ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดินบางประการในเขตพื้นที่ภาคเหนือ
ของประเทศไทย

ศรัณย์ จันทร์วงศ์

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปฐพีศาสตร์
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2566

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY

ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดินบางประการในเขตพื้นที่ภาคเหนือ
ของประเทศไทย

ศรัณย์ จันทร์วงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปฐพีศาสตร์
สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดินบางประการในเขตพื้นที่ภาคเหนือ
ของประเทศไทย

ศรัณย์ จันทร์วงศ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปฐพีศาสตร์

พิจารณาเห็นชอบโดย **อาจารย์ที่ปรึกษา**

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีราภรณ์ อินทสาร)
วันที่...................เดือน..................พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....
(อาจารย์ ดร.จักรพงษ์ ไชยวงศ์)
วันที่...................เดือน..................พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาวิกา กอนแสง)
วันที่...................เดือน..................พ.ศ. ....

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

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

ชื่อเรื่อง ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดินบางประการในเขตพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย

ชื่อผู้เขียน นายศรัณย์ จันทร์วงศ์

ชื่อปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปฐพีศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีราภรณ์ อินทสาร

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดินบางประการในเขตพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง คือ การทดลองที่ 1. ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีดินบางประการภายใต้การชะละลายในดิน ทำการศึกษาระหว่างเดือนสิงหาคม-พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 การทดลองที่ 2 คือ ผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีดินบางประการในดินร่วนปนทรายภายใต้สภาพการบ่มดิน ทำการศึกษาระหว่างเดือนมกราคม-สิงหาคม พ.ศ. 2565 โดยการทดลองที่ 1 วางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Factorial in Randomized Complete Block Design) ประกอบด้วย 2 ปัจจัย ปัจจัยที่ 1 คือประเภทของดินที่ต่างกัน 3 ชุดดิน คือ S_1 = ดินร่วนปนทราย, S_2 = ดินร่วนเหนียวปนทราย, S_3 = ดินเหนียว ปัจจัยที่ 2 คือการจัดการเติมถ่านชีวภาพ ได้แก่ B_1 = ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ, B_2 = ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด, B_3 = ถ่านชีวภาพจากแกลบ ผลการทดลอง พบว่าการเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดส่งผลให้ความชื้นในดินร่วนปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทราย และดินเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่เติมถ่านชีวภาพ และทำให้ความหนาแน่นอนุภาคของดินมีค่าลดลงหลังจากเติมถ่านชีวภาพทั้ง 2 ชนิดในดินระดับบน (0-15 ซม.) และดินดับล่าง (15-30 ซม.) การเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดส่งผลทำให้อนุภาคดินทรายมีปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันทำให้อนุภาคดินทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียวมีปริมาณลดลงในดินทั้งสองระดับความลึก การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดในดินร่วนเหนียวปนทรายทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้นสูงสุดจากดินที่ไม่เติมถ่านชีวภาพทั้งสองระดับความลึกคือ 7.89 และ 8.12 ตามลำดับ ดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าในดินระดับบนสูงสุดคือ 342 $\mu S\ cm^{-1}$ ขณะที่ดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้สภาพนำไฟฟ้าในดินระดับล่างมีค่าสูงสุดคือ 383 $\mu S\ cm^{-1}$ การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบในดินเหนียวส่งผลให้ปริมาณอินทรียวัตถุและค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินมีค่าสูงสุดในดินระดับบนและดินระดับล่าง ขณะที่ดินร่วน

ปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุดทั้งสองระดับคือ 405 และ 698 mgP kg^{-1} ตามลำดับ ส่วนการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดในดินร่วนเหนียวปนทรายส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงสุดในดินระดับบนและดินระดับล่าง (924, และ 1,152 mgK kg^{-1}) การเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินทั้ง 3 ชุดดิน มีค่าเพิ่มขึ้นจากดินที่ไม่เติมถ่านชีวภาพ การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบในดินร่วนปนทรายส่งผลให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบในดินร่วนเหนียวปนทรายและดินเหนียวทำให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินมีปริมาณลดลงทั้งสองระดับความลึก และการเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดทำให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณลดลงทั้งดินระดับบนและดินระดับล่าง ดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงสุดในดินระดับบนคือ 52.8 mgMn kg^{-1} และดินระดับล่างคือ 57.9 mgMn kg^{-1} ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้จากการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบในดินร่วนปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทรายและดินเหนียวที่ทำให้มีค่าเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุม (ไม่เติมถ่านชีวภาพ) ทั้งสองระดับความลึก ในส่วนของการชะละลายในดินถ่านชีวภาพจากแกลบมีแนวโน้มในการชะลอการสูญเสียปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมและสังกะสีในดินร่วนปนทรายและดินร่วนเหนียวปนทราย ขณะที่ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีช่วยชะลอการสูญเสียปริมาณแมกนีเซียม และสังกะสีในดินในดินเหนียว

การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีดินบางประการในดินร่วนปนทรายภายใต้สภาพการบ่มดิน วางแผนการทดลองแบบสปริทพลอทสุ่มสมบูรณ์ (split plot in completely randomized design) ประกอบด้วยปัจจัยหลัก (main plot) คือชนิดของถ่านชีวภาพ 1. ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด 2. ถ่านชีวภาพจากแกลบ ปัจจัยรอง (sub plot) คืออัตราของถ่านชีวภาพในอัตรา 0%, 2.5% และ 5.0% w/w ทำการบ่มร่วมกับดินร่วนปนทรายที่ระยะเวลา 0, 60, 120 และ 180 วัน จำนวน 4 ซ้ำ (replications) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดอัตรา 5.0% w/w ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าสภาพนำไฟฟ้าในดินมีค่าสูงสุดทุกระยะเวลาของการบ่มดิน การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบอัตรา 5.0% w/w ทำให้มีปริมาณอินทรียวัตถุในดินสูงสุดทุกระยะการบ่มดิน การใส่ถ่านชีวภาพจากแกลบอัตรา 5.0% w/w ทำให้มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงสุดที่ระยะการบ่ม 180 วัน คือ 7.74 cmol kg^{-1} ซึ่งการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบอัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้นในทุกระยะการบ่มดิน ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบทั้งสองอัตรา 2.5 และ 5.0% w/w ทำให้ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้นที่ระยะการบ่มดิน 60, 120 วัน การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบทั้งสองอัตราส่งผลให้ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะการบ่มดิน ขณะเดียวกันการ

เติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดและทั้งสองอัตราทำให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินมีค่าลดลงตลอดระยะการบ่มดิน การใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบอัตรา 2.5% w/w ส่งผลให้ปริมาณเหล็กและแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าลดลง การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบทั้งสองอัตราทำให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินเพิ่มขึ้นทุกระยะการบ่มดิน

คำสำคัญ : ถ่านชีวภาพ, สมบัติของดิน, ภาคเหนือของประเทศไทย

Title	EFFECT OF BIOCHAR ON SOIL PROPERTIES IN NORTHERN THAILAND
Author	Mr. Sarun Junwong
Degree	Master of Science in Soil Science
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Jiraporn Inthasan

ABSTRACT

To study effect of biochar on soil properties in northern Thailand could divide for 2 experiments. The first study prepared to do the effect of biochar on soil physical and soil chemical properties under leachate condition from August to November 2020 and the second experiment aim to determine the effect of biochar application on soil chemical properties in sandy loam soil from January to August 2022. The experiment 1 was designed by factorial in randomized complete block design: factor A was type of soils as following S_1 = sandy loam soil, S_2 = sandy clay loam soil and S_3 = clay and factor B was explained by different management of biochar as B_1 = none-biochar, B_2 = corncob biochar and B_3 = rice husk biochar. The result found that corncob and rice husk biochar increased soil moisture content in sandy loam soil, sandy clay loam soil and clay soil, but decreased soil particle density both in topsoil (0-15 cm) and subsoil (15-30 cm). The addition of biochar types could increase the percentage of sandy particles but decreased silt and clay particles in both soil depths. Corncob biochar applied in sandy loam soils resulted in the highest soil pH values comparing with non-biochar both in topsoil and subsoil at 7.89 and 8.12 respectively. Corncob biochar added in clay texture (S_3) had confirmed with the highest soil electrical conductivity on topsoil (342 μS cm^{-1}), while sandy loam (S_1) applying corncob biochar caused the maximum soil electrical conductivity at 383 μS cm^{-1}in subsoil. Both biochar types in clay soil (S_3) provided higher organic matter and cation exchange capacity in both topsoil and subsoil. While the sandy loam soil with corncob biochar gave the highest available phosphorus at 405 and 698 mgP kg^{-1} in topsoil and subsoil respectively. Sandy loam

