, L., Wang, L.G., Li, H., Qiu, J.J., Liu, H.Y., 2014. Impacts of Fertilization Alternatives and Crop Straw Incorporation on N₂O Emissions from a Spring Maize Field in Northeastern China. *Journal of Integrative Agriculture.* 13(4), 881–892.
- Zhang, Y.Y., Liu, J.F., Mu, Y.J., Zhu, X., Pei, S.W., Lun, X.X., Zhang, Y., 2012. Nitrous oxide emissions from a maize field during two consecutive growing seasons in the North China Plain. *Journal of Environmental Sciences.* 24, 160–168.

Graphical abstract



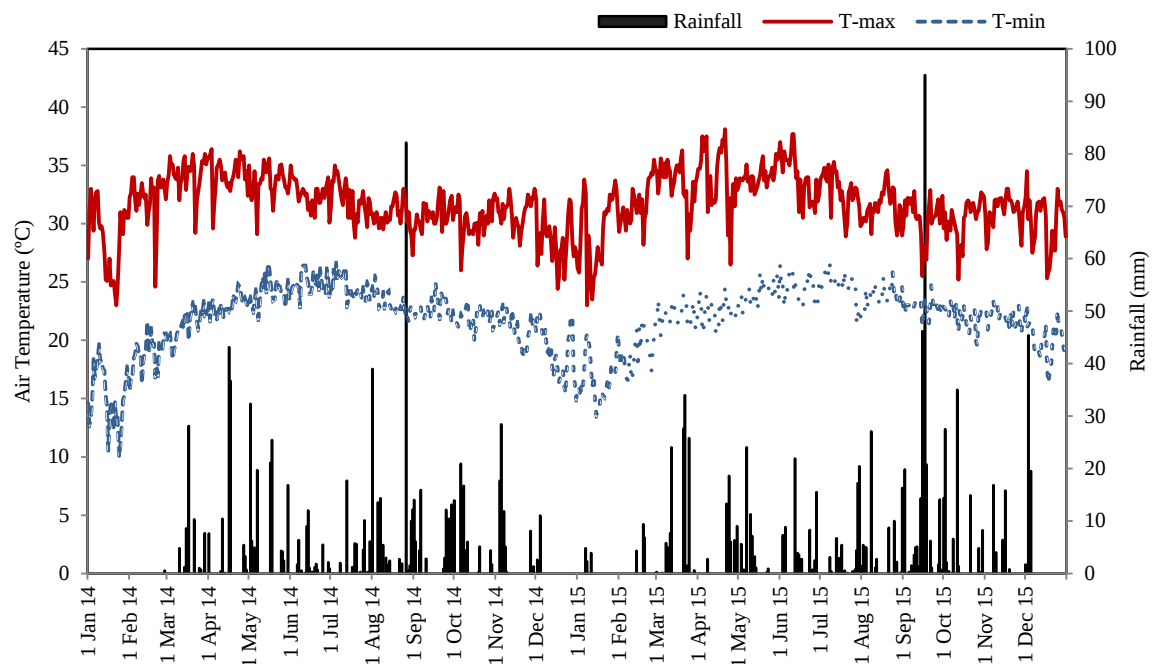


Fig. 1. Daily air temperatures (maximum and minimum) and rainfall conditions during the experimental period (2014–2015) at the National Corn and Sorghum Research Center, Pak Chong Agrometeorological Station, Nakhon Ratchasima province, Thailand.

823

824

825

826

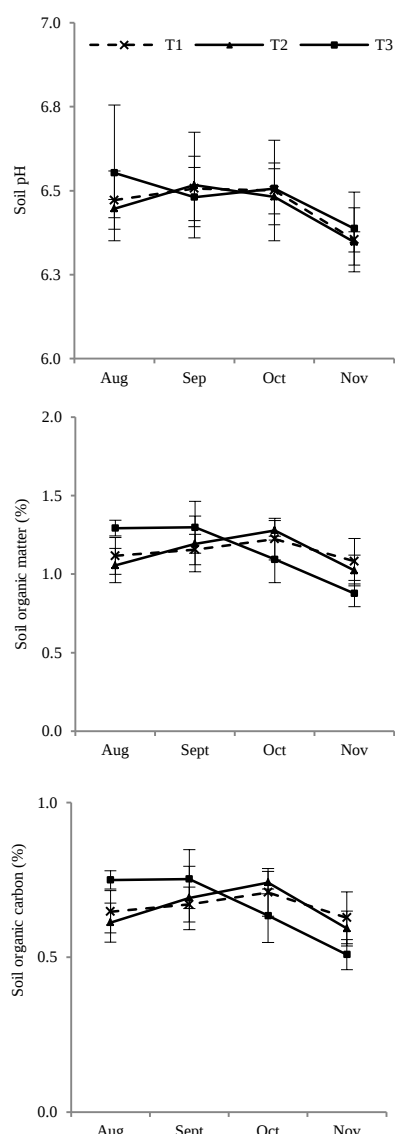
827

828

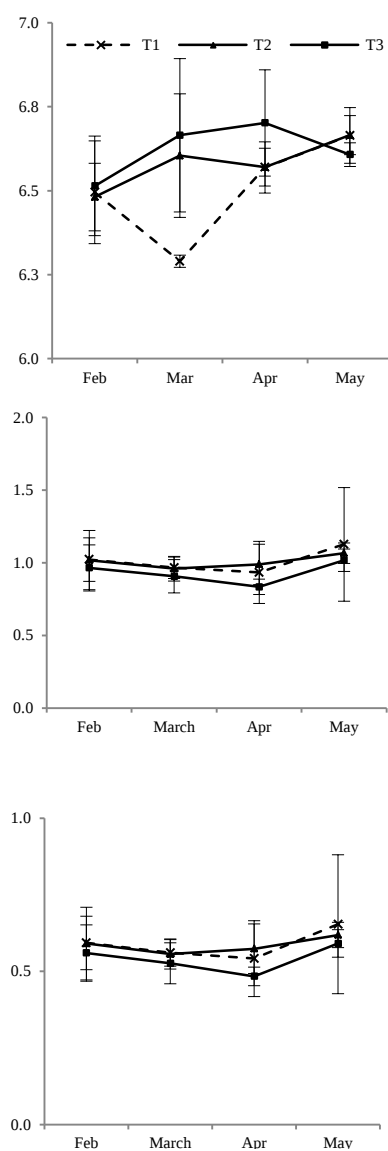
829

830

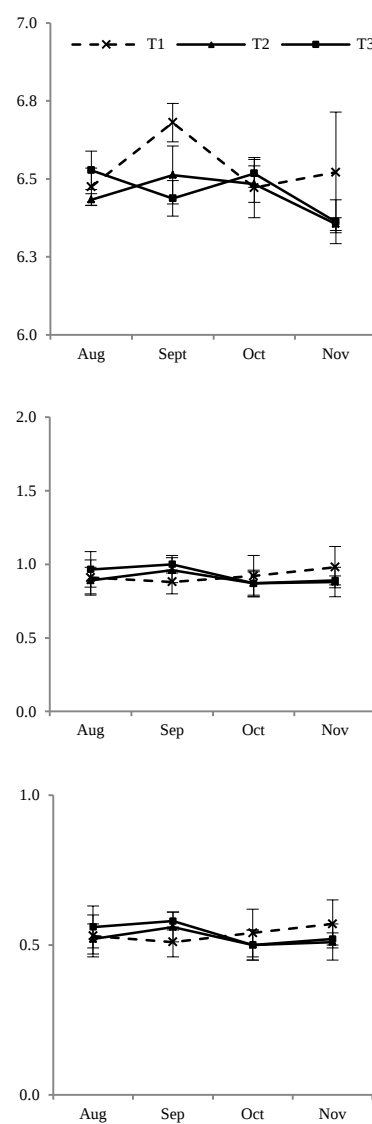
831 (a)

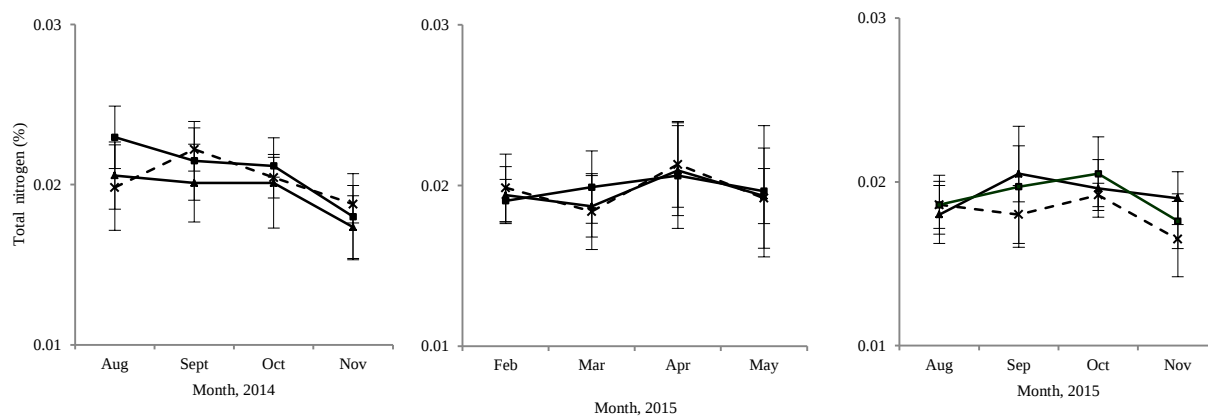


(b)



(c)





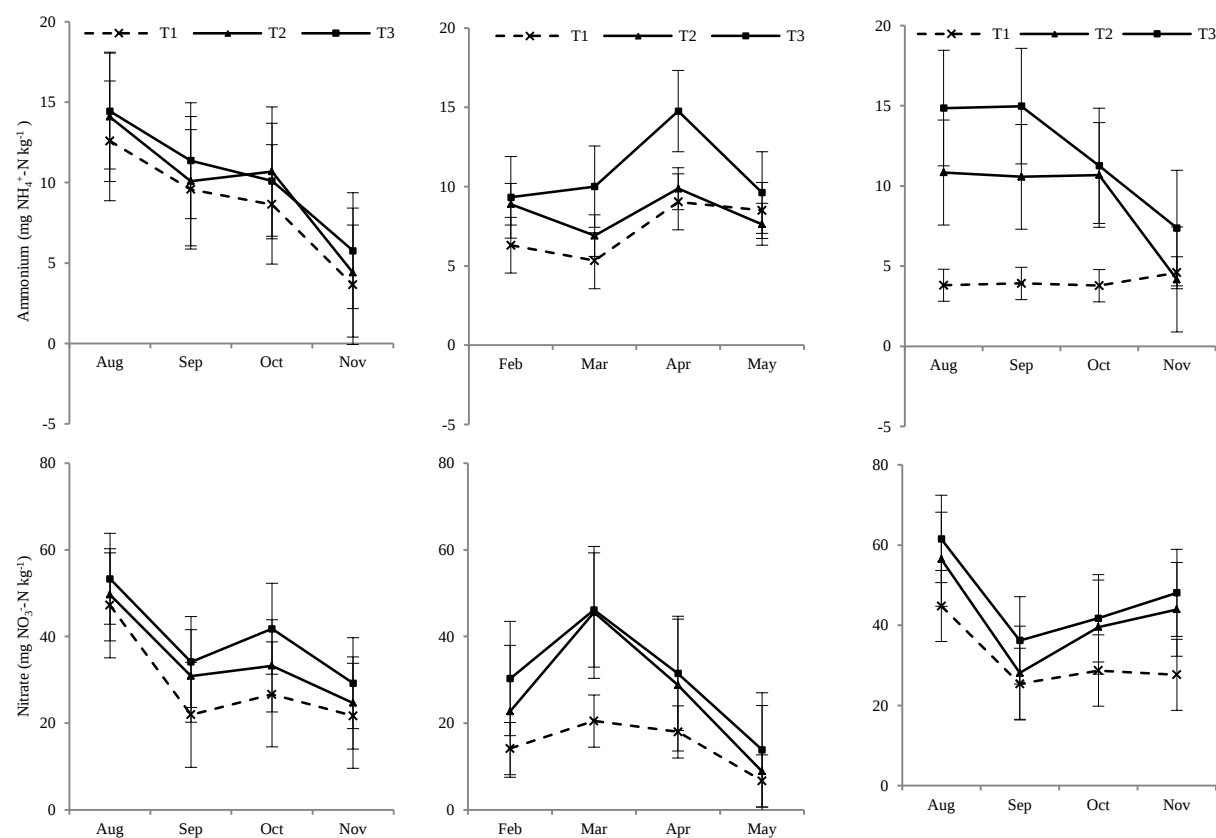
832 **Fig. 2.** Soil pH, soil organic matter, soil organic carbon and total nitrogen in the maize crop:
 833 the 1st crop (a), the 2nd crop (b) and the 3nd crop.

