ผลของการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดิน และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ภายใต้ระบบการปลูกข้าว

ชฎาภา ใจหมั้น

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปฐพีศาสตร์
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2564

ผลของการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดิน และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ภายใต้ระบบการปลูกข้าว

ชฎาภา ใจหมั้น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปฐพีศาสตร์
สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

ผลของการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดิน
และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก
ภายใต้ระบบการปลูกข้าว

ชฎาภา ใจหมั้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปฐพีศาสตร์

พิจารณาเห็นชอบโดย **อาจารย์ที่ปรึกษา**

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก .....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภธิดา อ่ำทอง)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(ศาสตราจารย์ ดร.อานัฐ ตันโช)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีณา นิลวงศ์)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผานิตย์ นาขยัน)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ สุทธิกุลบุตร)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว .....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)
รองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน
อธิการบดี มหาวิทยาลัยแม่โจ้
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY

ชื่อเรื่อง ผลของการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดิน และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ภายใต้ระบบการปลูกข้าว
ชื่อผู้เขียน นางสาวชฎาภา ใจหมั้น
ชื่อปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปฐพีศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภธิดา อ่ำทอง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดินและลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการปลูกข้าว ภายใต้ระบบการปลูกข้าวแบบขังและแบบเปียกสลับแห้ง ในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย เนื้อดินทรายปนร่วน ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ วางแผนการทดลอง แบบ 2x2x4 Factorial in RCBD จำนวน 4 ซ้ำ ประกอบด้วย 2 การทดลอง ซึ่งการทดลองที่ 1 ศึกษาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว สมบัติทางเคมีของดิน รวมถึงการเจริญเติบโตของต้นข้าว พบว่าการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งมีผลทำให้การปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าการจัดการน้ำแบบขังน้ำ และการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% ของข้าวระยะสุกแก่ มีค่าต่ำที่สุด 0.11 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$ และ 1.14 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ส่วนสมบัติทางเคมีของดิน เมื่อมีการใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินจะมีผลทำให้ปริมาณธาตุอาหารในดินมีค่าสูงที่สุด และค่าความเป็นกรด - ด่าง ของดินเหมาะสมต่อการผลิตข้าว ส่วนการเจริญเติบโตของต้นข้าวพบว่าในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายที่มีการใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีจะมีค่าน้ำหนักต้น น้ำหนักรากข้าว น้ำหนักรวง และความสูงของต้นข้าวสูงกว่าระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งจะพบว่าตำรับที่มีการใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินจะมีค่าสูงกว่าตำรับที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ส่วนการทดลองที่ 2 ศึกษาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว ในระยะข้าวแตกกอ ระยะข้าวตั้งท้อง ระยะข้าวออกดอก และระยะน้ำนมของข้าว รวมถึงการเจริญเติบโตทางด้านความสูง พบว่าในระยะข้าวตั้งท้อง ดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายที่มีการใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมี 100% มีการปลดปล่อยมีเทนออกมาต่ำที่สุดมีค่า 0.6 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$ ส่วนการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าในระยะข้าวตั้งท้องที่มีระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดิน

ทรายปนร่วนที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาต่ำที่สุดมีค่า 1.05 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$ และปลดปล่อยสูงที่สุดในระยะออกดอกในตำรับที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว มีค่า 51.73 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$ ส่วนการเจริญเติบโตด้านความสูงพบว่า ต้นข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำที่อายุ 20, 60 และ 80 วัน จะมีความสูงมากกว่าระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และความสูงของต้นข้าวที่ปลูกในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายทุกช่วงอายุจะมีความสูงมากกว่าเนื้อดินทรายปนร่วน ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ อีกทั้งเมื่อพิจารณาตำรับทดลอง พบว่า ตำรับที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพอัตรา 100% จะมีความสูงสูงกว่าตำรับที่ใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวและตำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ จึงสรุปได้ว่าการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินภายใต้ระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากดินที่ปลูกข้าว และยังสามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดินปลูกข้าวได้ โดยเนื้อดิน ระบบการจัดการน้ำ การใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดิน การเจริญเติบโตของต้นข้าว รวมถึงการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเราสามารถใช้เป็นแนวทางในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่จะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลสภาพภูมิอากาศได้

คำสำคัญ : ถ่านชีวภาพ, ก๊าซเรือนกระจก, การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง

Title EFFECTS OF USING BIOCHAR FOR SOIL AMENDMENTS AND REDUCING GREENHOUSE GASES EMISSIONS UNDER RICE CULTIVATION SYSTEM

Author Miss Chadapa Jaimun

Degree Master of Science in Soil Science

Advisory Committee Chairperson Associate Professor Dr. Supatida Aumtong

ABSTRACT

The main objective of this research was to study the effect of biochar as a soil amendment and for reducing methane and carbon dioxide gas emission from rice cultivated soil under logging and alternate wetting and drying water management systems in sandy clay loam and loamy sand soils, and in combination with chemical fertilizer in a 2x2x4 Factorial in RCBD experiment with four replicates in 2 treatments. Experiment 1 studied greenhouse gas emission of methane and carbon dioxide from soils planted with rice based on soil chemical properties, and rice growth. Results showed that water management of alternate wetting and drying affected the emission of methane and carbon dioxide gases in sandy clay loam which applied chemical fertilizer mixed with biochar (100%) to rice at the harvest maturity stage, gave the lowest value of 0.11 g$CH_4m^{-2}d^{-1}$ and 1.14 g$CO_2m^{-2}d^{-1}$, respectively, at a highly significant difference in statistics. On soil properties, when biochar was combined with chemical fertilizer based on soil analysis, results indicated the highest increase of availability of soil minerals and soil pH content for suitability to rice growth. As for rice plant growth, it was found that under water logging management in sandy clay loam with biochar combined with chemical fertilizer, plant weight, root weight, panicle weight and plant height were higher than in alternate wetting and drying water management. But when considering specifically alternate wetting and drying water management, results showed that in a treatment with biochar combined with chemical fertilizer, soil analysis had higher values than in a treatment

without biochar. Meanwhile, Experiment 2 studied on the emission of methane and carbon dioxide from soil planted with rice during the tillering, booting, flowering and milky stages including rice growth based on plant height. It was found that at booting stage, sandy clay loam soil planted to rice under alternate wetting and drying water management with biochar plus chemical fertilizer (100%), gave the lowest methane emission at 0.6 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$. On the emission of carbon dioxide gas, it was found that during the booting stage under alternate wetting and drying water management in loam sandy soil with chemical fertilizer combined with biochar (100%), emission of carbon dioxide gas was the lowest at 1.05 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$ but highest emission occurred at the flowering stage with only chemical fertilizer at 51.73 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$. On rice growth based on plant height, it was found that under water logging management, rice plants at 20, 60 and 80 days old, gave significantly taller rice plants than those under alternate wetting and drying water management. And, plant height of rice in sandy clay loam soil at every ages were found higher than plants in sandy loam soil, with highly significant difference in statistics. Moreover, when considering the treatments, results indicated that in treatment where chemical fertilizer was combined with biochar (100%), plant heights were higher than rice plants in treatment with chemical fertilizer only and in treatment without both chemical fertilizer and biochar, with highly significant difference in statistics. Thus in summary, the use of biochar in combination with chemical fertilizer upon soil analysis under alternate wetting and drying water management, could reduce emission of methane and carbon dioxide gases from soils planted with rice and could be used as a soil amendment material to increase availability of mineral nutrients in the paddy soil with soil texture, water management, use of biochar combined with chemical fertilizer, affecting the changes in soil properties, growth of rice plants and emission of methane and carbon dioxide gases, thus could be a guideline for reducing greenhouse gas emission so as to counteract changes in atmospheric conditions.

Keywords : biochar, greenhouse gas, alternate wetting and drying water management

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภธิดา อ่ำทอง ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและตรวจสอบข้อบกพร่อง เพื่อให้การแก้ไขเป็นไปอย่างถูกต้องสมบูรณ์ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต โชติอมรศักดิ์ ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้รับคำแนะนำ และคำปรึกษาในการเขียนวิทยานิพนธ์ จากศาสตราจารย์ ดร.อานัฐ ตันโช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีณา นิลวงศ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผานิช นาขยัน เป็นกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอกราบขอบพระคุณโครงการการจัดการทางการเกษตรเพื่อลดผลกระทบและตั้งรับการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศ ปีงบประมาณ 2561 ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ซึ่งทางผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการประจำสาขาปฐพีศาสตร์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ทุกท่านที่ให้คำแนะนำสั่งสอน เอื้อเฟื้อสถานที่ตลอดการปฏิบัติงานสำหรับทดลอง จนงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อทูน คุณแม่มิ่งมิตร ใจหมั้น ที่ได้ให้การอบรมสั่งสอน คอยเป็นกำลังใจ และแรงผลักดันเสมอมา ตลอดจนให้การสนับสนุนทุนทรัพย์ในการศึกษาเล่าเรียนมาโดยตลอด ขอบพระคุณครอบครัวมีชัย ทีให้การสนับสนุน ช่วยเหลือ ในทุก ๆ ด้าน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา รวมถึงเพื่อน ๆ พี่ น้อง ผู้มีส่วนช่วยเหลือทุกท่านที่ไม่สามารถกล่าวนามมาได้ทั้งหมด ที่ช่วยเหลือแนะนำช่วยแก้ไขปัญหาในระหว่างการทดลองตลอดการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ หากมีข้อบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้ และความดีอันเกิดจากประโยชน์จากการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้ที่มีพระคุณทุกท่าน และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนผู้ที่สนใจจะศึกษาในอนาคตต่อไป

ชฎาภา ใจหมั้น

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ช
สารบัญ ..... ซ
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญภาพ ..... ฐ
สารบัญตารางผนวก ..... ฑ
สารบัญภาพผนวก ..... ฒ
บทที่ 1 บทนำ 1
ความสำคัญของปัญหา 1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
ขอบเขตของการวิจัย 3
บทที่ 2 ตรวจเอกสาร 4
ถ่านชีวภาพ (Biochar) 4
คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ 4
การใช้ถ่านชีวภาพ (Biochar) ในการลดก๊าซเรือนกระจกจากดิน 5
ดินปลูกข้าว 6
สมบัติบางประการของดินปลูกข้าว 8
ก๊าซเรือนกระจก 17
บทที่ 3 วิธีการวิจัย 21

อุปกรณ์ในการวิจัย 23
วิธีการ 27
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ 33
สมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง 33
สมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง 33
สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ 34
สมบัติทางเคมีของดินปลูกข้าวหลังการทดลอง 40
บทที่ 5 สรุป 71
บรรณานุกรม 73
ภาคผนวก 78
ภาคผนวก ก อุปกรณ์และวิธีเก็บตัวอย่างก๊าซภาคสนาม 79
ภาคผนวก ข วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้เผาถ่านชีวภาพ 85
ภาคผนวก ค เกณฑ์มาตรฐานของค่าวิเคราะห์ดิน 87
ภาคผนวก ง รูปภาพการทดลอง 90
ประวัติผู้วิจัย 95

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ระดับธาตุอาหารหลัก และธาตุอาหารรองรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน (USDA)..... 10

ตารางที่ 2 ระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH 1 : 1) Land Classification Division and FAO Project Staff (1973) 10

ตารางที่ 3 ระดับความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange Capacity) 12

ตารางที่ 4 ระดับอินทรียวัตถุ (organic matter) (% organic carbon x 1.724) 13

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์เนื้อดิน..... 33

ตารางที่ 6 สมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง 33

ตารางที่ 7 สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพจากแกลบ 35

ตารางที่ 8 การปลดปล่อยก๊าซ CH_4 และ CO_2 ในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD) ของดินปลูกข้าวในระยะข้าวออกดอก (Flowering) และระยะสุกแก่ (Harvest maturity) 36

ตารางที่ 9 การปลดปล่อยก๊าซ CH_4 และ CO_2 ในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand) ของดินปลูกข้าวในระยะข้าวออกดอก (Flowering) และระยะสุกแก่ (Harvest maturity) 37

ตารางที่ 10 การปลดปล่อยก๊าซ CH_4 และ CO_2 ของดินปลูกข้าวในระยะข้าวออกดอก (Flowering) และระยะสุกแก่ (Harvest maturity) เมื่อมีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 38

ตารางที่ 11 การปลดปล่อยก๊าซ CH_4 และ CO_2 ของดินปลูกข้าวในระยะข้าวออกดอก (Flowering) และระยะสุกแก่ (Harvest maturity) 39

ตารางที่ 12 สมบัติทางเคมีของดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD) หลังการทดลอง เมื่อข้าวอายุ 100 วัน 41

ตารางที่ 13 สมบัติทางเคมีของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand) ที่ใช้ปลูกข้าวหลังการทดลอง เมื่อข้าวอายุ 100 วัน 42

ตารางที่ 14 สมบัติทางเคมีของดินปลูกข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพหลังการทดลอง เมื่อข้าวอายุ 100 วัน 43

ตารางที่ 15 สมบัติทางเคมีของดินปลูกข้าวหลังการทดลอง เมื่อข้าวอายุ 100 วัน 46

ตารางที่ 16 Carbon fraction ของดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD) เมื่อข้าวอายุ 100 วัน 47

ตารางที่ 17 Carbon fraction ของดินปลูกข้าวที่ปลูกในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand) เมื่อข้าวอายุ 100 วัน 48

ตารางที่ 18 Carbon fraction ของดินปลูกข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ เมื่อข้าวอายุ 100 วัน 48

ตารางที่ 19 Carbon fraction ของดินปลูกข้าว เมื่อข้าวอายุ 100 วัน 50

ตารางที่ 20 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD)55

ตารางที่ 21 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวที่ปลูกในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand) 55

ตารางที่ 22 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 56

ตารางที่ 23 น้ำหนักแห้งของต้นข้าว 57

ตารางที่ 24 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินปลูกข้าว ที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD) 59

ตารางที่ 25 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินปลูกข้าวที่ปลูกในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand) 60

ตารางที่ 26 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินปลูกข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 61

ตารางที่ 27 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินปลูกข้าว 63

ตารางที่ 28 การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว ที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD) 64

ตารางที่ 29 การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว ที่ปลูกในเนื้อดินร่วนเหนียว ปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand) 65

ตารางที่ 30 การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 65

ตารางที่ 31 การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว 67

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพจากแกลบ (Kearns et al., 2008) เมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 6

ภาพที่ 2 การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งสำหรับการปลูกข้าว 16

ภาพที่ 3 การปลดปล่อยมีเทนและไนตรัสออกไซด์จากนาข้าว 19

ภาพที่ 4 กรอบแนวความคิดเกี่ยวกับงานวิจัย 22

ภาพที่ 5 (a) ก๊อกเปิด-ปิด การเข้าออกของก๊าซ (b) การติดเทอร์โมมิเตอร์ภายในกล่องอะคริลิค .. 26

ภาพที่ 6 การปลูกข้าวโดยใช้เทคนิคการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง 29

ภาพที่ 7 ถ่านชีวภาพจากแกลบ (ก.) และถ่านชีวภาพที่ร่อนผ่านตะแกลง 0.25 มม.(ข.)..... 34

ภาพที่ 8 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย 52

ภาพที่ 9 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วน..... 52

ภาพที่ 10 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง ของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย 53

ภาพที่ 11 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน..... 54

ภาพที่ 12 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย..... 68

ภาพที่ 13 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วน 69

ภาพที่ 14 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย 69

ภาพที่ 15 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน..... 70

สารบัญตารางผนวก

หน้า

ตารางผนวกที่ 1 ระดับธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน (USDA) 88

ตารางผนวกที่ 2 ระดับความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange Capacity) 88

ตารางผนวกที่ 3 ระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH 1 : 1) Land Classification Division and FAO Porject Staff (1973) 89

ตารางผนวกที่ 4 ระดับอินทรียวัตถุ (organic matter) (% organic carbon x 1.724) 89

สารบัญภาพผนวก

หน้า

ภาพผนวกที่ 1 กล่องเก็บตัวอย่างก๊าซสำหรับเก็บก๊าซในดินปลูกข้าว 80
ภาพผนวกที่ 2 อุปกรณ์ดูดตัวอย่างก๊าซ 81
ภาพผนวกที่ 3 วาล์ว / ก๊อก เปิด-ปิด พร้อมโอริง 81
ภาพผนวกที่ 4 สายซิลิโคน 81
ภาพผนวกที่ 5 กล่องเก็บตัวอย่างก๊าซ 82
ภาพผนวกที่ 6 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างก๊าซ 83
ภาพผนวกที่ 7 เครื่อง Gas Chromatography (GC) 84
ภาพผนวกที่ 8 ถังสำหรับเผาถ่านชีวภาพ 86
ภาพผนวกที่ 9 ถ่านชีวภาพจากแกลบข้าว 86
ภาพผนวกที่ 10 การจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) 91
ภาพผนวกที่ 11 การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (AWD) 92
ภาพผนวกที่ 12 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย .. 93
ภาพผนวกที่ 13 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วน 93
ภาพผนวกที่ 14 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง ของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย 93
ภาพผนวกที่ 15 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน 94

บทที่ 1
บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกในปัจจุบัน ส่งผลให้เกิดสภาวะโลกร้อน ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการดำเนินกิจกรรมของมนุษย์ โดยในกลุ่มก๊าซเรือนกระจกหลักๆ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) และไนตรัสออกไซด์ (N_2O) (Jones and Briffa, 1992) ซึ่งการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างต่อเนื่องนี้มีทั้งการใช้พลังงาน การทำการเกษตร การขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม การขนส่ง รวมถึงการทำลายทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ล้วนเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดภาวะโลกร้อนที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (ศูนย์ข้อมูลก๊าซเรือนกระจก องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก), 2559) ซึ่งภาคการเกษตรจัดเป็นส่วนหนึ่งของการปลดปล่อยก๊าซ เช่น การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในนาข้าว เนื่องจากนาข้าวมีการขังน้ำ และมีเศษซากวัสดุอินทรีย์ ไม่ว่าจะเป็น ฟางข้าว ตอซังข้าว วัชพืชต่าง ๆ นอกจากจะเป็นแหล่งของคาร์บอนอินทรีย์ที่สำคัญต่อการปรับปรุงดินแล้ว ขณะเดียวกันยังเป็นแหล่งสารตั้งต้นคาร์บอนที่สำคัญต่อการผลิตก๊าซเรือนกระจกในนาข้าว (Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996) ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยจากนาข้าวส่วนใหญ่ คือก๊าซมีเทน ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินนา ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน คือ สภาพไร้อากาศ และสารอินทรีย์ที่อยู่ในนาข้าว ดังนั้น จึงมีแนวคิดที่ว่า หลังจากการขังน้ำในนาข้าว จะทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ออกสู่บรรยากาศได้โดยการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างในลำต้นข้าวและดิน ซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากนาข้าว เช่น อิทธิพลของพันธุ์ข้าว การจัดการน้ำ การจัดการฟางข้าว การใช้ปุ๋ย และการเติมอินทรียวัตถุในดิน เป็นต้น ดังนั้น ถ้ามีการจัดการเกษตรกรรมที่เหมาะสม จะสามารถเพิ่มการกักเก็บคาร์บอนในรูปของอินทรีย์วัตถุ และลดการปลดปล่อยคาร์บอนในรูปก๊าซเรือนกระจกได้เป็นอย่างดี ซึ่งปัจจุบันมีองค์ความรู้เกี่ยวกับการลดคาร์บอนโดยใช้ถ่านชีวภาพ (Biochar) ในการเกษตรเพื่อลดความเสื่อมสภาพดิน เป็นการปรับปรุงดินให้สมบูรณ์ นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังเป็นวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากมวลชีวภาพที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร ที่ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนโดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือใช้น้อยมาก (Pyrolysis) ถ่านชีวภาพช่วยปรับสภาพดินมีสถานะเป็นประจุลบอยู่บนพื้นผิว จึงทำให้สามารถดูดซับ หรือจับธาตุอาหารที่เป็นบวกได้ดี อีกทั้งมีพื้นที่ผิวภายในสูงมาก แต่อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ และอุณหภูมิในการเผา นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังมีความคงตัวสูง และทำให้

ถูกย่อยสลายได้ยาก เป็นวัสดุที่สามารถช่วยกักรักษาเก็บคาร์บอนไว้ในดิน จึงกล่าวได้ว่าถ่านชีวภาพ มีความสามารถลดการเกิดก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น CO_2 และ CH_4 ที่เป็นสาเหตุของภาวะเรือนกระจก และการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศได้ (ศูนย์ข้อมูลก๊าซเรือนกระจก องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.), 2559) และการจัดการน้ำที่เหมาะสมก็เป็นปัจจัยสำคัญในการปลูกข้าว แต่การปลูกข้าวนั้นจะต้องใช้น้ำมากกว่าธัญพืชชนิดอื่น ๆ ประมาณ 2-3 เท่า จึงมักมีการขังน้ำในแปลงนา ซึ่งการขังน้ำนี้เป็นแหล่งตั้งต้นของการสะสมคาร์บอนที่สำคัญต่อการผลิตก๊าซเรือนกระจกในนาข้าวได้ ซึ่งการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate wetting and drying management; AWD) เป็นวิธีหนึ่งที่นอกจากจะลดปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าวแล้ว ยังสามารถลดการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มักพบในดินน้ำขัง ซึ่งเป็นสาเหตุของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในดินปลูกข้าวได้ (ศุภธิดา, 2560) จึงนำมาสู่การศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดิน และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากดินปลูกข้าว เพื่อศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพ ที่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากดินปลูกข้าว และศึกษาผลของการจัดการน้ำแบบขังน้ำและการจัดการน้ำแบบปียกสลับแห้ง ที่มีต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก รวมถึงผลของการใช้ถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวในเนื้อดินที่มีลักษณะต่างกัน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดินที่ใช้ในการปลูกข้าว
2. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติดินและการเจริญเติบโตของต้นข้าวหลังใช้ถ่านชีวภาพภายใต้ระบบการปลูกข้าว
3. ศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพ และการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ จากดินปลูกข้าว

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง เป็นแนวทางลดปริมาณการใช้น้ำรวมถึงลดการปลดปล่อยก๊าซ CO_2 และCH_4 จากดินปลูกข้าว ที่เป็นสาเหตุของภาวะเรือนกระจกและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ
2. สามารถใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดินและเพิ่มประสิทธิภาพผลผลิตจากการปลูกข้าว

3. ทำให้ทราบผลการปลดปล่อยก๊าซ (CO_2,CH_4) คุณสมบัติของดิน รวมถึงการเจริญเติบโตของต้นข้าวหลังจากการใช้ถ่านชีภาพ

4. เพื่อนำผลจากการทดลองที่ได้ไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดิน และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่จะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดินและลดการปลดปล่อยก๊าซเรือกระจกภายใต้ระบบการปลูกข้าว ดำเนินการทดลองปลูกข้าวสายพันธ์สันป่าตอง 1 ในกระถาง โดยมีปัจจัยที่ศึกษา คือ เนื้อดิน (ดินร่วนเหนียวปนทรายและดินทรายปนร่วน) การจัดการน้ำ (การจัดการน้ำแบบขังน้ำและการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง) การใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีตามอัตราค่าวิเคราะห์ดิน โดยมีวิธีการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว เมื่อข้าวอยู่ในระยะออกดอก และระยะข้าวสุกแก่ รวมถึงศึกษาสมบัติทางเคมีของดินและการเจริญเติบโตของต้นข้าวหลังจากมีการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีตามอัตราค่าวิเคราะห์ดิน ดำเนินการระหว่างวันที่ 22 มกราคม ถึง วันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2561

2. ศึกษาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์รวมถึงการเจริญเติบโตของต้นข้าว ในระยะแตกกอ ระยะข้าวตั้งท้อง ระยะข้าวออกดอก และระยะน้ำนมข้าวของข้าว รวมถึงการเจริญเติบโตทางด้านความสูง ดำเนินการระหว่างวันที่ 23 เมษายน ถึง วันที่ 10 สิงหาคม พ.ศ. 2561

บทที่ 2
ตรวจเอกสาร

ถ่านชีวภาพ (Biochar)

ถ่านชีวภาพ (Biochar) เป็นวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอนผลิตจากมวลชีวภาพ (Biomass) ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือใช้น้อยมาก (Pyrolysis) (อรสา, 2552) มีการใช้ถ่านชีวภาพ ในการทำการเกษตรเพื่อลดความเสื่อมสภาพของดิน ซึ่งเป็นการปรับปรุงดินให้มีความอุดมสมบูรณ์ เพราะถ่านชีวภาพ จะมีประจุที่ช่วยในการดูดซับธาตุอาหาร และลดการสูญเสียไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในดิน นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังช่วยเก็บกักคาร์บอนลงดิน ตัดวงจรในการกลับสู่ชั้นบรรยากาศของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถือเป็นการลดก๊าซเรือนกระจกจากดินที่มีการเพาะปลูก และช่วยขจัดก๊าซมีเทน (CH_4) ได้ ซึ่งหลักการผลิตถ่านชีวภาพ จำแนก 2 วิธี คือ

1. การแยกสลายอย่างช้าที่อุณหภูมิเฉลี่ย 500 องศาเซลเซียส จะได้ผลผลิตของถ่านชีวภาพมากกว่า 50 % โดยใช้เวลาเป็นชั่วโมง
2. การแยกสลายอย่างเร็วที่อุณหภูมิเฉลี่ย 700 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาเป็นวินาที ผลผลิตที่ได้ จะเป็นน้ำมันชีวภาพ (Biofuel) 60 % ก๊าซสังเคราะห์ (Syngas) 20 % และถ่านชีวภาพ 20 % ถ่านชีวภาพ จึงเป็นถ่านที่ใช้ประโยชน์ เพื่อกักเก็บคาร์บอนลงในดิน และปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

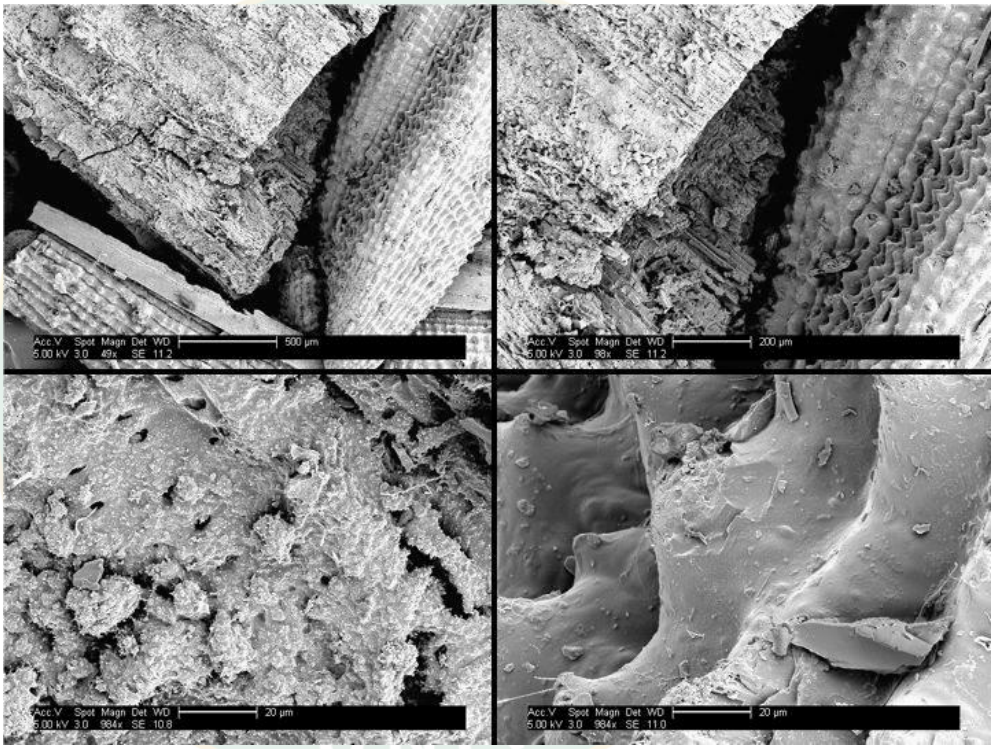
คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ คือ มีรูพรุนตามธรรมชาติ เมื่อใส่ลงในดิน จะช่วยเพิ่มช่องว่างอากาศ การซึมของน้ำ การอุ้มน้ำ ดูดยึดธาตุอาหาร เป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ ลดความเป็นกรดของดิน เนื่องจากถ่านชีวภาพ มีรูเป็นโพลง เมื่อนำถ่านชีวภาพมาผสมกับปุ๋ยหมัก หรือปุ๋ยคอก จะช่วยเก็บธาตุอาหารจากปุ๋ย และเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์จึงช่วยปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชได้นาน ซึ่งเป็นการลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเพิ่มผลผลิต นับเป็นเทคโนโลยีที่สามารถพัฒนาได้ตั้งแต่ระดับเกษตรกรครัวเรือนและชุมชน และถ่านชีวภาพ มีสมบัติเป็นคาร์บอน ที่มีความเสถียรสูง (Wu *et al.*, 2016) มีพื้นที่ผิวเป็นรูพรุน ช่วยดูดซับธาตุอาหาร และกักเก็บคาร์บอนตัดวงจรการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ถ่านชีวภาพเป็นคาร์บอน ที่มีความทนทานต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และสูญ