soil (S_1) with corncob biochar caused the peak of potassium exchangeable in topsoil and subsoils (924 and 1,152 mgK kg^{-1}). Application biochar types could higher offer calcium and magnesium exchangeable contents in all soil types than non-biochar both topsoil and subsoil. Corncobs and rice husk biochar applied in sandy loam soil could increase the amount of copper extractable in topsoil and subsoil. Despite adding corncobs and rice husk biochar in sandy loam and clay loam dropped the amount of copper extractable in both soil depths. The amount of iron extractable was gained by addition of two biochars in 3 soil types. Sandy clay loam mixed with corncob biochar contributed the highest manganese extractable in topsoil at 52.8 mgMn kg^{-1} and in subsoil at 57.9 mgMn kg^{-1}. Interestingly, sandy loam, sandy loam soil and clay that mixed with corncobs and rice husk could increase higher amount of zinc extractable than control (without biochar) both soil depths. Regarding soil leaching, rice husk biochar tends to slow down calcium, magnesium and zinc contents loss in sandy loam soil and sandy loam. While corncobs biochar showed the fallen pattern of magnesium and zinc contents in clay soils.

Experiment 2 this research aimed to study the effect of biochar from corncob and rice husk on soil properties by incubation technique in sandy loam soil. Split plot in completely design was consisting main-plot (corncob and rice husk) and sub-plot as various rates (0, 2.5 and 5.0% w/w) at 0, 60, 120 and 180 days with 4 replications. Corncob biochar at 5.0 %w/w caused the highest soil pH and electrical conductivity all incubation periods. Application both of corncob and rice husk biochar at 5.0% w/w provided with the highest of organic matter after incubation all stages. After incubation 180 days, rice husk biochar at 5.0% w/w provided the peak of cation exchange capacity (CEC) in soil sample at 7.74 cmol kg^{-1}. The available phosphorus and exchangeable potassium were increased by applying both of corncob and rice husk biochar at rate of 5.0% w/w after incubation. Moreover, all types of biochar at rates 2.5 and 5.0% w/w could step-up the amounts of calcium and magnesium exchangeable in 60 and 120 days after incubation. Corncob and rice husk biochar at rates 2.5 and 5.0% w/w caused sulfur exchangeable forms depending on the time of incubation. Furthermore, two rates biochar of application reduced extractable copper in soil all of times after incubation. Whereas addition 2.5% w/w of

both corncob and rice husk biochar declined the amounts of iron and manganese extractable. However, corncob and rice husk biochar at rate 2.5 and 5.0% w/w could improve the level of extractable zinc all stages of incubation.

Keywords : biochar, soil properties, northern Thailand

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีราภรณ์ อินทสาร อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำและให้การสนับสนุนเรื่องค่าใช้จ่าย อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.จักรพงษ์ ไชยวงศ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาวิกา กอนแสง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยช่วยเหลือและชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ฉัตรปวีณ์ เดชจิรรัตนสิริ ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ที่ให้คำแนะนำช่วยให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ บุคลากรประจำสาขาปฐพีศาสตร์ที่ให้คำปรึกษา รวมทั้งให้การช่วยเหลือตลอดช่วงระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้ "ทุนก้นกุฏิ" ที่ให้การสนับสนุน ขอขอบพระคุณครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและคอยให้กำลังใจในการศึกษาครั้งนี้เสมอมา ตลอดจนพี่ ๆ เพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการศึกษาครั้งนี้จะเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาให้เกิดประโยชน์ต่อภาคการเกษตรของประเทศไทยต่อไป

ศรัณย์ จันทร์วงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฌ
สารบัญ ..... ญ
สารบัญตาราง ..... ฐ
สารบัญภาพ ..... ฒ
สารบัญภาพภาคผนวก ..... ณ
อักษรย่อ และสัญลักษณ์ ..... ด
บทที่ 1 บทนำ 1
บทที่ 2 ตรวจเอกสาร 3
2.1 พื้นที่ทำการเกษตร และชุดดินที่สำคัญในภาคเหนือของประเทศไทย 3
2.2 ถ่านชีวภาพ (biochar) 3
2.2.1 การผลิตถ่านชีวภาพ (process of biochar) 4
2.2.2 ข้อดี และข้อเสียของถ่านชีวภาพ 5
2.3 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดิน 7
2.3.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของดิน (soil physical property) 7
2.3.2 สมบัติทางเคมีของดิน (soil chemical property) 9
2.3.3 สมบัติทางชีวภาพของดิน (soil biological property) 14
2.4 ผลของถ่านชีวภาพต่อสิ่งแวดล้อม 17
2.5 ผลของถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช 19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย 23