834

835 (a)

(b)

(c)



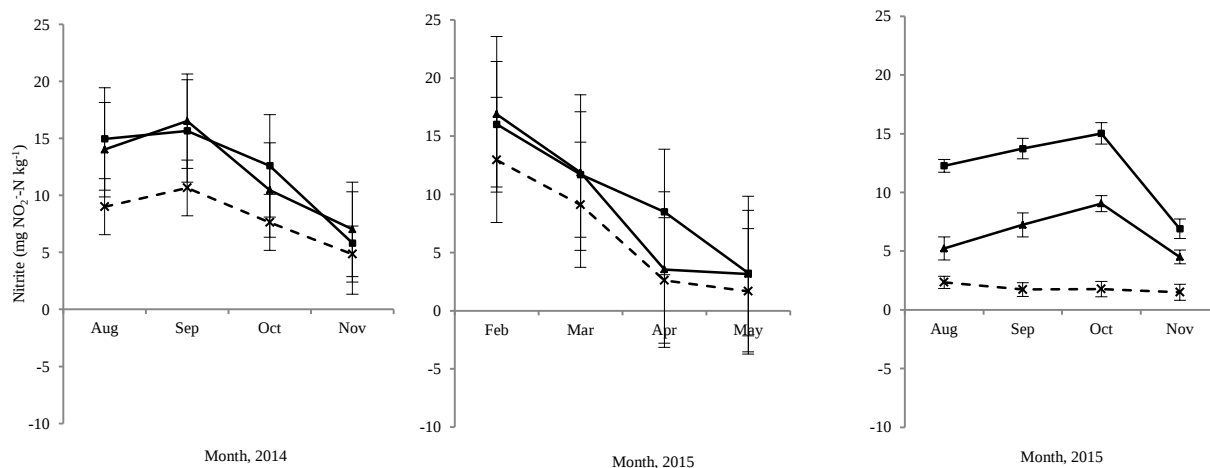
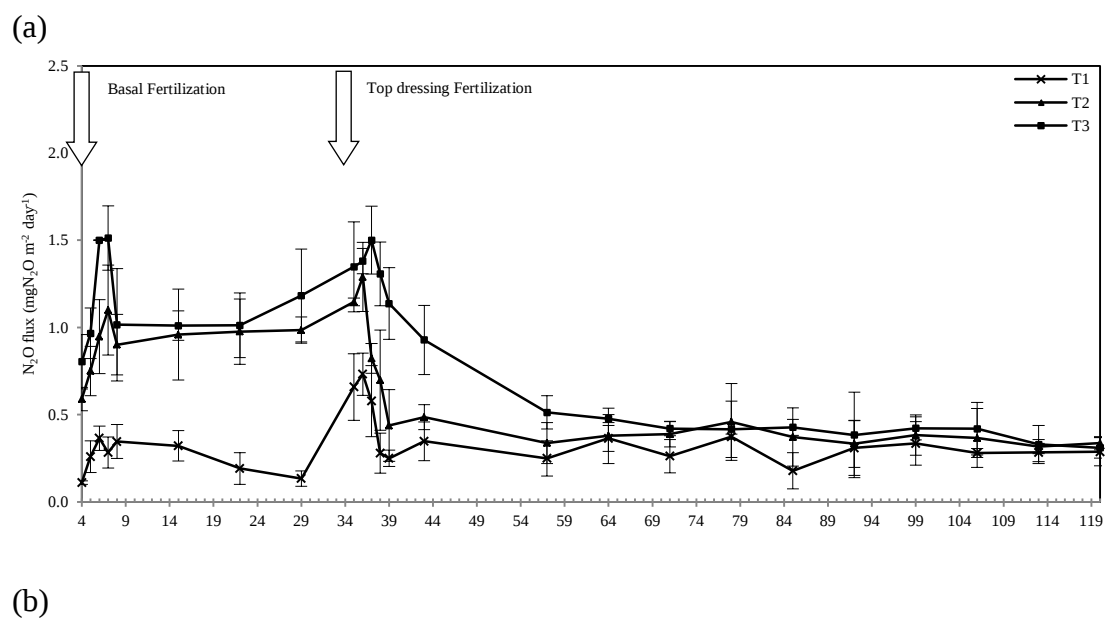
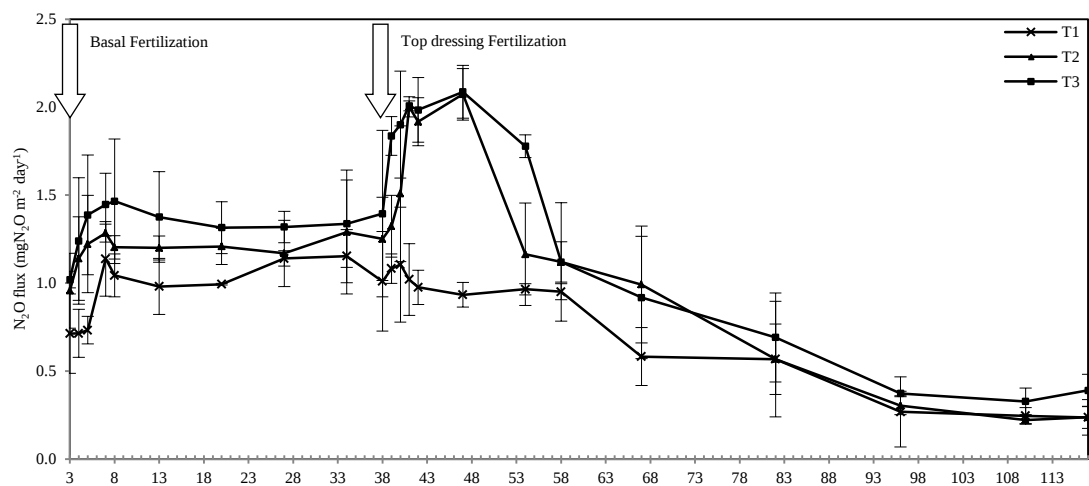


Fig. 3. The NH_4^+ , NO_3^- and NO_2^- concentrations in the maize crop: the 1st crop (a), the 2nd crop (b) and the 3rd crop.





(c)

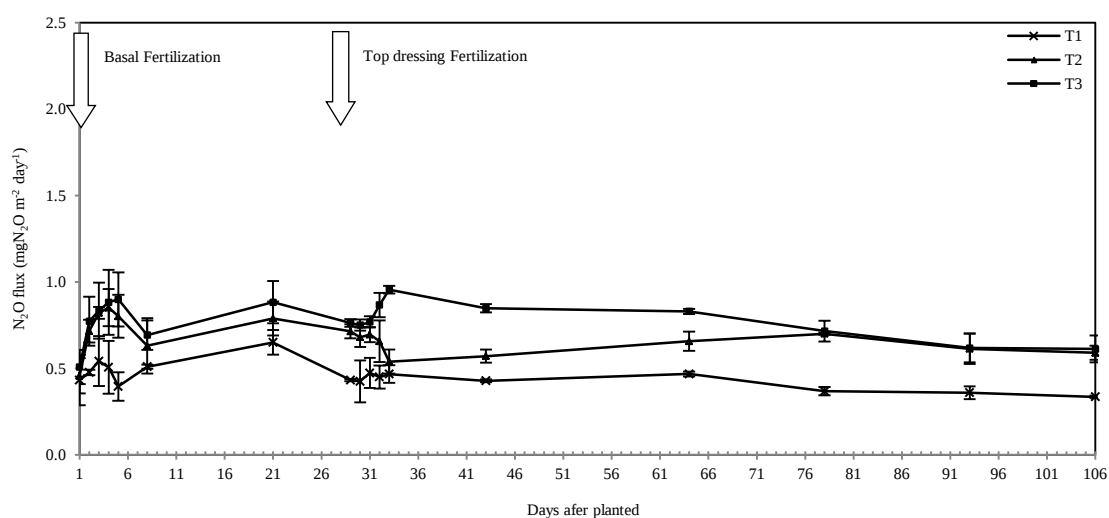
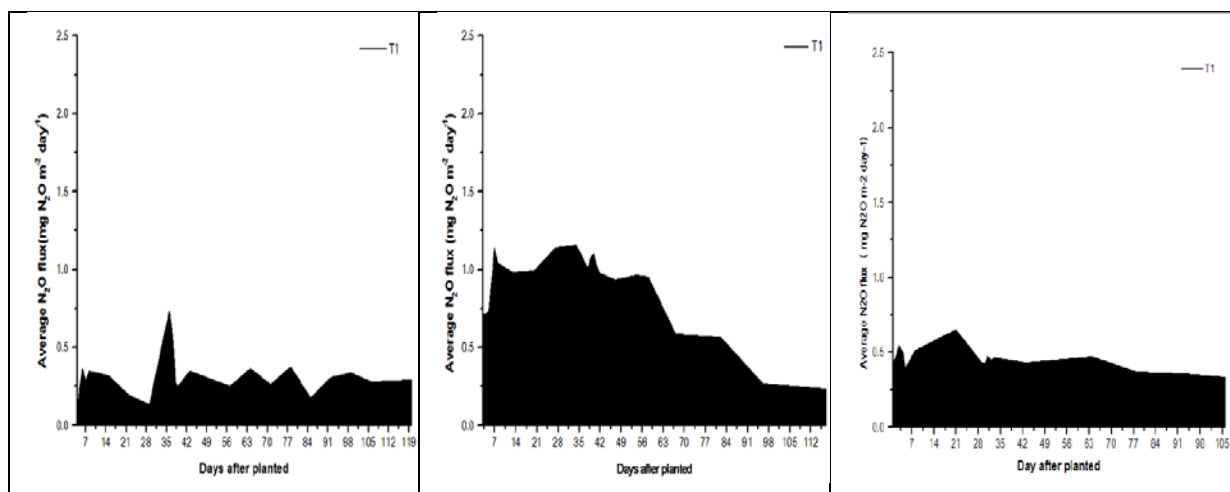


Fig. 4. N₂O fluxes under the treatments in maize crop: the 1st crop (a), the 2nd crop (b) and the 3rd crop (c) 2014–2015.



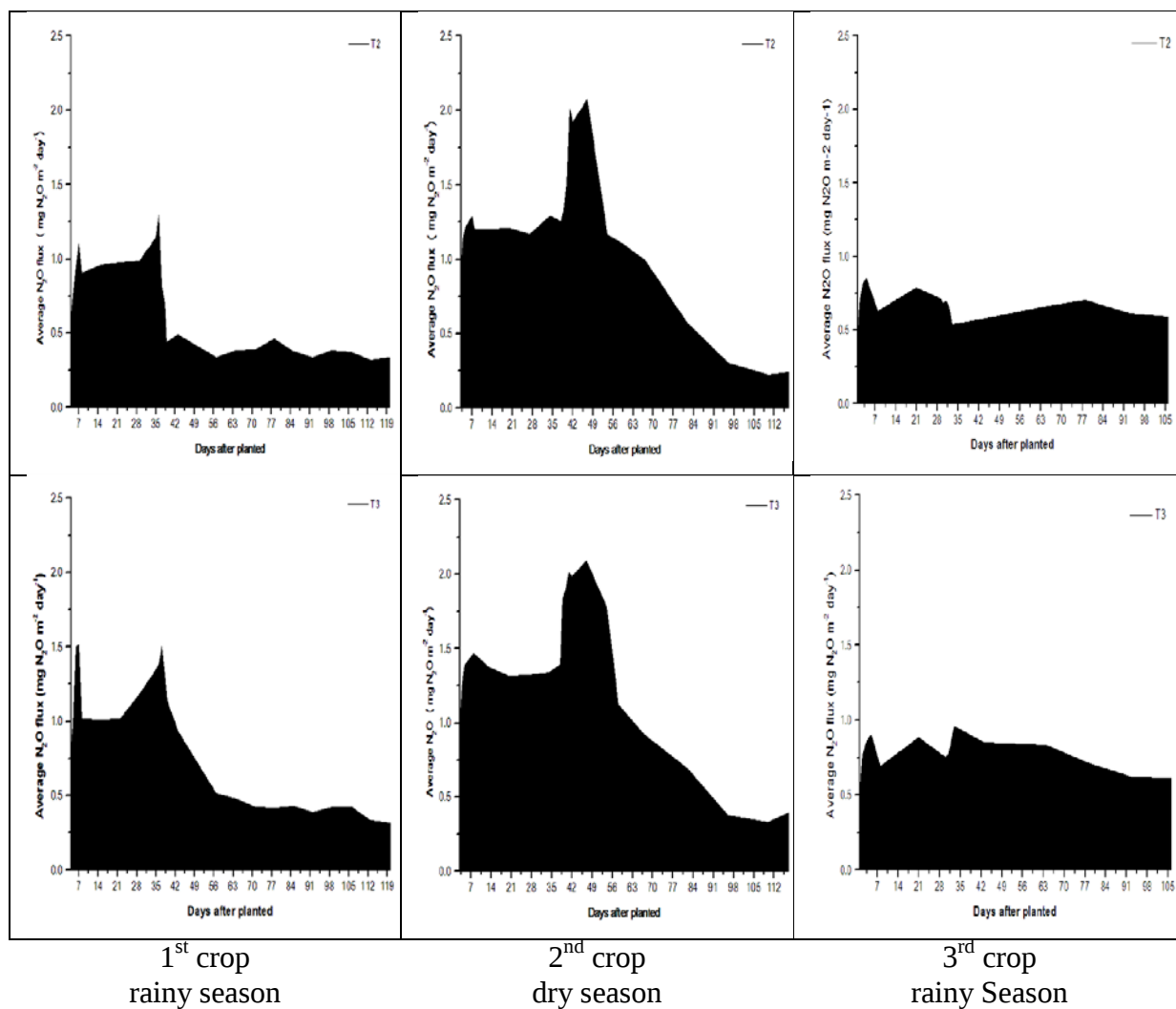
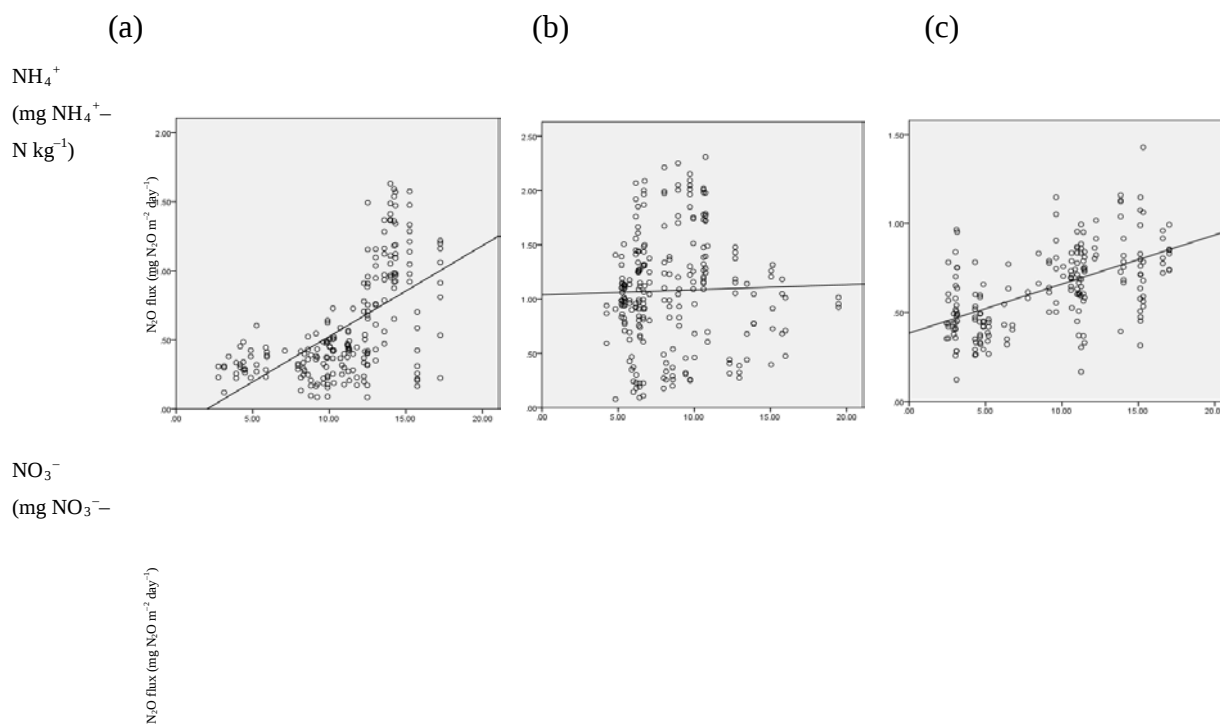
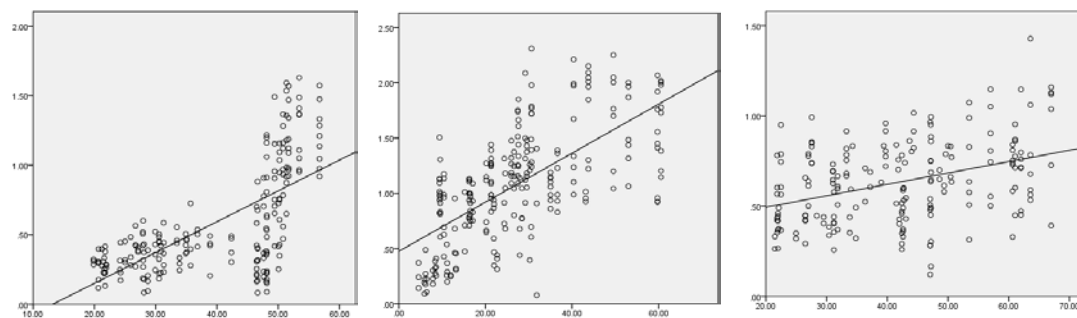