หายไปจากดินได้ยาก จึงทำให้สะสมอยู่ในดินได้นาน ซึ่งจะเป็นการเพิ่มคาร์บอนให้แก่ดินแทนที่จะเผาให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อันเป็นตัวการหนึ่งของก๊าซเรือนกระจก และเกิดภาวะโลกร้อน

การใช้ถ่านชีวภาพ (Biochar) ในการลดก๊าซเรือนกระจกจากดิน

ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอนผลิตจากมวลชีวภาพ ผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนโดยไม่ใช้ออกซิเจน หรือใช้น้อยมาก ซึ่งถ่านชีวภาพช่วยลดการเกิดก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นการบรรเทาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ เนื่องจากถ่านชีวภาพ สามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในระยะยาวได้ด้วยการกักเก็บคาร์บอนในดิน ช่วยปรับปรุงดิน และเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากเมื่อนำถ่านชีวภาพลงดิน ลักษณะความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพ จะช่วยกักเก็บน้ำ และธาตุอาหารในดิน และเป็นที่อยู่ให้กับจุลินทรีย์สำหรับทำกิจกรรม เพื่อสร้างธาตุอาหารให้ดิน เมื่อดินอุดมสมบูรณ์ จะส่งผลให้ผลผลิตทางการเกษตรเพิ่มขึ้น ช่วยผลิตพลังงานทดแทน ซึ่งเป็นพลังงานทางเลือก เนื่องจากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากมวลชีวภาพเป็นการแยกสลายด้วยความร้อน จะให้พลังงานชีวภาพ ที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทน เพื่อการขนส่ง และในระบบอุตสาหกรรมได้ อาทิ เชื้อเพลิงชีวภาพ และยังสามารถได้รับการพัฒนาเพื่อการพาณิชย์ในด้านต่าง ๆ เช่น กระแสไฟฟ้า การสกัดสารชีวภาพ และองค์ประกอบของยา เป็นต้น อีกทั้งยังช่วยในกระบวนการจัดการของเสียประเภทอินทรียวัตถุได้ เนื่องจากเทคโนโลยีถ่านชีวภาพ มีศักยภาพในการกำจัดของเสีย โดยเฉพาะการกำจัดกลิ่นทำให้เกิดสิ่งแวดล้อมเป็นมิตรได้ โดยพัชรี และคณะ (2558) ได้ศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพยูคาลิปตัส และฟางข้าว เพื่อการผลิตข้าว และลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์อย่างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ผลการศึกษาพบว่า การใช้ถ่านชีวภาพ อัตรา 1- 4 ตันต่อไร่ ทำให้ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซเรือนกระจก (GHG) จากการผลิตข้าวลดลง เมื่อเทียบกับตำรับควบคุม และเมื่อนำมาใช้ร่วมกับการไถกลบเดิม จะทำให้มีการกักเก็บก๊าซเพิ่มขึ้น และยังสามารถช่วยลดปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อหน่วยผลผลิตข้าวได้ และโครงการลดคาร์บอนที่ประสบความสำเร็จจากกรณีศึกษาของประเทศญี่ปุ่น เมือง Kameoka ที่ใช้ถ่านชีวภาพในการเกษตร เพื่อลดความเสื่อมสภาพดิน และยังช่วยกักเก็บคาร์บอนลงดิน เพื่อตัดวงจรการกลับสู่ชั้นบรรยากาศของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นับเป็นการลดก๊าซเรือนกระจก เพราะลดการแพร่กระจายของ ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ประมาณ 50 – 80% จากดินที่มีการเพาะปลูก และยังช่วยขจัดก๊าซมีเทนได้ (ศูนย์วิจัยธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร, 2559) ส่วน Seehausen *et al.* (2017) กล่าวว่าในดินที่มีการปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพ สามารถลดการปล่อย N_2O ได้ถึง 90% และ Case (2013) กล่าวว่า ถ่านชีวภาพ ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในดินเป็นเวลาสองปีในดินที่ทำการเพาะปลูกมานาน

การใช้ถ่านชีวภาพยังช่วยเพิ่มคาร์บอนให้กับดิน ป้องกันการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสารชีวภาพขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ และช่วยให้พืชดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างช้า ๆ ในขณะที่พืชสังเคราะห์แสง เพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของพืชให้ดีขึ้น ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี มีคุณภาพผลผลิตที่ดีขึ้น (Uvarov, 2000) ถ่านชีวภาพสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในระยะยาวได้ด้วยการชะลอการปลดปล่อยออกจากดิน ซึ่งถือเป็นการกักเก็บคาร์บอนไว้ในดิน ลดภาวะการเกิดก๊าซเรือนกระจกเป็นการบรรเทาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศของโลกได้ (Prabha *et al.*, 2013)



ภาพที่ 1 ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพจากแกลบ (Kearns *et al.*, 2008) เมื่อตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ดินปลูกข้าว

ดินที่ใช้ปลูกข้าว (Paddy soils) คือ ดินที่ใช้ปลูกข้าวในสภาพน้ำขัง ดังนั้น ดินอะไรก็ได้ที่อยู่ในพื้นที่ที่มีน้ำเพียงพอ และปลูกข้าวได้อย่างน้อย 1 ครั้ง ใน 1 ปี และมีอุณหภูมิเหมาะสม จะเรียกว่า paddy soil ดังนั้นคำว่าดินที่ใช้ปลูกข้าวในสภาพน้ำขัง จะสัมพันธ์กับการใช้ประโยชน์ที่ดินมากกว่าชนิดของดิน แต่คำว่า paddy soil ก็ยังมีผู้นิยมใช้มากกว่า rice soil หรือ submerged soil คำว่า

rice soil มีความหมายทั้งดินที่ใช้ปลูกข้าวในสภาพน้ำขัง และสภาพไร่ คำว่า submerged soil แสดงถึงสภาพของดินที่มีน้ำขัง (ทัศนีย์, 2550) ซึ่งดินที่ใช้ปลูกข้าว จะแตกต่างจากดินที่ใช้ปลูกพืชไร่ก็คือลักษณะของการที่มีน้ำขัง ประมาณ 80% ของพื้นที่ที่ปลูกข้าวในโลก จะปลูกในสภาพน้ำขัง ถึงแม้ว่าจะมีพันธุ์ข้าวที่ปลูกได้ตั้งแต่ข้าวขึ้นน้ำจนถึงข้าวไร่ เนื่องจากข้าวไร่ให้ผลผลิตต่ำ ดังนั้นการปลูกข้าวไร่จึงกระทำในพื้นที่ที่ไม่สามารถขังน้ำได้ แต่สภาพของการที่มีน้ำขังมีประโยชน์ต่อข้าว คือ มีธาตุอาหารต่าง ๆ ละลายอยู่ในน้ำที่ให้แก่ข้าว เนื่องจากข้าวเป็นพืชที่ใช้น้ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับพืชไร่อื่น ๆ จึงทำให้ข้าวที่ปลูกในสภาพน้ำขังได้รับธาตุอาหารจากน้ำในปริมาณที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในพื้นที่ที่ลาดชัน การขังน้ำช่วยกำจัดวัชพืช แบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค และไส้เดือนฝอย ไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ในสภาพน้ำขัง การขังน้ำช่วยรักษาอุณหภูมิให้กับข้าวที่อาจเกิดความเสียหาย การเกิดรีดักชัน เนื่องจากสภาพที่มีน้ำขัง ทำให้ฟอสเฟตและเหล็กละลายออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชมากขึ้น ไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียม และดูดซับอยู่ที่อนุภาคของดินเหนียว ซึ่งข้าว สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของไนเตรทในน้ำใต้ดิน จุลินทรีย์ที่ตรึงไนโตรเจนที่อยู่ในสภาพน้ำขังเจริญเติบโต และทำงานได้ดีในนาข้าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเขตร้อนชุ่มชื้น ธาตุอาหารที่ละลายอยู่ในน้ำ สามารถเคลื่อนที่ไปยังรากข้าว และทำให้ข้าวดูดไปใช้ได้ดี ดังนั้นมักพบว่าข้าวเจริญเติบโตได้ดี ถึงแม้ว่าจะปลูกในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ (ทัศนีย์, 2550)

ลักษณะทั่วไปของดินปลูกข้าวแบบน้ำขัง (General characteristics of paddy soils) ที่มีการปลูกข้าวในสภาพพื้นที่ลุ่มดินน้ำท่วมขัง ซึ่งจะมีการปรับสภาพพื้นที่ และการเตรียมดินที่เราเรียกว่า การทำเทือก (Puddling) จากนั้นจะมีการย้ายกล้าข้าว (Transplantation) และปล่อยให้ข้าวเจริญเติบโตในสภาพที่มีการขังน้ำ จนกระทั่งใกล้เก็บเกี่ยวจึงปล่อยให้ดินแห้ง ดังนั้น จากการมีน้ำขังดังกล่าวนี้ จึงมีผลต่อกระบวนการเกิดดินภายใต้ดินสภาพดังกล่าว ได้แก่ สมบัติทางปฐพีเคมีของดิน (Geochemical properties) การศึกษากระบวนการหรือปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากองค์ประกอบของหินน้ำ และดินในสภาพดินน้ำขัง เช่น ปริมาณการสลายตัวของอินทรียวัตถุในดิน อีกประการหนึ่งที่มีความน่าสนใจ คือ บทบาทของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ที่มีผลต่อกระบวนการต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น ยังมีผลการเปลี่ยนแปลง pH, redox potentials การเกิดสารประกอบของโลหะ (Complexation of metals) ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงส่วนที่เป็นของแข็ง โดยผ่านกระบวนการดูดยึด หรือการปลดปล่อย (Adsorption/desorption) และการละลายหรือการตกตะกอน (Dissolution/precipitation) ซึ่งเราเรียกบทบาทของสิ่งมีชีวิต ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติปฐพีเคมีของดินว่า Biogeochemistry (ศุภธิดา, 2560)

สมบัติบางประการของดินปลูกข้าว

ดินประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน คือ อนินทรียวัตถุ (inorganic matter) เป็นส่วนที่เกิดจากการสลายตัวผุพังของหิน และแร่ อินทรียวัตถุ (organic matter) เป็นส่วนที่เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังของเศษเหลือพืชและสัตว์ทับถมบนดิน น้ำ เป็นส่วนที่พบในช่องว่างของดิน (soil pore) ซึ่งช่องนี้อาจพบระหว่างเม็ดดิน (soil aggregate) หรือในเม็ดดิน น้ำที่มีอยู่ในดินมิใช่น้ำบริสุทธิ์ แต่มีไอออนของธาตุต่าง ๆ ปนอยู่ จึงนิยมเรียกว่า สารละลายดิน (soil solution) และอากาศ จะอยู่ในช่องว่างของดินเช่นกัน ดังนั้น สัดส่วนของอากาศในดินชนิดหนึ่ง จะมีปริมาณมากหรือน้อย ย่อมขึ้นกับปริมาณน้ำในดินเป็นสำคัญ และเนื่องจากดินเกี่ยวข้องโดยตรงกับการปลูกข้าว การเจริญเติบโตของข้าว จึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่าง ๆ หลายประการของดิน

สมบัติทางกายภาพของดินปลูกข้าว

คุณสมบัติทางกายภาพของดิน คือ คุณสมบัติของดินที่เราสามารถตรวจสอบได้ด้วยการมองเห็น หรือจับต้องได้ เช่น เนื้อดิน ความโปร่งหรือแน่นทึบของดิน ความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน และสีของดิน เป็นต้น คุณสมบัติของดินเหล่านี้ บางครั้งเราเรียกว่า คุณสมบัติทางฟิสิกส์

เนื้อดินและโครงสร้างดิน

เนื้อดิน (soil texture) หมายถึง องค์ประกอบเชิงกายภาพของดิน จะสังเกตได้ว่าดินในแต่ละสถานที่มีลักษณะแตกต่างกัน เนื่องจากดินประกอบขึ้นจากของอนุภาคตะกอนหลายขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุด คือ อนุภาคทราย อนุภาคขนาดรองลงมา คือ อนุภาคทรายแป้ง และก้อนหิน ที่มีขนาดเล็กที่สุด คือ ดินเหนียว ดินมีหลายชนิด เช่น ดินทราย ดินร่วน ดินเหนียว ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของตะกอนที่ผสมกันเป็นดิน เช่น ดินเหนียวมีเนื้อละเอียดมาก เนื่องจากประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กมาก จึงไม่มีน้ำช่องว่างให้น้ำซึมผ่าน ดินทรายมีเนื้อหยาบ เนื่องจากประกอบด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ จึงมีช่องว่างให้น้ำซึมผ่านอย่างรวดเร็ว ส่วนดินร่วนมีส่วนผสมเป็นอนุภาคขนาดปานกลาง เช่น ทรายแป้งเป็นส่วนใหญ่ จึงมีความเหมาะสมในการปลูกพืชส่วนใหญ่ เนื่องจากน้ำซึมผ่านได้ไม่รวดเร็วจนเกินไป จึงสามารถเก็บกับความชื้นได้ดี

นักปฐพีวิทยาแบ่งดินออกเป็น 12 ชนิด โดยการศึกษาสัดส่วนการกระจายอนุภาคของดินตามภาพที่ 2 ดินทรายร่วน ประกอบด้วย อนุภาคทราย 80%, อนุภาคทรายแป้ง 10%, อนุภาคดินเหนียว 10% ดินร่วนประกอบด้วย อนุภาคทราย 40%, อนุภาคทรายแป้ง 40%, อนุภาคดินเหนียว 20% ดินเหนียว ประกอบด้วยอนุภาคทราย 20%, อนุภาคทรายแป้ง 20%, อนุภาคดินเหนียว 60% การจำแนกดิน ช่วยให้เราเข้าใจถึงคุณสมบัติของดินประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ความสามารถในการกักเก็บ

น้ำ และการถ่ายเทพลังงานความร้อน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางเกษตรกรรม และวิศวกรรม เป็นต้น

โครงสร้างดิน (soil structure)

โครงสร้างดิน คือ รูปแบบของการยึด และการเรียงตัวของอนุภาคเดี่ยวของดินเป็นเม็ดดินในหน้าตัดดินเม็ดดินแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันทั้งด้านขนาดและรูปร่างซึ่งแบ่งออกเป็น 7 แบบ คือ แบบก้อนกลม (granular) แบบก้อนเหลี่ยม (blocky) แบบแผ่น (platy) แบบแท่งหัวเหลี่ยม (prismatic) แบบแท่งหัวมน (columnar) แบบก้อนทึบ (massive) แบบอนุภาคเดี่ยว (single Grained)

โครงสร้างของดินเป็นคุณสมบัติของดิน ที่เกิดจากสภาพที่อนุภาคของดินที่เกาะกันเป็นก้อนหรือเม็ดดินมีขนาดต่าง ๆ อยู่รวมกันอย่างหลวม ๆ ตามธรรมชาติ ทำให้ดินมีสภาพโปร่งไม่แน่นทึบ ดินทราย และดินเหนียว ถ้ามีโครงสร้างที่เหมาะสม จะสามารถเปลี่ยนสภาพความโปร่ง และความแน่นทึบ อันเป็นคุณสมบัติเดิมของเนื้อดินนั้นได้ เช่น ดินเหนียวคุณสมบัติเดิม คือ เหนียว และแน่นทึบ ถ้าใส่ปุ๋ยอินทรีย์ลงไปนาน ๆ เข้าโครงสร้างที่ดี ก็จะเกิดขึ้น ซึ่งมีผลให้ดินนั้นมีคุณสมบัติโปร่งไถพรวนง่ายขึ้น เพราะดินจะฟูขึ้นมา เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวจะจับเกาะกันเป็นเม็ดดินก้อนเล็ก ๆ อยู่รวมกันอย่างหลวม ๆ เช่นเดียวกับดินทรายคุณสมบัติเดิมที่โปร่งเกินไป เมื่อใช้ปุ๋ยคอกใส่ลงไปในดินนาน ๆ เข้า ดินจะมีโครงสร้างที่เหมาะสม กล่าวคือ อนุภาคทรายที่อยู่อย่าง หลวม ๆ จะจับเกาะกันเป็นก้อนดินเล็ก ๆ ที่แน่นทึบขึ้น ลดความโปร่งลง อุ้มน้ำดีขึ้น การไถพรวนก็ยังคงง่าย และสะดวกเหมือนเดิม ดังนั้นโครงสร้างของดินเปลี่ยนแปลงได้

สมบัติทางเคมีของดินปลูกข้าว

สมบัติทางเคมีของดิน แสดงถึงปริมาณของความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยจะบอกปริมาณและสัดส่วนของธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชที่มีอยู่ในดิน ว่ามีมากน้อย และเป็นสัดส่วนกันอย่างไร มีการแปรสภาพเปลี่ยนแปลงอย่างไร พืชจึงสามารถดึงดูดไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของดิน จึงเป็นการประเมินถึงปริมาณธาตุอาหารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในดิน ดินที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ควรเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ดีปานกลางถึงสูง (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ระดับธาตุอาหารหลัก และธาตุอาหารรองรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน (USDA)

ธาตุอาหารพืช	ระดับความเป็นประโยชน์ต่อพืช (mg kg^{-1})				
	ต่ำมาก	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูงมาก
ฟอสฟอรัส (P)	< 3	3 - 10	11 - 15	16 - 45	> 45
โพแทสเซียม (K)	< 30	30 - 60	61 - 90	91 - 120	> 120
แคลเซียม (Ca)	< 400	400 - 1000	1001 - 2000	2001 - 4000	> 4000
แมกนีเซียม (Mg)	< 36	36 - 120	121 - 365	366 - 975	> 975

สภาพความเป็นกรด – ด่างของดินนั้น เราสามารถตรวจสอบได้ปกติเรามักใช้บอกความเป็นกรด - ด่างด้วยค่าที่เรียกว่า pH ช่วงของพีเอชของดิน โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 3.0-9.0 (ตารางที่ 2) ค่าพีเอช 7.0 บอกถึงสภาพความเป็นกลางของดิน กล่าวคือ ดินมีตัวที่ทำให้เป็นกรด และตัวที่ทำให้เป็นด่างอยู่เป็นปริมาณเท่ากันพอดี ค่าของค่า pH ของดินสามารถวัดได้ด้วยเครื่องวัดความเป็นกรดในภาคสนาม สามารถใช้ชุดตรวจสอบชนิดใช้น้ำยาเปลี่ยนสีตรวจสอบ เรียกว่า ค่า pH ชุดทดสอบค่า pH หรือ ชุดตรวจสอบ

ตารางที่ 2 ระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH 1 : 1) Land Classification Division and FAO Project Staff (1973)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ระดับ
< 4.5	กรดจัดมาก
4.5 - 5.0	กรดจัด
5.1 - 5.5	กรดแก่
5.6 - 6.0	กรดปานกลาง
6.1 - 6.5	กรดเล็กน้อย
6.6 - 7.3	กลาง
7.4 - 7.8	ด่างอ่อน
7.9 - 8.5	ด่างปานกลาง
8.6 - 9.0	ด่างแก่
> 9.1	ด่างจัด

ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารต่าง ๆ ในดินที่พืช จะดึงดูดเอาไปใช้ได้ง่าย และมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับสภาพ หรือระดับค่า pH ของดินเป็นอย่างมากธาตุอาหารพืช ที่มีอยู่ในดิน จะคงสภาพที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ง่าย และมีปริมาณมากที่มีค่า pH ช่วงหนึ่งถ้าดินมีค่าความเป็นกรดสูงหรือต่ำกว่าช่วงนั้น ๆ ก็เปลี่ยนสภาพเป็นรูปที่ยากที่พืช จะดึงดูดเอาไปใช้เป็นประโยชน์ได้ เช่น ธาตุฟอสฟอรัส จะอยู่ในรูปของสารละลายที่พืชดึงดูดไปใช้ได้ง่ายเมื่อดินมีอยู่ระหว่างค่า pH 6.0-7.0 ค่า pH ถ้าดินมีสูง หรือต่ำกว่า ช่วงนี้ความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสในดินก็ลดน้อยลง เพราะไปทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่าง ๆ ในดินได้ง่ายขึ้น และแปรสภาพเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำยาก ปุ๋ยฟอสเฟตที่เราใส่ลงไปในดิน จะเป็นประโยชน์ต่อพืชที่ปลูกได้มากที่สุด ก็เมื่อดินมีค่า pH อยู่ในช่วงดังกล่าว ปุ๋ยฟอสเฟตที่ใส่ลงไปในดิน จะไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชทั้งหมด แต่จะสูญเสียไปโดยทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่าง ๆ ในดินแปรสภาพเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำยากเสียกว่า 80% ซึ่งเราเรียกว่าฟอสเฟตถูกตรึง ปุ๋ยฟอสเฟต จะถูกตรึงได้ง่าย และมากขึ้นไปกว่านี้ได้อีกถ้าดิน มีค่าความเป็นกรดสูง หรือต่ำกว่าช่วงค่า pH ดังกล่าวข้างต้น

ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Capacity หรือ CEC)

คือ ปริมาณของ cation ทั้งหมดที่ดินสามารถดูดยึดไว้ได้ ระดับความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน แสดงไว้ในตารางที่ 3 การที่จะทราบว่าดินมี CEC เท่าใดนั้น ทำได้โดยการไล่ที่ cation ที่ถูกดูดซับไว้ด้วย NH^+ หรือ Ba^+ จากนั้นก็ทำการวิเคราะห์หาปริมาณของ NH^+ หรือ Ba^+ ที่เข้าไปแทนที่ว่ามีอยู่เท่าใด โดยการบอกเป็น milliequivalents ต่อดิน 100 กรัม ดังนั้นค่า CEC ของดิน จึงบอกเป็นค่าของ milliequivalents / 100 กรัมของดิน ค่า CEC ของดินแต่ละชนิด จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้ คือ ชนิดของ Soil colloid ปริมาณของแร่ดินเหนียวที่มีอยู่ในดิน และปริมาณอินทรียวัตถุในดิน

ตารางที่ 3 ระดับความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange Capacity)

ระดับ	CEC (cmol kg^{-1})
ต่ำมาก	< 3.0
ต่ำ	3.0 - 5.0
ค่อนข้างต่ำ	5.0 - 10.0
ปานกลาง	10.0 - 15.0
ค่อนข้างสูง	15.0 - 20.0
สูง	20.0 - 30.0
สูงมาก	> 30.0

อินทรียวัตถุในดิน (Soil organic matter)

อินทรียวัตถุ หมายถึง สารประกอบอินทรีย์ซึ่งได้มาจากเศษซาก หรือซากสัตว์ รวมทั้งสิ่งที่พืชหรือสัตว์ผลิตขึ้นในขณะที่ยังมีชีวิต อินทรียวัตถุยังประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่ตายแล้ว และสารประกอบที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในขณะที่ยังมีชีวิต อินทรียวัตถุในดิน ประกอบด้วย อินทรีย์สารหลายชนิด พวกสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน สารประกอบอินทรีย์ฟอสฟอรัส สารประกอบอินทรีย์กำมะถัน เป็นต้น และเมื่ออินทรียวัตถุสลายตัวโดยจุลินทรีย์ถึงขั้นสุดท้ายจะได้ฮิวมัส (humus) เป็นอินทรีย์ประกอบเชิงซ้อนที่ประกอบขึ้นจากสารกลุ่มต่าง ๆ เช่น methyl phenolic, quinone และ carboxylic groups ที่มีอยู่ในดิน ฮิวมัส แบ่งได้เป็นสองส่วน คือ humic acid และ fulvic acid ฮิวมัสนี้ไม่ใช่สารที่คงทนถาวร จุลินทรีย์ในดินทำให้สลายตัวได้ เช่นเดียวกับ อินทรียสารอื่นที่มีอยู่ในดิน แต่อัตราการสลายตัวของฮิวมัส จะช้ากว่าการสลายตัวของอินทรียสารที่เป็นต้นกำเนิดของฮิวมัส ฮิวมัสเป็นของแข็งที่มีอนุภาคละเอียดมากมีบทบาทสำคัญ คือ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity) สูงสามารถดูดซับน้ำได้ดี และมีบทบาทสำคัญต่อการเกาะยึดกันเป็นเม็ดของอนุภาคดิน ระดับอินทรียวัตถุ แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ระดับอินทรียวัตถุ (organic matter) (% organic carbon x 1.724)

ระดับ (rating)	พิสัย (ร้อยละ)
ต่ำมาก	< 0.5
ต่ำ	0.5 - 1.0
ค่อนข้างต่ำ	1.0 - 1.5
ปานกลาง	1.5 - 2.5
ค่อนข้างสูง	2.5 - 3.5
สูง	3.5 - 4.5
สูงมาก	> 4.5

การเปลี่ยนแปลงทางเคมี และชีวภาพของดินปลูกข้าว

กิจกรรมการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหาร และการหมุนเวียนสารต่าง ๆ ในดินส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแบบรีด๊อกซ์ที่เกิดจากเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ การจัดการน้ำ ดินที่อยู่ในสภาพน้ำขัง (water log) จะมีการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารต่าง ๆ ภายในดิน (ศุภธิดา, 2560) อย่างเช่นการลดลงของออกซิเจน และการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์ในดินปลูกข้าว ซึ่งการขาดออกซิเจนมีผลต่อการงอกของเมล็ดข้าว เมล็ดข้าวจะไม่งอก หรืองอกแล้วกล้า จะอ่อนแอ เมื่อยอดอ่อนเจริญออกมา และมีรากแผ่กระจายแล้ว การขาดออกซิเจน ก็จะไม่มีผล การขาดออกซิเจนไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าว เพราะออกซิเจนที่ใช้ในการหายใจ และดูดดึงธาตุอาหารมาจากการถ่ายทอดออกซิเจนโดยทางยอดและใบ และดูดดึงธาตุอาหารของรากพืชได้จากการถ่ายทอดออกซิเจนโดยทางยอดและใบซึ่งอยู่เหนือน้ำ เมื่อดินที่มีน้ำขัง จะทำให้เกิดการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น ถ้ามากเกินไปจะทำให้รากดูดน้ำ และธาตุอาหารไม่ปกติ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ถ้ามีมากกว่า 0.15 - 0.2 บรรยากาศจะเป็นพิษ โดยส่วนมากจะพบในดินที่ไถกลบปุ๋ยพืชสดใหม่ ๆ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีสะสมอยู่ในดินที่ขังน้ำ มีประโยชน์คือ ทำให้ Fe อยู่ในรูปของ ferrous bicarbonate ซึ่งทำให้ข้าวดูดดึงเหล็กได้ดีขึ้น และจำเป็นในช่วงที่ข้าวเริ่มตั้งท้อง (reproductive phase) อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างของดิน ซึ่งการขังน้ำทำให้ pH ของดินกรดสูงขึ้น และ pH ของดินด่างลดลง สำหรับดินทั่ว ๆ ไป แล้วหลังจากขังน้ำไปหลาย ๆ สัปดาห์ pH ของสารละลายดินมีค่าคงที่อยู่ระหว่าง 6.5 ถึง 7.0 ถ้าวัด pH ของดินอัตราส่วน 1:1 จะมีค่าสูงกว่านี้ประมาณ 0.2 unit และ pH ของดินมีผลกระทบต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินที่ขังน้ำมากกว่าในดินไร่ จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายอินทรียวัตถุในดินไร่มีมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดก็ต้องการระดับ pH ที่เหมาะสมของมัน (ศุภธิดา, 2560) ดังนั้น การ