3.1. การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมี... ดินบางประการภายใต้การชะละลายในดิน 23
3.1.1 พื้นที่และระยะเวลาในการศึกษา 23
3.1.2 แผนการทดลองและสิ่งทดลอง 23
3.2 การทดลองที่ 2 ผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีดินบางประการในดิน ... ร่วนปนทรายภายใต้สภาพการบ่มดิน 24
3.2.1 พื้นที่และระยะเวลาในการศึกษา 24
3.2.2 แผนการทดลองและสิ่งทดลอง 24
3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีบางประการของดินหลังการทดลอง 24
3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของดินในการทดลองที่ 1 24
3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินในการทดลองที่ 1 25
3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินในการทดลองที่ 2 27
3.3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ 28
3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ 28
3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของมูลวัว 29
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ 31
การทดลองที่ 1 31
การทดลองที่ 2 52
วิจารณ์ผลการทดลอง 70
การทดลองที่ 1 70
การทดลองที่ 2 75
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 79
บรรณานุกรม 83
ภาคผนวก 100

ประวัติผู้วิจัย..107

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 สมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีบางประการของดินก่อนการทดลองในการทดลองที่ 1 32

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีบางประการของถ่านชีวภาพ และมูลวัวก่อนการทดลองในการทดลองที่ 133

ตารางที่ 3 ผลของถ่านชีวภาพต่อความชื้น และความหนาแน่นอนุภาคของดินหลังการทดลอง 36

ตารางที่ 4 ผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงอนุภาคของเนื้อดินที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร 38

ตารางที่ 5 ผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงอนุภาคของเนื้อดินที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร 39

ตารางที่ 6 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมี และปริมาณธาตุอาหารหลักของดินหลังการทดลองที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร 44

ตารางที่ 7 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมของดินหลังการทดลองที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร 45

ตารางที่ 8 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมี และปริมาณธาตุอาหารหลักของดินหลังการทดลองที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร 50

ตารางที่ 9 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมของดินหลังการทดลองที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร 51

ตารางที่ 10 สมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีของดินบางประการก่อนการทดลองในการทดลองที่ 2 53

ตารางที่ 11 สมบัติทางเคมีบางประการของถ่านชีวภาพก่อนการทดลองในการทดลองที่ 2............. 54

ตารางที่ 12 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมี และปริมาณธาตุอาหารหลักหลังการบ่มดินที่ระยะ 0 วัน 56

ตารางที่ 13 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมหลังการบ่มดินที่ระยะ 0 วัน 57

ตารางที่ 14 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมี และปริมาณธาตุอาหารหลักหลังการบ่มดินที่ระยะ 60 วัน 60

ตารางที่ 15 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมหลังการบ่มดินที่ระยะ 60 วัน.. 61

ตารางที่ 16 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมี และปริมาณธาตุอาหารหลักหลังการบ่มดินที่ระยะ 120 วัน 64

ตารางที่ 17 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมหลังการบ่มดินที่ระยะ 120 วัน 65

ตารางที่ 18 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมี และปริมาณธาตุอาหารหลักหลังการบ่มดินที่ระยะ 180 วัน 68

ตารางที่ 19 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมหลังการบ่มดินที่ระยะ 180 วัน 69

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ผลของถ่านชีวภาพต่อการชะลอการสูญเสียธาตุฟอสฟอรัสในดิน 81

ภาพที่ 2 ผลของถ่านชีวภาพต่อการชะลอการสูญเสียธาตุโพแทสเซียมในดิน 81

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY

สารบัญภาพภาคผนวก

หน้า

ภาพภาคผนวก 1 ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (A) และถ่านชีวภาพจากแกลบ (B)........................... 85

ภาพภาคผนวก 2 การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีดินบางประการภายใต้การชะละลาย.. 85

ภาพภาคผนวก 3 ดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ................................86

ภาพภาคผนวก 4 ดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ.................... 86

ภาพภาคผนวก 5 ดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ...86

ภาพภาคผนวก 6 การวิเคราะห์เนื้อดินก่อนและหลังการทดลอง...87

ภาพภาคผนวก 7 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของอนุภาคดิน...87