Fig. 5. N₂O fluxes accumulation calculated from the area under the curve



N kg⁻¹)



NO₂⁻
(mg-NO₂⁻
N kg⁻¹)

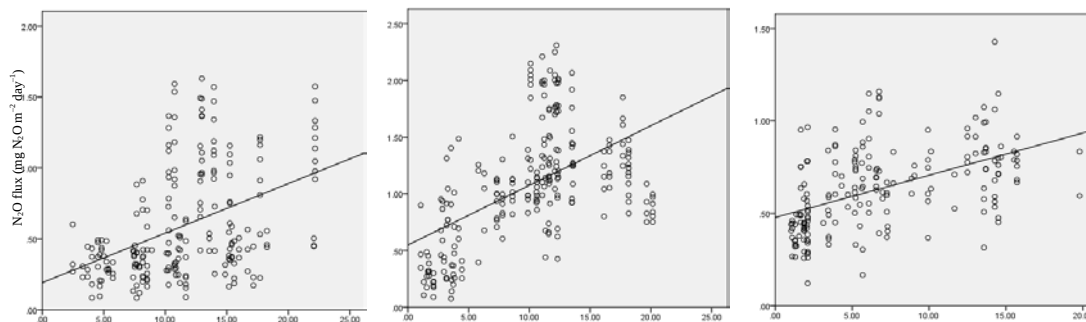


Fig. 6. Regression analyses of N₂O fluxes tested against NH₄⁺, NO₃⁻ and NO₂⁻ in the 1st crop (a), the 2nd crop (b) and the 3rd crop. (c).

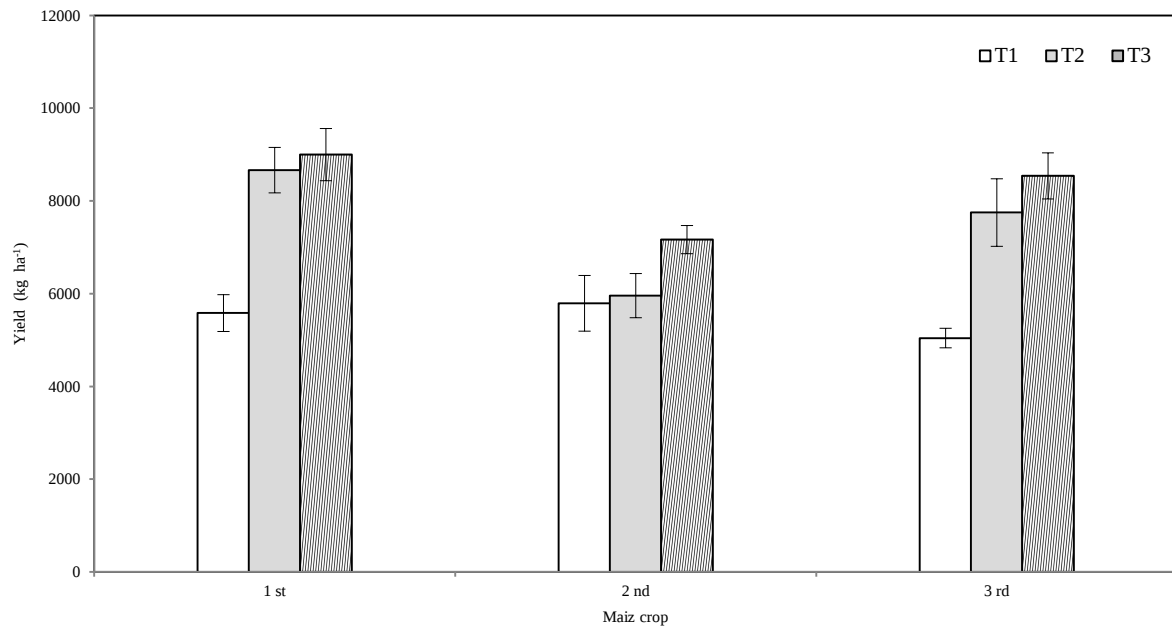


Fig. 7. Crop yields under the three treatments: control (T1), traditional fertilization (T2) and excess fertilization (T3) in maize cultivation.

Table 1

Soil properties before panting in 1st crop.

Soil depth (cm)	pH	Bulk density (g cm ⁻³)	Soil water content (%)	WFPS (%)	Organic matter (%)	Clay ^a (%)	Silt ^b (%)	Sand ^c (%)
0–20	6.12	1.09	24.65	41.78	3.84	19.50	25.42	55.08

^a < 0.002 mm.

^b 0.002–0.05 mm.

^c 0.05–2 mm.

Table 2**Crop management in this experiment**

Crop management activities	1 st crop	2 nd crop	3 rd crop
Crop cultivation	2014 18 Jul: planting, 15 Nov: harvest	2015 2 Feb: planting, 15 Jun: harvest	2015 4 Aug: planting, 28 Nov: harvest
Fertilizer application	18 Jul : NPK 21 Aug: Urea	2 Feb : NPK 11 May: Urea	4 Aug : NPK 4 Sep: Urea
Biomass collection	6 Sep: reproductive stage 15 Nov: mature stage	21 Mar: reproductive stage 5 Jun: mature stage	19 Sep: reproductive stage 23 Nov: mature stage
Season	Rainy season	Dry season	Rainy season

The compound fertilizer NPK is a combination of N:P₂O₅:K₂O (16:20:0).

Urea is 46:0:0 of nutrient (NPK) contents.

946 **Table 3**
947 **Soil properties and inorganic nitrogen**

Parameters	Crops / Treatments								
	1 st crop (Rainy season)			2 nd crop (Dry season)			3 rd crop (Rainy season)		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Soil pH	6.48	6.52	6.55	6.50	6.60	6.62	6.55	6.46	6.47
(H ₂ O)	±0.15 a	±0.17 a	±0.16 a	±0.18 a	±0.19 a	±0.16 a	±0.15 a	±0.10 a	±0.12 b
Soil water	19.90	20.11	19.99	17.34	15.93	16.39	21.11	20.18	21.34
content	±7.55 a	±6.74 a	±7.19 a	±8.72 a	±8.45 a	±8.77 a	±8.78 a	±8.66 a	±8.22 a
(%)									
Water	35.62	36.91	35.79	33.11	31.18	32.26	38.12	36.26	37.93
filled pore	±13.76 a	±12.95 a	±13.25 a	±16.72 a	±16.63 a	±17.25 a	±15.36 a	±14.50 a	±13.99 a
space									
(WFPS)									
(%)									
Bulk	1.17	1.20	1.16	1.26	1.28	1.30	1.00	1.07	1.17
density	±0.44 b	±0.90 b	±0.05 a	±0.10 a	±0.12 ab	±0.99 b	±0.00 a	±0.12 b	±0.12 c
(g cm ⁻³)									
OM	1.08	1.07	1.04	1.01	1.01	0.93	0.91	0.91	0.91
(%)	±0.19 a	±0.15 a	±0.20 a	±0.23 a	±0.13 a	±0.12 a	±0.10 a	±0.09 a	±0.10 a
SOC	0.63	0.62	0.60	0.59	0.58	0.54	0.53	0.53	0.56
(%)	±0.11 a	±0.09 a	±0.12 a	±0.13 a	±0.07 a	±0.07 a	±0.06 a	±0.05 a	±0.05 b
TN	0.199	0.196	0.204	0.197	0.196	0.198	0.182	0.192	0.191
(%)	±0.002 a	±0.002 a	±0.003 a	±0.003 a	±0.002 a	±0.003 a	±0.002 a	±0.02 b	±0.02 b
NH ₄ ⁺	8.57	9.73	10.42	7.10	8.42	10.69	3.93	9.94	13.59
(mg	±3.69 a	±4.02 ab	±3.34 b	±3.14 a	±3.09 b	±2.86 c	±1.03 a	±2.29 b	±2.87 c
NH ₄ ⁺ -N									
kg ⁻¹)									
NO ₃ ⁻	29.38	34.85	39.28	14.85	26.50	30.45	34.04	42.99	48.68
(mg	±10.87a	±10.12 b	±11.17 c	±7.73 a	±14.89 b	±13.67 b	±9.80 a	±13.30 b	±12.67 c
NO ₃ ⁻ -N									
kg ⁻¹)									
NO ₂ ⁻	8.04	12.02	12.26	6.59	8.86	9.86	1.96	6.30	12.48
(mg	±3.29 a	±4.89 b	±5.41 b	±5.36 a	±6.05 b	±5.18 b	±0.67 a	±1.97 b	±3.37 c
NO ₂ ⁻ -N									
kg ⁻¹)									

948 Means ± standard error of mean deviation with different letters in the columns of each treatment and cropping
949 season are significantly different at the 0.05 level (*P*<0.05).

Table 4

Seasonal cumulated emission of N₂O, N₂O direct emission factors, GWP and N₂O emissions per maize planted area.

Treatment	N ₂ O emission (mg N ₂ O m ⁻² day ⁻¹)			N ₂ O cumulative (kg N ₂ O ha ⁻¹ crop ⁻¹)			N ₂ O direct emission factors (%)			Mean of EFs (%)	GWPs (Tg CO ₂ eq ha ⁻¹) ¹
	1 st crop	2 nd crop	3 rd crop	1 st crop	2 nd crop	3 rd crop	1 st crop	2 nd crop	3 rd crop		
T1	0.33 ±0.17 a	0.83 ±0.32 a	0.46 ±0.16 a	0.35	0.82	0.47	–	–	–	–	–
T2	0.65 ±0.35 b	1.11 ±0.53 b	0.68 ±0.18 b	0.65	1.07	0.69	0.65	1.08	0.69	0.81	0.24, 0.02
T3	0.88 ±0.45 c	1.29 ±0.55 c	0.78 ±0.21 c	0.80	1.20	0.81	0.81	1.21	0.81	0.94	0.28, 0.03

Means ± standard error of mean deviation with different letters in the columns of each treatment and cropping season are significantly different at the 0.05 level ($P < 0.05$).

¹ Evaluated GWPs from Thailand had maize-planting areas throughout the Kingdom and in Nakhon Ratchasima Province of 1,145,000 and 108,371 hectares, respectively. Reported data by Office of Agricultural Economics, 2016.

Table 5
Regression analysis of N₂O fluxes.

Independent variable	Intercept	Slope	R ²	P-value
The 1 st crop				
NH ₄ ⁺	−0.13	0.066	0.35	0.000
NO ₃ [−]	−0.29	0.022	0.43	0.000
NO ₂ [−]	0.19	0.035	0.18	0.000
The 2 nd crop				
NH ₄ ⁺	1.04	0.0050	0.01	> 0.05
NO ₃ [−]	0.48	0.022	0.44	0.000
NO ₂ [−]	0.55	0.053	0.28	0.000
The 3 rd crop				
NH ₄ ⁺	0.38	0.028	0.31	0.000
NO ₃ [−]	−0.37	0.0060	0.14	0.000
NO ₂ [−]	0.48	0.023	0.25	0.000

Table 6Models perform on relationship between N₂O emissions and environment variables.