สลายตัวของอินทรียวัตถุเกิดขึ้นได้ดีในช่วง pH ที่ค่อนข้างกว้าง จุลินทรีย์หลักที่มีกิจกรรมในดินที่ขังน้ำก็คือ แบคทีเรียที่อยู่ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน และมีกิจกรรมได้ดีที่สุดในสภาพของ pH ที่เป็นกลาง ดังนั้น ammonification, denitrification, sulfate reduction และการเปลี่ยนจากกรดอินทรีย์เป็นมีเทนเกิดขึ้นได้ดีในสภาพของ pH ที่ใกล้เป็นกลาง ค่าของ pH ที่เหมาะสมสำหรับข้าวคือ 6.6 เพราะว่าที่ pH ระดับนี้ จุลินทรีย์จะย่อยสลายอินทรียวัตถุและปลดปล่อยไนโตรเจน และฟอสฟอรัสออกมาได้มาก รวมทั้งความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสมาก ปริมาณของทองแดง สังกะสี และโมลิบดินัมเพียงพอ ความเข้มข้นสารประกอบต่าง ๆ ที่จะมีผลต่อการดูดธาตุอาหาร หรือเป็นพิษต่อข้าว เช่น อลูมินัม แมงกานีส เหล็กคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอินทรีย์ จะอยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษ และดินที่มี pH สูง จะมีปริมาณ K Ca และ Mg ในระดับสูง อีกทั้งการขังน้ำ Ca Mg จะถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็ว และ K จะถูกปลดปล่อยออกมาเพิ่มมากขึ้นในรูปของ soluble K ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการสูญเสีย K ได้ง่าย (Ponnamperuma, 1965) อย่างไรก็ตาม อัตราการเกิด denitrification และ sulfate reduction จะเร็ว ดังนั้นการจัดการในเรื่องของดินและน้ำ ควรให้ดินที่ปลูกข้าวมี pH ประมาณ 6.6 ตั้งแต่ช่วงปลูกจนกระทั่งถึงข้าวอยู่ในระยะกำเนิดช่อดอก และมีการสูญเสียธาตุอาหารในดินนาน้ำขัง ซึ่งดินที่ปลูกข้าวมีการสูญเสียไนเตรตอย่างรวดเร็ว ภายใน 2-3 วันหลังจากดินมีน้ำขัง ซึ่งเนื่องมาจากดีไนตรีฟิเคชัน เราสามารถลดการสูญเสียไนโตรเจนนี้โดยการปลูกข้าว และทำให้ดินเปียกและแห้งสลับกัน จะไม่ทำให้สูญเสียไนโตรเจนมากนัก และผลผลิตก็ไม่ลดลงด้วย (ศุภธิดา, 2560)

คุณสมบัติทางชีวภาพของดินที่มีต่อการเจริญเติบโตของพืช

ดินมีสิ่งที่มีชีวิตมากมายอาศัยอยู่ ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ เช่น แบคทีเรีย รา แอคติโนมัยซิสและสาหร่าย เป็นต้น ขนาดใหญ่ เช่น ไส้เดือนฝอย ไส้เดือนดิน แมลงต่าง ๆ หนู และสัตว์อื่น ๆ สิ่งที่มีชีวิตในดินทั้งหมดอาศัย และอยู่ร่วมกันอย่างเป็นระบบ มีทั้งที่เกื้อกูลพึ่งพาอาศัยกัน และที่ให้โทษต่อกัน พืชได้อาศัยสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในดิน เพื่อการเจริญเติบโต ได้แก่ สิ่งมีชีวิตในดินทำหน้าที่ย่อยสลายตัวอินทรียวัตถุในดินที่มีขนาดใหญ่ และโครงสร้างซับซ้อนให้มีขนาดเล็กลง เป็นสารประกอบอนินทรีย์อย่างง่ายที่จะกลายเป็นธาตุอาหารพืช และช่วยในการเปลี่ยนแปลงรูปของอนินทรีย์สารบางชนิด ซึ่งได้จากการแปรสภาพของอินทรีย์วัตถุในดินที่ละลายน้ำยากให้เป็นรูปของสารประกอบอนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ง่าย และพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ฟอสฟอรัส กำมะถัน แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม เหล็ก แมงกานีส อะลูมินัม และซิลิกอน อนินทรีย์สารเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นรูปที่ละลายน้ำได้ง่าย โดยกรดชนิดต่าง ๆ ที่แบคทีเรียในดินสร้างขึ้น อีกทั้งสิ่งมีชีวิตในดินยังช่วยในการตรึงไนโตรเจนจากอากาศมาอยู่ในรูปของสารประกอบในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เรียกกระบวนการนี้ว่า Nitrogen fixation โดยแบคทีเรียที่สำคัญในการทำหน้าที่ดังกล่าว คือ symbiotic

nitrogen fixing bacteria ชนิด Rhizobium *spp*. ซึ่งอาศัยอยู่ตามรากพืชตระกูลถั่ว แบคทีเรียพวกนี้จะสร้างสารประกอบไนโตรเจนให้พืชตระกูลถั่วนำไปใช้ในการเจริญเติบโต และช่วยลดความเป็นพิษหรือทำลายสารที่เป็นพิษในดิน อันเนื่องมาจากการใช้สารกำจัดศัตรูพืชบางชนิด

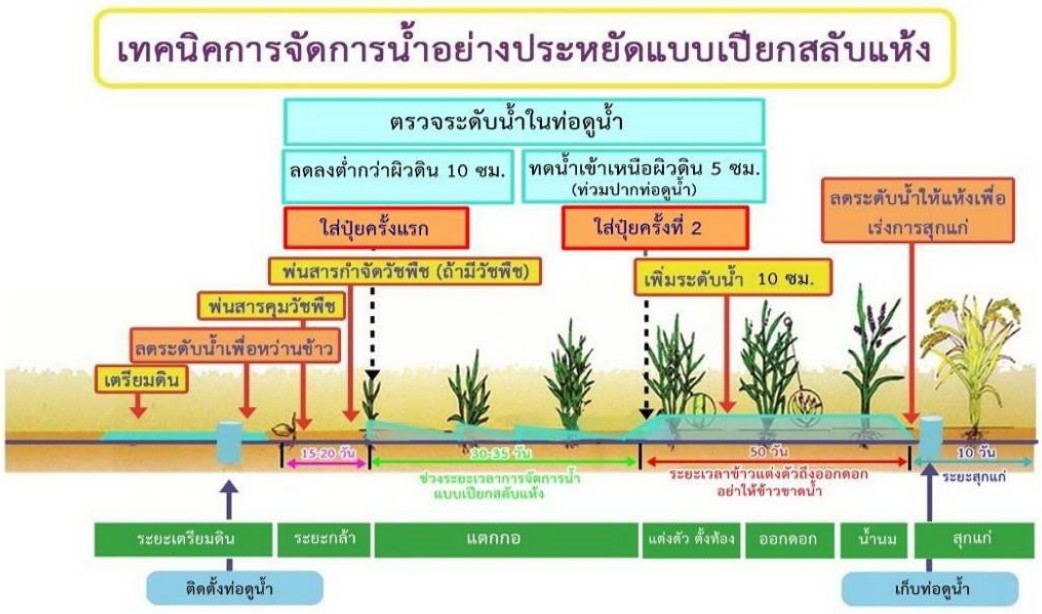
ความต้องการน้ำและการจัดการน้ำสำหรับการปลูกข้าว

ข้าวเป็นพืชที่ต้องการน้ำในการเจริญเติบโตและให้ผลผลิต ดังนั้นการปลูกข้าวจึงต้องอยู่ในพื้นที่ ๆ มีปริมาณน้ำเพียงพอ และมีการบริหารจัดการในเรื่องน้ำให้เหมาะสมต่อความต้องการของข้าวในแต่ละช่วงอายุ จึงจะประสบผลสำเร็จในการปลูกข้าว การจัดการน้ำในนาข้าวรวมถึงการควบคุมน้ำสำหรับผลผลิตที่พอเหมาะ และการใช้น้ำที่มีอยู่จำกัดให้ได้ผลประโยชน์สูงสุด การจัดการน้ำอย่างถูกวิธีและประหยัดจะทำให้มีน้ำพอเพียงในฤดูแล้ง ซึ่งข้าวมักมีผลผลิตสูงเนื่องจากมีแสงแดดจัดและยาวนาน ทำให้ข้าวตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนมากกว่าในฤดูเพาะปลูกปกติ อีกทั้งการจัดการน้ำที่เหมาะสมก็เป็นปัจจัยสำคัญในการปลูกข้าว แต่การปลูกข้าวนั้นจะต้องใช้น้ำมากกว่าธัญพืชชนิดอื่น ๆ ประมาณ 2-3 เท่า จึงมักมีการขังน้ำในแปลงนา ซึ่งการขังน้ำนี้เป็นแหล่งตั้งต้นของการสะสมคาร์บอนที่สำคัญต่อการผลิตก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gases) ในนาข้าวได้ และดินที่อยู่ในสภาพน้ำขังจะมีการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารต่าง ๆ (ศุภธิดา, 2560) ภายในดินมักเกิดจากจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน และเมื่อดินอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งที่เกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นเวลานาน สามารถนำไปสู่การนำเอาแคตไอออนออกจากโครงสร้างของแร่ดินเหนียว ซึ่งการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate wetting and drying management; AWD) เป็นวิธีหนึ่งที่นอกจากจะลดปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าวแล้ว ยังสามารถลดการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนที่มักพบในดินน้ำขัง ซึ่งเป็นสาเหตุของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในดินปลูกข้าวได้ (ศุภธิดา, 2560)

การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งในนาข้าว (Alternate wetting and drying : AWD)

การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งในนาข้าว เป็นการควบคุมระดับน้ำในแปลงนา ทำให้ภาวะช่วงหนึ่งของดินสำหรับปลูกข้าวอยู่ในสภาวะขาดน้ำ ปล่อยให้น้ำในบริเวณรากข้าวค่อย ๆ แห้งไปแล้วจึงให้น้ำใหม่อีกครั้ง วิธีการแบบนี้ จะทำให้ดินอยู่ในสภาพเปียกแล้วก็แห้ง เปียกแล้วก็แห้ง สลับไปเรื่อย ๆ (ศุภธิดา, 2560) สาเหตุที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง เนื่องจากภาวะเกิดฝนทิ้งช่วงการปลูกข้าวนั้น จะต้องใช้น้ำมากกว่าธัญพืชชนิดอื่น ๆ ประมาณ 2-3 เท่า การปรับรูปแบบการทำนาน้ำขังมาเป็นแบบแห้งสลับเปียก เพื่อรักษาให้ดินมีความชื้น ซึ่งข้าวบางระยะ อาจจะไม่ต้องการน้ำในปริมาณมาก เช่น ในระยะต้นกล้า การให้น้ำในปริมาณที่มาก อาจจะทำให้สูญเสียน้ำ และธาตุอาหารโดยเปล่าประโยชน์ แนวทางการใช้น้ำอย่างประหยัด อาจจะเป็นแนวทางในการปลูกข้าวในพื้นที่ที่ขาดแคลนน้ำ ซึ่งมีข้อดี คือ ลดปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าวได้ร้อยละ 25-40 ลดค่าน้ำมันเชื้อเพลิง

และค่าแรงสูบน้ำ ช่วยส่งเสริมการเจริญของรากข้าว สามารถลดการระบาดของเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล ช่วยให้ต้นข้าวมีระบบรากแข็งแรงไม่หักล้มง่าย ลดการสะสมของก๊าซมีเทนในดิน (ภาพที่ 2) (กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว, 2558)



ภาพที่ 2 การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งสำหรับการปลูกข้าว

ที่มา: กองวิจัยและพัฒนาข้าวกรมการข้าว (2558)

ก๊าซเรือนกระจก

ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases) เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นรังสีความร้อนได้ดี ก๊าซเหล่านี้มีความจำเป็นต่อการรักษาอุณหภูมิในบรรยากาศของโลกให้คงที่ เมื่อมีก๊าซเหล่านี้ในบรรยากาศมากขึ้นบรรยากาศโลก จึงมีอุณหภูมิสูงขึ้น ก๊าซเรือนกระจกมีหลายชนิด เช่น ไอน้ำ โอโซน ถือเป็นกลุ่มก๊าซที่ จะก่อให้เกิดภาวะเรือน แต่เมื่อพิจารณาตามพิธีสารเกียวโตแล้ว จะระบุก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญไว้ 6 ชนิด คือ CO_2, CH_4, N_2O, HFCs, PFCs และ SF_6 (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2554) แหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจก พิจารณาก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้ การผลิตวัตถุดิบ การผลิตพลังงานที่ใช้ทุกประเภท กระบวนการเผาไหม้ และปฏิกิริยาเคมี การสูญเสียน้ำยาทำความเย็น และการรั่วไหลของก๊าซ การปฏิบัติงาน การขนส่งทุกประเภทที่เกี่ยวข้อง การปศุสัตว์ และกระบวนการผลิตทางการเกษตรอื่น ๆ และของเสีย และการจัดการของเสีย การเกษตรในปัจจุบันมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวมประมาณร้อยละ 14.9 ของก๊าซเรือนกระจกรวม โดยแบ่งการปล่อยในทางตรงจากการเพาะปลูกพืชและเลี้ยงสัตว์มีปริมาณร้อยละ 13.5 ของก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด และทางอ้อมอีกร้อยละ 1.4 จากการใช้เครื่องจักรกลในการเกษตร ซึ่งไม่นับรวมการปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากการบุกเบิกพื้นที่ป่าหรือพื้นที่ธรรมชาติ เพื่อใช้ในการเกษตร โดยก๊าซเรือนกระจก ที่ปล่อยออกจากภาคการเกษตรนี้ มีทั้งมีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเกือบสามในสี่มาจาก 2 แหล่ง คือ การปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ จากการใช้ที่ดินในการเพาะปลูก และการเลี้ยงปศุสัตว์ (รวมทั้งการจัดการมูลสัตว์ด้วย) ซึ่งทำให้ภาคการเกษตรเป็นแหล่งปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ และก๊าซมีเทน ที่สำคัญที่สุด (Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning : ONEP, 2009)

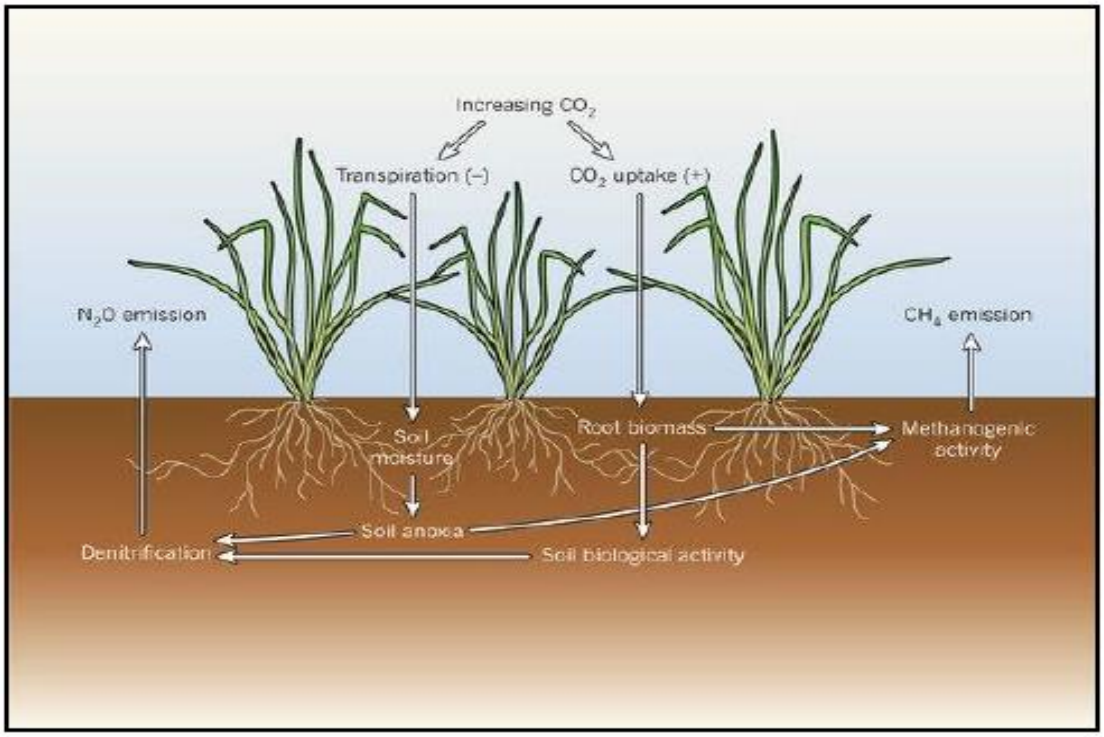
การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการเกษตร

ปศุสัตว์ การปศุสัตว์ที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกอย่างมีนัยสำคัญคือ โคนม, โคเนื้อ, กระบือ, สุกร และสัตว์ปีก เนื่องจากมีการเลี้ยงเพื่อตอบสนองต่อการบริโภคของประชากรในประเทศ และส่วนหนึ่งมีการส่งออกเพื่อจำหน่ายในตลาดต่างประเทศ เช่น ในกลุ่มการจัดการมูลสัตว์ (Manure management) ก๊าซมีเทนที่ปล่อยออกมาจากการจัดการมูลสัตว์ เกิดขึ้นจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุภายใต้การขาดก๊าซออกซิเจน กระบวนการสร้างมีเทนเหมือนกับการเกิดก๊าซมีเทนในนาข้าว ซึ่งการจัดเก็บ และการจัดการมูลสัตว์ จะทำให้มูลสัตว์บางส่วนอยู่ภายใต้สภาวะขาดออกซิเจน จึงทำให้จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทน สามารถเจริญเติบโต และทำให้มูลสัตว์ที่จัดการในลักษณะต่าง ๆ เป็นแหล่งที่ปล่อยก๊าซมีเทนที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่ง ปริมาณมีเทนที่เกิด และปล่อยออกมาขึ้นอยู่กับวิธีการ

จัดการของเสียจากสัตว์ ประสิทธิภาพในการบำบัด ชนิดของสัตว์ที่ปล่อยของเสีย ปริมาณ และประเภทของอาหารที่สัตว์บริโภค อุณหภูมิ และเวลาในการเก็บรักษา ส่วนก๊าซไนตรัสออกไซด์ N_2O ที่เกิดขึ้นในส่วนของการจัดการมูลสัตว์นี้ เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษามูลสัตว์ก่อนที่จะถูกนำไปใช้ เช่น เป็นปุ๋ยอินทรีย์ในการเพาะปลูก ใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือใช้ในรูปอื่น ๆ โดยที่การปล่อยก๊าซ N_2O จากมูลสัตว์นี้เกิดจากกระบวนการไนตริฟิเคชั่น (Nitrification) และดีไนตริฟิเคชั่น (Denitrification) ของไนโตรเจนที่อยู่ในมูลสัตว์ โดยที่การปล่อยก๊าซ N_2O จากมูลสัตว์นี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณไนโตรเจน และคาร์บอนที่อยู่ในมูลสัตว์ ช่วงเวลาในการกักเก็บ และชนิดของระบบการจัดการมูลสัตว์ (บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีพลังสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2555)

นาข้าว เป็นกิจกรรมการเกษตรที่ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ เช่น การปล่อยก๊าซมีเทน และไนตรัสออกไซด์ จากการทำนาข้าว การใส่ปุ๋ยไนโตรเจน การทำปุ๋ยอินทรีย์ และจากการปศุสัตว์ เป็นต้น ส่วนการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่เกษตร เกิดจากการเก็บสะสมคาร์บอนในพืช และในดินในลักษณะที่คล้ายกับการกักเก็บคาร์บอนของพื้นที่ป่า แต่ระยะเวลาในการกักเก็บ และการรบกวนระบบนิเวศแตกต่างกัน โดยการใช้พื้นที่การเกษตรเพื่อเป็นแหล่งสะสมของคาร์บอน เป็นวิธีการหนึ่งที่องค์กรอาหารและการเกษตร (Food and Agriculture Organization: FAO) ได้ให้ความสนใจอย่างมากในการใช้ลดก๊าซเรือนกระจก (FAO, 2002) ซึ่งสถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ หรือ IRRI (1991) ยืนยันว่าการเกิดก๊าซมีเทนจากนาข้าวเกิดได้ 3 ทาง คือ โดยการแพร่ผ่านชั้นน้ำ (diffusion) และฟองอากาศ (bubble) ในปริมาณเล็กน้อย แต่การปล่อยก๊าซส่วนใหญ่ หรือประมาณ 80% เกิดขึ้นผ่านทางต้นข้าว โดยมีจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทน (methanogens) ได้ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้อากาศที่เกิดขึ้นหลังจากการขังน้ำในนาข้าว (ภาพที่ 3) ก๊าซเรือนกระจกตัวสำคัญที่ปล่อยจากนาข้าว ได้แก่ ก๊าซมีเทน และก๊าซไนตรัสออกไซด์ โดยก๊าซมีเทน จะเกิดจากกระบวนการทางชีวภาพ ก๊าซมีเทนนี้จะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศได้โดยการเคลื่อนที่ผ่านทางช่องว่างในลำต้นข้าวเป็นหลัก จึงมีปัจจัยหลายอย่างส่งผลกระทบต่อปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนจากต้นข้าว เช่น อิทธิพลของพันธุ์ข้าว การจัดการน้ำ การจัดการฟางข้าว การใช้ปุ๋ยและการเติมอินทรียวัตถุในดิน เป็นต้น การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ในการเพาะปลูกและวิธีการเพาะปลูกข้าว รวมถึงการจัดการน้ำที่แตกต่างกัน (ศิริลักษณ์ และคณะ, 2550) มีผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่ง รุ่งทิพย์ และคณะ (2558) ได้ศึกษาการปล่อยแก๊สมีเทน จากนาข้าวชลประทานที่มีการจัดการน้ำและวัชพืชต่างกัน พบว่า การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง ส่งผลให้มีการปล่อยแก๊สมีเทนน้อยสุดเฉลี่ย 129.46 mg CH_4 $m^{-2}day^{-1}$ ส่วนการขังน้ำตลอดเวลา ส่งผลให้มีการปล่อยแก๊สมีเทนมากที่สุด เฉลี่ย 237.99 mg CH_4 $m^{-2}day^{-1}$ ซึ่งสอดคล้องกับ (อัจฉรา และบัญชา, 2551) ที่ได้ศึกษาการจัดการน้ำในนาข้าว เพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านก๊าซมีเทน พบว่าที่

ระดับน้ำท่วมขังในนาข้าวสูงกว่า และนานกว่าส่งผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนมากที่สุด และแบบเปียกสลับแห้ง ส่งผลกระทบน้อยที่สุด คือ เกิดมีเทนในนาข้าวน้อยที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับแบบดั้งเดิม พบว่าการจัดการน้ำทั้ง 4 แบบที่ศึกษาสามารถลดปริมาณมีเทนได้ 20–81% รวมทั้งประหยัดน้ำได้ประมาณ 40–63 % ส่วน นิภา และคณะ (2556) ได้ศึกษาผลของอัตราฟางข้าวต่อผลผลิตข้าว และการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก พบว่า การเพิ่มอัตราฟางข้าว 1-4 ตัน/ไร่ ลงไปในดิน ส่งผลให้มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก 50.5-104.7 กก.C/ไร่ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับควบคุม



ภาพที่ 3 การปลดปล่อยมีเทนและไนตรัสออกไซด์จากนาข้าว

ที่มา: Knohl and Veldkamp (2011)

การจัดการดิน ดินทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิด และมีส่วนเกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) และไนตรัสออกไซด์ (N_2O) เนื่องจากมีความสามารถทั้งในการจัดเก็บ และการปล่อยก๊าซ ซึ่งจำเป็นสำหรับการใช้ประโยชน์ที่ดิน (การเกษตร) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั่วโลกเพื่อการวิจัยสภาพภูมิอากาศ (Oertel *et al.,* 2016) ก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นนั้นมาจากการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ การหายใจของราก การสลายตัวของอินทรีย์สาร ความชื้น อุณหภูมิของดิน สารอาหาร และค่าความเป็นกรด - ด่าง การใช้ประโยชน์ที่ดิน

รวมทั้งการหายใจของสัตว์ในดิน และสิ่งมีชีวิตในดิน (Chapuis-Lardy *et al.*, 2007) และคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน การระบายน้ำ ความสามารถในการดูดซับอาหารของพืช จะมีผลต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน ส่วนคุณสมบัติทางเคมีของดินมีผลต่อการเจริญเติบโต และกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดและด่างของดิน ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนเช่นกัน (ระวิวรรณ, 2537)

แนวทางในการจัดการลดก๊าซเรือนกระจกจากภาคการเกษตร

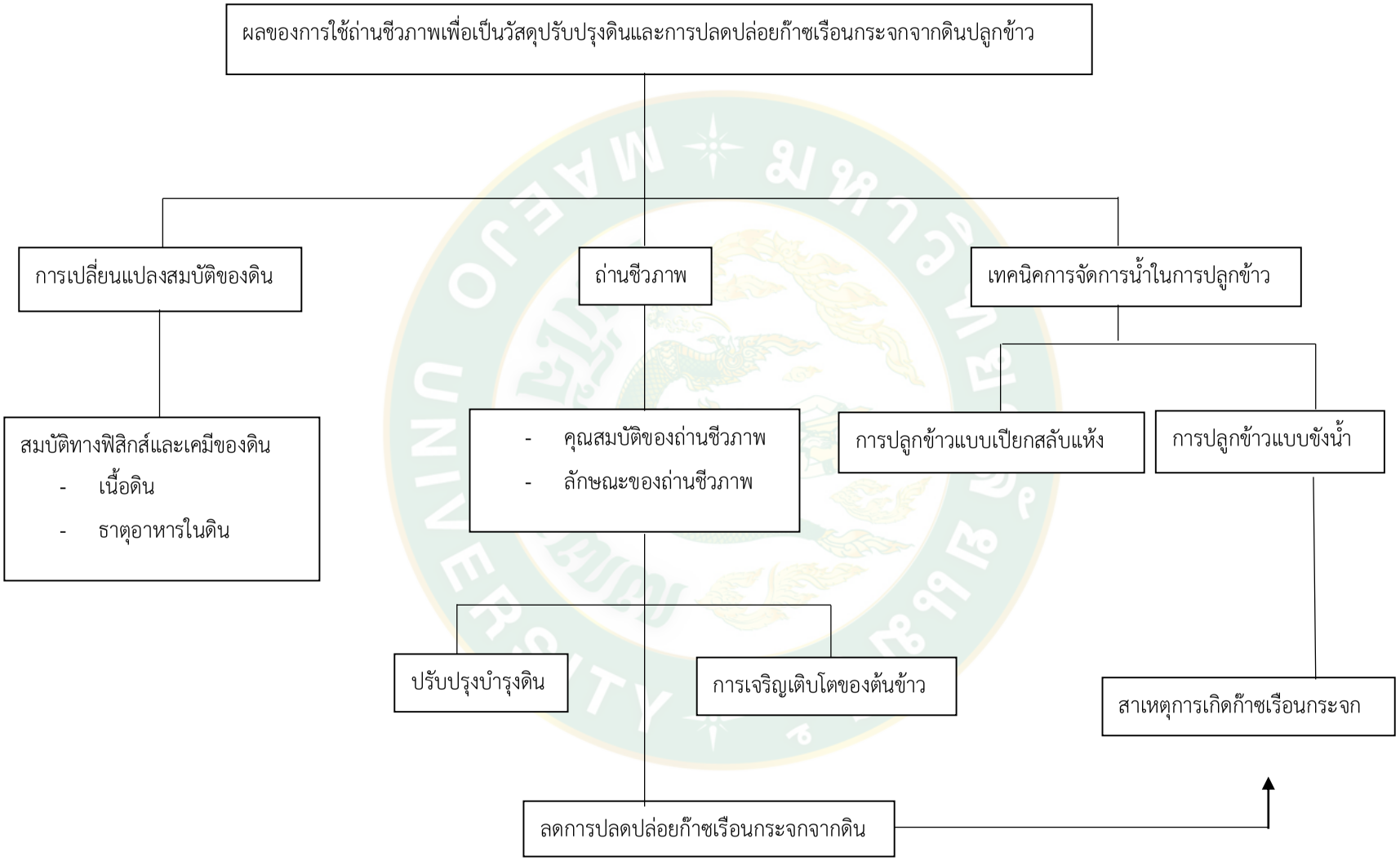
แนวทางการลดก๊าซเรือนกระจกในภาคเกษตรกรรม คือ การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการส่งเสริมการเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอน โดยการเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนเป็นกลไกที่มีผลอย่างมากต่อการลดก๊าซเรือนกระจก แม้ว่ากลไกการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเกษตร จะมีความซับซ้อน แต่การจัดการระบบเกษตรที่เหมาะสมอาจช่วยลดก๊าซเรือนกระจกได้ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่แล้ว และนาไปปฏิบัติได้ทันที (ภัทรา, 2552) แนวทางลดก๊าซเรือนกระจกในภาคเกษตรกรรมที่เป็นที่รู้จัก คือ การปรับปรุงการจัดการพืช และทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ เช่น การปรับปรุงวิธีการทำเกษตร การใช้ปุ๋ย การไถพรวน และการจัดการเศษซากพืช การฟื้นฟูดินอินทรีย์ หรือดินพรุที่ถูกระบายน้ำออก เพื่อใช้ในการเพาะปลูก และการฟื้นฟูพื้นที่เสื่อมสภาพ นอกจากนี้ยังมีแนวทางการลดก๊าซเรือนกระจก โดยการปรับปรุงการจัดการน้ำและข้าว การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน การยกเลิกที่ดินเพาะปลูก (set-aside) ระบบวนเกษตร (agro-forestry) และการปรับปรุงการจัดการปศุสัตว์และมูลสัตว์ ซึ่ง Buller *et al.* (2015) กล่าวว่า การกระตุ้นกระบวนการทางเทคโนโลยีที่ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยมีการจัดตั้งฟาร์มนำร่องเพื่อประเมินระบบการเลี้ยงสัตว์ สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ การผลิตกระแสไฟฟ้าและการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ ให้เป็นเครื่องมือในการประเมินและวินิจฉัยการออกแบบระบบฟาร์ม รวมถึงเพิ่มความรู้ความเข้าใจประสิทธิภาพของระบบปศุสัตว์แบบผสมผสานในการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ และการใช้พลังงานจากการจัดการมูลสัตว์ในระบบการเกษตร สามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านสิ่งแวดล้อมในการลดก๊าซเรือนกระจกได้