ภาพภาคผนวก 8 การวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของดินและถ่านชีวภาพ...88

ภาพภาคผนวก 9 การวิเคราะห์ปริมาณอินทรียวัตถุในดินและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในถ่านชีวภาพ...88

ภาพภาคผนวก 10 การวิเคราะห์ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินและถ่านชีวภาพ................89

ภาพภาคผนวก 11 การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินและถ่านชีวภาพ...............89

ภาพภาคผนวก 12 การวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน...90

ภาพภาคผนวก 13 การวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียม ปริมาณธาตุอาหารเสริมในดินและถ่านชีวภาพ...90

อักษรย่อ และสัญลักษณ์

อักษรย่อและสัญลักษณ์	ความหมาย
%	เปอร์เซ็นต์
°C	องศาเซลเซียส
°C/s.	องศาเซลเซียสต่อวินาที
branch plat^{-1}	กิ่งต่อต้น
dS m^{-1}	เดซิซีเมนต่อเมตร
CFU g^{-1}	ซีเอฟยูต่อกรัม (colony forming unit)
CFU g^{-1} DM	ซีเอฟยูต่อกรัมของวัตถุแห้ง
CFU g^{-1} dray soil	ซีเอฟยูต่อกรัมของดินแห้ง
Ca	แคลเซียม
Cu	ทองแดง
CEC	ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน
Cd	แคดเมียม
Cr	โคเมียม
cm	เซนติเมตร
cm^{-2}	ตารางเซนติเมตร
cm hr-1	เซนติเมตรต่อชั่วโมง
cmol kg^{-1}	เซนติโมลต่อกิโลกรัม
Fe	เหล็ก
fruits	ผลต่อต้น
fruits plant^{-1}	ผลต่อต้น
g	กรัม
g cm^{-3}	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
g DW g^{-1} N	ปริมาณไนโตรเจนในน้ำหนักแห้ง
g kg^{-1}	กรัมต่อกิโลกรัม
ha	เฮกตาร์

kg	กิโลกรัม
kg rai^{-1}	กิโลกรัมต่อไร่
kg ha^{-1}	กิโลกรัมต่อเฮกตาร์
kg $plant^{-1}$	กิโลกรัมต่อต้น
kg m^{-2} min^{-1}	กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อนาที
kg N_2O-N t^{-1}	กิโลกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อตัน
kg N_2O-N ha^{-1}	กิโลกรัมไนตรัสออกไซด์ต่อเฮกตาร์
LR (lime requirement)	ความต้องการปูน
Mg	แมกนีเซียม
Mn	แมงกานีส
mm	มิลลิเมตร
min.	นาที
ml	มิลลิลิตร
MPa	เมกะปาสคาล
Mg m^{-3}	เมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
Mg ha^{-1}	เมกะกรัมต่อเฮกตาร์
mg g^{-1}	มิลลิกรัมต่อกรัม
mg kg^{-1}	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
mg N g^{-1}	มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อกรัม
mmol kg^{-1}	มิลลิโมลต่อกิโลกรัม
m^3 m^{-3}	ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตร
Ni	นิกเกิล
OM	อินทรียวัตถุ
OC	คาร์บอนอินทรีย์
P	ฟอสฟอรัส
Pb	ตะกั่ว
t	ตัน (1,000 กิโลกรัม)
t rai^{-1}	ตันต่อไร่

t ha^{-1}	ตันต่อเฮกตาร์
tC ha^{-1}	ตันคาร์บอนต่อเฮกตาร์
t ha^{-1} $year^{-1}$	ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี
nmol g^{-1}	นาโนโมลต่อกรัม
nmol g dray $soil^{-1}$	นาโนโมลต่อกรัมของดินแห้ง
S	กำมะถัน
seed pod^{-1}	เมล็ดต่อฝัก
sheet	ใบ
pod $plant^{-1}$	ฝักต่อต้น
v/v	ปริมาตรต่อปริมาตร
w/w	น้ำหนักต่อน้ำหนัก
µS cm^{-1}	ไมโครซีเมนต่อเซนติเมตร
Zn	สังกะสี