Crop/ Treatment	Multiple linear regression equation	Model R ²
1st crop		
N ₂ O flux T1	= 0.178+0.005(WFPS)	0.89
N ₂ O flux T2	= 0.204+0.24(NO ₃ ⁻)-0.761(SOC)-0.006(RF)	0.65
N ₂ O flux T3	= -8.499+4.436(BD)+0.129(Ave. temp.)+0.01(NO ₃ ⁻)+0.008(WFPS)	0.81
Average N ₂ O flux	= -1.053+33.421(TN)+0.016(NO ₂ ⁻)+0.013(NO ₃ ⁻)+0.008(WFPS) -0.003(RF)	0.54
2nd crop		
N ₂ O flux T1	= -4.883+3.168(BD)+0.09(Ave. temp.)+0.026(Ave. soil temp. at sampling)-0.056(Ave. temp. at sampling)	0.69
N ₂ O flux T2	= -1.68 +0.62(NO ₂ ⁻)+0.44(NH ₄ ⁺)+0.44(Ave. temp. at sampling)+0.15(NO ₃ ⁻)-2.332(SOC)	0.67
N ₂ O flux T3	= -6.239+48.934(TN)+4.129(BD)+0.068(Ave. temp.)+0.011(NO ₃ ⁻)-0.096(NH ₄ ⁺)	0.66
Average N ₂ O flux	= -7.066+2.444(BD)+0.314(pH)+0.124(Ave. temp.)+0.036(NO ₂ ⁻)+0.007(NO ₃ ⁻)-0.037(Ave. temp. at sampling)	0.65
3rd crop		
N ₂ O flux T1	= 14.442+0.26(Ave. soil temp. at sampling)+0.164(Ave. temp.)	0.38
N ₂ O flux T2	= 16.344+0.314(Ave. soil temp. at sampling)+0.10(NH ₄ ⁺)	0.42
N ₂ O flux T3	= 16.706+0.293(Ave. soil temp. at sampling)+0.093(NH ₄ ⁺)	0.44
Average N ₂ O flux	= 0.268+0.023(NH ₄ ⁺)+0.004(NO ₃ ⁻)-0.009(RF)	0.39

1) TN: Total nitrogen, NO₂⁻: Nitrite, NO₃⁻: Nitrate, NH₄⁺: Ammonium, WFPS: Water filled pore space, RF: Rainfall, BD: Bulk density, pH: Soil pH, SOC: Soil organic carbon, TN: Total nitrogen, Ave. temp: Average daily air temperature, Ave. temp. at sampling: Average air temperature at sampling time, Ave. soil temp. at sampling: Average soil temperature at sampling time.

1014 **Table 7**
1015 **Maize growth, dry weight of biomass and crop yield**

Parameters	Crops / Treatments								
	1 st crop		2 nd crop			3 rd crop			
	T1	T2	T1	T2	T3	T3	T1	T2	T1
Height	252.50	257.50	268.58	185.75	200.92	207.00	185.42	195.25	198.42
(cm)	±5.99 a	±4.69 a	±1.34 b	±3.74 a	±0.83 b	±3.97 c	±12.91 a	±4.20 a	±5.86 a
Dry weight	395.46	402.74	440.41	319.59	327.83	437.22	338.47	364.90	387.04
of biomass	±45.14 a	±38.58 a	±14.34 a	±55.73 a	±47.19 b	±23.11 c	±29.71 a	±81.40 a	±19.25 a
(g)									
Yield	5,583.33	8,666.67	9,000.00	5,791.67	5,958.33	7,166.67	5,041.67	7,750.00	8,541.67
(grain)	±396.75 a	±490.65 b	±561.08 b	±599.00 a	±478.71 a	±304.29 b	±209.72 a	±726.40 b	±497.68 b
(kg ha ⁻¹)									

1016 Means ± standard error of mean deviation with different letters in the columns of each treatment and cropping
1017 season are significantly different at the 0.05 level ($P<0.05$).

1039 **Table 8**
1040 System nitrogen balance

Seasonal	Rainy Season 2014: 1 st CROP			Dry Season 2015: 2 nd CROP			Rainy Season 2015: 3 rd CROP		
Treatment	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
N input kg N ha ⁻¹ N fertilizer	0	96.875	155	0	96.875	155	0	96.875	155
Total N input	0	96.875	155	0	96.875	155	0	96.875	155
N outputs kg N ha ⁻¹ N in soils	19.90	19.60	20.40	19.70	19.60	19.80	18.20	19.20	19.10
N in biomass	87.00	91.00	85.00	90.00	83.00	70.00	77.00	85.00	76.00
N from N ₂ O gas	0.11	0.21	0.25	0.26	0.34	0.38	0.15	0.22	0.26
Total N outputs	107.01	110.81	105.65	109.96	102.94	90.18	95.35	104.42	95.36
System N balance	-107.01	-13.94	49.35	-109.96	-6.07	64.82	-95.35	-7.55	59.64

1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1060

Table 9

Value cost ratio maize yield under various fertilizer application treatments.

Crops	Treatment/ Rate of N fertilizer	Yield	Increased yield obtained	Farm price of maize ¹⁾	Value of increased yield obtained	Cost of total weight N fertilizers used ²⁾	VCR
	(kg N ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(baht kg ⁻¹)	(baht ha ⁻¹)	(baht ha ⁻¹)	
1 st crop	T1: 0	5,583.33	–	7.13	–	0	–
	T2: 97	8,666.67	3,083.34		21,984	2,265.75	9.70
	T3: 155	9,000.00	3,416.67		34,361	3,625.00	9.48
2 nd crop	T1: 0	5,791.67	–	7.73	–	0	–
	T2: 97	5,958.33	166.66		1,288.25	2,343.75	0.55
	T3: 155	7,166.67	1,375.00		10,628.75	3,750.00	2.83
3 rd crop	T1: 0	5,041.67	–	7.73	–	0	–
	T2: 97	7,750.00	2,708.33		20,935.50	2,343.75	8.93
	T3: 155	8,541.67	3,500		27,055.00	3,750.00	7.21

1) Farm price of maize from price of maize reported by Office of Agricultural Economics in 2014 and 2015 that corresponds to a year of maize cultivation.

2) Cost of total weight fertilizer N:P₂O₅:K₂O (16:20:0) is 14.50 baht kg⁻¹ and Urea (46:0:0) is 15 baht kg⁻¹ reported by Office of Agricultural Economics, 2016.

3) Exchange rate: 35 Bath ~ 1 USD.

การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในการเกษตร ที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

Nitrous Oxide Flux of Agricultural Soil in Maize

อุกฤษ เรืองชู¹ และ มณฑิรา ยูติธรรม^{2*}

Ukrit Ruangchu¹ and Monthira Yuttitham^{2*}

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท; ^{2*}อาจารย์ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล นครปฐม 73170

*โทรศัพท์: 0 2441 5000 ต่อ 2201, E-mail: monthira.yut@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

แนวโน้มการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการเกษตรของไทยเพิ่มขึ้น จากการใส่ปุ๋ยเพิ่มผลผลิต และความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยเฉพาะปุ๋ยไนโตรเจน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ทางตรงจากดินการเกษตรที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ภายใต้สภาพภูมิอากาศเขตร้อน ด้วยวิธี Static chamber method ออกแบบชุดการทดลองใส่ปุ๋ยไนโตรเจน 0, 25 และ 40 กิโลกรัมต่อไร่ ในฤดูฝนและฤดูแล้ง ผลการศึกษา พบว่า ชุดการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T_1) ปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ยต่ำสุด 0.32 ± 0.03 , 0.84 ± 0.06 มิลลิกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวัน ชุดการทดลองใส่ปุ๋ย 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T_2) 0.66 ± 0.06 , 1.15 ± 0.10 มิลลิกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวัน และชุดการทดลองใส่ปุ๋ย 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T_3) ปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ยสูงสุด 0.86 ± 0.09 , 1.31 ± 0.11 มิลลิกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวัน การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังใส่ปุ๋ยและลดลงจนถึงช่วงเก็บเกี่ยว ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสมในฤดูแล้งมีมากกว่าฤดูฝน เนื่องจากการให้น้ำร่วมกับปริมาณฝนในพื้นที่ ค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ย T_2 และ T_3 แตกต่างกับ T_1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งสองรอบการเพาะปลูก ค่าความสูง มวลชีวภาพ และผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์แปรผันตามปริมาณปุ๋ยที่ใส่ ส่งผลให้การเจริญเติบโตและผลผลิต T_2 และ T_3 แตกต่างกับ T_1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะให้ผลผลิตสูงในฤดูฝน ผลการศึกษาใช้พัฒนาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ทางตรงจากดินในการเกษตร และรูปแบบเขตกรรมปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพิ่มผลผลิตและลดการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ในดินการเกษตร

คำสำคัญ : ก๊าซไนตรัสออกไซด์; ปุ๋ยไนโตรเจน; สุวรรณ 4452; ดินเกษตร; การปล่อยก๊าซเรือนกระจก



Abstract

Nitrous Oxide (N_2O) Emission of agricultural sector in Thailand is increasing because agriculturists use fertilizers, especially nitrogen fertilizers, to increase yield and soil fertility. The purpose of this research is to measure the direct N_2O emission from agricultural soil of maize cultivation in tropical zone by Static chamber method. The treatments of this experiment are nitrogen fertilizers adding at 0, 25 and 40 kg rai^{-1} in wet and dry seasons. The results show that the treatment that adding no nitrogen fertilizer (T_1) has the lowest average N_2O emission at 0.32 ± 0.03 , 0.84 ± 0.06 mg $N_2O\ m^{-2}\ day^{-1}$. The treatment that adding nitrogen fertilizer at 25 kg rai^{-1} (T_2) has the average N_2O emission at 0.66 ± 0.06 , 1.15 ± 0.10 mg $N_2O\ m^{-2}\ day^{-1}$. The treatment that adding nitrogen fertilizer at 40 kg rai^{-1} (T_3) has the highest average N_2O emission at 0.86 ± 0.09 , 1.31 ± 0.11 mg $N_2O\ m^{-2}\ day^{-1}$. The trend of N_2O emission increases after fertilizers adding and decreases until the harvest. The accumulated N_2O emission of dry season is more than that in wet season because of watering and rainfall in the area in dry season. The average N_2O emission of T_2 and T_3 treatment are statistically significant different from T_1 treatment ($p < 0.05$) in both 2 crops. Height, biomass and yield of the maize vary with the amount of fertilizer adding. Growth and productivity of T_2 and T_3 treatment are statistically significant different from T_1 treatment ($p < 0.05$). Maize has the highest yield in wet season. This study is expected to develop the direct N_2O emission from agricultural soil and the maize cultivation to increase the productivity and decrease N_2O emission from agricultural soil.

Keywords : Nitrous Oxide gases; Nitrogen fertilizer; Suwan 4452; Agricultural soils; Greenhouse gases emission

บทนำ

ก๊าซไนตรัสออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 270 เป็น 319 ส่วนในพันล้านส่วน ในชั้นบรรยากาศโลก [1] ส่งผลให้อุณหภูมิโลกเพิ่มขึ้น และเป็นสาเหตุการทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศโลก ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน [2] ภาคการเกษตรของไทยมีส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศ 22.6% มากกว่าสัดส่วนการปล่อยจากภาคการเกษตรของโลก 13.8% ปริมาณปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ของไทย ปล่อยจากกลุ่มดินที่ใช้ในการเกษตรจากการใส่ปุ๋ยเป็นหลัก 7.6 ล้านตัน คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า [3] และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการพัฒนาเศรษฐกิจจากระบบการเกษตรที่เน้นผลผลิตสูง ป้อนเข้าสู่ภาคอุตสาหกรรม พื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของประเทศมีประมาณ 7 ล้านไร่ ระบบการเกษตรเน้นผลผลิตทำให้ใช้ปุ๋ยเคมีจำนวนมาก โดยเฉพาะปุ๋ยเคมีในโตรเจนเพิ่มผลผลิตและความอุดมสมบูรณ์ของดิน ทั้งนี้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สามารถนำปุ๋ยในโตรเจนที่ใส่ลงในดินไปใช้เพียง 30% และสูญเสียสู่สิ่งแวดล้อม 70% โดยกระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน [4] และมีการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ออกมาโดยตรง (Direct emission) และสูญเสียในโตรเจนจากกระบวนการอื่น เช่น การชะล้าง การระเหย ในรูปก๊าซแอมโมเนีย เป็นต้น เรียกกระบวนการนี้ว่าการปล่อยโดยทางอ้อม (Indirect emission) การใส่ปุ๋ยในโตรเจนในดินปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นสาเหตุการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงและโดยทางอ้อมสู่สิ่งแวดล้อม [5] จากกระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันในดิน รวมถึงการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ทางตรงจากดินการเกษตรด้วย [6]

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ทางตรงจากดินการเกษตรที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ภายใต้สภาพภูมิอากาศเขตร้อน ผลที่ได้สามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนาค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ทางตรงจากดินการเกษตรที่ใช้ปุ๋ยเคมีในโตรเจน และเป็นแนวทางเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่เพิ่มผลผลิตและลดการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากดินในการเกษตรได้

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองในสภาพไร่ (Field condition) ดำเนินการทดลองที่ศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ จังหวัดนครราชสีมา ในแปลงขนาด 6x10 เมตร ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์พันธุ์สุวรรณ 4452 โดยวิธีการปลูกและจัดการของศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ ในฤดูฝน (ระหว่างเดือนกรกฎาคม ถึงพฤศจิกายน 2557) และฤดูแล้ง (ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ ถึงพฤษภาคม 2558) ควบคุมตัวแปรจำนวน 1 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณปุ๋ยเคมีในโตรเจน วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized complete block design, RCBD) กำหนดกรรมวิธีทดลอง (Treatment) จำนวน 3 ชุด การทดลองๆ ละ 4 ซ้ำ ได้แก่ 1) ควบคุมการทดลองไม่ใส่ปุ๋ย (T_1) 2) ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T_2) 3) ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตรา 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T_3) เก็บตัวอย่างอากาศโดยใช้กล่องเก็บตัวอย่างอากาศ ด้วยวิธี Static chamber method เก็บตัวอย่างอากาศไว้ในขวดแก้วสุญญากาศ ตั้งแต่เวลา 09.00 น. ที่เวลา 0, 10, 20 และ 30 นาที โดยเก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 1 ครั้ง โดยช่วงการใส่ปุ๋ย 2 ครั้ง เก็บตัวอย่างอากาศทุกวันต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วัน หลังจากนั้นเก็บสัปดาห์ละครั้งตามปกติ จนถึงเก็บช่วงเกี่ยวผลผลิต วิเคราะห์ความเข้มข้นก๊าซไนตรัสออกไซด์ด้วยเครื่อง Gas chromatography (GC) และคำนวณอัตราการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์จากความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นตามช่วงเวลา สมการ (1) [7] โดยเลือกใช้ค่า $R^2 > 0.9$

$$F_{GHGs} = \rho \times (V/A) (dG/dt) \quad (1)$$

เมื่อ F_{GHGs} คือ อัตราการปลดปล่อยไนตรัสออกไซด์ (มิลลิกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง), ρ คือ ความหนาแน่นของก๊าซไนตรัสออกไซด์ ณ เวลาที่เก็บตัวอย่างที่ปรับแก้ค่าความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิภายในกล่องเก็บตัวอย่างอากาศ ด้วย Idea gas law, V คือ ปริมาตรของกล่องเก็บตัวอย่างอากาศ (m^3), A คือ พื้นที่หน้าตัดของกล่องเก็บตัวอย่าง