บทที่ 3
วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อศึกษาผลการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดิน และลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ระบบการปลูกข้าว ทำการศึกษาสมบัติบางประการของดินหลังจากการปลูกข้าว การปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว รวมถึงการเจริญเติบโตของต้นข้าว ซึ่งวิธีการดำเนินงานวิจัยดังกล่าว ประกอบด้วย 2 การทดลอง

การทดลองที่ 1 ศึกษาการปลดปล่อยก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว เมื่อข้าวอยู่ในระยะออกดอกซึ่งอยู่ในช่วงการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง และช่วงระยะข้าวสุกแก่ ซึ่งอยู่ในช่วงของการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง และศึกษาสมบัติทางเคมีของดิน รวมถึงการเจริญเติบโตของต้นข้าว โดยมีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) ซึ่งมีการขังน้ำให้สูงเหนือผิวหน้าดิน 5 ซม. ขังน้ำไว้ตลอดจนต้นข้าวจนถึงระยะสุกแก่จึงหยุดการขังน้ำ ส่วนการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (AWD) เริ่มดำเนินการเมื่อข้าวอายุระหว่าง 35 – 75 วัน เริ่มขังน้ำเหนือผิวดิน 5 ซม. เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นหยุดการให้น้ำ 7 วัน (ใช้เวลาประมาณ 7 วันต่อหนึ่งวงรอบการขังน้ำจนความชื้นลดลง) แล้วจึงมีการให้น้ำในสภาพน้ำขังอีกครั้ง ทำเช่นนี้จนข้าวมีอายุ 70 วัน ซึ่งได้จำนวน 5 วงรอบของเปียกสลับแห้ง จากนั้นจึงให้น้ำแบบขังน้ำตลอดเวลาจนต้นข้าวใกล้สุกแก่ เก็บตัวอย่างก๊าซในช่วงของข้าวเจริญเติบโตในระยะข้าวออกดอก อายุ 70 วัน และระยะสุกแก่ อายุ 100 วัน ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเวลา 09:00 – 12:20 น. การทดลองทั้งหมดนี้ ดำเนินการระหว่างวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2561 ถึง วันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2561

การทดลองที่ 2 ศึกษาการปลดปล่อยก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว ในระยะข้าวแตกกอ ระยะข้าวตั้งท้อง ระยะข้าวออกดอก และระยะน้ำนมของข้าว รวมถึงการเจริญเติบโตทางด้านความสูง ซึ่งมีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (AWD) เริ่มดำเนินเมื่อข้าวอายุระหว่าง 35 – 70 วัน โดยเริ่มขังน้ำเหนือผิวดิน 5 เซนติเมตร 3 วัน จากนั้นปล่อยระดับน้ำลดลงหรือหยุดการให้น้ำ 3 วัน แล้วจึงมีการให้น้ำในสภาพขังอีกครั้ง ทำเช่นนี้จนข้าวมีอายุ 70 วัน จากนั้นจึงให้น้ำแบบขังน้ำตลอดเวลาจนถึงข้าวมีระยะสุกแก่ โดยเก็บตัวอย่างก๊าซภายใต้การปลูกข้าว 4 ระยะ ได้แก่ ระยะแตกกอ (tillering stage) ระยะข้าวตั้งท้อง (booting stage) ระยะข้าวออกดอก (flowering) และระยะน้ำนม (milky) การทดลองทั้งหมดนี้ดำเนินการระหว่างวันที่ 23 เมษายน พ.ศ. 2561 ถึง วันที่ 10 สิงหาคม พ.ศ. 2561



ภาพที่ 4 กรอบแนวความคิดเกี่ยวกับงานวิจัย

อุปกรณ์ในการวิจัย

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกข้าว

1.1 กระถางพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร

1.2 เมล็ดข้าวพันธ์สันป่าตอง 1

1.3 ดินที่ใช้ปลูกข้าว คือ ดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy clay loam) และดินร่วนปนทราย (Loamy sand)

1.4 แม่ปุ๋ย (N, P, K) สูตร 46-0-0, 0-46-0, 0-0-60

1.5 ถ่านชีวภาพ จากแกลบ

1.6 ตลับเมตร

1.7 กล้องบันทึกภาพ

2. สารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง (AR เกรด)

2.1.1 Ammonium acetate (CH_3COONH_4)

2.1.2 Sodium hydroxide (NaOH)

2.1.3 Methyl red ($C_{15}H_{15}N_3O_{12}$)

2.1.4 Bromocresol green ($C_{21}H_{14}O_5Br_4S$)

2.1.5 Boric acid (H_3BO_3)

2.1.6 Ethyl alcohol (C_2H_2OH)

2.1.7 Sodium chloride (NaCl)

2.1.8 Potassium chloride (KCl)

2.1.9 Deionized water (DI)

2.1.10 Potassium dichromate ($K_2Cr_2O_7$)

2.1.11 Ferrous sulfate ($FeSO_4$)

2.1.12 Ammonium ferrous sulfate ($(NH_4)_2$ $FeSO_4$)

2.1.13 0-phenanthroline ($C_{12}H_8N_2$)

2.1.14 Catalyst

2.1.15 Ammonium sulfate ($(NH_4)_2$ SO_4)

2.1.16 Potassium sulfate (K_2SO_4)

2.1.17 Sodium sulfate (Na_2SO_4)

2.1.18 Copper sulfate ($CuSO_4$)

2.1.19 Bray II (0.03 N NH_4F + 0.1 N HCl)

2.1.20 Ammonium fluoride (NH_4F)

2.1.21 Hydrochloric acid (HCl)

2.1.22 Ammonium molybdate ($(NH_4)_6Mo_7O_{24}4H_2O$)

2.1.23 Antimony potassium tartrate ($KSbO.C_4H_4O_4$)

2.1.24 Ascorbic acid ($C_6H_8O_6$)

2.1.25 Potassium di-hydrogen phosphate (KH_2PO_4)

2.1.26 Calcium carbonate ($CaCO_3$)

2.1.27 Magnesium sulfate ($MgSO_4$)

2.1.28 Iron (II) sulphate heptahydrate ($FeSO_4.\ 7H_2O$)

2.1.29 Lanthanum oxide (La_2O_3)

2.1.30 Potassium permanganate ($KMnO_4$)

2.1.31 Sodium carbonate ($NaCO_3$)

2.1.32 Sulfuric acid (H_2SO_4)

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

2.2.1 ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)

2.2.2 ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask)

2.2.3 จุกปิดพลาสติก (plastic stopper)

2.2.4 เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)

2.2.5 บีกเกอร์ (beaker)

2.2.6 ขวดกรองสาร (suction flask)

2.2.7 ปิเปตต์ (pipette)

2.2.8 บิวเร็ตต์ (burette)

2.2.9 หลอดทดลอง (test tube)

2.2.10 หลอดเซนติฟิว (centrifuge tube)

2.2.11 กระบอกตวง (cylinder)

2.2.12 ไมโครปิเปตต์ทิป (micropipette tip)

2.2.13 กรวยกรอง (filtering funnel)

2.2.14 โกร่งบด (pestle & mortar)

2.2.15 ถ้วยกรองแก้ว (filter crucible)

2.2.16 ขวดดูแรน (laboratory bottle)

2.2.17 หลอดหยดสาร (dropper)

2.2.18 แท่งแก้วคนสาร (stirring rod)

2.2.19 กรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)

2.2.20 ขวดกรองสาร (suction flask)

2.2.21 กระดาษกรอง (filtering paper)

2.2.22 ขวดฉีดน้ำกลั่น (wash bottle)

2.2.23 ออโต้ปิเปตต์ (auto pipette)

2.2.24 ตะแกรงใส่หลอดทดลอง (test tube rack)

2.2.25 ช้อนตักสาร (spatula)

2.2.26 คีมคีบ (forceps)

2.2.27 ฐานตั้งเหล็ก (stand and base)

2.2.28 ที่จับบิวเร็ตต์ (burette clamp)

2.2.29 แปรงล้างเครื่องแก้ว (brush)

2.2.30 จุกยางดำ (rubber corks)

2.2.31 ลูกยางปิเปต (pipettes bulb)

2.2.32 ไซริ้งบอล (syringe ball)

2.2.33 ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer)

2.2.34 ถุงมือยาง (rubber glove)

2.2.35 หน้ากากปิดปาก (face mask)

2.2.36 เครื่องดูดสารละลาย (dispenser)

2.2.37 ครูซิเบิ้ล (crucible)

2.2.38 เครื่องเขย่า (incubator shaker)

2.2.39 เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge)

2.2.40 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล (precision balance)

2.2.41 pH meter

2.2.42 spectrophotometer

2.2.43 atomic absorption spectrophotometer

2.2.44 Electric oven

2.2.45 Kjeldahl digestion flask

2.2.46 digestion apparatus

2.2.47 distillation apparatus

3. อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ

3.1 เข็มฉีดยาขนาด 0.55 x 40 มิลลิเมตร

3.2 กระบอกฉีดยาขนาด 10 มิลลิลิตร

3.3 เทอร์โมมิเตอร์ 0-100 องศาเซลเซียส

3.4 ขวดสุญญากาศ ขนาด 10 มิลลิลิตร

3.5 ตลับเมตร

3.6 ถาดรองกระถางขนาด 50 x 72 x 45 เซนติเมตร (ก x ย x ส) สำหรับใส่กระถางข้าวและน้ำ เพื่อใช้ในการเก็บตัวอย่างก๊าซ ทำให้เกิดระบบปิด เมื่อนำกล่องอะคริลิคมาครอบเมื่อเก็บก๊าซ

3.7 กล่องเก็บตัวอย่างก๊าซทำจากอะคริลิค มีขนาดความกว้าง x ยาว x สูง คือ 35 x 35 x 100 เซนติเมตร ด้านบนกล่องอะคริลิคจะเจาะรูที่มีขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร นำก๊อกมาเสียบต่อเข้ากับรูที่เจาะและใช้ซิลิโคนทาบริเวณรอยต่อ เพื่อปิดช่องว่างระหว่างรอยต่อ (ภาพที่ 4 a) และต่อท่อซิลิโคน ภายในติดเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิภายในกล่อง (ภาพที่ 5 b)

(a) (b)

ภาพที่ 5 (a) ก๊อกเปิด-ปิด การเข้าออกของก๊าซ (b) การติดเทอร์โมมิเตอร์ภายในกล่องอะคริลิค

วิธีการ

วางแผนการทดลอง

กำหนดกรอบแนวคิด เป้าหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดิน และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากดินปลูกข้าว วางแผนการทดลองแบบ 2x2x4 Factorial in Randomized Complete Block Design (RCBD) จำนวน 4 ซ้ำ โดยใช้ระบบการจัดการน้ำในการปลูกข้าว 2 ระบบ คือ ระบบการจัดการน้ำแบบน้ำขัง (Waterlogging : WL) และระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate wetting and drying : AWD) ลักษณะเนื้อดิน ได้แก่ ดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy clay loam : C1) และดินทรายปนร่วน (Loamy sand : C2) รวมถึงปริมาณปุ๋ยเคมี (Chemical Fertilizer : CF) ประกอบด้วยการใส่วัสดุปรับปรุง 4 แบบ ได้แก่

ตำรับที่ 1 ไม่มีการใส่=ชุดควบคุม (control)

ตำรับที่ 2 ปุ๋ยเคมี 100% ตามค่าวิเคราะห์ดิน (CF100%)

ตำรับที่ 3 ปุ๋ยเคมี 50%ตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% (CF50%+BC100%)

ตำรับที่ 4 ปุ๋ยเคมี 100% และถ่านชีวภาพ 100% (CF100%+BC100%)

โดย CF หมายถึงปริมาณของธาตุอาหารที่ข้าวต้องการเพื่อให้ได้ผลผลิตข้าว 1,000 กก./ไร่ (Witt and Haefele, 2005 อ้างโดย ศุภธิดา, 2560) สำหรับอัตราของถ่านชีวภาพใส่เท่ากับ 1000 กิโลกรัมต่อไร่ (BC100%)

การทดลองประกอบด้วย treatment combinations ดังนี้

WL	Sandy clay loam	control (no CF and BC)
		CF100%
		CF50%+BC100%
		CF100%+BC100%
	Loamy sand	control (no CF and BC)
		CF100%
		CF50%+BC100%
		CF100%+BC100%

AWD	Sandy clay loam	control (no CF and BC)
		CF100%
		CF50%+BC100%
		CF100%+BC100%
	Loamy sand	control (no CF and BC)
		CF100%
		CF50%+BC100%
		CF100%+BC100%

หมายเหตุ: ระบบการจัดการน้ำแบบน้ำขัง (Waterlogging : WL)
ระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate wetting and drying : AWD)
เนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (Sandy clay loam : C1)
เนื้อดินทรายปนร่วน (Loamy sand : C2)
ปุ๋ยเคมี (Chemicals Fertilizer : CF)
ถ่านชีวภาพ (Biochar : BC)

1. การเตรียมดิน

1.1 เก็บตัวอย่างดิน ที่ระดับความลึก 0 -15 เซนติเมตร

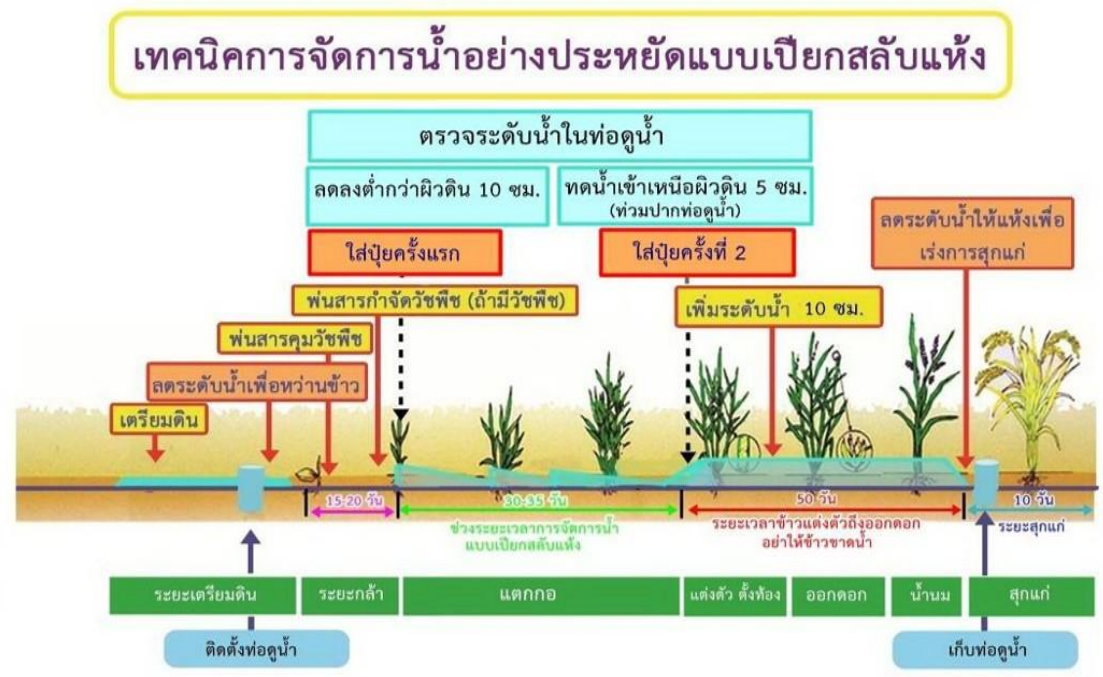
1.2 นำดินมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.00 มิลลิเมตร

1.3 ใส่ดินที่ร่อนผ่านตะแกรงลงในกระถางปลูกข้าวปริมาณ 7 กิโลกรัมต่อกระถาง (การทดลองที่1) และ ดิน 5 กิโลกรัมต่อกระถาง (การทดลองที่2)

1.4 ทำการผสมถ่านชีวภาพจากแกลบที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.25 มิลลิเมตรกับดินปลูกข้าวในอัตรา 1,000 กิโลกรัมต่อไร่ (ตำรับที่ 3 และ 4)

2. การปลูกข้าวในกระถางโดยใช้เทคนิคการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง

ใส่ดินที่ร่อนผ่านตะแกรงลงในกระถาง จากนั้นใส่น้ำลงไปในกระถาง ให้น้ำท่วมดิน เพื่อที่จะแช่ดินประมาณ 3 วัน แล้วจึงนำกล้าข้าวที่เพาะไว้มาทำการปลูกโดยวิธีการดำในกระถางหลังจากการเตรียมดิน และเริ่มการปลูกข้าวโดยการดำในกระถาง โดยใช้ระบบการปลูก 2 ระบบ คือ แบบขังน้ำและแบบการจัดการน้ำแบบปียกสลับแห้ง ดังแสดงตามภาพที่ 6 โดยช่วงระยะเวลาการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งนั้นจะเป็นช่วงที่ข้าวเริ่มแตกกอ หรือหลังจากการใส่ปุ๋ยครั้งแรก



ภาพที่ 6 การปลูกข้าวโดยใช้เทคนิคการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง

ที่มา: กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว (2558)

3. การใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพจากแกลบในการปลูกข้าว

3.1 ใส่ปุ๋ยเคมีครั้งแรก คือ 25 วันหลังการปลูกข้าว และใส่ถ่านชีวภาพจากแกลบข้าวตามอัตราค่าวิเคราะห์ดินโดยใส่ผสมกับดินก่อนนำข้าวลงกระถาง

3.2 ใส่ปุ๋ยเคมีครั้งที่ 2 ในระยะข้าวเริ่มตั้งท้อง คือ 50 วันหลังการปลูกข้าว

4. การเก็บและการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซ

เก็บตัวอย่างก๊าซจากการปลูกข้าวหลังจากข้าวมีอายุ 1 เดือน ไปจนถึงระยะเก็บเกี่ยว โดยทำการเก็บตัวอย่าง ในช่วงเวลา 09:00 – 12:20 น. ซึ่งการเก็บตัวอย่างอากาศมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1 เตรียมขวดเก็บตัวอย่างทำให้เป็นขวดสูญญากาศ

4.2 ยกกระถางข้าวตั้งในถาดรอง จากนั้นใส่น้ำลงไปในถาดรอง และนำกล่องอะคิลิคมาครอบต้นข้าวพร้อมทั้งเปิดก๊อกด้านบนกล่องเก็บตัวอย่างออกเพื่อไล่อากาศ เมื่อระดับน้ำสูงเท่ากันทั้งด้านนอก และด้านในกล่องเก็บตัวอย่าง จึงปิดก๊อกพร้อมทั้งจับเวลา เพื่อเริ่มเก็บตัวอย่าง

4.3 เก็บตัวอย่างก๊าซในกล่องเก็บตัวอย่างในนาทีที่ 20 หลังจากครอบกล่องเก็บตัวอย่าง โดยใช้เข็มฉีดยาพร้อมไซริ้งค์ขนาด 10 มิลลิลิตร ดูดตัวอย่างอากาศออกจากกล่องเก็บตัวอย่าง และ

บรรจุตัวอย่างอากาศในขวดเก็บตัวอย่างที่มีสภาพเป็นสูญญากาศ โดยมีการวัดอุณหภูมิภายในกล่องเก็บตัวอย่างด้วย (ณัฐพล, 2557)

4.4 นำก๊าซที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซเรือนกระจก คือ CO_2 และ CH_4 ที่ถูกปลดปล่อยมาจากดิน โดยใช้เครื่อง Gas Chromatography และคำนวณหาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (Emission potential, E) โดยใช้วิธีการของ Saenjan *et al.,* (2015) ด้วยสมการ

$$E = \{C \times Vb \times (Mw/Mv) \times 273.2 / (273.2 + T)\} \times (1000/5)$$

เมื่อ E = การปลดปล่อยก๊าซ CH_4 และ CO_2 ($gCH_4m^{-2}d^{-1}$ และ $gCO_2m^{-2}d^{-1}$)

C = ความเข้มข้นของก๊าซ CH_4 (µmole mole-1)

Vb = ปริมาตรของช่องว่างในกล่องเก็บก๊าซ (m2)

Mw = น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซ CH_4 16.123 g $mole^{-1}$ และ CO_2 44.01 g $mole^{-1}$

Mv = ปริมาตรโมเลกุลของก๊าซ CH_4 และ CO_2 22.41x10-3 m^3

T = อุณหภูมิ (°C)

5. การวิเคราะห์ตัวอย่างดิน

5.1 การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

5.1.1 เนื้อดิน (soil texture)

โดยการชั่งดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ทำให้อนุภาคดินเกิดสภาพแขวนลอยในน้ำ โดยการใช้สารละลาย 5% Calgon และน้ำกลั่น หาปริมาณของอนุภาค sand silt และ clay โดยใช้ Hydrometer วัดความหนาแน่นของสารแขวนลอย หลังการตกตะกอนของอนุภาคดินในระยะต่าง ๆ

5.1.2 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน (cation exchange capacity : CEC)

โดยวิธีการแทนที่ของประจุบวกในดิน แล้วไล่ที่ประจุบวกตัวอื่นในสภาพที่เป็นกรดโดยการใช้ ammonium acetate 1 N pH 7.0 แช่ตัวอย่างดินให้ดินอิ่มตัว เพื่อให้ NH_4^+ ไปแทนที่ประจุบวกต่าง ๆ ที่ดินดูดซับไว้ เก็บสารละลายที่สกัดได้ไว้สำหรับวิเคราะห์ แคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ (Ca, Mg, K, Na) จากนั้นล้าง NH_4^+ ด้วย Ethanol ปริมาณของ NH_4^+ ที่วิเคราะห์ออกมาจะเป็นค่า CEC ของดิน

5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน

5.2.1 ความเป็นกรด – ด่างของดิน (pH)

pH ของดินจะถูกวัดด้วยเครื่องมือวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าในการละลายดินที่ H^+ ละลายออกมาจากตัวทำละลายในน้ำ โดยใช้สัดส่วนดินต่อน้ำ 1: 1 (v/v) (Mclean, 1982)

5.2.2 อินทรียวัตถุ (Organic matter : OM)

ใช้การวิเคราะห์หาโดยวิธีการของ Walkley & Black โดยการออกซิไดส์อินทรีย์คาร์บอน $K_2Cr_2O_7$ แล้วหาปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ ที่เหลือ โดยการไตเตรทย้อนกลับด้วย $FeSO_4$ หลังจากนั้นคำนวณหาปริมาณอินทรียวัตถุในดิน (Walkley and Black, 1934)

5.2.3 ไนเตรท (NO_3^-)

ใช้วิธีการสกัดดินด้วย K_2SO_4 0.5 M ปริมาตร 20 ml เขย่า 1 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 จากนั้นทำให้เกิดสีโดยใช้โซเดียมซาลิไซลิก 1 ml และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 ml ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 410 nm

5.2.4 แอมโมเนียม (NH_4^+)

ทำการสกัดด้วย KCl แล้วกรอง จากนั้นดูดสารละลายตัวอย่าง 0.5 ml ใส่หลอดทดลอง เติมสารละลายบัพเฟอร์ 2.5 ml แล้วเติมสารละลายโซเดียมซาลิไซเลต – โซเดียมไนโทรพลัสไซด์ 2 ml และเติมสารละลายโซเดียมไฮโมคลอไรด์ 1 ml ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง แล้ววัดค่าดูดกลืนแสง 650 nm

5.2.5 ไนโตรเจนในดิน (Total N)

ใช้วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณ NH_4^+ ที่ถูกย่อยด้วย H_2SO_4 ที่อุณหภูมิสูงไม่เกิน 410°c ในการสลาย NH_4^+ - N ที่ถูกย่อยจะนำมาวิเคราะห์หาปริมาณ NH_3 โดยการกลั่นในสภาพที่เป็นด่าง และ NH_3 ที่ได้จากการกลั่น จะถูกนำมาเก็บในสภาพที่เป็นกรด H_3BO_3 นำ NH_3 ไตเตรทหาเป็นขั้นตอนสุดท้าย

5.2.6 ฟอสฟอรัสที่มีประโยชน์ (Available phosphorus)

ใช้วิธีการสกัดหาปริมาณฟอสฟอรัสในดิน ใช้สารละลาย Bray II สารละลายที่สกัดได้ จะนำไปทำปฏิกิริยาด้วยสารประกอบเชิงซ้อน acid molydate และ phosphomolydate ซึ่งจะถูกรีดิวซ์ด้วย ascorbic acid เป็น Mo สีน้ำเงิน จากนั้นทำการวัดสีที่ช่วงคลื่น 882 nm

5.2.7 โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่สกัดได้ (K , Ca and Mg extractables)

เป็นการวิเคราะห์เบสที่แลกเปลี่ยนได้จากการสกัดดินด้วย ammonium acetate มาหาประจุบวก โดยใช้หลักการของ Atomic absorption spectrophotometer และ Flame photometer

5.2.8 อินทรีย์คาร์บอน (Organic carbon)

อินทรียวัตถุมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบประมาณ 58% การหาปริมาณอินทรียวัตถุจึงนิยมหาในรูปปริมาณคาร์บอน แล้วคำนวณกลับเป็นอินทรีย์วัตถุ โดยวิธีวิเคราะห์อินทรียคาร์บอนส่วนต่าง ๆ ในดิน มีหลายวิธีดังนี้

5.2.8.1 Soil organic carbon (SOC)

โดยนำดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 ml น้ำหนัก 0.3 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 ml และทำ blank เติม $K_2Cr_2O_7$ 1 N ปริมาณ 5 ml และ H_2SO_4 7.5 ml ตั้งบน hot plate ที่อุณหภูมิ 100-130 องศาเซลเซียล เป็นเวลา 30 นาที แล้วไตเตรทกับ 0.5 M NH_4FeSO_4

5.2.8.2 Total organic carbon (TOC)

โดยนำดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.5 mm น้ำหนัก 0.3 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 ml และทำ blank เติม $K_2Cr_2O_7$ 0.1 N ปริมาณ 5 ml และ H_2SO_4 7.5 ml ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาตั้งบน hot plate ที่อุณหภูมิ 100-130 องศาเซลเซียล เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่น 30 ml ไตเตรทกับ 0.2 M NH_4FeSO_4

5.2.8.3 Water Soluble Carbon (WSC)

โดยชั่งดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 ml ปริมาณ 3 g เติมน้ำกลั่น 30 ml ลงในหลอดเซนติฟิวส์ นำไปเขย่าเป็นเวลา 30 นาที และเซนติฟิวส์ที่ 5000 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 นาที กรองด้วยชุดกรองต่อ vacuum pump ซึ่งใช้ตัวกรอง < 0.45 ไมโครเมตร ดูดสารละลายที่กรอง 5 ml ใส่ขวดรูปชมพู่ แล้วเติม 0.1 N $K_2Cr_2O_7$ 0.1 N ปริมาณ 5 ml และ H_2SO_4 7.5 ml ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที และนำไปไตเตรทกับ 0.1 M $FeSO_4$ (Ghani *et al.,* 2003)

5.2.8.4 Hot Water Soluble Carbon (HWSC)

นำดินที่ได้จากการทำ WSC มาเติมน้ำกลั่น 30 ml แช่ไว้ในอ่างน้ำร้อน (hot water bath) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง สารละลายส่วนนี้เรียกว่า Hot Water Soluble Carbon (HWSC) หรือคาร์บอนที่สกัดได้ด้วยน้ำร้อน และนำสารละลายส่วนที่กรองได้ด้วย vacuum pump หาอินทรียคาร์บอนเช่นเดียวกับ WSC (Fynn *et al.,* 2003)

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์

สมบัติทางกายภาพของดินก่อนการทดลอง

ดินที่ใช้ในการปลูกข้าวเป็นเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (พิกัด x : 499028 , y : 2085625) และเนื้อดินทรายปนร่วน (พิกัด x : 502275 , y : 2088868) ผลการวิเคราะห์เนื้อดินก่อนการทดลอง แสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์เนื้อดิน

Soil textur	% Sand	% Silt	% Clay
Sandy clay loam	54	18	28
Loamy sand	82	8	10

สมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

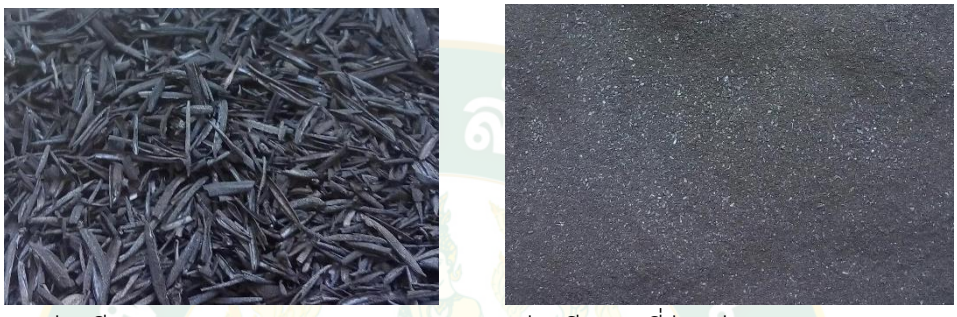
ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินร่วนเหนียวปนทรายที่ถือว่ามีความอุดมสมบูรณ์สูง เหมาะที่ใช้เพาะปลูกพืช และดินทรายปนร่วน ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของดินก่อนการทดลอง แสดงไว้ใน ตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

Soil texture	pH	%SOM	%SOC	Avail.P	K	Ca	Mg	WSC	HWSC
				mg/kg					
Sandy clay loam	6.95	2.29	1.33	31.68	89	1702	74	8	126
Loamy sand	7.09	0.052	0.03	23.3	118	2325	845	18	86

สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพที่ใช้ผลิตจากแกลบหรือเปลือกข้าว (Rice Husk) โดยใช้กระบวนการเผาไหม้ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิในการเผา 350 – 600 องศาเซลเซียส เผาโดยระบบปิดใช้เวลาในการเผา 1-2 ชั่วโมง การนำถ่านชีวภาพมาใช้นั้นจะนำถ่านชีวภาพมาบดให้มีขนาดเล็ก และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.25 มม. (ภาพที่ 7)



ก.ถ่านชีวภาพจากแกลบ ข.ถ่านชีวภาพที่ร่อนผ่านตะแกลง 0.25 มม.