บทที่ 1
บทนำ

ในการทำการเกษตรของประเทศไทยในปัจจุบันกำลังเผชิญกับปัญหาดินเสื่อมโทรม ซึ่งในประเทศไทยพบพื้นที่ดินเสื่อมโทรมและดินที่มีปัญหาต่อการใช้ประโยชน์ทางการเกษตรสูงถึง 182 ล้านไร่ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) และในภาคเหนือที่มีพื้นที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตรมากเป็นลำดับสองของประเทศรองจากภาคตะวันออกเฉียงเหนืออยู่ที่ 43 ล้านไร่ (กลุ่มวิเคราะห์สภาพการใช้ที่ดิน, 2561) จากปัญหาดินเสื่อมโทรมซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรที่ผลิตได้มีปริมาณลดลง จึงมีการนำวัสดุปรับปรุงดินชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยอินทรีย์ มูลสัตว์ ปูนขาว และปูนโดโลไมท์ มาใช้ในการปรับปรุงบำรุงดิน เพื่อให้ดินในพื้นที่ทำการเกษตรกลับมามีความอุดมสมบูรณ์ ช่วยให้มีปริมาณผลผลิตที่เพิ่มขึ้น โดยถ่านชีวภาพจัดเป็นวัสดุปรับปรุงดินที่ผลิตจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือมูลสัตว์จากการทำปศุสัตว์ เช่น แกลบ ซังข้าวโพด ชานอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง มูลสัตว์ โดยนำมาผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีด้วยความร้อน ได้เป็นวัสดุของแข็งสีดำที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง และในส่วนนี้จึงส่งผลให้ถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือ มีความหนาแน่นรวมต่ำ (Asai et al., 2009; Zhang et al., 2010) มีพื้นที่ผิวและความพรุนสูง สามารถอุ้มน้ำในดินได้สูง มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่สูง (Liang et al., 2006; Yao et al., 2012b; Batista et al., 2018) มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-ด่างสูง (รัตถชล และคณะ, 2560; Li et al., 2013) เป็นแหล่งดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนตรัสออกไซด์และก๊าซมีเทน (เสาวคนธ์, 2557; Fungo et al., 2014; Qiao and Wu, 2022) จึงมีการนำถ่านชีวภาพมาใช้ในการปรับปรุงดิน เพื่อยกระดับค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน ช่วยลดความหนาแน่นรวมของดิน เพิ่มความพรุนของดิน ช่วยในการกักเก็บธาตุอาหารในดินและเพิ่มศักยภาพในการใช้ธาตุอาหารของพืช นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในดิน เนื่องจากบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่จำนวนมาก ทำให้ปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้น สิ่งมีชีวิตในดินสามารถใช้ทำให้เกิดกิจกรรม ส่งผลจ่อการเจริญเติบโตของพืชทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านชีวภาพต่อสมบัติในดินชนิดต่าง ๆ และสถานะของธาตุอาหารที่มาจากถ่านชีวภาพที่แตกต่างกันต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีของดินในเขตพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีบางประการภายใต้การชะละลายในดินร่วนปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทราย และดินเหนียว
2. เพื่อศึกษาผลของชนิดและอัตราของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีบางประการในดินร่วนปนทราย

ขอบเขตการศึกษา

1. เพื่อศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีบางประการภายใต้การชะละลายในดินร่วนปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทรายและดินเหนียว
2. เพื่อศึกษาผลของชนิดและอัตราของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีบางประการในดินร่วนปนทราย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบศักยภาพของถ่านชีวภาพที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีบางประการของดิน ในดินร่วนปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทรายและดินเหนียวที่เป็นตัวแทนของดินในพื้นที่ทำการเกษตรในภาคเหนือของประเทศไทย