อากาศ (m^3) และ dG/dt คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยเวลา ($\text{mg m}^{-3} \text{h}^{-1}$). วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ระหว่างชุดการทดลอง ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One – way analysis of variance; One – way ANOVA)

ผลการทดลองและวิจารณ์

คุณสมบัติดินก่อนเพาะปลูก พื้นที่ศึกษา แปลงทดลองศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ จังหวัดนครราชสีมา (14 38'50"N, 101 18'40"E) ชุดดินปากช่อง เนื้อดิน ดินบนเป็นดินเหนียว ดินเหนียวปนทรายแป้ง ดินร่วนปนทรายแป้ง สีดิน สีน้ำตาลปนแดงเข้ม และสีแดง ปฏิกริยาดิน (pH) ดินบน เป็นกรดปานกลางถึงกรดเล็กน้อย (5.92-6.31) อินทรีย์วัตถุปานกลาง ถึงสูงมาก (2.20-5.15%) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในระดับสูงมาก (69.0-311.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ปริมาณ โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในระดับปานกลางถึงสูงมาก (61.15-199.90 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ชนิดพืชในพื้นที่เป็นพืชไร่

ข้อมูลอุณหภูมิตามวิทยานิพนธ์ 10 ปี (พ.ศ. 2547-2556) สถานีอุณหภูมิตามวิทยา (กลุ่มงานเกษตรปากช่อง) จังหวัด นครราชสีมา ฤดูฝน เริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคม ถึงกลางเดือนตุลาคม ฤดูหนาว ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน ถึงเดือนกุมภาพันธ์ และฤดูร้อน ตั้งแต่กลางเดือนกุมภาพันธ์ ถึงเดือนพฤษภาคม อุณหภูมิเฉลี่ย 26.28 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 72.76% และปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 1,225.1 มิลลิเมตรต่อปี

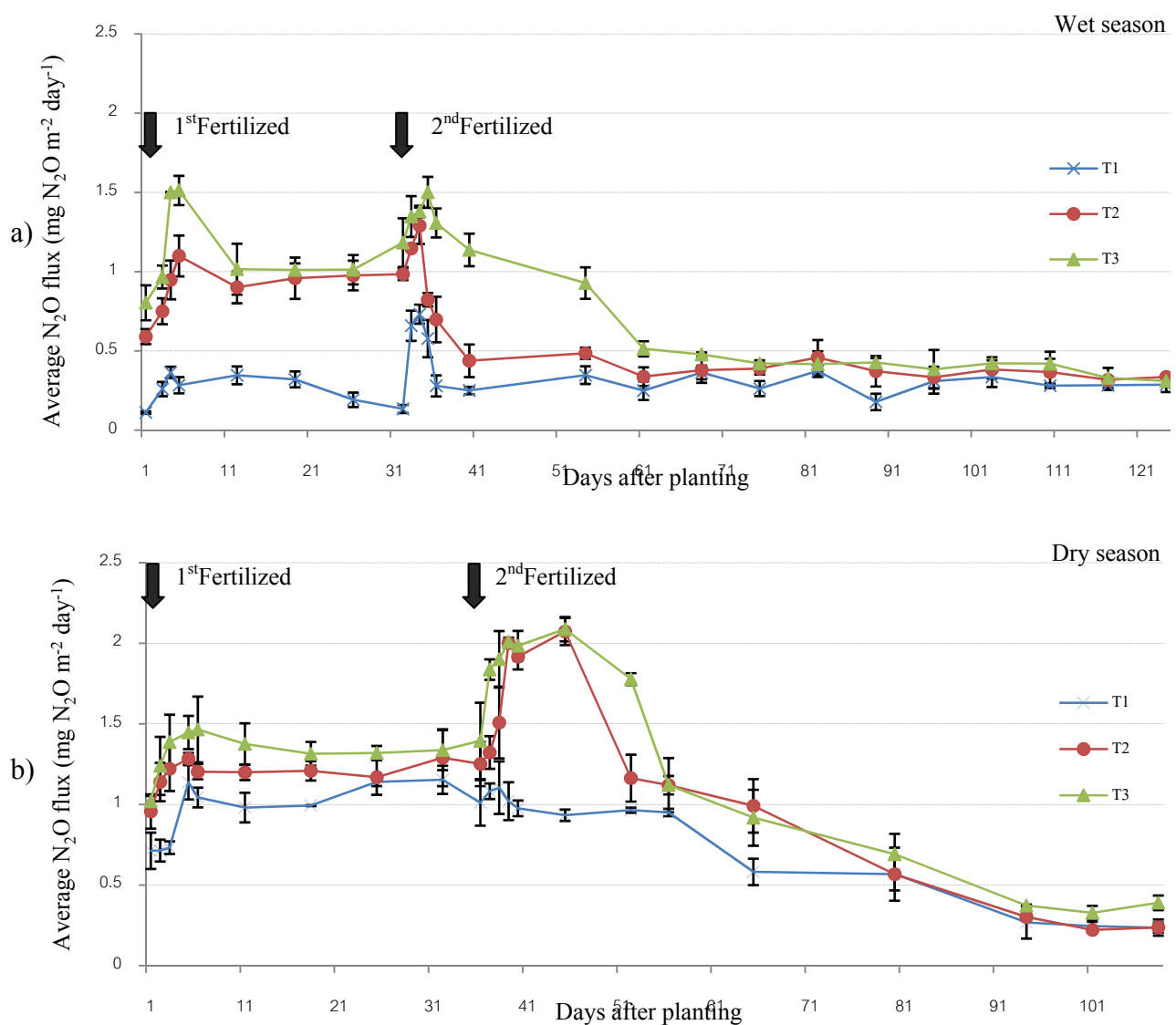
ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ย (Average N_2O flux) ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ย ตลอดการเพาะปลูกในฤดูฝน (Wet season) และฤดูแล้ง (Dry season) (ตารางที่ 1) โดยชุดการทดลองควบคุมไม่ใส่ปุ๋ย (T_1) มีค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ยต่ำสุด ทั้งสองรอบการเพาะปลูก มีค่า 0.32 ± 0.03 , 0.84 ± 0.06 มิลลิกรัม ไนตรัสออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวัน ชุดการทดลองใส่ปุ๋ยในโตรเจน 25 กิโลกรัมต่อไร่ (T_2) มีค่า 0.66 ± 0.06 , 1.15 ± 0.10 มิลลิกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวัน และชุดทดลองใส่ปุ๋ยในโตรเจน 40 กิโลกรัมต่อไร่ (T_3) มีค่าการปล่อย ก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ยสูงสุดทั้งสองรอบการเพาะปลูก 0.86 ± 0.09 , 1.31 ± 0.11 มิลลิกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อตารางเมตร ต่อวัน ตามลำดับ โดย T_2 และ T_3 มีค่าการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ย แตกต่างกับ T_1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้ง 2 รอบการเพาะปลูก ทั้งนี้ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นภายหลังใส่ปุ๋ยทั้ง 2 ระยะ โดยการใส่ปุ๋ยระยะที่ 2 ปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์มากกว่าระยะแรก (รูปที่ 1) เนื่องจากระยะที่ 2 ใส่ปุ๋ยยูเรีย (46-0-0) โรยหน้าทีผิวดินรอบลำต้น ซึ่งปุ๋ยยูเรียมีธาตุอาหารในรูปไนโตรเจน 46% มากกว่าปุ๋ยรองพื้นสูตร 16-20-0 ที่ใส่กันหลุมพร้อมหยอดเมล็ดพันธุ์ ที่มีธาตุอาหารในรูปไนโตรเจน 16% โดยปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นภายหลังใส่ปุ๋ย ประมาณ 5 วัน และมีแนวโน้มการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ลดลงจนถึงช่วงเก็บเกี่ยว ผลผลิต

ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสม (N_2O emission accumulation) ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ สะสมในรอบการเพาะปลูกฤดูฝนและฤดูแล้ง พบว่าชุดการทดลอง T_1 มีการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสมต่ำสุด มี ค่า 0.06 และ 0.13 กิโลกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อไร่ต่อรอบการเพาะปลูก ชุดทดลอง T_2 มีค่า 0.11 และ 0.17 กิโลกรัม ไนตรัสออกไซด์ต่อไร่ต่อรอบการเพาะปลูก และชุดทดลอง T_3 ปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสมปริมาณสูงสุด 0.14 และ 0.19 กิโลกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อไร่ต่อรอบการเพาะปลูก (รูปที่ 2) ทั้งนี้ พบว่าในการเพาะปลูกฤดูแล้ง มีการปล่อย ก๊าซไนตรัสออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อมมากกว่าในช่วงฤดูฝน เนื่องจากฤดูแล้งมีความชื้นของดิน จากความถี่ของจำนวน ครั้งการให้น้ำมากกว่าฤดูฝน ร่วมกับในช่วงการเพาะปลูกมีปริมาณน้ำฝนในพื้นที่สูง

ตารางที่ 1 ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ยและปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสม

ก๊าซไนตรัสออกไซด์	หน่วย	ชุดการทดลอง					
		T ₁ : Wet	T ₁ : Dry	T ₂ : Wet	T ₂ : Dry	T ₃ : Wet	T ₃ : Dry
Average ^a	mg N ₂ O m ⁻² day ⁻¹	0.32±0.03	0.84±0.06	0.66±0.06	1.15±0.10	0.86±0.09	1.31±0.11
Accumulate ^b	kg N ₂ O rai ⁻¹ crop ⁻¹	0.06	0.13	0.11	0.17	0.14	0.19

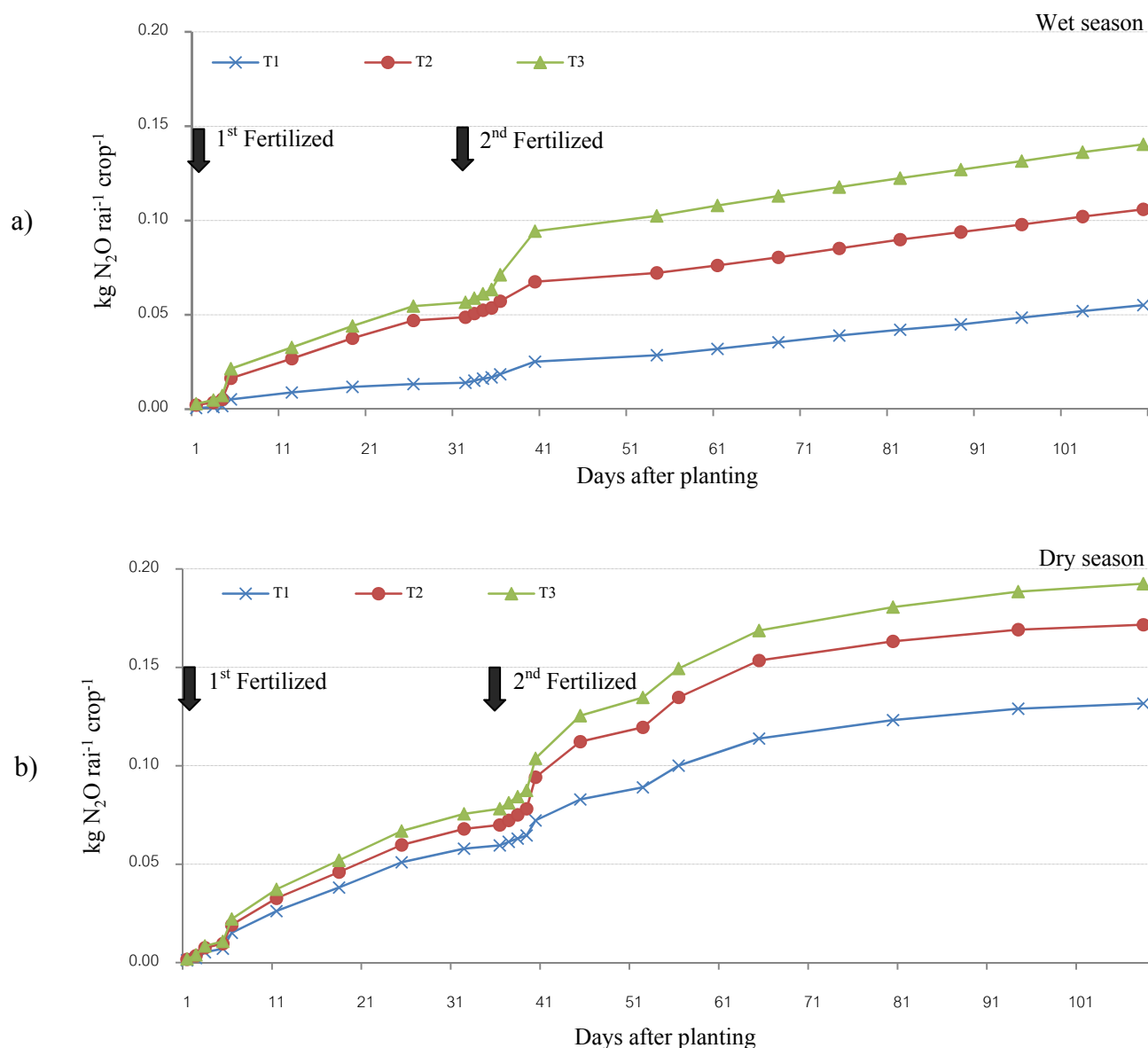
หมายเหตุ: ^a หมายถึง Average N₂O flux คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ย (มิลลิกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวัน) และ ^b หมายถึง N₂O emission accumulation คือ ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสม (กิโลกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อไร่ต่อรอบการเพาะปลูก)