ภาพที่ 7 ถ่านชีวภาพจากแกลบ (ก.) และถ่านชีวภาพที่ร่อนผ่านตะแกลง 0.25 มม.(ข.)

สำหรับสมบัติของถ่านชีวภาพที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีสมบัติ ดังนี้ ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) 8.79 ความหนาแน่นรวม 0.58 กรัม/ลบ.ดม ค่าการนำไฟฟ้า 0.22 มิลลิซีเมนต์/ซม. ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ มีค่า 166.97, 77.85, 14.83 และ 10.36 มก./กก. ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพจากแกลบ

ถ่านชีวภาพ	pH	BD	EC	Avai P	K	Ca	Mg
		g/cm^3	ms/cm	mg/kg			
แกลบ	8.79	0.58	0.22	166.97	77.85	14.83	10.36

การทดลองที่ 1

การปลดปล่อยก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว

การปลดปล่อยก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของดินปลูกข้าวในระยะออกดอก (Flowering) และระยะสุกแก่ (Harvest maturity) พบว่าการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งมีผลทำให้การปลดปล่อยก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (ตารางที่ 8) เนื่องจากการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (Alternate wetting and drying management; AWD) เป็นวิธีหนึ่งที่นอกจากจะลดปริมาณการใช้น้ำในการปลูกข้าวแล้ว ยังสามารถลดการเกิดกระบวนการดีไนตริฟิเคชันจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มักพบในดินน้ำขัง ซึ่งเป็นสาเหตุของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในดินปลูกข้าวได้ (ศุภธิดา, 2560) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ดวงนภา และ บรรชา (2557) ที่ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาการจัดการบริหารจัดการน้ำในนาข้าว เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทน กล่าวว่าระดับน้ำขังในนาข้าวส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนให้มีมากขึ้น ทั้งนี้การทำนาแบบดั้งเดิมส่งผลกระทบมากที่สุด และแบบเปียกสลับแห้งส่งผลกระทบน้อยที่สุด คือ มีเทนในนาข้าวน้อยสุด ซึ่งผลการศึกษาของดวงนภา และบัญชา (2557) พบว่า การบริหารจัดการน้ำในนาข้าวแบบเปียกสลับแห้ง เป็นวิธีการบริหารจัดการน้ำที่สามารถใช้งานได้ดี โดยสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในนาปีและนาปรัง ได้ถึง 80 – 82% และก๊าซมีเทน จะเกิดขึ้นเมื่อค่า Eh อยู่ระหว่าง -67 ถึง -347 mv และการจัดการน้ำในนาข้าวแบบเปียกสลับแห้ง สามารถลดการแพร่กระจายของก๊าซมีเทนได้ถึง 76% และลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนเหลือเพียง 0.029 เทระกรัม/ปี

ตารางที่ 8 การปลดปล่อยก๊าซ CH_4 และ CO_2 ในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD) ของดินปลูกข้าวในระยะข้าวออกดอก (Flowering) และระยะสุกแก่ (Harvest maturity)

Treatment	Gas Emission			
	$CH_4(gCH_4m^{-2}d^{-1})$		$CO_2(gCO_2m^{-2}d^{-1})$	
	Flowering	Harvest maturity	Flowering	Harvest maturity
A : water (n=64)				
WL	0.99 a	0.3 a	64.0 a	59.84 a
AWD	0.87 b	0.28 a	61.27 a	46.82 b
F-test A	**	ns	ns	**

WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

ส่วนการปลดปล่อยก๊าซมีเทนของเนื้อดินทรายปนร่วนในระยะข้าวสุกแก่ มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาต่ำที่สุด (0.28 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) และปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาสูงที่สุดในระยะออกดอก (0.9 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) และมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายของข้าวระยะสุกแก่ต่ำที่สุด (42.76 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (ตารางที่ 9) เนื่องจากดินทรายปนร่วนหรือดินเนื้อหยาบมีการปลดปล่อยก๊าซสูงกว่าดินร่วนเหนียวปนทราย หรือดินเนื้อละเอียด กล่าวคือ ดินที่มีเนื้อดินหยาบ หรือเป็นดิน ที่มีอนุภาคใหญ่ จะมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซสูงกว่าดินที่มีเนื้อดินละเอียด ทั้งนี้เนื่องจากดินเนื้อหยาบ มีปริมาณของช่วงว่างระหว่างอนุภาคดินขนาดใหญ่อยู่มาก ทำให้ก๊าซแพร่กระจายผ่านช่องว่างในดินเข้าสู่ราก และแพร่ผ่านถึงน้ำที่ขังเหนือผิวดินแล้วผ่านสู่อากาศได้ง่าย ส่วนดินที่มีเนื้อดินละเอียดจะมีการปลดปล่อยก๊าซออกมาต่ำกว่าดินเนื้อหยาบ เนื่องจากดินเนื้อละเอียดมีช่องว่างขนาดเล็ก การแพร่กระจายและการรวมตัวของก๊าซเป็นไปได้ช้าและยากกว่า (เศวตฉัตร, 2552) สอดคล้องกับ (อรรคเดช และ พัชรี, 2545) พบว่าดินราชบุรี ซึ่งเป็นดินเหนียวปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาได้ต่ำกว่าดินร้อยเอ็ดซึ่งเป็นดินร่วน ทั้งนี้เพราะดินร่วนมีเนื้อหยาบ และมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินใหญ่ ทำให้ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่าย

ตารางที่ 9 การปลดปล่อยก๊าซ CH_4 และ CO_2 ในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand) ของดินปลูกข้าวในระยะข้าวออกดอก (Flowering) และระยะสุกแก่ (Harvest maturity)

Treatment	Gas Emission			
	$CH_4(gCH_4m^{-2}d^{-1})$		$CO_2(gCO_2m^{-2}d^{-1})$	
	Flowering	Harvest maturity	Flowering	Harvest maturity
B: soil texture (n=32)				
Sandy clay loam (C1)	0.9 a	0.3 a	62.64 a	42.76 b
Loamy sand (C2)	0.96 a	0.28 a	62.63 a	63.9 a
F-test B	ns	ns	ns	**

C1, Sandy clay loam; C2, Loamy sand

Different letters in a column indicate significance difference among treatment. ns = no significant, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

ส่วนการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในดินปลูกข้าว ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่าดินปลูกข้าวในระยะข้าวสุกแก่ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี ตามค่าวิเคราะห์ดินร่วมกับถ่านชีวภาพอัตรา 100% มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาต่ำที่สุด (0.25 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (ตารางที่ 9) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในดินปลูกข้าวในระยะสุกแก่ ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด (34.56 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$) แต่ปลดปล่อยออกมาสูงที่สุดในดินปลูกข้าวที่ไม่มีการปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 การปลดปล่อยก๊าซ CH_4 และ CO_2 ของดินปลูกข้าวในระยะข้าวออกดอก (Flowering) และระยะสุกแก่ (Harvest maturity) เมื่อมีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ

Treatment	Gas Emission			
	$CH_4(gCH_4m^{-2}d^{-1})$		$CO_2(gCO_2m^{-2}d^{-1})$	
	Flowering	Harvest maturity	Flowering	Harvest maturity
C : Fertilizer and Biochar (n=16)				
Control (T1)	0.81 c	0.33 a	63.11 ab	86.5 a
CF 100% (T2)	0.97 ab	0.33 a	59.26 b	34.56 d
CF 50% +BC 100% (T3)	0.91 bc	0.26 b	64.62 a	41.77 c
CF 100%+ BC100% (T4)	1.03 a	0.25 b	63.54 a	50.49 b
F-test C	**	**	ns	**

CF, chemical fertilizer; BC, biochar

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างการจัดการน้ำ เนื้อดิน การใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% ของข้าวระยะสุกแก่มีค่าต่ำสุด (0.11 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) และมีการปลดปล่อยออกมาสูงที่สุดในระยะออกดอกในระบบที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 50% ร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% (1.12 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (ตารางที่ 10) ส่วนการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าในระยะข้าวสุกแก่ที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ (control) มีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาสูงที่สุด (111.56 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$) และปลดปล่อยออกมาต่ำที่สุดในระยะข้าวสุกแก่ ที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพอัตรา 100% (1.14 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (ตารางที่ 11) จะพบว่าการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง สามารถลดการเกิดก๊าซเรือนกระจกได้ เนื่องจากการให้น้ำแบบเปียกสลับแห้ง สำหรับการปลูกข้าวแนวทางหนึ่งเป็นการลดการใช้น้ำแต่ยังรักษาดินให้

อยู่ในสภาพอิ่มตัว หรือลดการใช้น้ำโดยให้ดินอยู่ในสภาพขังน้ำแล้วปล่อยให้ดินชั้นบนแห้งถึงระดับหนึ่ง จึงให้น้ำอีกครั้ง ซึ่งดินจะมีวงรอบของดินที่เปียกสลับแห้ง (Alternative wetting and drying, AWD) เป็นต้น ได้ถูกนำไปปฏิบัติในในประเทศต่าง ๆ เช่น จีน ฟิลิปปินส์ และญี่ปุ่นและถูกมาใช้ในการปลูกข้าวในช่วงฤดูแล้งในบริเวณสามเหลี่ยมปากแม่น้ำโขง และถ่านชีวภาพมีสมบัติเป็นคาร์บอนที่มีความเสถียรสูง (Wu *et al.* 2016) มีพื้นที่ผิวเป็นรูพรุนช่วยดูดซับธาตุอาหาร และกักเก็บคาร์บอนตัดวงจรการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ สอดคล้องกับพัชรี และคณะ (2558) ที่ศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพยูคาลิปตัส และฟางข้าว เพื่อการผลิตข้าวและลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์อย่างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมผลการศึกษาพบว่า การใช้ถ่านชีวภาพ อัตรา 1-4 ตันต่อไร่ ทำให้ปริมาณการปล่อย CH_4, CO_2 และก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ จากการผลิตข้าวลดลงเมื่อเทียบกับตำรับควบคุม

ตารางที่ 11 การปลดปล่อยก๊าซ CH_4 และ CO_2 ของดินปลูกข้าวในระยะข้าวออกดอก (Flowering) และระยะสุกแก่ (Harvest maturity)

Treatment	Gas Emission			
	$CH_4(gCH_4m^{-2}d^{-1})$		$CO_2(gCO_2m^{-2}d^{-1})$	
	Flowering	Harvest maturity	Flowering	Harvest maturity
A x B x C (n=4)				
WLC1T1	1.01 bc	0.30 bcd	60.03 def	81.87 b
WLC1T2	1.02 ab	0.35 abc	39.41 g	8.55 i
WLC1T3	1.21 a	0.30 bcd	69.51 bc	72.91 c
WLC1T4	1.01 bc	0.29 cd	86.8 a	61.12 d
WLC2T1	1.10 ab	0.32 abcd	74.36 b	87.57 b
WLC2T2	1.10 ab	0.31 bcd	71.63 bc	16.88 h
WLC2T3	0.38 d	0.25 d	53.14 f	42.72 e
WLC2T4	1.12 ab	0.29 cd	57.61 ef	107.08 a
AWDC1T1	0.18 e	0.38 ab	60.03 def	65.01 cd
AWDC1T2	0.82 c	0.40 a	70.24 bc	28.94 fg
AWDC1T3	1.00 bc	0.11 e	71.82 bc	22.54 gh

ตารางที่ 11 (ต่อ)

Treatment	Gas Emission			
	$CH_4(gCH_4m^{-2}d^{-1})$		$CO_2(gCO_2m^{-2}d^{-1})$	
	Flowering	Harvest maturity	Flowering	Harvest maturity
AWDC1T4	0.98 bc	0.12 e	43.71 g	1.14 i
AWDC2T1	0.97 bc	0.31 bcd	58.50.5 def	111.56 a
AWDC2T2	0.94 bc	0.25 d	55.78 f	83.85 b
AWDC2T3	1.05 ab	0.37 abc	64.02 cde	28.91 fg
AWDC2T4	1.01 bc	0.3 bcd	66.05 cd	32.64 f
F-test A x B x C	**	**	**	**
CV (%)	15.1	19.96	9.2	10.83

T1, control; T2, CF100%; T3, CF50%+BC100%; T4, CF100%+BC100%

CF, chemical fertilizer; BC, biochar; C1, Sandy clay loam; C2, Loamy sand; WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying

Different letters in a column indicate significance difference among treatment. ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

สมบัติทางเคมีของดินปลูกข้าวหลังการทดลอง

สมบัติทางเคมีของดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD) หลังการทดลอง เมื่อข้าวอายุ 100 วัน พบว่าค่า pH ของดิน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ที่สกัดได้ในดินของระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำ มีค่าสูงกว่าระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (ตารางที่ 12)

ตารางที่ 12 สมบัติทางเคมีของดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD) หลังการทดลอง เมื่อข้าวอายุ 100 วัน

Treatment	Soil chemical properties						
	pH	Avail P.	K	Ca	Mg	NO_3^-	NH_4^+
				mg/kg			
A : water (n=64)							
WL	7.58 a	16.68 b	54.62 a	1981.7 a	298.88 a	2.02 b	17.97 b
AWD	7.14 b	25.82 a	23.19 b	153.7 b	51.86 b	5.87 a	22.51 a
F-test A	**	**	**	**	**	**	*

WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

สมบัติทางเคมีของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand) ที่ใช้ปลูกข้าวหลังการทดลอง เมื่อข้าวอายุ 100 วัน พบว่าค่าความเป็นกรด - ด่างของดิน ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ที่สกัดได้ในเนื้อดินทรายปนร่วน มีค่าสูงกว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (ตารางที่ 13)

ตารางที่ 13 สมบัติทางเคมีของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand) ที่ใช้ปลูกข้าวหลังการทดลอง เมื่อข้าวอายุ 100 วัน

Treatment	Soil chemical properties						
	pH	Avail P.	K	Ca	Mg	NO_3^-	NH_4^+
	mg/kg						
B : soil texture (n=32)							
Sandy clay loam (C1)	7.32 b	20.07 a	37.6 a	957.6 b	156.31 b	4.04 a	18.76 a
Loamy sand (C2)	7.4 a	22.42 a	40.2 a	1177.7 a	194.43 a	3.84 a	21.72 a
F-test B	**	ns	ns	**	**	ns	ns

C1, Sandy clay loam; C2, Loamy sand

Different letters in a column indicate significance difference among treatment. ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

สมบัติทางเคมีของดินปลูกข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพข้าวหลังการทดลอง เมื่อข้าวอายุ 100 วัน พบว่าดินปลูกข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ มีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน โพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่สกัดได้ในดิน มีปริมาณสูงที่สุด (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 14 สมบัติทางเคมีของดินปลูกข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพหลังการทดลอง เมื่อข้าวอายุ 100 วัน

Treatment	Soil chemical properties						
	pH	Avail P.	K	Ca	Mg	NO_3^-	NH_4^+
				mg/kg			
C : Fertilizer and Biochar (n=16)							
Control (T1)	7.36 ab	22.45 a	35.11 b	940.9 b	172.52 a	4.48 a	16.66 b
CF 100% (T2)	7.41 a	20.59 a	39.04 ab	1085.4 ab	162.95 a	3.69 a	22.6 a
CF 50% +BC 100% (T3)	7.33 b	19.86 a	43.07 a	1047.0 ab	177.41 a	3.93 a	23.31 a
CF 100%+ BC100% (T4)	7.34 b	22.08 a	38.4 ab	1197.5 a	188.61 a	3.67 a	18.39 ab
F-test C	*	ns	*	ns	ns	ns	ns

CF, chemical fertilizer; BC, biochar; C1, Sandy clay loam; C2, Loamy sand;
WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying
Different letters in a column indicate significance difference among treatment.
ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

สมบัติทางเคมีของดินปลูกข้าวหลังการทดลอง เมื่อข้าวอายุ 100 วัน ที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง แบบขังน้ำ เนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย เนื้อดินทรายปนร่วน และการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่าค่า pH ของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย มีค่าเพิ่มขึ้นทุกตำรับการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับดินก่อนการทดลอง และค่า pH ของดินทรายปนร่วน ที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพอัตรา 100% มีค่า pH สูงที่สุด (7.7) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 15) แต่ pH ในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพอัตรา 100% มีค่า pH ต่ำสุด (7.01) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 15) เนื่องจากผลของรูปแบบการจัดการน้ำ 2 รูปแบบในการปลูกข้าว คือ การขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD) ต่อ pH ของดินในระหว่างการขังน้ำ ในการให้น้ำแบบการขังน้ำ (WL) ของดิน จะเกิดการเปลี่ยนแปลง pH ของดิน โดยดินกรด จะมี pH สูงขึ้น เนื่องมีการใช้โปรตรอน (H^+) ในปฏิกิริยา ในขณะที่ดินด่าง pH ลดลง เพราะว่ามีปริมาณของกรดคาร์บอนนิคเพิ่มขึ้นในสารละลายดินมีปริมาณของ CO_2 เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลง pH ดังกล่าวจะเปลี่ยนกลับมาสู่สภาพเดิมได้ นอกจากนี้มีการเปลี่ยนแปลงแบบกลับไปมาของค่าสารละลายดินระหว่างการขังน้ำเป็นกลางในช่วงการปลูกข้าว แล้ว pH จะเป็นเป็นด่างเมื่อสิ้นสุดฤดูกาลเพราะปลูก

และดินจะกลับมาเป็นกลางอีกครั้ง เมื่อฤดูการเพาะปลูกใหม่อีกครั้ง (Kirk, 2004) อีกทั้งถ่านชีวภาพมีสถานะเป็นประจุลบ จึงสามารถดูดซับธาตุอาหารที่มีประจุบวกได้ดี อีกทั้งคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ คือ มีรูพรุน เมื่อใส่ลงในดินจะช่วยระบายอากาศ การซึมของน้ำ การอุ้มน้ำ ดูดยึดธาตุอาหาร เป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ ลดความเป็นกรดของดิน ช่วยปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชได้นาน ซึ่งจากการทดลองดินหลังการปลูกข้าว pH มีค่าสูงขึ้นจากดินก่อนการปลูกข้าวทุกตำรับการทดลอง ค่า pH ของดินหลังจากการขังน้ำที่สูงขึ้นเนื่องจากกระบวนการ reduction เมื่อ H^+ ถูกใช้ไปทำให้ H^+ ลดลงส่งผลให้ค่า pH ของดินสูงขึ้น (Ponnamperuma, 1972) และลดความรุนแรงของกรดในดินเพราะมีฤทธิ์เป็นด่าง เพิ่มความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารพืช จึงเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหาร (Lehmann *et al*., 2003) ส่วนฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินปลูกข้าว ที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีค่าสูงสุด (35.12 มก./กก.) แต่ในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 50% ร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำที่สุด (13.19 มก./กก.) ซึ่งต่ำกว่าดินก่อนการทดลอง (ตารางที่ 15) เนื่องจากดินน้ำขังมีการสูญเสียฟอสฟอรัสในรูปของ Phosphine (PH_3) ซึ่งสอดคล้องกับ Aumtong *et al.* (2014) ได้ศึกษาระบบการปลูกข้าวโดยให้น้ำแบบเปียกสลับแห้ง เพื่อเป็นแนวทางในการปลูกข้าวในพื้นที่ที่ขาดแคลนน้ำต่อปริมาณฟอสฟอรัส พบว่า การจัดการน้ำแบบ AWD มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่าการจัดการน้ำแบบ WL ส่วนโพแทสเซียมที่สกัดได้ในดิน พบว่า ทุกตำรับการทดลอง มีค่าต่ำกว่าดินก่อนการทดลองทุกตำรับ และดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 50% ร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีค่าสูงที่สุด (74.64 มก./กก.) แต่ในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพมีปริมาณโพแทสเซียม ที่สกัดได้ในดินต่ำที่สุด (20.84 มก./กก.) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 14) เนื่องจากถ่านชีวภาพมีสถานะเป็นประจุลบ จึงสามารถดูดซับธาตุอาหาร ที่มีประจุบวกได้ดี และค่า pH มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารในดิน ซึ่งดินที่มี pH สูง จะมีปริมาณ K, Ca และ Mg ในระดับสูง อีกทั้งการขังน้ำ Ca, Mg จะถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็ว และ K จะถูกปลดปล่อยออกมาเพิ่มมากขึ้นในรูปของ soluble K. ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการสูญเสีย K ได้ง่าย (Ponnamperuma, 1965) ส่วนปริมาณแคลเซียมที่สกัดได้ในดิน พบว่า ระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำ ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 100% ของดินทรายปนร่วนมีค่าสูงที่สุด (2,484.8 มก./กก.) รองลงมา คือ ตำรับที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพอัตรา 100% (2,423.1 มก./กก.) ซึ่งสูงกว่าดินก่อนการทดลอง แต่ในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพอัตรา 100% ของดินทรายปนร่วนมีปริมาณแคลเซียมต่ำที่สุด (56.8 มก./กก.) ซึ่งมีปริมาณต่ำกว่าดินก่อนการทดลองเป็นอย่างมาก (ตารางที่ 15) ส่วนปริมาณแมกนีเซียมที่สกัดได้ในดิน พบว่า การจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 50% ร่วมกับถ่าน

ชีวภาพ 100% มีปริมาณแมกนีเซียมในดินสูงที่สุด (376.69 มก./กก.) แต่ในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 50% ร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีปริมาณแมกนีเซียมต่ำที่สุด (32.13 มก./กก.) ซึ่งทุกตำรับการทดลองมีปริมาณแมกนีเซียมต่ำกว่าดินก่อนการทดลอง ส่วนปริมาณไนเตรทในดิน พบว่า ระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพ มีปริมาณไนเตรทในดินสูงที่สุด (8.05 มก./กก.) ส่วนระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี 50% ร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีปริมาณไนเตรทในดินต่ำที่สุด (1.91 มก./กก.) และปริมาณแอมโมเนียมในดิน พบว่า ดินปลูกข้าว ที่มีระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 50% ร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีปริมาณแอมโมเนียมในดินสูงที่สุด (29.45 มก./กก.) แต่ดินที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี 100% โดยไม่ใส่ถ่านชีวภาพมีปริมาณแอมโมเนียมในดินต่ำที่สุด (7.95 มก./กก.) ซึ่งทุกตำรับทดลอง มีค่าต่ำกว่าดินก่อนการทดลอง (ตารางที่15) ซึ่งสาเหตุที่มีการเพิ่มขึ้น และลดลงของ NH_4^+ และ NO_3^- นี้ เนื่องมากจากกระบวนการ Nitrification และ Denitrification โดย Nitrification จะเปลี่ยนรูปของ NH_4^+ เป็น NO_3^- และเมื่อดินเกิดการขังน้ำ NO_3^- จะเกิดการสูญหายอย่างรวดเร็วในกระบวนการ Denitrification แต่จะสะสม NH_4^+ ซึ่งมีประโยชน์ต่อข้าวมาก เพราะข้าว จะดูดไนโตรเจนจากดินในปริมาณสูงถึง 70% (ศุภธิดา, 2560) และจากการทดลองนี้ อาจกล่าวได้ว่า กิจกรรมการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหาร และการหมุนเวียนสารต่าง ๆ ในดินส่วนใหญ่ เป็นปฏิกิริยาแบบรีด๊อกซ์ที่ เกิดจากเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ ในเรื่องของการจัดการน้ำ ดินที่อยู่ในสภาพน้ำขัง (WL) จะมีการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารต่าง ๆ ภายในดิน (ศุภธิดา, 2560) เกิดจากจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน และเมื่อดินอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง (AWD) ที่เกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นเวลานาน สามารถนำไปสู่การนำเอาแคตไอออนออกจากโครงสร้างของแร่ดินเหนียว และค่า pH ยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหาร ไม่ว่าจะเป็นไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เป็นต้น รวมถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินในการย่อยสลายอินทรียวัตถุ

ตารางที่ 15 สมบัติทางเคมีของดินปลูกข้าวหลังการทดลอง เมื่อข้าวอายุ 100 วัน

Treatment	Soil chemical properties						
	pH	Avail P.	K	Ca	Mg	NO_3^-	NH_4^+
				mg/kg			
A x B x C (n=4)							
WLC1T1	7.32 c	17.06 cde	49.8 bc	1570.8 b	245.88 b	2.05 e	4.65 e
WLC1T2	7.58 ab	15.54 de	50.94 bc	1660.9 b	242.31 b	1.93 e	7.95 de
WLC1T3	7.47 b	13.19 e	48.41 c	1539.1 b	247.25 b	1.91 e	19.25 abcd
WLC1T4	7.58 ab	16.8 de	53.82 bc	2190.2 a	331.38 a	2.10 e	18.78 abcd
WLC2T1	7.66 a	17.19 cde	44.99 c	1662.9 b	315.38 ab	2.03 e	25.6 ab
WLC2T2	7.68 a	20.9 bcde	59.91 b	2484.8 a	316.13 ab	2.08 e	26.31 ab
WLC2T3	7.68 a	17.15 cde	74.64 a	2321.6 a	376.69 a	2.04 e	24.07 abc
WLC2T4	7.7 a	15.57 de	54.42 bc	2423.1 a	316.06 ab	1.98 e	17.13 bcd
AWDC1T1	7.3 c	29.35 ab	24.82 d	335.5 c	70.31 c	5.78 bcd	19.25 abcd
AWDC1T2	7.28 c	23.07 bcd	23.4 d	110.5 c	44.31 c	6.5 ab	29.45 a
AWDC1T3	7.05 e	24.73 bcd	26.6 d	134.5 c	32.13 c	5.4 bcd	26.07 ab
AWDC1T4	7.01 e	20.82 bcde	23.02 d	119.7 c	36.94 c	6.64 ab	24.89 ab
AWDC2T1	7.19 cd	26.21 abc	20.84 d	194.4 c	53.5 c	8.05 a	17.13 bcd
AWDC2T2	7.12 de	22.67 bcd	21.92 d	85.6 c	49.06 c	4.26 cd	26.89 ab
AWDC2T3	7.1 de	24.36 bcd	22.61 d	192.7 c	53.56 c	6.35 abc	23.83 abc
AWDC2T4	7.04 e	35.12 a	22.29 d	56.8 c	70.06 c	3.96 de	12.77 cde
F-test A x B x C	*	ns	*	ns	ns	ns	ns
CV (%)	1.27	30.62	18.7	27.94	30.1	37.46	40.05

T1, control; T2, CF100%; T3, CF50%+BC100%; T4, CF100%+BC100%

CF, chemical fertilizer; BC, biochar; C1, Sandy clay loam; C2, Loamy sand;

WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

Carbon fraction ของดินปลูกข้าว

Carbon fraction ของดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD) เมื่อข้าวอายุ 100 วัน พบว่า ค่า HWSC TOC SOC SOM และค่า CEC ของดินที่มีระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำมีค่าสูงกว่าระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (ตารางที่ 16)

ตารางที่ 16 Carbon fraction ของดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD) เมื่อข้าวอายุ 100 วัน