รูปที่ 1 a) ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ยในฤดูฝน
b) ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ยในฤดูแล้ง



ความสูง มวลชีวภาพ และผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (ตารางที่ 2) พบว่า การเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในฤดูฝน และฤดูแล้งมีค่าแตกต่างกัน ความสูงเฉลี่ยของลำต้น T_3 มีค่าสูงสุด 2.66 ± 0.01 , 2.07 ± 0.04 เมตร T_2 มีค่า 2.58 ± 0.01 , 2.01 ± 0.01 เมตร และ T_1 มีความสูงเฉลี่ยของลำต้นน้อยสุด 2.53 ± 0.06 , 1.86 ± 0.04 เมตร ในฤดูฝนและฤดูแล้ง ตามลำดับ ซึ่งมีผลไปทางเดียวกับน้ำหนักแห้งมวลชีวภาพเฉลี่ย T_3 มีค่ามากที่สุด 436.00 ± 6.20 , 437.22 ± 11.56 กรัม รองลงมา คือ T_2 มีค่า 410.20 ± 10.90 , 307.17 ± 21.47 กรัม และ T_1 มีค่า 434.59 ± 14.45 , 367.30 ± 14.42 กรัม ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่า ปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนส่งผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะเจริญเติบโตในฤดูฝนได้ดีกว่าฤดูแล้ง ยกเว้นใน T_3 ซึ่งมีน้ำหนักแห้งมวลชีวภาพเฉลี่ยใกล้เคียงกันทั้ง 2 รอบการเพาะปลูก ในส่วนของผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ พบว่า T_3 ผลผลิตมากที่สุด ในรอบการเพาะปลูกฤดูฝน $1,440 \pm 22.44$ กิโลกรัมต่อไร่ รองลงมา คือ T_2 ในรอบการเพาะปลูกฤดูฝน $1,390 \pm 19.63$ กิโลกรัมต่อไร่ และ T_1 ให้ผลผลิตน้อยสุด 890 ± 15.87 และ 930 ± 23.96 กิโลกรัมต่อไร่ ในรอบการเพาะปลูกฤดูฝนและฤดูแล้ง ตามลำดับ โดยค่าความสูง มวลชีวภาพ และผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ T_2 และ T_3 แตกต่างกับ T_1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



รูปที่ 2 a) ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสมเพาะปลูกฤดูฝน
b) ปริมาณการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสมเพาะปลูกฤดูแล้ง

ตารางที่ 2 ความสูง ผลผลิต และมวลชีวภาพข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ตัวแปร	หน่วย	ชุดการทดลอง					
		T ₁ : Wet	T ₁ : Dry	T ₂ Wet	T ₂ Dry	T ₃ Wet	T ₃ Dry
Height	m	2.53±0.06	1.86±0.04	2.58±0.01	2.01±0.01	2.66±0.01	2.07±0.04
Dry weight	g	434.59±14.45	367.30±14.42	410.20±10.90	307.17±21.47	436.00±6.20	437.22±11.56
Yield	Kg rai ⁻¹	890±15.87	930±23.96	1,390±19.63	950±19.15	1,440±22.44	1,150±12.17

สรุป

ตลอดระยะเวลาการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ อัตราการปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์รายวันเฉลี่ย มีความผันแปรตามช่วงเวลา อันเนื่องมาจากปริมาณการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน จึงส่งผลต่อการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ทางตรง การเจริญเติบโต และผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยที่ชุดการทดลอง T₃ ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน 40 กิโลกรัมต่อไร่ ปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ยรายวันสูงสุด 0.86±0.09, 1.31±0.11 มิลลิกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวัน และมีการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสมสูงสุด 0.14, 0.19 กิโลกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อไร่ต่อรอบการเพาะปลูก ในฤดูฝนและฤดูแล้งตามลำดับ การเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในรอบฤดูฝน ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เจริญเติบโตได้ดีกว่าฤดูแล้ง โดย T₃ ให้ผลผลิตมากที่สุด 1,440±22.44 กิโลกรัมต่อไร่

ชุดการทดลอง T₂ ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน 25 กิโลกรัมต่อไร่ ให้ผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในฤดูฝนใกล้เคียงกับชุดการทดลอง T₃ ในการเพาะปลูกฤดูฝน 1,390±19.63 กิโลกรัมต่อไร่ และมากกว่าชุดการทดลอง T₃ ในการเพาะปลูกฤดูแล้ง แต่ชุดการทดลอง T₂ ปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์เฉลี่ยรายวันต่ำกว่าชุดการทดลอง T₃ โดยมีค่า 0.66±0.06, 1.15±0.10 มิลลิกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวัน ในฤดูฝนและฤดูแล้งตามลำดับ ชุดการทดลอง T₂ เป็นแนวทางการเกษตรกรรมปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่สามารถลดการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ลงได้ และให้ผลผลิตสูง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และมหาวิทยาลัยมหิดล และผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการอนุเคราะห์พื้นที่วิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] IPCC. 2007. In: Core Writing Team, Pachauri, R.K., Reisinger, A. (Eds.). Climate Change 2007: Synthesis Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland.
- [2] Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B. & Sirotenko, O. 2007. Agriculture. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ed. by B. Metz, O.R. Davidson, P.R.



Bosch, R. Dave and L.A. Meyer). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- [3] สิริทรเทพ เต๋าศระยู. 2554. ศักยภาพและแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคการเกษตร. ใน: รายงานการสังเคราะห์และประมวลสถานการณ์องค์ความรู้ด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของไทย ครั้งที่ 1: องค์ความรู้ด้านการลดก๊าซเรือนกระจก. คณะทำงานกลุ่มที่ 3 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย [สิริทรเทพ เต๋าศระยู, จันทน์ สรพิพัฒน์ และอำนาจ ชิดไชสง (บรรณาธิการ)].
- [4] Metivier, K.A., Pattey, E., Grant, R.F. 2009. Using the ecosys mathematical model to simulate temporal variability of nitrous oxide emissions from a fertilized agricultural soil. Soil Biology and Biochemistry. 41(12): 2370-2386.
- [5] Zhang, Y., Liu, J., Mu, Y., Xu, Z., Pei, S., Lun, X., 2012. Nitrous oxide emissions from a maize field during two consecutive growing seasons in the north China plain. J Environ Sci 24(1):160-168.
- [6] Bouwman, A.F. (1996) Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 46: 53-57.
- [7] Peng, S., Yang, S., Xu, J., Gao, H. 2011. Field experiments on greenhouse gas emissions and nitrogen and phosphorus losses from rice paddy with efficient irrigation and drainage management. Science China Technological Sciences. 54: 1581-1587.

The Measurement of Nitrous Oxide Emission from Maize Cultivation

Ukrit Ruangchu^a and Monthira Yuttitham^a

^aFaculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University,
Nakhon Phathom 73170, Thailand

Abstract

Field experiments were conducted during the 2014 and 2015 seasons to investigate the effect of inorganic nitrogen (N) fertilizer application on silt loam soils regarding nitrous oxide (N₂O) emissions, soil properties, biomass and maize yield. Daily N₂O emissions from three treatments: control with no fertilizer input (T1), 97 (T2) and 155 (T3) kg N ha⁻¹ were studied using the static chamber method for maize (*Zea mays* L. var. Suwan 4452) cropping in a tropical savanna climate in Nakhon Ratchasima Province, Thailand during wet and dry seasons. Results indicated that the average N₂O fluxes in the T1, T2 and T3 treatments during the wet season were 0.33, 0.65 and 0.88 mg N₂O m⁻² day⁻¹, and in the dry season 0.83, 1.11 and 1.29 mg N₂O m⁻² day⁻¹, respectively. The highest N₂O fluxes were observed in the T3 treatment, corresponding to 18–32% of N₂O emissions. Values increased sharply after 5–7 days of N fertilization. The rates for N₂O emissions in the dry season were significantly higher than in the wet season ($P < 0.05$) due to nitrification and denitrification processes and the different in maize cultivated condition such as, soil inorganic N, soil bulk density, and air temperature. With no different crop yields in the wet season, the T2 treatment had lower N₂O emissions than the T3 treatment and this fertilizer treatment could be applied for the sustainable maize farming.

Keywords: nitrous oxide flux; static chamber; maize cultivation

1. Introduction

Nitrous oxide (N₂O) is an important greenhouse gas (GHG) in the atmosphere. It also plays a significant role in ozone (O₃) depletion. With a global warming potential (GWP) 298 times greater than carbon dioxide (CO₂), N₂O is as powerful as GHG (Ravishankara *et al.*, 2009). N₂O increased to 319 ppb by 2005 from a pre-industrial concentration of 270 ppb (IPCC, 2013). N₂O emissions from agriculture represent approximately 60% of the global and 67% of the agricultural soil derived from nitrogen (N) fertilization (U.S. EPA, 2012). Generally, it is estimated that around 10–50 kg of N will be lost from the soil as N₂O for every 1,000 kg of applied N fertilizers (Shcherbak *et al.*, 2014). Agricultural soil is an important source of N₂O emission (Akiyama *et al.*, 2010). Agricultural soil N₂O emissions are affected by environment factors (seasonal climate, soil texture and physical and chemical soil properties), and by management factors (synthetic N and fertilizer application rates and types) (Synder *et al.*, 2009). N₂O is a by-product of soil nitrification and denitrification processes. Nitrification can occur under aerobic conditions. Ammonium (NH₄⁺) is oxidized and converted into nitrite (NO₂⁻) by *Nitrosomonas* sp. NO₂⁻ will be transformed into nitrate (NO₃⁻) by *Nitrobacter* sp. In contrast, denitrifying bacteria will reduce NO₃⁻ to N₂O and nitrogen (N₂) due to lack of oxygen or without oxygen in soil (Metivier *et al.*, 2009). Inorganic N application stimulates N₂O emissions by increasing substrate nitrification and denitrification. Modification of inorganic N fertilizer formulation, inorganic N fertilizer rate and/or the method of inorganic N fertilizer application have the potential to affect N₂O emission (Bijesh and Rodney, 2013).

Maize (*Zea mays* L.) is a crop that is vital to the economic development of the country. In general, maize production zones are in temperate regions with sub-tropical and tropical climates.

Maize cultivation areas in Thailand comprise 1.14–1.18 million hectares (Office of Agricultural Economics, 2016). These maize production areas are mainly distributed in the northern, central and northeastern regions of Thailand. Maize cultivation in the croplands uses excess inorganic N fertilizers, which is the main source of N₂O emission from agricultural soil.

This study aims to verify the effect of rate of N fertilizer on N₂O emission using the static chamber method, soil properties, biomass, and crop yields with maize (*Zea mays* L. var. Suwan 4452) in agricultural soil under the tropical savanna climate in Thailand, in both the wet season and dry season. This study introduced maize cultivation practices to minimize N₂O emission and applied fertilizer treatment for the sustainable maize farming.

2. Materials and Methods

2.1. Site description

The field experiments were conducted in 2014 and 2015 at the National Corn and Sorghum Research Center and the Suwan Wajokkasikit Field Crops Research Station (14° 38' N, 101° 19' E) in Pak Chong District, Nakhon Ratchasima Province, Thailand. The soil at this site was classified using the Pak Chong (Pc) soil series described as follows: a reddish, (5YR3/3) silt loam with very fine soil texture and well-drained but low ability to absorb water and a high amount of iron (Fe) oxide nodules (classification by Land Development Department). Other soil characteristics are as follows: 25.0% sand, 55.0% silt and 20.0% clay, with pH 6.12, 1.09 g cm⁻³ bulk density and 3.84% organic matter (Soil Analysis by Department of Silviculture, Faculty of Forestry, Kasetsart University).

The local climate during the experimental periods was observed from the National Corn and Sorghum Research Center, Pak Chong Agrometeorological Station, which was located 800 m from the experimental site. Daily air temperatures and rainfall are shown in Figure 1. The means for daily air temperature in 2014 and 2015 were 26.0 °C and 26.3 °C, respectively. The means for daily maximum and minimum air temperatures were 31.6 °C and 21.7 °C in 2014, and 31.9 °C and 22.0 °C in 2015, respectively. The annual rainfall accumulation amounts were 775.6 mm in 2014 and 991.9 mm in 2015.

2.2. Field experiment designs

The experiments were conducted in a field with a randomized complete block design (RCBD). The site containing twelve rectangular plots, each with a size of 6m × 10m. In all plots, maize was grown all 2 crops on July to November, 2014 represent wet season and February to June, 2015 represent dry season. The treatment with four replications conducted of the following three treatments: T1 (control and no N fertilization, but with the same irrigation as the other treatments), T2 (traditional fertilization, fertilized by rate 97 kg N ha⁻¹) and T3 (excess fertilization, fertilized by rate 155 kg N ha⁻¹). Two fertilization events were conducted with NPK fertilizers formula 16–20–0 after planted maize seeding and urea is 46–0–0 about 30–40 days after planting maize seeding cultivated as the basal fertilizer and topdressing, respectively. The maize crop cultivar used in this study was Suwan 4452 (*Zea mays* L.). Maize was planted by direct seeding at a spacing of 75cm × 20cm.

2.3. N₂O emission measurement

N₂O emissions were measured by using static chamber. Each gas sampling chamber consisted of an acrylic cover resting on a stainless steel base measuring 30cm × 30cm square open at the bottom, with sides 5cm above the ground and 10cm below the ground. The acrylic cover rested in a groove around the top of a square base filled with water as a gas seal. The

acrylic cover was black to prevent photosynthesis in plants during the gas sampling and covered with white polystyrene foam sheeting for thermal insulation.

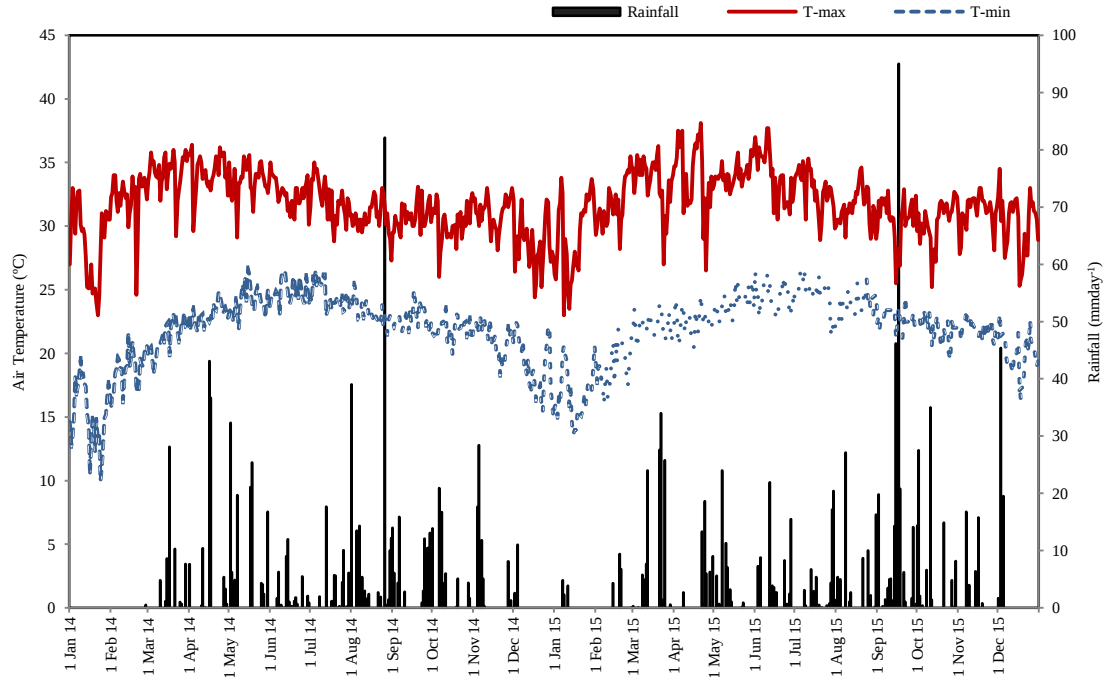


Figure 1. Dairy air temperature (maximum and minimum) and rainfall conditions during the experimental period (2014–2015) at the National Corn and Sorghum Research Center, Pak Chong Agrometeorological Station (Data observed by the National Corn and Sorghum Research Center, Pak Chong Agrometeorological Station).

Gas samples were taken from the headspace once a week with a 20ml plastic syringe and transferred to evacuated vials. From the beginning of cropping to the end of harvest, gas samples were collected every other day for 5 days after the N fertilizer period. Samples were collected from 09:00 to 11:00 AM (local time) at time intervals of 0, 10, 20 and 30 min after chamber closure. Air temperature was monitored in each chamber simultaneously while gas samples were collected. The gas concentrations were analyzed by a gas chromatograph (Agilent model 6890, Agilent Technologies, USA) equipped with an electron capture detector for measuring N_2O emission. The net emission flux of N_2O was calculated using a linear fit to the gas concentration change inside the chamber over the sampling time (Nishimura *et al.*, 2008). Gas fluxes (F) were then calculated using linear regression and ideal gas laws (Ussiri *et al.*, 2009, Eq. 1) as:

$$F = \left(\frac{\Delta g}{\Delta t} \right) \left(\rho \frac{V}{A} \right) \left(\frac{273}{T+273} \right) k \quad (1)$$

Where $\Delta g/\Delta t$ is the average rate of change in gas concentration inside the chamber ($\text{mg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$), ρ is the gas density, V is the volume of the chamber (m^3), A is the surface area circumscribed by the chamber (m^2), T is the temperature in the chamber ($^{\circ}\text{C}$) and k is the time conversion factor.

A seasonal cumulative emission of N_2O was calculated by plotting the fluxes measured each week. The combined 100-year global warming potential (GWP) of N_2O in maize planted areas was calculated using a factor of 298 times for N_2O (IPCC, 2007; Nishimura *et al.*, 2011).

2.4. Aboveground biomass sampling and crop yield analysis

In order to estimate the dry weight of the aboveground biomass of the crop harvest, 1m×1m areas in each plot were marked out and the crops collected at harvest time. These parts of biomass were dried in an oven at 80 °C for 48 h to determine dry weight. Harvested maize was used to calculate the total crop yield.

2.5. Soil sample collection and soil properties

The bulk samples of surface (0–15cm) soils, about 1 kg from each horizon (0–15cm), were air dried, gently pulverized, and sieved to a particle size < 2000µm by a stainless steel sieve before analysis. Soil pH was measured in water (pH_{H2O}) (Peech, 1965). Organic carbon (OC) and organic matter (OM) determined by a wet oxidation procedure (Walkley and Black, 1934). The ammonium (NH₄⁺) and nitrate (NO₃⁻) concentrations were analyzed by colorimetric techniques (Li *et al.*, 2014). Soil bulk density was measured in each field plot at soil depths of 0–15cm using stainless steel cylinders with a 5cm internal diameter and 5cm height. The soil cores were dried in an oven at 105 °C for 48 h.

2.6. Statistical analysis

Statistical analyses were performed utilizing IBM SPSS Statistics 20 for Windows. One-way analysis of variance (ANOVA) calculations and Duncan's Multiple-Range Test (DMRT) ($P < 0.05$) were conducted in order to categorize the effects of different N fertilizer rate treatments on seasonal N₂O emission, soil properties, biomass and crop yield.

3. Results and Discussion

3.1. Effects of N fertilizer on soil properties

3.1.1. Soil properties

The soil is classified as reddish with moderately high water permeability. Red soil develops on crystalline igneous rocks in regions with a tropical climate. Moreover, there is darker red in the top soil than the subsoil due to the accumulation of organic matter on the soil surface. Reddish soil types are typically found in tropical climate zones. The reddish tropical soil contains low activity clay and is rich in iron (Fe) and aluminum (Al) oxides. The highly-weathered reddish soil found in the northeast region of Thailand has a soil surface formed of crystalline Fe more than amorphous Fe, which is due to climate factors specific to these areas (Wisawapipat *et al.*, 2010). Fe oxide in the surface soil allows aggregate soil particles to form granular soil structures that drain water well but have low water-holding capacity (Trakoonyingcharoen *et al.*, 2012), resulting in dryness in the dry season.

The pH value is within a neutral range (6.0–7.0). It is usually moderate and has rather low fertility. The soil tends to lose moisture and nutrients rapidly. The soil is less porous that is difficult to plow and lumpy when rainfall is scarce. The soil is suitable for the cultivation of field crops, yielding especially good maize crops in the rainy season. The NH₄⁺ and urea are oxidized to nitrite (NO₂⁻) and NO₃⁻ by the nitrification process and hydrogen ion (H⁺) by-product, which make the soil acidic. However, the ability of soil to resist pH shifts, making fertilizer application impractical because of sharply decreasing soil pH due to soil pH buffering. Average soil bulk density in the dry season (1.28±0.11 g cm⁻³) is higher than in the wet season (1.18±0.07 g cm⁻³) because soil compaction does not absorb water in the dry season and there is no tillage of soil since initially preparing harrow soil for planting in the early period. Table 1 summarizes the soil properties and inorganic N in the three treatments by wet and dry seasons.

Table 1. Soil properties and inorganic N in this experiment.

Parameters	Unit	Wet season 2014			Dry season 2015		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3
Soil pH		6.48±0.15 a	6.52±0.17 a	6.55±0.16 a	6.50±0.18 a	6.60±0.19 a	6.62±0.16 a
Bulk density	g cm ⁻³	1.17±0.44 b	1.20±0.90 b	1.16±0.05 a	1.26±0.10 a	1.28±0.12 ab	1.30±0.99 b
Organic matter	%	1.08±0.19 a	1.07±0.15 a	1.04±0.20 a	1.01±0.23 a	1.01±0.13 a	0.93±0.12 a
Organic carbon	%	0.63±0.11 a	0.62±0.09 a	0.60±0.12 a	0.59±0.13 a	0.58±0.07 a	0.54±0.07 a
Ammonium	mg NH ₄ ⁺ -N kg ⁻¹	8.57±3.69 a	9.73±4.02 ab	10.42±3.34 b	7.10±3.14 a	8.42±3.09 b	10.69±2.86 c
Nitrate	mg NO ₃ ⁻ -N kg ⁻¹	29.38±10.87 a	34.85±10.12 b	39.28±11.17 c	14.85±7.73 a	26.50±14.89 b	30.45±13.67 b

Means ± standard error of mean deviation with different letters in the columns of each treatment and cropping season are significantly different at the 0.05 level ($P < 0.05$).

3.1.2. Organic matter and organic carbon

The amount of organic matter (OM) was low (0.5–1.0%) and moderately low (1.0–1.5%). OM ranged from 1.04–1.08% in the wet season and 0.93–1.01% in the dry season. The OM decreased due to the decomposition of biomass, organic materials, decayed plants, straw and animal materials that exist naturally. The organic agricultural residue and straw in the soil degrade rapidly in topsoil. As a result, the OM tends to drop after the N fertilization phase, lasting until harvest. Organic carbon (OC) has low values in top soil. Maize production has OC values ranging from 0.60–0.63% and 0.54–0.59% in the wet and dry seasons, respectively. Soil organic carbon is another soil parameter implicated in N₂O emissions (Giles *et al.*, 2012). In synthetically-fertilized soils, the OC could be an indicator of the concentrations of C substrates accessible to nitrifying and denitrifying microorganisms that produce N₂O (Charles *et al.*, 2017). Tropical climate soil is generally OC depleted due to environmental conditions favoring the decomposition and mineralization of OM and OC.

3.1.3. Inorganic nitrogen

The results of inorganic N in the soil of maize production can be detailed as ammonium (NH₄⁺) and nitrate (NO₃⁻) from mineralization process in N cycle by organic N and N fertilizer application in soil. The amount of NH₄⁺ in treatments T2 and T3 was higher than treatment T1 ($P < 0.05$) in both crops. The T3 treatment had the most NH₄⁺ in the soil at 10.42±3.34 and 10.69±2.68 mg NH₄⁺-N kg⁻¹ in the wet and dry seasons, respectively. The amount of NH₄⁺ in the soil was higher after added N fertilizer that contains N element and NH₄⁺ decreased to the end of the maize cultivation. Concerning the amount of NO₃⁻ in the soil, the results showed that the T2 and T3 treatments were higher than treatment T1 and statistically significant ($P < 0.05$). The T3 treatment added excess N fertilizer application and had the highest amount of NO₃⁻ at 39.28±11.17 and 30.45±13.67 mg NO₃⁻-N kg⁻¹ in wet and the dry seasons, respectively. Compared to the amount of NH₄⁺ in the soil, it contains a reduced proportion to the amount of NO₃⁻ in the soil. Moreover, NO₃⁻ ion is a form of N that plants can uptake, likely because NO₃⁻ has an anion the same as the soil colloids. Thus, it has less-absorbing surface soil colloids, which cause plants to uptake and leach NO₃⁻ lost to an environment more easily than NH₄⁺. OM and clay have anions that are easily attached to cations of NH₄⁺ than NO₃⁻.

The average of NH₄⁺ in soil was less than NO₃⁻ due to NH₄⁺ being oxidized to nitrite (NO₂⁻) and quickly transformed to NO₃⁻ by the nitrification process in aerobic condition. The N fertilizer inputs to the maize crops (100–275 kg N ha⁻¹) at significant amounts of 70%, which can be accounted for in plant uptake, retention/accumulation in soils and ammonia volatilization

(Borin and Tocchetto, 2007), whilst 25% was probably lost to ground water and 2–7% was lost in the denitrification process by N_2O (Zhao *et al.*, 2011).

3.2. Effect of N fertilizer on N_2O emission

In general, the nitrification process contributes to N_2O emission during the oxidation of NH_4^+ to NO_3^- after the addition of N fertilizer to the crop soil (Hou and Tsuruta, 2003). For N_2O emission during the wet season, treatment T1 had the lowest average daily N_2O emission, which was significantly different ($P<0.05$) from other treatments. N_2O emission of the T1 was 0.33 ± 0.17 , while the T2 and T3 were 0.65 ± 0.35 and 0.88 ± 0.45 $mg\ N_2O\ m^{-2}\ day^{-1}$, respectively. Concerning maize production in the dry season, treatment T1 had the lowest average daily N_2O emission, which was significantly different ($P<0.05$) from other treatments. The T1 was 0.83 ± 0.32 , while the T2 and T3 were 1.11 ± 0.53 and 1.29 ± 0.55 $mg\ N_2O\ m^{-2}\ day^{-1}$, respectively, as shown in Table 2. Average N_2O emission from the dry season was significantly ($P<0.05$) higher (1.08 ± 0.51 $mg\ N_2O\ m^{-2}\ day^{-1}$) than the wet season (0.63 ± 0.41 $mg\ N_2O\ m^{-2}\ day^{-1}$).

The N fertilizer application increased N_2O emission by increasing the availability of substrate for the nitrification process. N_2O emission by the nitrification process was found in the early period of the wet season and most of the dry season. Rainfall and air temperature stimulate the conversion of organic N to inorganic N as NH_4^+ . The results indicate that the denitrification process was the main contributor to N_2O emission in both the wet and dry seasons especially anaerobic condition in soils, while the nitrification process was responsible for the majority of N_2O emission in the dry season (Kachenchart *et al.*, 2012). N_2O background emission was found in the T1 treatment because the biotic mechanisms involved in N_2O production share substrates and were driven by common variables in both the nitrification and denitrification processes (Lagnoul *et al.*, 2017).