Treatment	Carbon function					
	WSC	HWSC	TOC	SOC	SOM	CEC
	mg/kg			(%)		(me/100g)
A : water (n=64)						
WL	10.61 a	46.5 a	1.9 a	1.78 a	3.06 a	33.56 a
AWD	11.55 a	32.25 b	0.54 b	0.5 b	0.86 b	2.61 b
F-test A	ns	**	**	**	**	**

WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

Carbon fraction ของดินปลูกข้าวที่ปลูกในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand) เมื่อข้าวอายุ 100 วัน พบว่าค่า WSC SOC SOM และ CEC ของเนื้อดินทรายปนร่วน มีค่าสูงกว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (ตารางที่ 17)

ตารางที่ 17 Carbon fraction ของดินปลูกข้าวที่ปลูกในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand) เมื่อข้าวอายุ 100 วัน

Treatment	Carbon function					
	WSC	HWSC	TOC	SOC	SOM	CEC
	mg/kg			(%)		(me/100g)
B : soil texture (n=32)						
Sandy clay loam (C1)	10.05 a	42.37 a	1.24 a	1.13 a	1.95 a	16.41 b
Loamy sand (C2)	12.11 a	36.37 b	1.20 a	1.15 a	1.98 a	19.76 a
F-test B	ns	*	ns	ns	ns	**

Sandy clay loam; C2, Loamy sand

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

Carbon fraction ของดินปลูกข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ เมื่อข้าวอายุ 100 วัน พบว่าปริมาณ WSC TOC SOC และ SOM ของดินปลูกข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพมีค่าสูงที่สุด แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 18)

ตารางที่ 18 Carbon fraction ของดินปลูกข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ เมื่อข้าวอายุ 100 วัน

Treatment	Carbon function					
	WSC	HWSC	TOC	SOC	SOM	CEC
	mg/kg			(%)		(me/100g)
C : Fertilizer and Biochar (n=16)						
Control (T1)	12.67 a	41.62 a	1.17 b	1.11 a	1.91 a	18.84 a
CF 100% (T2)	10.05 a	36.0 a	1.22 ab	1.09 a	1.88 a	18.36 a
CF 50% +BC 100% (T3)	11.17 a	40.87 a	1.21 ab	1.18 a	2.03 a	16.85 a
CF 100%+ BC100% (T4)	10.42 a	39.0 a	1.28 a	1.17 a	2.02 a	18.29 a
F-test C	ns	ns	ns	ns	ns	ns

CF, chemical fertilizer; BC, biochar

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

เมื่อทำการวิเคราะห์หา carbon fraction ในดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ และแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย และเนื้อดินทรายปนร่วน พบว่า WSC ที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของดินทรายปนร่วน ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพมีปริมาณ WSC สูงที่สุด (18.3 มก./กก) แต่ในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของดินทรายปนร่วน ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพกลับ มีปริมาณ WSC ต่ำที่สุด (6.3 มก./กก) ส่วน HWSC ที่มีการจัดน้ำแบบขังน้ำของดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 50% ร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีปริมาณ HWSC สูงที่สุด (54.0 มก./กก) แต่ในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของดินทรายปนร่วน ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวมีปริมาณ HWSC ต่ำที่สุด (24.0 มก./กก) ส่วนปริมาณ TOC ที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 100% ร่วมกับถ่านชีวภาพมีปริมาณ TOC สูงที่สุด (2.02%) แต่ในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของดินร่วนเหนียวปนทราย มีปริมาณ TOC ต่ำที่สุด (0.45%) ส่วนปริมาณ SOC ที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีปริมาณ SOC สูงที่สุด (1.85%) แต่ในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวมีปริมาณ SOC ต่ำที่สุด (0.4%) ส่วนปริมาณ SOM ที่มีระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีปริมาณ SOM สูงที่สุด (3.19%) (ตารางที่ 18) เนื่องจากระบบดินนาน้ำขังจะก่อให้เกิดสภาพความเป็นประโยชน์ฟอสฟอรัสจะเพิ่มขึ้น มีการสะสมของอินทรียวัตถุในดิน และการเปลี่ยนแปลง pH ของดิน (จากกรดให้เป็นกลาง) นอกจากนี้ ยังพบการตรึงไนโตรเจนในระบบดินนาน้ำขัง เป็นต้น (Kirk, 2004) แต่เมื่อดินอยู่ในระบบการปลูกข้าวแบบ AWD จะทำให้ผลพลอยได้ที่เกิดจากการขังน้ำก็จะสูญเสียไปด้วย เกิดการสูญเสียไนโตรเจน เกิดการขาดของจุลธาตุ (Micronutrient deficiency) ปริมาณอินทรียวัตถุในดินลดลง หรือปัญหาการมีสภาพ pH ของดินไม่เหมาะสม แต่ในระบบที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวมีปริมาณ SOM ต่ำที่สุด (0.7%) เพราะการจัดการน้ำแบบแห้งสลับเปียกและแบบน้ำขัง มีผลทำให้อินทรียวัตถุในดินแตกต่างกัน (ศุภธิดา และคณะ, 2554) เนื่องจากเมื่อดินมีการขังน้ำ การสลายตัวของ OM จะเกิดได้ช้าลงในสภาพที่ขาด O_2 จึงสะสมในดินและเกิดสารประกอบสุดท้ายจากการสลายตัวของ OM ในสภาพน้ำขัง คือ CO_2, fatty acid, CH_4 และ NH_3 และปริมาณ CEC ที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของดินทรายปนร่วน ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ มีค่า CEC สูงที่สุด (45.6 มิลลิสมมูล/ดินแห้ง100กรัม) แต่ในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของดินทรายปนร่วน ที่ไม่มีการใช้ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ มีค่า CEC ต่ำที่สุด (1.85 มิลลิสมมูล/ดินแห้ง100กรัม) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ) ดังแสดงในตารางที่ 19 ซึ่งดินที่มี CEC สูง มีความสามารถในการกักเก็บ cation ได้มากกว่า รวมทั้งมีความต้านทานการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของดิน เช่น pH ของดิน ตลอดจนสามารถต้านทานการชะล้างได้ดีกว่า

ดินที่มี CEC ต่ำ ซึ่งดินที่ใช้ในทางการเกษตรส่วนใหญ่มีค่า CEC อยู่ในช่วง 3 – 20 cmol (+)/kg (cmol (+)/kg = me/100g) (Eash *et al.,* 2008; Harpstead *et al.,* 2001) (แต่ดินอินทรีย์ อยู่ในช่วง 50 – 200 cmol (+)/kg (Wolf, 1999) ค่า CEC ของดิน จะเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของเนื้อดิน ซึ่งแม้ว่าแร่ดินเหนียวจะมีค่า CEC สูงสุด แต่ก็ยังมีค่าต่ำกว่าอินทรียวัตถุอย่างมากทั้งนี้ 1% ของอินทรียวัตถุให้ค่าเฉลี่ย CEC ได้ถึง 2 me ขณะที่แร่ดินเหนียวให้ได้เพียง 0.5 me (Wolf, 1999)

ตารางที่ 19 Carbon fraction ของดินปลูกข้าว เมื่อข้าวอายุ 100 วัน

Treatment	Carbon function					
	WSC	HWSC	TOC	SOC	SOM	CEC
	mg/kg			(%)		(me/100g)
A x B x C (n=4)						
WLC1T1	13.8 ab	48.0 ab	1.77 b	1.7 a	2.94 a	22.2 e
WLC1T2	7.8 b	46.5 ab	2.02 a	1.7 a	2.94 a	26.15 de
WLC1T3	12.3 ab	54.0 a	1.9 ab	1.83 a	3.15 a	33.1 bc
WLC1T4	7.8 b	42.0 abc	2.02 a	1.8 a	3.11 a	37.1 b
WLC2T1	6.3 b	46.5 ab	1.85 ab	1.68 a	2.9 a	45.6 a
WLC2T2	10.8 ab	42.0 abc	1.9 ab	1.8 a	3.11 a	43.2 a
WLC2T3	13.8 ab	45.0 ab	1.85 ab	1.83 a	3.15 a	29.95 cd
WLC2T4	12.3 ab	48.0 ab	1.87 ab	1.85 a	3.19 a	31.15 bcd
AWDC1T1	12.3 ab	42.0 abc	0.57 c	0.55 b	0.95 b	5.7 f
AWDC1T2	9.3 b	31.5 cd	0.45 c	0.4 b	0.7 b	2.2 f
AWDC1T3	9.3 b	39.0 bc	0.55 c	0.53 b	0.91 b	2.35 f
AWDC1T4	7.8 b	36.0 bc	0.6 c	0.5 b	0.87 b	2.5 f
AWDC2T1	18.3 a	30.0 cd	0.5 c	0.5 b	0.87 b	1.85 f

ตารางที่ 19 (ต่อ)

Treatment	Carbon function					
	WSC	HWSC	TOC	SOC	SOM	CEC
	mg/kg			(%)		(me/100g)
AWDC2T2	12.3 ab	24.0 d	0.52 c	0.45 b	0.78 b	1.9 f
AWDC2T3	9.3 b	25.5 d	0.5 c	0.53 b	0.91 b	2.0 f
AWDC2T4	13.8 ab	30.0 cd	0.62c	0.53 b	0.91 b	2.4 f
F-test A x B x C	ns	ns	ns	ns	ns	**
CV (%)	50.5	23.79	10.3	18.38	18.42	23.48

T1, control; T2, CF100%; T3, CF50%+BC100%; T4, CF100%+BC100%

CF, chemical fertilizer; BC, biochar; C1, Sandy clay loam; C2, Loamy sand;

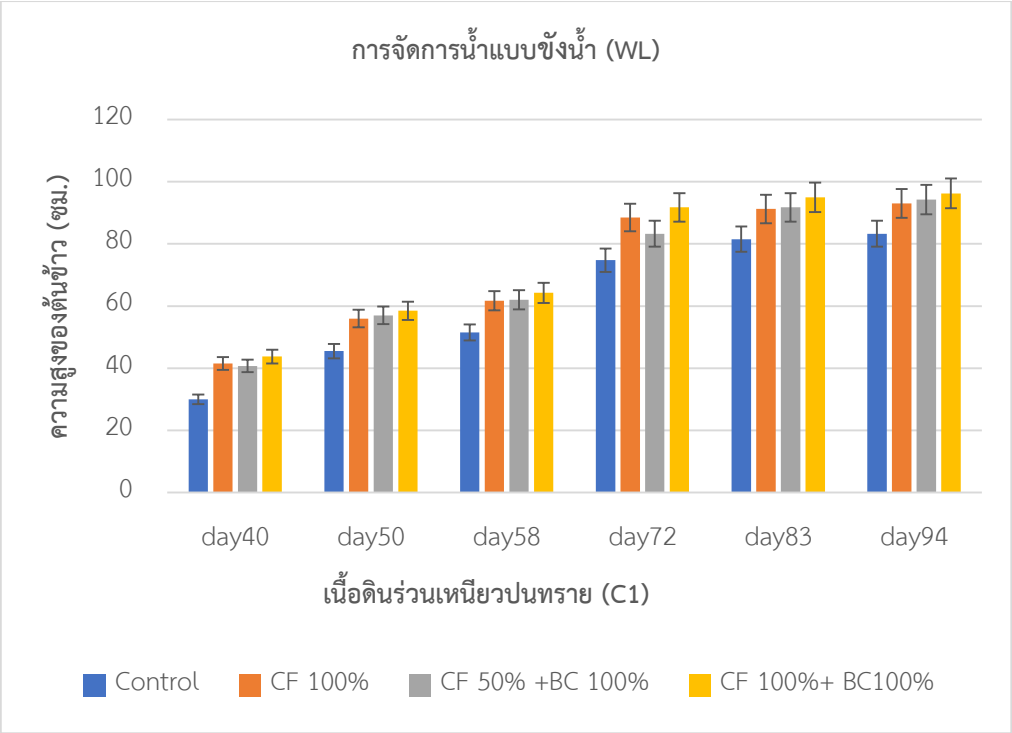
WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

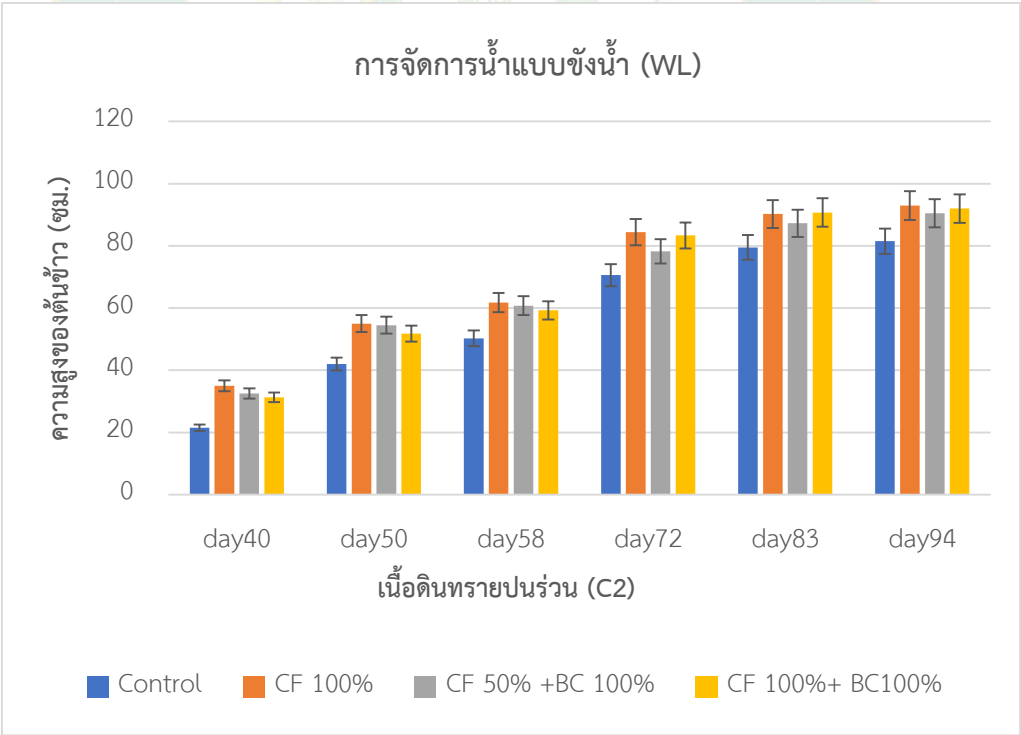
ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

การเจริญเติบโตของต้นข้าวในด้านความสูง

การเจริญเติบโตของต้นข้าวในด้านความสูงที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำ และแบบเปียกสลับแห้ง ของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย เนื้อดินทรายปนร่วน พบว่า ความสูงของต้นข้าวในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย มีความสูงมากกว่าต้นข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วนทุกระยะการเจริญเติบโต เนื่องจากเมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างการจัดการน้ำ เนื้อดินและการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่าต้นข้าวในระยะ 40 50 58 72 83 และ 94 วัน ที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพมีความสูง สูงที่สุดทุกระยะการเจริญเติบโต แต่จาวภา และคณะ (2560) ซึ่งศึกษา ถ่านชีวภาพที่มีผลต่อคุณสมบัติของดิน และการเจริญเติบโตของข้าวนาหว่านน้ำตม (การทดสอบในสภาพกระถาง) รายงานว่า การใช้ถ่านชีวภาพมีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวในระยะแรก ที่อายุ 30 และ 45 วันหลังหว่านข้าว โดยทำให้ข้าวมีความสูง จำนวนหน่อ/ต้น พื้นที่ใบ น้ำหนักแห้งส่วนเหนือดิน สูงกว่ากรรมวิธีไม่ใส่ถ่านชีวภาพ แต่ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตในระยะต่อมา (ใส่ถ่านชีวภาพ 500 กิโลกรัม/ไร่) (ภาพที่ 8 และภาพที่ 9)

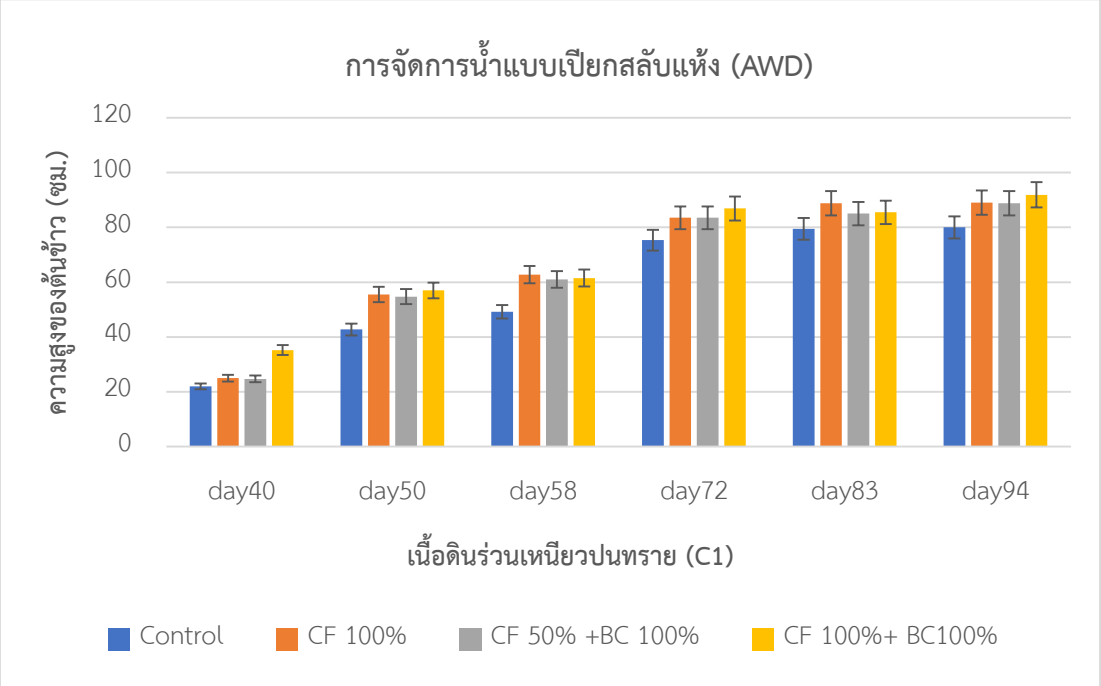


ภาพที่ 8 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย

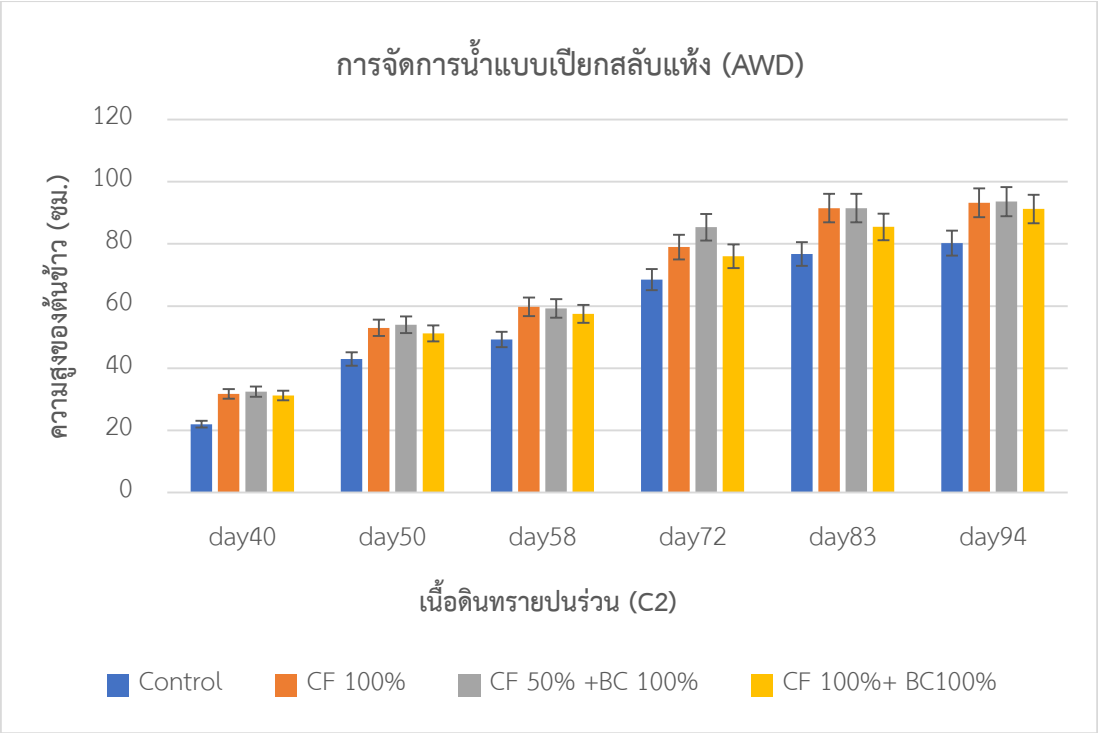


ภาพที่ 9 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วน

ส่วนระยะ 40 และ 50 วัน ในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ มีความสูงต่ำที่สุด และระยะ 58 72 83 และ 94 วัน ในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของดินทรายปนร่วน ที่ไม่มีการใช้ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ มีความสูงต่ำที่สุด แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ภาพที่ 9 และภาพที่ 10) เนื่องจากเนื้อดินทรายปนร่วนเป็นอุปสรรคต่อการเจริญเติบโตของพืช มีการระบายน้ำดีเกินไป ทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำ ความสามารถในการอุ้มน้ำ และดูดซับธาตุอาหารต่ำ ความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำ การใช้ประโยชน์เพื่อการปลูกข้าว จึงจำเป็นต้องมีการจัดการเป็นพิเศษกว่าดินเนื้อละเอียด ความสามารถในการดูดซับธาตุอาหาร และแลกเปลี่ยนธาตุอาหารต่ำมาก เมื่อมีการใส่ปุ๋ยเคมีลงไป ทำให้เกิดการสูญเสียไปจากดินได้ง่าย ทำให้ข้าวที่ปลูกมีการเจริญเติบโตไม่ดี และให้ผลผลิตน้อยกว่าดินปกติ



ภาพที่ 10 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย



ภาพที่ 11 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน

การเจริญเติบโตของต้นข้าวโดยวัดจากน้ำหนักแห้งของต้นและราก

จากการทดลองปลูกข้าวโดยใช้ระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำ และแบบเปียกสลับแห้งในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย และเนื้อดินทรายปนร่วน ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่าการเจริญเติบโตของต้นข้าวโดยวัดจากน้ำหนักแห้งที่ผ่านการอบ ณ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทำให้น้ำหนักรวงข้าว และน้ำหนักรากข้าว ที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำ มีค่าสูงกว่าระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P<0.05$) ส่วนน้ำหนักต้นข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำ มีค่าสูงกว่าระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 20)

ตารางที่ 20 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD)

Treatment	น้ำหนักรวง	น้ำหนักต้น	น้ำหนักราก
		กรัม/กระถาง	
A : water (n=64)			
WL	34.82 a	40.18 a	46.06 a
AWD	31.20 b	38.34 a	37.20 b
F-test A	*	ns	*

WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

เมื่อพิจารณาเรื่องเนื้อดิน น้ำหนักรวงข้าว และน้ำหนักต้นข้าวที่ปลูกในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายมีค่าสูงกว่าเนื้อดินทรายปนร่วน (38.30 และ 41.38 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 21)

ตารางที่ 21 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวที่ปลูกในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand)

Treatment	น้ำหนักรวง	น้ำหนักต้น	น้ำหนักราก
		กรัม/กระถาง	
B : soil texture (n=32)			
Sandy clay loam (C1)	38.30 a	41.38 a	40.73 a
Loamy sand (C2)	27.72 b	36.84 b	42.54 a
F-test B	**	*	ns

C1, Sandy clay loam; C2, Loamy sand

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

และน้ำหนักรวงข้าว น้ำหนักต้นข้าว และน้ำหนักรากที่ปลูกโดยมีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพอัตรา 100% มีค่าสูงกว่าตำรับที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และตำรับที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) (ตารางที่ 22)

ตารางที่ 22 น้ำหนักแห้งของต้นข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ

Treatment	น้ำหนักรวง	น้ำหนักต้น	น้ำหนักราก
	กรัม/กระถาง		
C : Fertilizer and Biochar (n=16)			
Control (T1)	15.41 c	21.93 c	14.83 c
CF 100% (T2)	41.85 a	49.26 a	55.92 a
CF 50% +BC 100% (T3)	31.72 b	35.79 b	38.09 b
CF 100%+ BC100% (T4)	43.06 a	49.44 a	57.7 a
F-test C	**	**	**

CF, chemical fertilizer; BC, biochar; C1, Sandy clay loam; C2, Loamy sand;
WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying
Different letters in a column indicate significance difference among treatment.
ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างการจัดการน้ำ เนื้อดิน การใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่า น้ำหนักรวงข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว มีค่าสูงที่สุด (56.17กรัม) รองลงมา คือ ตำรับที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% (55.38 กรัม) แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และน้ำหนักรวงข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วนที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยและถ่านชีวภาพลงไปมีน้ำหนักต่ำที่สุด (9.92 กรัม) ส่วนน้ำหนักแห้งของต้นข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวมีน้ำหนักสูงที่สุด (55.18 กรัม) รองลงมา คือ ระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพอัตรา 100% (55.15 กรัม) แต่น้ำหนักต้นข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพ มีน้ำหนักต้นข้าวต่ำที่สุด (16.30

กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ส่วนน้ำหนักรากข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วนที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพอัตรา 100% มีน้ำหนักรากสูงที่สุด (76.43 กรัม) แต่น้ำหนักรากของต้นข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพมีน้ำหนักรากต่ำที่สุด (10.94 กรัม) (ตารางที่ 23) ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ่านชีวภาพส่งผลต่อน้ำหนัก และผลผลิตของต้นข้าว เนื่องจากถ่านชีวภาพสามารถเพิ่มผลผลิตของพืชผ่านการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินได้โดยตรงจากการที่ถ่านมีธาตุอาหาร หรือมีผลต่อโครงสร้างของดิน ลักษณะเนื้อดินช่องว่างในดิน เพิ่มความจุในการอุ้มน้ำ และลดความหนาแน่นของดิน (Atkinson *et al.*, 2010; Warnock *et al.*, 2007) และส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตดีขึ้น (Hammes and Schmidt, 2009) และการใส่ถ่านชีวภาพสามารถเพิ่มผลผลิตข้าว (Haefele *et al.*, 2011)

ตารางที่ 23 น้ำหนักแห้งของต้นข้าว

Treatment	น้ำหนักรวง	น้ำหนักต้น	น้ำหนักราก
	กรัม/กระถาง		
A x B x C (n=4)			
WLC1T1	22.33 fg	31.09 efg	16.25 gh
WLC1T2	56.17 a	55.18 a	66.42 ab
WLC1T3	34.43 cde	38.35 cdef	49.74 bcd
WLC1T4	55.38 a	47.39 abc	48.82 bcd
WLC2T1	12.33 h	16.86 h	13.12 h
WLC2T2	36.43 cd	50.95 ab	60.35 abc
WLC2T3	28.86 def	29.74 fg	37.38 defg
WLC2T4	32.64 cde	51.87 ab	76.43 a
AWDC1T1	17.07 gh	23.49 gh	18.9 fgh
AWDC1T2	38.05 c	47.74 abc	52.95 bcd
AWDC1T3	35.74 cde	32.63 defg	25.03 efgh
AWDC1T4	47.25 b	55.15 a	47.64 bcd
AWDC2T1	9.92 h	16.30 h	10.94 h

ตารางที่ 23 (ต่อ)

Treatment	น้ำหนักรวง	น้ำหนักต้น	น้ำหนักราก
		กรัม/กระถาง	
AWDC2T2	36.75 cd	43.18 bcd	43.96 cde
AWDC2T3	27.86 ef	42.43 bcde	40.2 cdef
AWDC2T4	36.97 c	43.35 abcd	57.9 abcd
F-test A x B x C	ns	*	ns
CV (%)	16.99	21.33	36.77

T1, control; T2, CF100%; T3, CF50%+BC100%; T4, CF100%+BC100%

CF, chemical fertilizer; BC, biochar; C1, Sandy clay loam; C2, Loamy sand;

WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

การทดลองที่ 2

การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินปลูกข้าว

การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD) พบว่า ในระยะน้ำนมของข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาน้อยที่สุด (0.62 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) แต่ในระยะออกดอก เมื่อมีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งกลับมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาสูงที่สุด (0.72 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) (ตารางที่ 24)

ตารางที่ 24 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินปลูกข้าว ที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD)

Treatment	Gas Emission			
	$CH_4(gCH_4m^{-2}d^{-1})$			
	Tillering	Booting	Flowering	Milky
A : water (n=64)				
WL	0.7 a	0.69 a	0.62 b	0.71 a
AWD	0.71 a	0.69 a	0.72 a	0.62 b
F-test A	ns	ns	**	**

WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

เมื่อข้าวอยู่ในระยะแตกกอ พบว่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินปลูกข้าวของเนื้อดินทรายปนร่วน มีค่าสูงกว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (ตารางที่ 25) เนื่องจากดินที่มีเนื้อดินหยาบ หรือเป็นดินที่มีอนุภาคใหญ่ จะมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซสูงกว่าดิน ที่มีเนื้อดินละเอียด ซึ่งจากการรายงานของ Yagi and Minami (1990) พบว่า นาข้าวที่ปลูกในดินต่างชนิดกันในญี่ปุ่น จะมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่างกัน เนื่องจากดินแต่ละชนิดมีคุณสมบัติต่างกัน

ตารางที่ 25 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินปลูกข้าวที่ปลูกในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand)

Treatment	Gas Emission			
	$CH_4(gCH_4m^{-2}d^{-1})$			
	Tillering	Booting	Flowering	Milky
B : soil texture (n=32)				
Sandy clay loam (C1)	0.67 b	0.7 a	0.65 b	0.65 b
Loamy sand (C2)	0.74 a	0.68 b	0.69 a	0.68 a
F-test B	**	**	**	**

C1, Sandy clay loam; C2, Loamy sand

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

ในตำรับที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี 100% และตำรับที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี 50% ร่วมกับถ่านชีวภาพ มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาสูงที่สุด (0.76 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (ตารางที่ 26) ถ้าพิจารณาในเรื่องของการขังน้ำและไม่ขังน้ำ CH_4 และ CO_2 เป็นผลผลิตคาร์บอนตัวสุดท้าย ที่ได้จากการสลายตัวของอินทรียวัตถุโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในสภาพที่ขาด O_2 ในสภาพดินน้ำขังจุลินทรีย์จะใช้ NO^{3-} เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และใช้ CO_2 เป็นแหล่งคาร์บอนควบคู่ในการออกซิไดซ์สารอาหารเปลี่ยนเป็นก๊าซ CH_4 จึงทำให้ดิน ที่มีการขังน้ำจะมีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงกว่าดินที่ไม่มีการขังน้ำ

ตารางที่ 26 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินปลูกข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ

Treatment	Gas Emission			
	$CH_4(gCH_4m^{-2}d^{-1})$			
	Tillering	Booting	Flowering	Milky
C : Fertilizer and Biochar (n=16)				
Control (T1)	0.58 c	0.73 a	0.72 a	0.65 b
CF 100% (T2)	0.76 a	0.7 b	0.66 c	0.66 a
CF 50% +BC 100% (T3)	0.76 a	0.67 d	0.69 b	0.66 a
CF 100%+ BC100% (T4)	0.72 b	0.68 c	0.6 d	0.67 a
F-test C	**	**	**	**

CF, chemical fertilizer; BC, biochar

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

ระยะข้าวแตกกอ เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของข้าวในระยะแตกกอ พบว่า การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาต่ำที่สุด (P<0.05) และตำรับที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี 100% เพียงอย่างเดียว มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาสูงที่สุด (0.84 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (ตารางที่ 27) มีรายงานว่าระยะแตกกอ หรืออายุข้าวประมาณ 35-50 วันมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงที่สุด สอดคล้องกับพันธวัศ และ นิตยา (2556) ที่พบว่า พันธุ์ข้าวและชนิดของปุ๋ย มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทน และพบการปลดปล่อยก๊าซมีเทนมากที่สุดในระยะข้าวแตกกอ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Satpathy *et al. (1997)* ที่พบว่าข้าวในระยะแตกกอนั้น มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนสูงที่สุดเช่นกัน ซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องกับปัจจัยด้านอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน

ระยะข้าวตั้งท้อง พบว่า การจัดการน้ำทั้งสองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 24) เนื้อดินทรายปนร่วนมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่ำกว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (ตารางที่ 25) และตำรับ ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี 50% ร่มกับถ่านชีวภาพ 100% มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาต่ำที่สุด (0.67 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 26) เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างการจัดการน้ำ เนื้อดิน และการใส่ปุ๋ยร่วมกับถ่านชีวภาพ เมื่อข้าวอยู่ในระยะตั้งท้อง พบว่า การปลดปล่อยก๊าซมีเทนในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมี

ร่วมกับถ่านชีวภาพมีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนต่ำที่สุด (0.6 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) แต่ตำรับ ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมีกับถ่านชีวภาพมีการปลดปล่อยมีเทนออกมาสูงที่สุด (0.84 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) (ตารางที่ 27)

ระยะข้าวออกดอก ส่วนในระยะข้าวออกดอก พบว่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งสูงกว่าระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (0.72 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P<0.01$) (ตารางที่ 24) เนื้อดินทรายปนร่วนสูงกว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (0.69 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) (ตารางที่ 25) และตำรับที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมีกับถ่านชีวภาพ มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาสูงที่สุด และตำรับ ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีการลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาต่ำที่สุด (0.6 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P<0.01$) (ตารางที่ 26) เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ทั้งสามปัจจัย พบว่าการปลดปล่อยก๊าซมีเทนในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพ มีการปลดปล่อยมีเทนออกมาสูงที่สุด (0.78 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) และการปลดปล่อยมีเทนในระบบการจัดการน้ำแบบขังนำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีการปลดปล่อยมีเทนออกมาต่ำที่สุด (0.35 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) (ตารางที่ 27)

ระยะน้ำนมของข้าว ส่วนข้าวในระยะน้ำนม พบว่า การปลดปล่อยมีเทนในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำมีค่าสูงกว่าระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (ตารางที่ 24) เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างการจัดการน้ำ เนื้อดิน การใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่า ข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการรใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีการปลดปล่อยมีเทนออกมาต่ำที่สุด (0.57 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) ในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว มีการปลดปล่อยมีเทนออกมาสูงที่สุด (0.73 $gCH_4m^{-2}d^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) (ตารางที่ 27) ซึ่งการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากการปลูกข้าวเกิดได้ 3 ทาง คือ โดยการแพร่ผ่านชั้นน้ำ และฟองอากาศในปริมาณเล็กน้อย แต่การปล่อยก๊าซส่วนใหญ่ หรือประมาณ 80% เกิดขึ้นผ่านทางต้นข้าว และข้าว ที่อยู่ในระยะเจริญเติบโตเต็มที่กิจกรรมของจุลินทรีย์ดินได้รับสารคาร์บอนจากสารคัดหลั่งของรากข้าว จึงเกิดการส่งเสริมกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (methanogenesis) มากขึ้น (พัชรี และคณะ, 2557) เทียนชัย (2539) ยังรายงานว่า ภายใต้สภาพที่น้ำท่วมขังในนาข้าว การแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างดิน และบรรยากาศ จะถูกยับยั้งอย่างรุนแรง ทำให้ดินขาดออกซิเจน และกลายเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทน โดยมีต้นข้าวเป็นทางหลังของการปล่อยก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศ และก๊าซเรือนกระจกถูกปลดปล่อยจากดินโดยผ่านการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ และผ่านทางต้นข้าวซึ่ งลักษณะทางกายภาพของต้นข้าวที่ มีช่องว่างภายในใบ ลำต้นและรากข้าว เป็นช่องทางลำเลียงของก๊าซ เพื่อใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึม และปลดปล่อยสู่บรรยากาศ ดังนั้นความสูง และจำนวนกอ ที่มีปริมาณมาก จะมีการปลดปล่อยก๊าซออกมามากเช่นกัน

ตารางที่ 27 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินปลูกข้าว

Treatment	Gas Emission			
	$CH_4(gCH_4m^{-2}d^{-1})$			
	Tillering	Booting	Flowering	Milky
A x B x C (n=4)				
WLC1T1	0.83 a	0.74 b	0.72 cd	0.65 e
WLC1T2	0.71 e	0.69 d	0.66 g	0.73 a
WLC1T3	0.74 d	0.66 e	0.7 e	0.69 d
WLC1T4	0.65 f	0.73 bc	0.35 j	0.71 bc
WLC2T1	0.63 g	0.72 c	0.72 cd	0.73 a
WLC2T2	0.72 e	0.69 d	0.6 i	0.72 ab
WLC2T3	0.71 e	0.69 d	0.62 h	0.73 a
WLC2T4	0.65 f	0.64 f	0.62 h	0.7 cd
AWDC1T1	0.05 h	0.84 a	0.68 f	0.65 e
AWDC1T2	0.78 c	0.73 bc	0.67 fg	0.58 hi
AWDC1T3	0.78 c	0.62 g	0.71 df	0.6 g
AWDC1T4	0.81 b	0.6 h	0.72 cd	0.57 h
AWDC2T1	0.81 b	0.62 g	0.78 a	0.59 gh
AWDC2T2	0.84 a	0.69 d	0.72 cd	0.63 f
AWDC2T3	0.83 a	0.7 d	0.75 b	0.65 e
AWDC2T4	0.77 c	0.74 b	0.73 c	0.7 cd
F-test A x B x C	**	**	**	**
CV (%)	1.16	1.18	1.22	1.23

T1, control; T2, CF100%; T3, CF50%+BC100%; T4, CF100%+BC100%

CF, chemical fertilizer; BC, biochar; C1, Sandy clay loam; C2, Loamy sand; WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying

Different letters in a column indicate significance difference among treatment. ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว

การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD) พบว่าในระยะข้าวแตกกอ ระยะตั้งท้อง และระยะน้ำนมของดิน ที่มีระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าการจัดการน้ำแบบขังน้ำ ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 28)

ตารางที่ 28 การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว ที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) และเปียกสลับแห้ง (AWD)

Treatment	Gas Emission $CO_2(gCO_2m^{-2}d^{-1})$			
	Tillering	Booting	Flowering	Milky
A : water (n=64)				
WL	15.18 a	12.63 a	27.35 b	17.45 a
AWD	14.75 b	8.8 b	34.45 a	15.8 b
F-test A	*	**	**	**

WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว ที่ปลูกในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand) พบว่าในระยะข้าวตั้งท้อง ออกดอก และระยะน้ำนมของเนื้อดินทรายปนร่วน มีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (ตารางที่ 29)

ตารางที่ 29 การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว ที่ปลูกในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) และเนื้อดินทรายปนร่วน (loamy sand)

Treatment	Gas Emission			
	CO_2($gCO_2m^{-2}d^{-1}$)			
	Tillering	Booting	Flowering	Milky
B : soil texture (n=32)				
Sandy clay loam (C1)	13.6 b	12.37 a	31.83 a	18.82 a
Loamy sand (C2)	16.33 a	9.07 b	30.46 b	14.42 b
F-test B	**	**	**	**

C1, Sandy clay loam; C2, Loamy sand

Different letters in a column indicate significance difference among treatment.

ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว ที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่า ในระยะข้าวแตกกอ ระยะตั้งท้อง และระยะน้ำนมของข้าว ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด (ตารางที่ 30)

ตารางที่ 30 การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าวที่ใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ

Treatment	Gas Emission			
	CO_2($gCO_2m^{-2}d^{-1}$)			
	Tillering	Booting	Flowering	Milky
C : Fertilizer and Biochar (n=16)				
Control (T1)	16.89 a	10.58 b	19.48 d	19.37 a
CF 100% (T2)	16.39 a	12.29 a	39.64 a	17.95 b
CF 50% +BC 100% (T3)	13.4 b	9.43 c	28.42 c	14.45 c
CF 100%+ BC100% (T4)	13.17 b	10.56 b	37.04 b	14.72 c
F-test C	**	**	**	**

CF, chemical fertilizer; BC, biochar; C1

Different letters in a column indicate significance difference among treatment. ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

ระยะข้าวแตกกอ การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว ที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำและแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย เนื้อดินทรายปนร่วน ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ พบว่าในระยะข้าวแตกกอ เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของ 3 ปัจจัย ในระบบที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 50% ร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าวออกมาสูงที่สุด (28.06 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$) และในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% กลับมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอกไอออกไซด์ออกมาต่ำที่สุด (8.23 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) (ตารางที่ 31) การปลดปล่อย CO_2 ออกมาสู่ชั้นบรรยากาศภายใต้สภาพการขังน้ำอาจมาจากหลายทาง เช่น กระบวนการหายใจของพืช และกระบวนการปลดปล่อยจากดินโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะกลุ่ม methanogenic bacteria (ศุภธิดา, 2560) แต่จะมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับระดับอินทรียวัตถุในดิน

ระยะข้าวตั้งท้อง ส่วนข้าวในระยะตั้งท้อง เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของ 3 ปัจจัยในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาสูงที่สุด (18.58 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$) แต่ในระบบที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของดินทรายปนร่วน ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาต่ำที่สุด (1.05 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P<0.01$) (ตารางที่ 31)

ระยะออกดอก ส่วนข้าวระยะออกดอก เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของ 3 ปัจจัยในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียวมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าวออกมาสูงที่สุด (51.73 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$) และในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าวออกมาต่ำที่สุด (13.53 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P<0.01$) (ตารางที่ 31)

ระยะน้ำนมของข้าว ส่วนข้าวในระยะน้ำนม เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของ 3 ปัจจัยในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าวออกมาสูงที่สุด (31.43 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$) แต่ในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าวออกมาต่ำที่สุด (11.75 $gCO_2m^{-2}d^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P<0.01$) (ตารางที่ 31)

ตารางที่ 31 การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินปลูกข้าว

Treatment	Gas Emission			
	CO_2($gCO_2m^{-2}d^{-1}$)			
	Tillering	Booting	Flowering	Milky
A x B x C (n=4)				
WLC1T1	16.41 e	15.2 b	19.4 j	31.43 a
WLC1T2	18.5 d	12.62 c	37.37 c	18.66 c
WLC1T3	8.29 i	15.6 b	29.87 f	15.21 f
WLC1T4	8.23 i	13.13 c	35.44 d	17.28 d
WLC2T1	11.59 h	11.0 d	19.62 j	15.8 ef
WLC2T2	16.74 e	6.56 f	24.26 hi	15.87 ef
WLC2T3	28.06 a	8.36 e	23.64 i	12.22 hi
WLC2T4	13.61 fg	18.58 a	29.17 fg	13.11 gh
AWDC1T1	17.32 e	9.0 e	13.53 k	14.03 g
AWDC1T2	17.35 de	14.88 b	45.21 b	20.81 b
AWDC1T3	2.79 j	9.04 e	28.62 g	16.44 de
AWDC1T4	19.94 c	9.47 e	45.2 b	16.74 de
AWDC2T1	22.26 b	7.14 f	25.38 h	16.24 def
AWDC2T2	12.98 g	15.13 b	51.73 a	16.46 de
AWDC2T3	14.47 f	4.7 g	31.57 e	13.93 g
AWDC2T4	10.92 h	1.05 h	38.35 c	11.75 i
F-test A x B x C	**	**	**	**
CV (%)	5.46	7.62	2.62	4.91

T1, control; T2, CF100%; T3, CF50%+BC100%; T4, CF100%+BC100%

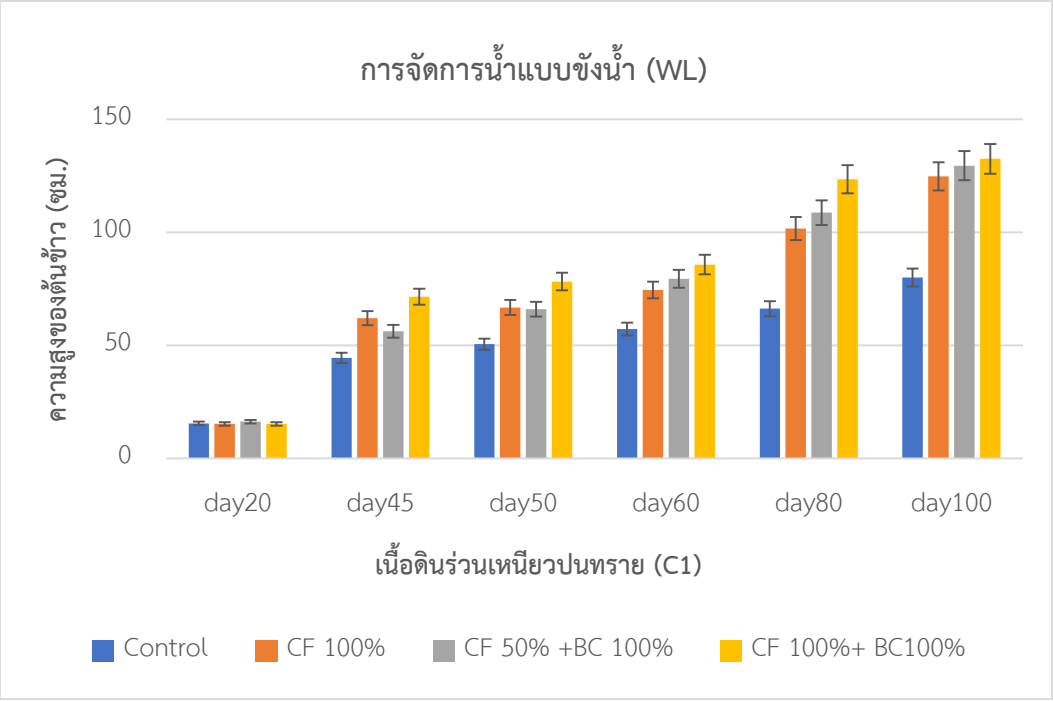
CF, chemical fertilizer; BC, biochar; C1, Sandy clay loam; C2, Loamy sand; WL, waterlogging; AWD, Alternate wetting and drying

Different letters in a column indicate significance difference among treatment. ns = no significant, * P < 0.05, ** P <0.01

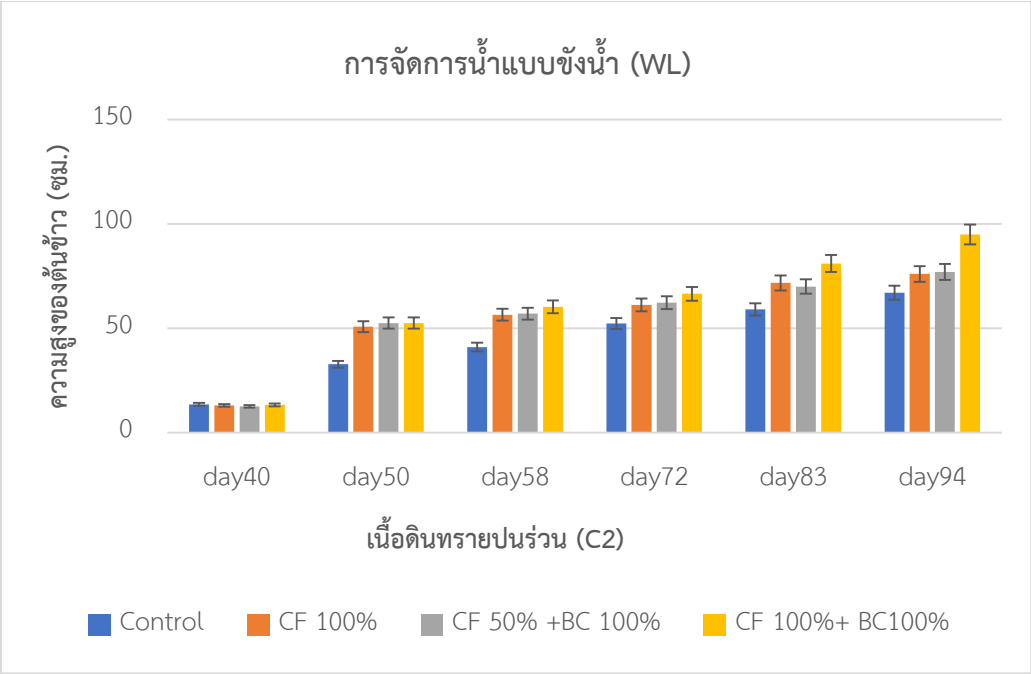
การเจริญเติบโตของต้นข้าวในด้านความสูง

การเจริญเติบโตของต้นข้าวในด้านความสูง ที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำแบบเปียกสลับแห้ง ในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย เนื้อดินทรายปนร่วน ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่า เมื่อพิจารณาระบบการจัดการน้ำจะเห็นว่าต้นข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำที่อายุ 20, 60 และ 80 วัน จะมีความสูงมากกว่าระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ส่วนเรื่องเนื้อดิน จะพบว่าเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายทุกช่วงอายุของต้นข้าว จะมีความสูงมากกว่าเนื้อดินทรายปนร่วน ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P<0.01$) และเมื่อพิจารณาตำรับทดลอง พบว่า ตำรับที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพอัตรา 100% จะมีความสูงสูงกว่าตำรับ ที่ใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว และตำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P<0.01$) แต่จาวภา และคณะ (2560) ไม่พบอิทธิพลของการใส่ถ่านชีวภาพต่อความสูงของข้าวในทุกระยะการเจริญเติบโต

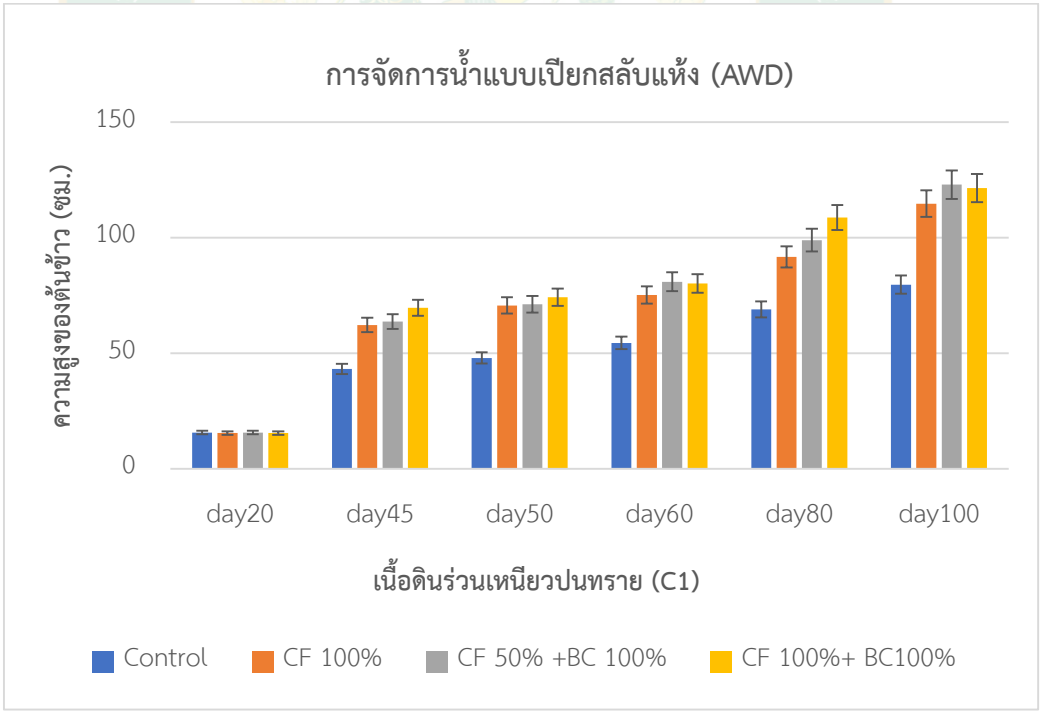
เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างการจัดการน้ำ เนื้อดิน และการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ พบว่า ความสูงของต้นข้าวที่อายุ 45, 50, 60, 80 และ 100 วัน ที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำ เนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมี 100% ร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีความสูงสูงที่สุด และต้นข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำ เนื้อดินทรายปนร่วน ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพมีความสูงต่ำที่สุด (ภาพที่ 12 และภาพที่ 13)



ภาพที่ 12 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย

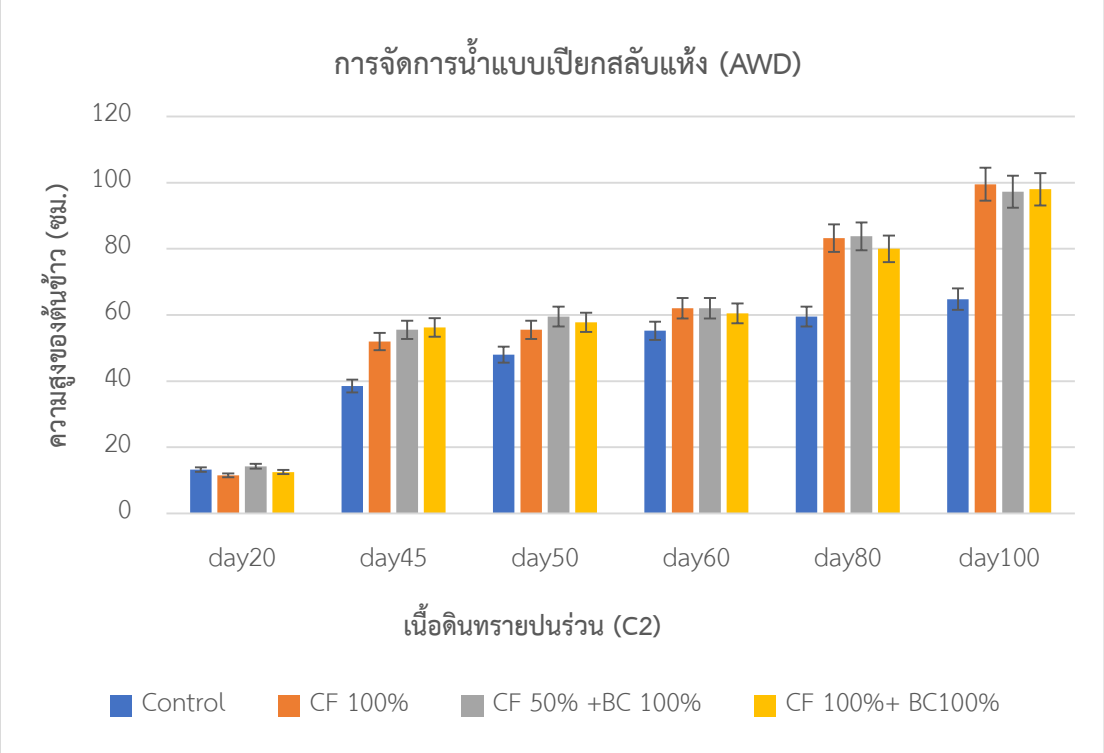


ภาพที่ 13 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วน



ภาพที่ 14 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย

ส่วนต้นข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพมีความสูงสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับที่ใส่ปุ๋ยเคมี และตำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพ และความสูงของต้นข้าว ที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง เนื้อดินทรายปนร่วน ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพมีความสูงต่ำที่สุด (ภาพที่ 14 และภาพที่ 15)



ภาพที่ 15 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน

บทที่ 5
สรุป

การใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดินและลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) ภายใต้ระบบการปลูกข้าว จากการศึกษาพบว่า การใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินภายใต้ระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากดินที่ปลูกข้าว และยังสามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดินปลูกข้าวได้ โดยเนื้อดิน ระบบการจัดการน้ำการใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดิน การเจริญเติบโตของต้นข้าว รวมถึงการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเราสามารถใช้เป็นแนวทางในการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่จะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลสภาพภูมิอากาศได้

การทดลองที่ 1 การปลดปล่อยก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของดินปลูกข้าวในระยะออกดอกและระยะสุกแก่พบว่า การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง มีผลทำให้การปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าการจัดการน้ำแบบขังน้ำ และการปลดปล่อยก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% ของข้าวระยะสุกแก่ มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ส่วนสมบัติทางเคมีของดิน เมื่อมีการใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินจะมีผลทำให้ปริมาณธาตุอาหารในดินมีค่าสูงที่สุด ค่าความเป็นกรด - ด่าง ของดินเหมาะสมต่อการผลิตข้าว ส่วนการเจริญเติบโตของต้นข้าว จะพบว่าในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่มีการใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมี จะมีค่าน้ำหนักต้น น้ำหนักรากข้าว น้ำหนักรวง และความสูงของต้นข้าวสูงกว่าระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง พบว่าตำรับที่มีการใส่ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดิน จะมีค่าสูงกว่าตำรับที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ

การทดลองที่ 2 การปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากดินปลูกข้าวในระยะข้าวแตกกอ พบว่า ดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพ มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาต่ำที่สุด และปลดปล่อยออกมาสูงที่สุดในตำรับ ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ในระยะตั้งท้องกลับพบว่า ดินปลูกข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย ที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมี และถ่านชีวภาพ มีการปลดปล่อยก๊าซมีเทนออกมาสูงที่สุด และตำรับที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีการปลดปล่อยมีเทนออกมาต่ำที่สุด ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติ ส่วนการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ในระยะข้าวตั้งท้อง ที่มีระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพ 100% มีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาต่ำที่สุด และปลดปล่อยสูงที่สุดในระยะออกดอกในตำรับ ที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว ส่วนการเจริญเติบโตด้านความสูงพบว่า ต้นข้าวที่ปลูกในระบบการจัดการน้ำแบบขังน้ำที่อายุ 20, 60 และ 80 วัน จะมีความสูงมากกว่าระบบการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และความสูงของต้นข้าวที่ปลูกในเนื้อดินร่วนเหนียวปนทรายทุกช่วงอายุ จะมีความสูงมากกว่าเนื้อดินทรายปนร่วน ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ อีกทั้งเมื่อพิจารณาตำรับทดลอง พบว่า ตำรับที่มีการใส่ปุ๋ยเคมีร่วมกับถ่านชีวภาพอัตรา 100% จะมีความสูง สูงกว่าตำรับที่ใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว และตำรับที่ไม่ใส่ปุ๋ยเคมีและถ่านชีวภาพ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ

บรรณานุกรม

กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว. 2558. **คู่มือการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งในนาข้าว**. สุพรรณบุรี: สุพรรณการพิมพ์.

จาวภา มะนาวนอก, สันติไมตรี ก้อนคำดี, เกษสุดา เดชภิมล, วรรณวิภา แก้วประดิษฐ์ พลพินิจ และ ดรุณี โชติษฐยางกูร. 2560. ถ่านชีวภาพ: ผลต่อคุณสมบัติของดินและการเจริญเติบโตของข้าวนาหว่านน้ำตม (การทดสอบในสภาพกระถาง). **วารสารแก่นเกษตร**, 5(2), 209-220.

ณัฐพล บัวจันทร์. 2557. **ปริมาณคาร์บอนสะสมในดินที่ใช้ปลูกข้าวในการจัดการดินที่แตกต่างกัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ดวงนภา วานิชสรรพ์ และ บรรชา ขวัญยืน. 2557. การพัฒนาการบริหารจัดการน้ำในนาข้าวเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทน. **วารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา**, 25(1), 59-69.

ทัศนีย์ อัตตะนันทน์. 2550. **ดินที่ใช้ปลูกข้าว**. กรุงเทพฯ: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เทียนชัย สุวรรณเวช. 2539. **เคมีของดิน**. กรุงเทพฯ: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

นิภา ธรรมโสม, มัจฉา แก้วพิลา, ดวงสมร ตุลาพิทักษ์, เกษสุดา เดชพิมล, พัชรินทร์ ส่งศรี และ พัชรี แสนจันทร์. 2556. ผลของอัตราฟางข้าวต่อผลผลิตข้าวและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก. **วารสารแก่นเกษตร**, 41(2), 33-38.

บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีพลังสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2555. **โครงการจัดทำฐานข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภาคการเกษตร**. กรุงเทพฯ: รายงานฉบับสมบูรณ์ สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.

พัชรี แสนจันทร์, นิภา ธรรมโสม, Chhin Phy และ ดวงสมร ตุลาพิทักษ์. 2558. การใช้ถ่านชีวภาพยูคาลิปตัสและฟางข้าวเพื่อการผลิตข้าวและลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์อย่างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม. **แก่นเกษตร**, 43(1), 373-379.

พัชรี แสนจันทร์, มัจฉา แก้วพิลา, นิภา ธรรมโสม, พฤกษา หล้าวงษา, ดวงสมร ตุลาพิทักษ์ และ เกษสุดา เดชภิมล. 2557. ผลของฟางข้าวต่อสภาพรีดักชั่นในดินนาและปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทน (การทดลองในกระถางปลูกข้าว). **ว. แก่นเกษตร**, 42(1), 235-240.

พันธวัศ สัมพันธ์พานิช และ นิตยา รื่นสุข. 2556. ผลของพันธุ์ข้าวและชนิดของปุ๋ยต่อการปลดปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าว. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 18(1), 105-115.

ภัทรา เพ่งธรรมกีรติ. 2552. **การศึกษาติดตามการเจรจาในเวทีการเจรจาเรื่องโลกร้อนที่เกี่ยวโยงกับภาคการเกษตรและนัยสำคัญต่อประเทศไทย**. รายงานฉบับสมบูรณ์. สัญญาเขตที่ PDG5230005. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

ระวิวรรณ กาญจสุนทร. 2537. **ผลการทำนาสวนและนาไร่ต่อการปล่อยก๊าซมีเทนในจังหวัดเชียงใหม่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รุ่งทิพย์ เกาะคู, นงภัทร ไชยชนะ, วิทิตร ใจอารีย์, ทศพล พรพรหม, ชเนษฎ์ ม้าลาพอง และทิวา พาโคกทม. 2558. การปล่อยแก๊สมีเทนจากการจัดการน้ำและวัชพืชในนาข้าวชลประทาน. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53**. คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

ศิริลักษณ์ พิมมะสาร, นครินทร์ ชัยแก้ว และ สิทธิชัย พิมลศรี. 2550. การประมาณค่าการปล่อยก๊าซมีเทนจากนาข้าวในจังหวัดพะเยา. **Naresuan Phayao Journal**, 6(2), 116-127.

ศุภธิดา อ่ำทอง. 2560. **ดินปลูกข้าวและการจัดการ**. เชียงใหม่: ภาควิชาปฐพีศาสตร์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ศุภธิดา อ่ำทอง, พิทวัส สุสิงสา และ กนกกาญจน์ กันทะวงษ์. 2554. ความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนที่ถูกออกซิไดซ์ด้วยเพอร์แมงกาเนตและอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในดินชนิดต่าง ๆ. **Journal of Agr. Research & Extension**, 28(2), 33-38.

ศูนย์ข้อมูลก๊าซเรือนกระจก องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก). 2559. **การตรวจวัดก๊าซเรือนกระจกจากสถานีจุลอุตุนิยมวิทยา**. กรุงเทพฯ: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน).

ศูนย์วิจัยธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร. 2559. **โครงการลดคาร์บอน (Carbon Minus Project) ที่ประสบความสำเร็จ กรณีศึกษา: ประเทศญี่ปุ่น**. กรุงเทพฯ: ศูนย์วิจัยธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร.

เศวตฉัตร ศรีสุรัตน์. 2552. การลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก: กรณีก๊าซมีเทนจากนาข้าว. **วารสารสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**, 115-122.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2554. **อภิธานศัพท์และคำย่อ ด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก**. กรุงเทพฯ: สำนักพัฒนาศักยภาพและเผยแพร่องค์ความรู้ องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน).

อรรคเดช ศรีบุตตะ และ และพัชรี แสนจันทร์. 2545. ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดและปลดปล่อยมีเทนจากนาข้าว. **วารสารศูนย์บริการวิชาการ**, 10(3), 42-46.

อรสา สุกสว่าง. 2552. เทคโนโลยีถ่านชีวภาพ : วิธีแก้ปัญหาโลกร้อนดินและความยากจนในการเกษตรกรรม. น. 172-184. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**. คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

อัจฉรา ชุมวงศ์ และ บัญชา ขวัญยืน. 2551. **การจัดการน้ำในนาข้าวเพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านก๊าซมีเทน**. กรุงเทพฯ: สำนักออกแบบวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม กรมชลประทาน.

Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D. & Hipps, N. A. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. **Plant and Soil**, 337(1), 1-18.

Aumtong, S., Kanthiya, N. & Yod, I. K. 2014. **Effect of alternate wetting and drying continuous waterlogging on phosphorus fractions under rice cultivation** Chiang Mai: Maejo University.

Buller, L. S., Bergier, I., Ortega, E., Moraes, A., Bayma-Silva, G. & Zanetti, M. R. 2015. Soil improvement and mitigation of greenhouse gas emissions for integrated crop–livestock systems: Case study assessment in the Pantanal savanna highland, Brazil. **Agricultural Systems**, 137, 206-219.

Case, S. 2013. **Biochar amendment and greenhouse gas emissions from agricultural soils.** Dissertation Phd. University of Edinburgh.

Chapuis-Lardy, L., Wrage, N., Metay, A., Chotte, J. L. & Bernoux, M. 2007. Soils a sinkfor N2O. A review Glob. **Change Biol**, 13, 1–17.

Eash, N. S., Green, C. J., Ravzi, A. & Bennett, W. F. 2008. **Soil Science Simplified.** 5th ed. Wiley-Black Wall Ames, lowa.

Haefele, S., Konboon, Y., Wongboon, W., Amarante, S., Maarifat, A. A., Pfeiffer, E. M. & Knoblauch, C. 2011. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems. **Field Crops Research**, 121(3), 430-440.

Harpstead, M. I., Saver, T. J. & Bannett, W. F. 2001. **Soil science simplified**. 4th. Lowa: Lowa state univ. Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 1996. Methane emission from rice cultivation: Flooded fields. (Revised). **Guidelines for national greenhouse gas inventories: Reference manual**, 4, 53-75.

Jones, P. D. & Briffa, K. R. 1992. Global surface air temperature variations during the twentieth century: Part 1, spatial, temporal and seasonal details. **The Holocene**, 2(2), 165- 179.

Kearns, J., Knappe, D. & Saquing, C. 2008. **Charcoals: An Electron Microscopy Study**. [Online]. Available http://www.aqsolutions.org/images/2008/08/electron-microscopy-study.pdf. (31 March 2020).

Kirk, G. J. D. 2004. **The biogeochemistry of submerged soils**. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.

Knohl, A. & Veldkamp, E. 2011. Indirect feedbacks to rising CO_2. **Nature research**, 475, 177-178.

Land Classification Division and FAO Project Staff. 1973. **Soil Interpretation Handbook for Thailand**. Bangkok: Dept. of Land Development, Min. of Agri. And Coop.

Lehmann, J., Pereira da Silva, J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W. & Glaser, B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, 249(2), 343-357.

Mclean, E. O. (1982). Soil pH and Lime Requirement. pp. 199-224. In A. L. Page (Ed.), **Methods of Soil Analysis, Part II. Chemical and Microbiological Properties. Soil Science Society of America**. Madison, WI.

Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning : ONEP. 2009. **National strategy on Climate Change Management (A.D. 2008-2012)**. Bangkok: Ministry of Natural Resources and Environment.

Ponnamperuma, F. N. 1972. The Chemistry of Submerged Soils. **Advances in Agronomy**, 24, 29-96.

Prabha, S. P., Renuka, R., Sreekanth, N. P., Padmakumar, B. & Thomas, A. P. 2013. A study of the fertility and carbon sequestration potential of rice soil with respect to the application of biochar and selected amendments. **Annals of Environmental Science**, 7, 17-30.

Satpathy, S. N., Rath, A. K., Ramakrishnan, B., Rao, V. R., Adhya, T. K. & Sethunathan, N. 1997. Diurnal variation in methane efflux at different growth stages of tropical rice. **Plant and Soil**, 195(2), 267-271.

Seehausen, M. L., Gale, N. V., Dranga, S., Hudson, V., Liu, N., Michener, J., Thurston, E., Williams, C., Smith, S. M. & Thomas, S. C. 2017. Is There a Positive Synergistic Effect of Biochar and Compost Soil Amendments on Plant Growth and Physiological Performance? **Agronomy**, 7(1), 13.

Uvarov, A. V. 2000. Effects of Smoke Emissions from a Charcoal Kiln on the Functioning of Forest Soil Systems: A Microcosm Study. **Environmental Monitoring and Assessment**, 60(3), 337-357.

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 Science**, 37(1), 29-33.

Warnock, D. D., Lehmann, J., Kuyper, T. W. & Rillig, M. C. 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. **Plant and Soil**, 300(1), 9-20.

Wolf, B. 1999. **The Fertile Triangle: The Interrelationship of Air, water, and Nutrients in Maximizing soil Productivity**. New York: The Haworth Press.

Wu, M., Han, X., Zhong, T., Yuan, M. & Wu, W. 2016. Soil organic carbon content affects the stability of biochar in paddy soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 223, 59-66.

Yagi, K. & Minami, K. 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. **Soil Science and Plant Nutrition**, 36(4), 599-610.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

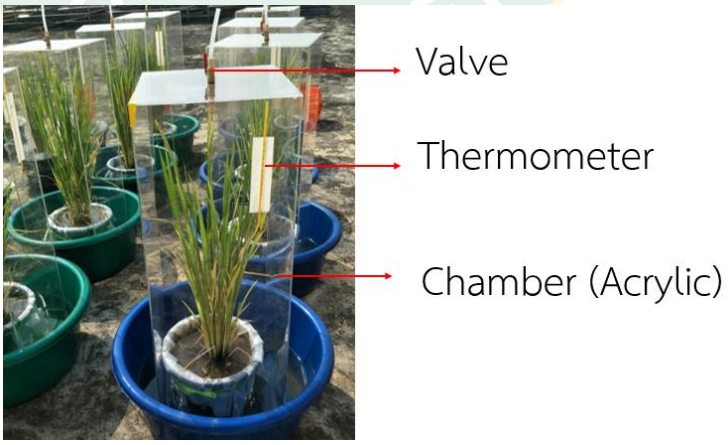
อุปกรณ์และวิธีเก็บตัวอย่างก๊าซภาคสนาม

การเก็บตัวอย่างก๊าซเรือนกระจกจากภาคสนาม

ก๊าซเรือนกระจก คือ ก๊าซที่เป็นองค์ประกอบของบรรยากาศโลกห่อหุ้มโลกไว้เสมือนเรือนกระจก ก๊าซเหล่านี้มีความจำเป็นต่อการรักษาอุณหภูมิของโลกให้คงที่ ซึ่งอาจแบ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกตามธรรมชาติและก๊าซเรือนกระจกจากภาคอุตสาหกรรม โดยองค์ประกอบที่สำคัญของก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), มีเทน (CH_4), ไนตรัสออกไซด์ (N_2O), ซีเอฟซี (CFCs), ไฮโดรฟลูโรคาร์บอนคาร์บอน (HFCs), เพอร์ฟลูโรคาร์บอน (PFCs) และซัลเฟอร์เฮกซาฟลูออร์ไรด์ (SF_6) โดยธรรมชาติแล้ว ก๊าซเรือนกระจกจะช่วยรักษาอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกให้อยู่ในระดับที่คงที่ อย่างไรก็ตาม กิจกรรมที่ดำเนินการโดยมนุษย์กลับส่งผลให้เกิด “ภาวะโลกร้อน (Global Warming)” อันเกิดจากสาเหตุการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลและการตัดไม้ทำลายป่ารวมถึงกิจกรรมทางการเกษตร เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งการเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการก็เป็นปัจจัยหลัก ๆ ที่จะทำให้ข้อมูลที่ได้คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้นจึงได้จัดทำคู่มือการเก็บตัวอย่างก๊าซเรือนกระจกจากภาคสนามนี้ขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการเก็บตัวอย่างก๊าซและวิธีการทำอุปกรณ์การเก็บตัวอย่างก๊าซสำหรับผู้ที่สนใจสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง

1. วัสดุอุปกรณ์

1.1 กล่องเก็บตัวอย่างก๊าซสำหรับเก็บก๊าซในดินปลูกข้าวใช้กล่อง Acrylic ขนาด 35x35x100 (กว้างxยาวxสูง) (ภาพผนวกที่ 1)



ภาพผนวกที่ 1 กล่องเก็บตัวอย่างก๊าซสำหรับเก็บก๊าซในดินปลูกข้าว

1.2 อุปกรณ์ดูดตัวอย่างก๊าซ (ภาพที่ 17)

- ขวดสุญญากาศขนาด 4 มล. (1)
- Syringe / กระบอกฉีดยาขนาด 10 มล. (2)
- Vale / วาล์วเปิด-ปิด (3)
- เข็มฉีดยาเบอร์ 22 (4)

ภาพผนวกที่ 2 อุปกรณ์ดูดตัวอย่างก๊าซ

1.3 วาล์ว / ก๊อก เปิด-ปิด พร้อมโอริง เพื่อติดข้างบนกล่องเก็บตัวอย่างก๊าซ สำหรับใช้เปิด-ปิด ตอนดูดตัวอย่างก๊าซ (ภาพที่ 18)

ภาพผนวกที่ 3 วาล์ว / ก๊อก เปิด-ปิด พร้อมโอริง

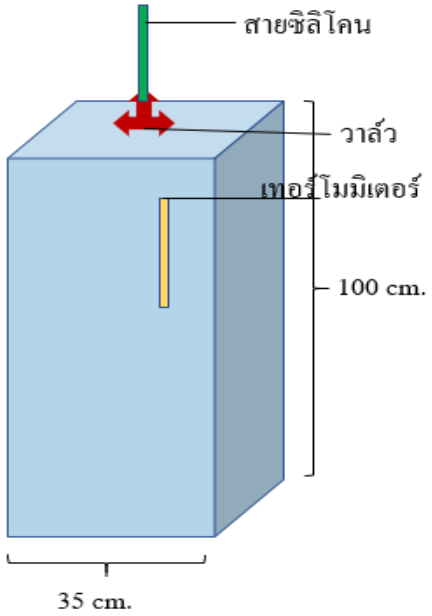
1.4 สายซิลิโคนความยาว 10 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. (ภาพที่ 19)

1.5 เทอร์โมมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ

1.6 พาราฟินแผ่น

ภาพผนวกที่ 4 สายซิลิโคน

2. วิธีการประดิษฐ์กล่องเก็บตัวอย่างก๊าซ



ภาพผนวกที่ 5 กล่องเก็บตัวอย่างก๊าซ

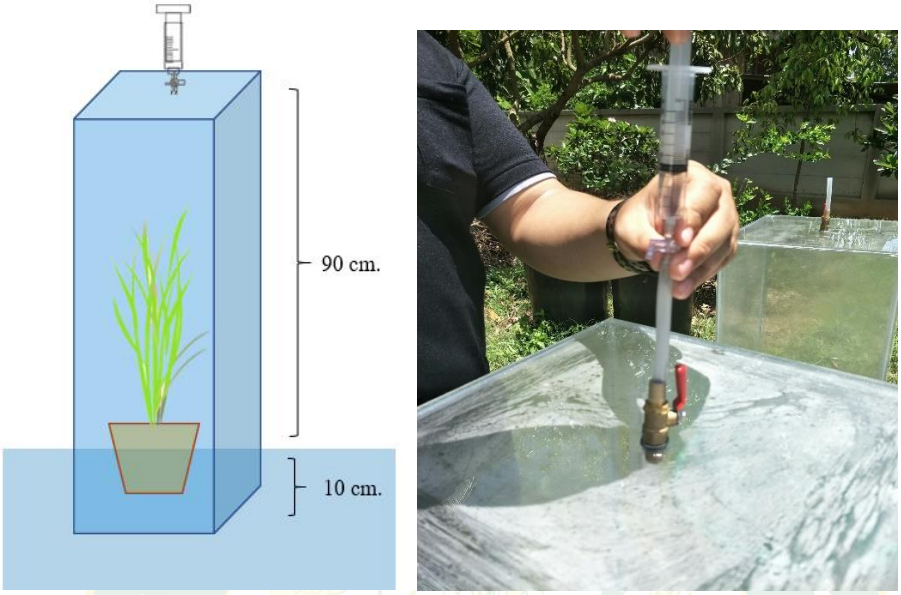
2.1 ใช้แผ่น Acrylic ขนาด 35x35x100 (กว้างxยาวxสูง) ประกอบกันโดยใช้น้ำยาผสานอะคริลิคเพื่อไม่มีช่องว่างอากาศ

2.2 ด้านบนกล่องเจาะรูขนาด 1 ซม. เพื่อติดวาล์ว/ก๊อกเปิด-ปิด พร้อมใส่โอริงแล้วต่อสายซิลิโคน

2.3 ด้านในกล่องติดเทอร์โมมิเตอร์

2.4 หลังจากนั้นนำซิลิโคนเหลวมาทาตรงรอยผสานของกล่อง Acrylic ทุกด้าน เพื่อป้องกันก๊าซรั่ว

3. ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างก๊าซ



ภาพผนวกที่ 6 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างก๊าซ

3.1 การเก็บตัวอย่างก๊าซในดินปลูกพืช เช่น ดินปลูกข้าวที่มีต้นข้าว จะใช้กล่องเก็บก๊าซที่เป็น Acrylic ที่มีลักษณะใส่ โดยจะฝังกล่อง Acrylic ลงไป 10 ซม. ปิดก๊อกด้านบน และจับเวลา 20 นาที แล้วจึงดูดตัวอย่างก๊าซมาใส่ในขวดสุญญากาศ แต่ถ้าปลูกพืชในกระถาง จะต้องมีกะละมังที่มีขนาดใหญ่กว่ากล่อง Acrylic โดยจะยกกระถางต้นพืชใส่ในกะละมัง เติมน้ำลงไปให้สูง 10 ซม. หลังจากนั้นจึงนำกล่อง Acrylic ครอบลงไปแล้วปิดก๊อกด้านบน และจับเวลา 20 นาที แล้วจึงดูดตัวอย่างก๊าซมาใส่ในขวดสุญญากาศ

3.2 เมื่อดูดตัวอย่างก๊าซใส่ในขวดสุญญากาศแล้วควรเก็บไว้ในตู้เย็นก่อนนำไปวิเคราะห์

ภาพผนวกที่ 7 เครื่อง Gas Chromatography (GC)

3.3 วิเคราะห์หาปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยมาจากดิน โดยใช้เครื่อง Gas Chromatography (GC) และคำนวณหาการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ (Emission potential, E) โดยใช้วิธีการของ Saenjan *et al.,* (2015) ด้วยสมการ $E = \{C \times Vb \times (Mw/Mv) \times 273.2 / (273.2 + T)\} \times (1000/5)$

เมื่อ E = การปลดปล่อยก๊าซ CH_4 และ CO_2 ($gCH_4m^{-2}d^{-1}$ และ $gCO_2m^{-2}d^{-1}$)

C = ความเข้มข้นของก๊าซ CH_4 ($\mu mole\ mole^{-1}$)

Vb = ปริมาตรของช่องว่างในกล่องเก็บก๊าซ (m^2)

Mw = น้ำหนักโมเลกุลของก๊าซ CH_4 16.123 g $mole^{-1}$ และ CO_2 44.01 g $mole^{-1}$

Mv = ปริมาตรโมเลกุลของก๊าซ CH_4 และ CO_2 $22.41 \times 10^{-3}\ m^3$

T = อุณหภูมิ (°C)

ภาคผนวก ข

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้เผาถ่านชีวภาพ

ภาพผนวกที่ 8 ถังสำหรับเผาถ่านชีวภาพ

ภาพผนวกที่ 9 ถ่านชีวภาพจากแกลบข้าว

ภาคผนวก ค

เกณฑ์มาตรฐานของค่าวิเคราะห์ดิน

ตารางผนวกที่ 1 ระดับธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดิน (USDA)

ธาตุอาหารพืช	ระดับความเป็นประโยชน์ต่อพืช (mg kg^{-1})				
	ต่ำมาก	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูงมาก
ฟอสฟอรัส (P)	< 3	3 - 10	11 - 15	16 - 45	> 45
โพแทสเซียม (K)	< 30	30 - 60	61 - 90	91 - 120	> 120
แคลเซียม (Ca)	< 400	400 - 1000	1001 - 2000	2001 - 4000	> 4000
แมกนีเซียม (Mg)	< 36	36 - 120	121 - 365	366 - 975	> 30

ตารางผนวกที่ 2 ระดับความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation exchange Capacity)

ระดับ	CEC (cmol kg-1)
ต่ำมาก	< 3.0
ต่ำ	3.0 - 5.0
ค่อนข้างต่ำ	5.0 - 10.0
ปานกลาง	10.0 - 15.0
ค่อนข้างสูง	15.0 - 20.0
สูง	20.0 - 30.0
สูงมาก	> 30.0

ตารางผนวกที่ 3 ระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH 1 : 1) Land Classification Division and FAO Project Staff (1973)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ระดับ
<4.5	กรดจัดมาก
4.5 - 5.0	กรดจัด
5.1 - 5.5	กรดแก่
5.6 - 6.0	กรดปานกลาง
6.1 - 6.5	กรดเล็กน้อย
6.6 - 7.3	กลาง
7.4 - 7.8	ด่างอ่อน
7.9 - 8.5	ด่างปานกลาง
8.6 - 9.0	ด่างแก่
> 9.1	ด่างจัด

ตารางผนวกที่ 4 ระดับอินทรียวัตถุ (organic matter) (% organic carbon x 1.724)

ระดับ (rating)	พิสัย (ร้อยละ)
ต่ำมาก	< 0.5
ต่ำ	0.5 - 1.0
ค่อนข้างต่ำ	1.0 - 1.5
ปานกลาง	1.5 - 2.5
ค่อนข้างสูง	2.5 - 3.5
สูง	3.5 - 4.5
สูงมาก	> 4.5

ภาคผนวก ง

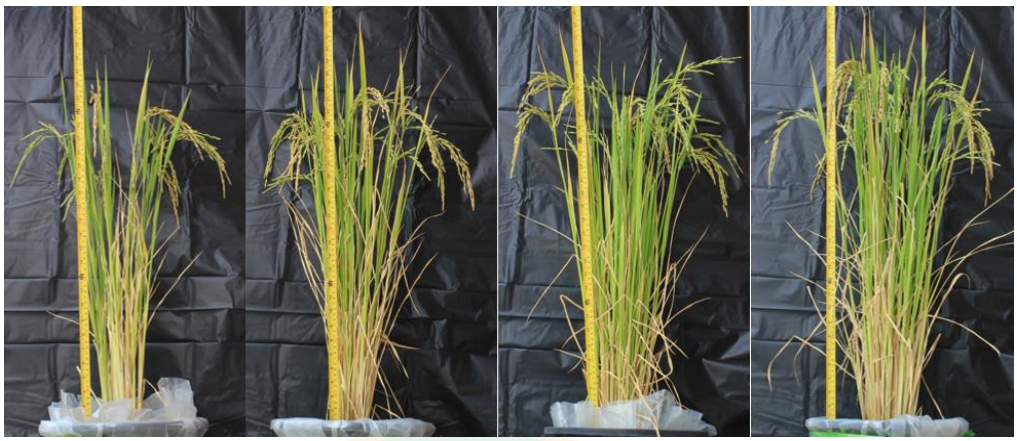
รูปภาพการทดลอง

ภาพผนวกที่ 10 การจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL)

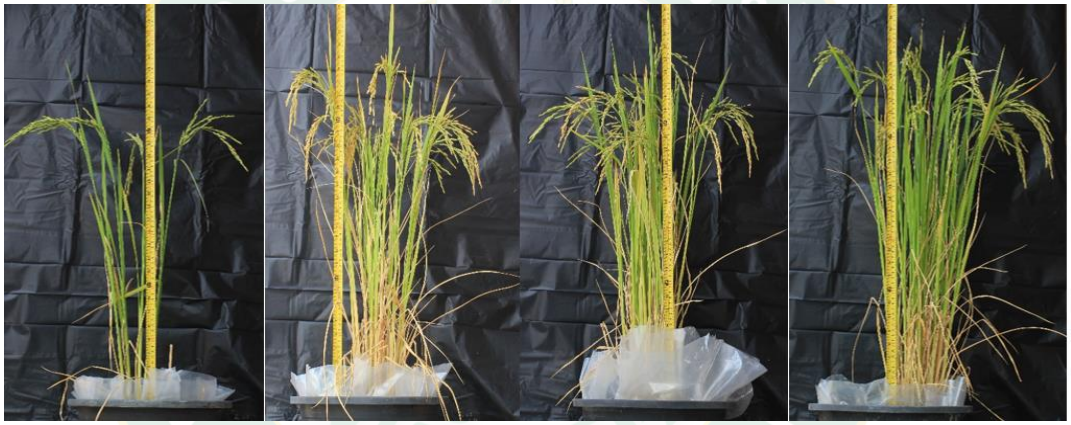
การจัดการน้ำแบบขังน้ำ (WL) ซึ่งมีการขังน้ำให้สูงเหนือผิวหน้าดิน 5 ซม. ขังน้ำไว้ตลอดจนต้นข้าวจนถึงระยะสุกแก่

ภาพผนวกที่ 11 การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (AWD)

การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง (AWD) เริ่มดำเนินการเมื่อข้าวอายุระหว่าง 35 – 75 วัน เริ่มขังน้ำเหนือผิวดิน 5 ซม. เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นหยุดการให้น้ำ 7 วัน (การทดลองที่ 2 วงรอบ AWD 3 วัน) แล้วจึงมีการให้น้ำในสภาพน้ำขังอีกครั้ง ทำเช่นนี้จนข้าวมีอายุ 70 วัน



ภาพผนวกที่ 12 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย



ภาพผนวกที่ 13 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบขังน้ำของเนื้อดินทรายปนร่วน

ภาพผนวกที่ 14 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง
ของเนื้อดินร่วนเหนียวปนทราย

ภาพผนวกที่ 15 ความสูงของต้นข้าวที่มีการจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้งของเนื้อดินทรายปนร่วน

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวชฎาภา ใจหมั้น	
เกิดเมื่อ	16 สิงหาคม พ.ศ. 2534	
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2552	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเทพบดินทร์วิทยา เชียงใหม่
	พ.ศ. 2556	ปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2557	ผู้ช่วยสัตวแพทย์ โรงพยาบาลเชียงใหม่รักสัตว์
	พ.ศ. 2562	เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 6 จังหวัดเชียงใหม่