One distinct N_2O flux peak and the difference of emission between treatments were observed in wet and dry seasons, appearing after N fertilizer application. During this period, N_2O flux increased sharply in the basal fertilizer and topdressing over approximately 5–7 days of N fertilization, which contributed to 18–32% of N_2O emissions. Bouwman *et al.* (2002) and Huang *et al.* (2017) reported that N_2O emissions remain relatively static across a broad range of N fertilizer rates that approach crop demand levels, and then sharply increase with higher fertilizer rates. Our results showed a static range of N fertilizer rates after a sharp peak of basal fertilization and a sharp increase with the topdressing fertilization stage. N_2O flux from the topdressing fertilization released sharply trended emissions higher than the basal fertilization because the topdressing fertilization used N fertilizer as urea (46–0–0), which had 46% higher N element than the 16% of the NPK fertilizer formula 16–20–0 (Figure 2).

Table 2. Seasonal N_2O emissions, combined dry weight aboveground biomass and crop yields

Treatment	Wet season 2014			Dry season 2015		
	N_2O emission ($mg\ N_2O\ m^{-2}\ day^{-1}$)	Aboveground biomass (g)	Crop yield ($kg\ ha^{-1}$)	N_2O emission ($mg\ N_2O\ m^{-2}\ day^{-1}$)	Aboveground biomass (g)	Crop yield ($kg\ ha^{-1}$)
T1	0.33 ± 0.17 a	395.46 ± 45.14 a	5,583.33 ± 396.75 a	0.83 ± 0.32 a	319.59 ± 55.73 a	5,791.67 ± 599.00 a
T2	0.65 ± 0.35 b	402.74 ± 38.58 a	8,666.67 ± 490.65 b	1.11 ± 0.53 b	327.83 ± 47.19 b	5,958.33 ± 478.71 a
T3	0.88 ± 0.45 c	440.41 ± 14.34 a	9,000.00 ± 561.08 b	1.29 ± 0.55 c	437.22 ± 23.11 c	7,166.67 ± 304.29 b

Means $\pm$ standard error of mean deviation with different letters in the columns of each treatment and cropping season are significantly different at the 0.05 level ($P<0.05$).

N_2O emissions will be evaluated for greenhouse gas emission as well as global warming potential (GWP). N_2O emission has a GWP of 298 over 100 years, equivalent to CO_2 . In 2015,

Thailand had maize-planting areas throughout the Kingdom and in Nakhon Ratchasima Province of 1,145,000 and 108,371 hectares, respectively. N₂O emission from these maize-planting areas throughout the Kingdom was 0.26 and 0.31 Tg CO₂ eq. at N fertilizer 97 kg N ha⁻¹ and 155 kg N ha⁻¹, respectively. GWP from maize planted in the area of Nakhon Ratchasima Province was 0.02 and 0.03 Tg CO₂ eq. at N fertilizer 97 kg N ha⁻¹ and 155 kg N ha⁻¹, respectively.

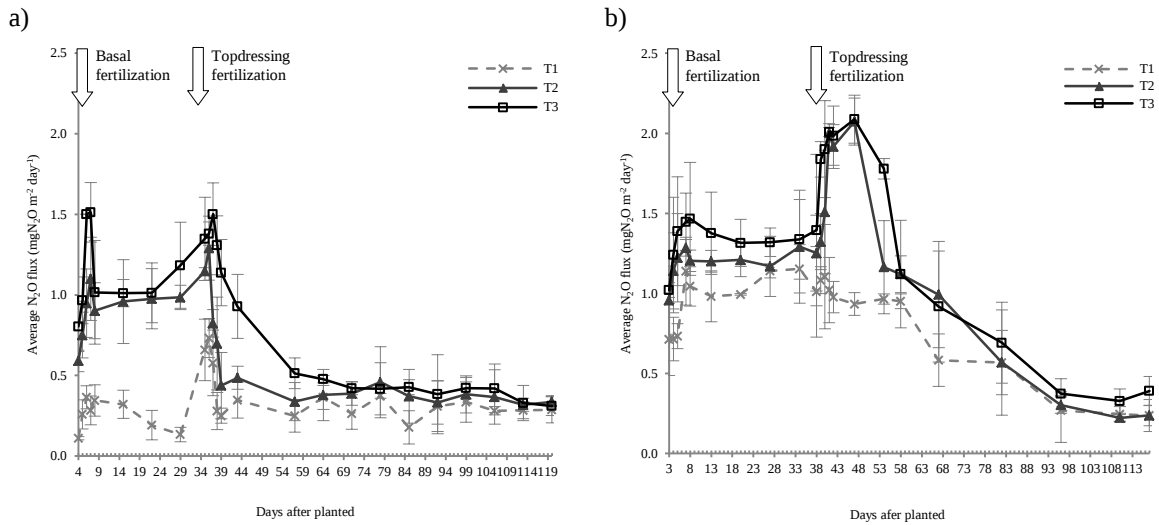


Figure 2. N₂O emission during different N fertilizer applications in wet season (a) and dry season (b).

3.3. Effect of N fertilizer on dry weight of aboveground biomass and crop yields

In the wet season, the average dry weight of above ground biomass in T1, T2, and T3 were 395.46±45.14, 402.74±38.58, and 440.41±14.34 g, respectively. For dry weight of above ground biomass in the dry season, the T1 was 319.59±55.73, while the T2 and T3 were 327.83±47.19, and 437.22±23.11 g, respectively (Table 2 and Figure 3). Statistical analysis found that the average dry weight of above ground biomass in all treatments during the wet season was not significantly different ($P>0.05$). However, it was significantly different in the dry season ($P<0.05$).

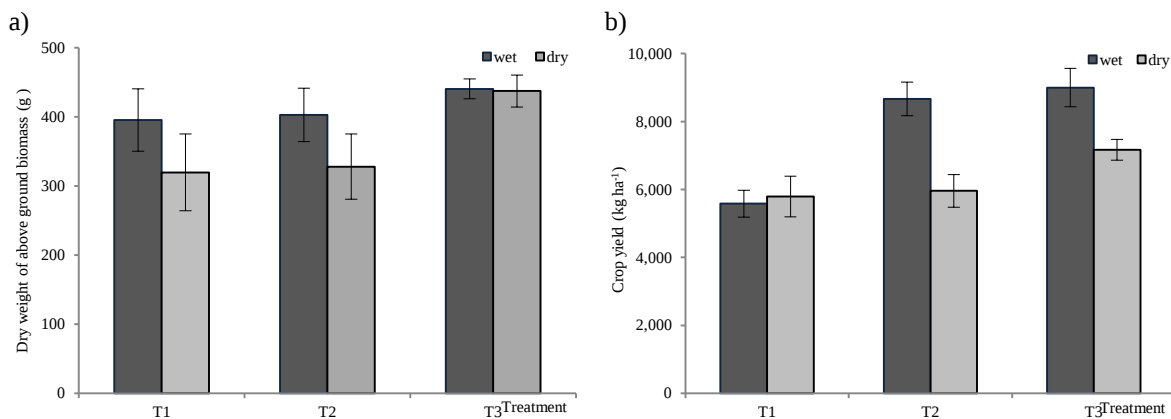


Figure 3. The Effect of N fertilizer on the dry weight of aboveground biomass (a) and crop yields (b).

In the wet season, all treatments recorded high crop yield as a result of rate of inorganic N fertilizer and heavy rainfall. These factors resulted in high crop yields. The T1 treatment was

5,583.33±396.75 kg ha⁻¹, while T2 and T3 were 8,666.67±490.65 and 9,000±561.08 kg ha⁻¹. Statistical analysis found that the crop yields for T2 and T3 were significantly different ($P<0.05$) compared to the T1. In the dry season, T1 treatment had the lowest crop yield. The T1 treatment was 5,791.67±599.00 kg ha⁻¹, while the treatments for T2 and T3 were 5,958.33±478.71 and 7,166.67±304.29 kg ha⁻¹, respectively (Figure 3). Crop yield in the dry season was less productive than in the wet season ($P<0.05$). Statistical analysis found that crop yields for the T3 were significantly different ($P<0.05$) compared to other treatments. Moreover, the pod corn in T1 in the dry season usually seedless because of lack of rainfall during the fertility stage. The rate of inorganic N fertilizer application and seasonal condition especially rainfall affect crop yields in maize cultivation.

4. Conclusion

The rates of inorganic N fertilizer application affect N₂O emissions from maize cultivation, and the T3 treatment at 155 kg N ha⁻¹ released higher N₂O fluxes compared with T1 and T2 treatments. Soil properties, especially inorganic N, soil bulk density and seasonal variations demonstrated high rates of N₂O emissions during the dry season. Fertilizer T2 treatment at 97 kg N ha⁻¹ reduced N₂O emissions compared with the T3 treatment and recorded similar aboveground biomass and crop yields during the wet season.

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to the Thailand Research Fund and Mahidol University, Thailand for providing a grant for this research. Thanks are also extended to the Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Thailand for their strong support throughout this project. Appreciation is also expressed to the National Corn and Sorghum Research Center and Suwan Wajokkasikit Field Crops Research Station, Kasetsart University, Thailand for providing the necessary permits to use the research site.

References

- Akiyama H, Yan XY, Yagi K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. *Global Change Biol* 2010; 16: 1837–46.
- Bijesh M, Rodney TV. Nitrite intensity explains N management effects on N₂O emissions in maize. *Soil biology & Biochemistry* 2013; 66: 229–38.
- Borin M, Tocchetto D. Five year water and nitrogen balance for a constructed surface flow wetland treating agricultural drainage waters. *Sci. Total Environ* 2007; 380: 38–47.
- Bouwman AF, Boumans LJM, Batjes NH. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: summary of available measurement data. *Global Biogeochem. Cycle* 2002; 16: 1–13.
- Charles A, Rochette P, Whalen JK, Angers DA, Chantigny MH, Bertrand N. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ* 2017; 236: 88–98.
- Giles M, Morley N, Baggs EM, Daniell TJ. Soil nitrate reducing processes—drivers, mechanisms for spatial variation, and significance for nitrous oxide production. *Front. Microbiol* 2012; 3: 1–16.
- Hou AX, Tsuruta H. Nitrous oxide and nitric oxide fluxes from an upland field in Japan: effect of urea type, placement, and crop residues. *Nutr. Cycl. Agroecosyst* 2003; 65: 191–200.
- Huang T, Yang H, Huang C, Ju X. Effect of fertilizer N rates and straw management on yield-scaled nitrous oxide emissions in a maize–wheat double cropping system. *Field Crops Res.* 2017; 204: 1–11.

- IPCC. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. Fourth Assessment Report (AR4). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. 2007; 212.
- IPCC. Climate Change 2013. In: Qin STF, Plattner D, Tignor GK, Allen M, Boschung SK, Nauels J, et al, editors. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA. 2013.
- Kachenchart B, Davey LJ, Nantana G, Gareth EJ, Atsamon L. Seasonal nitrous oxide emissions from different land uses and their controlling factors in a tropical riparian ecosystem. *Agric. Ecosyst. Environ* 2012; 158: 15–30.
- Li M, Zhou X, Zhang Q, Cheng X. Consequences of afforestation for soil nitrogen dynamics in central China. *Agr. Ecosyst. Environ.* 2014; 183: 40–6.
- Lognoul M, Theodorakopoulos N, Hiel MR, Regaert D, Broux F, Heinesch B. Impact of tillage on greenhouse gas emissions by an agricultural crop and dynamics of N₂O fluxes: Insights from automated closed chamber measurements. *Soil & Tillage Research* 2017; 167: 80–9.
- Metivier KA, Pattey E, Grant RF. Using the ecosysmathematical model to simulate temporal variability of nitrous oxide emissions from a fertilized agricultural soil. *Soil Biology and Biochemistry* 2009; 41: 2370–86.
- Nishimura S, Akiyama H, Sudo S, Fumoto T, Cheng W, Yagi K. Combined emission of CH₄ and N₂O from a paddy field was reduced by preceding upland crop cultivation. *Soil Sci. Plant Nutr* 2011; 57: 167–78.
- Nishimura S, Yonemura S, Sawamoto T, Shirato Y, Akiyama H, Sudo S, et al. Effect of land use change from paddy rice cultivation to upland crop cultivation on soil carbon budget of a cropland in Japan. *Agric. Ecosyst. Environ* 2008; 125: 9–20.
- Office of Agricultural Economics. Agricultural Statistics of Thailand 2015. Office of Agricultural Economics, Bangkok, Thailand. 2016.
- Peech M. Soil pH by glass electrode pH meter. *Methods of Soil Analysis. Amer. Soc. Agro. No.9. Part* 1965; 60: 914–25.
- Ravishankara AR, Daniel JS, Portmann RW. Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science* 2009; 326: 123–25.
- Shcherbak L, Millar N, Robertson GP. Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen. *P Natl Acad Sci* 2014; 111: 9199–204.
- Snyder CS, Bruulsema TW, Jensen TL, Fixen PE. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agric. Ecosyst. Environ* 2009; 133: 247–66.
- Takoonyingcharoen P, Gilkes RJ, Sangkhasila K. Factors contributing to the Clay Dispersion and Aggregate Stability of Thai Oxisols. *Walailak J. Sci. & Tech.* 2012; 9: 19–30.
- U.S. EPA. Global anthropogenic non-CO₂ greenhouse gas emissions: 1990–2030. Office of Atmospheric Programs, Climate Change Division. Washington, DC: USA. 2012.
- Ussiri DAN, Lal R, Jarecki MK. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. *Soil & Tillage Research* 2009; 104(2): 247–55.
- Walkley A, Black IA. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci* 1934; 37: 29–38.
- Wisawapipat W, Kheoruenromne I, Suddhiprakarn A, Gilkes RJ. Surface charge characteristics of variable charge soil in Thailand. *Soil Research* 2010; 48: 295–308.
- Zhao BQ, Li XY, Liu H, Wanga BR, Zhu P, Huang SM, et al. Results from long-term fertilizer experiments in China: the risk of groundwater pollution by nitrate. *Njas–Wageningen J. Life Sci* 2011; 58: 177–83.