บทที่ 2
ตรวจเอกสาร

2.1 พื้นที่ทำการเกษตร และชุดดินที่สำคัญในภาคเหนือของประเทศไทย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมมีพื้นที่ทั้งหมด 320 ล้านไร่ซึ่งมีพื้นที่ 178 ล้านไร่ เป็นพื้นที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตร จากการใช้ประโยชน์ของพื้นที่อย่างหนักหน่วงเพื่อให้ได้มาซึ่งผลผลิต อาจทำให้เกิดการละเลยในการปรับปรุงบำรุงดินให้มีความอุดมสมบูรณ์จนทำให้ดินเกิดปัญหาความเสื่อมโทรม ประเทศไทยมีพื้นที่ดินเสื่อมโทรมและดินที่มีปัญหาต่อการใช้ประโยชน์ทางการเกษตร สูงถึง 182 ล้านไร่ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) ซึ่งยังคงต้องได้รับการปรับปรุงบำรุงดินให้มีความอุดมสมบูรณ์ต่อไป ภาคเหนือของประเทศไทยประกอบไปด้วย 17 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย แม่ฮ่องสอน พะเยา ลำปาง ลำพูน น่าน แพร่ ตาก อุตรดิตถ์ สุโขทัย กำแพงเพชร พิษณุโลก พิจิตร นครสวรรค์ อุทัยธานี เพชรบูรณ์ ซึ่งมีสภาพภูมิประเทศเป็นเทือกเขาสูงสลับระหว่างกับที่ราบระหว่างหุบเขา มีพื้นที่ใช้ประโยชน์ทางการเกษตรอยู่ที่ 43 ล้านไร่ มากเป็นลำดับสองรองจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (กลุ่มวิเคราะห์สภาพการใช้ที่ดิน, 2561) ส่วนใหญ่นิยมปลูกข้าว พืชไร่ พืชผัก และไม้ผล ชุดดินที่พบมาก ได้แก่ ชุดดินบ้านจ้อง เชียงใหม่ แม่ริม สันทราย สันป่าตอง หางดง แม่แตง เวียงชัย เชียงราย เชียงแสน เชียงของ แม่สาย เชียงคาน พาน ลำปาง แม่ทะ น่าน พะเยา กำแพงเพชร หล่มสัก อุตรดิตถ์ ดงยางเอน ด่านซ้าย ไทรงาม ท่าลี่ ตะพานหิน วังไห วังสะพุง ซึ่งชุดดินที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ 1. ชุดดินสันทราย มีพื้นที่ประมาณ 760,086 ไร่ เป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ การระบายน้ำค่อนข้างเลว 2. ชุดดินหล่มสัก มีพื้นที่ประมาณ 207,746 ไร่ ดินมีการระบายน้ำเลวอาจทำให้เกิดน้ำท่วมขังได้ในบางปี หากปลูกพืชไร่หรือพืชผักควรยกร่องให้มีการระบายดีขึ้น 3. ชุดดินหางดง มีพื้นที่ประมาณ 1,153,324 ไร่ หากทำการเกษตรควรมีการยกร่องและปรับสภาพดินให้ร่วนซุยเพื่อให้ดินมีการระบายน้ำได้ดีขึ้น การใช้ประโยชน์ที่ดินของทั้งสามชุดดินส่วนใหญ่ใช้ปลูกข้าว พืชไร่และพืชผัก (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548; กองสำรวจดินและวิจัยทรัพยากรดิน, 2558; กรมพัฒนาที่ดิน, 2561)

2.2 ถ่านชีวภาพ (biochar)

ถ่านชีวภาพ (biochar) คือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือการทำปศุสัตว์ เช่น แกลบ ซังข้าวโพด ชานอ้อย มูลสัตว์ ฯลฯ นำมาผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีด้วยความร้อน โดยจำกัดปริมาณหรือปราศจากก๊าซออกซิเจนในการ

เผาไหม้ ได้เป็นถ่านชีวภาพที่อุดมไปด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก (Lehmann and Joseph, 2009) จึงทำให้ถ่านชีวภาพมีคุณสมบัติเฉพาะตัว และมีความแตกต่างจากถ่านทั่วไป ซึ่งคุณสมบัติที่เด่นชัดของถ่านชีวภาพนี้ เหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน เนื่องจากมีความหนาแน่นรวมต่ำ (Asai et al., 2009; Zhang et al., 2010) มีพื้นที่ผิว และความพรุนสูง สามารถอุ้มน้ำในดินได้สูง มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่สูง (Liang et al., 2006; Yao et al., 2012b; Batista et al., 2018) มีค่าสภาพการนำไฟฟ้า ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง (รัตถชล และคณะ, 2560; Li et al., 2013) เป็นแหล่งที่อยู่อาศัย ทำให้เกิดกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตในดิน ได้แก่ แบคทีเรีย แอคติโนมัยซีท และเชื้อราไมคอร์ไรซา (Thies and Rillig, 2009) สามารถช่วยลดการสูญเสียธาตุไนโตรเจนที่ถูกชะล้างออกไปจากดิน โดยเป็นตัวดูดซับแอมโมเนียมและไนเตรทไว้ (Ding et al., 2010; Sika and Hardie, 2013; Yunlong et al., 2019) ช่วยดูดซับฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟต (Yao et al., 2012a; Lv et al., 2021) ถ่านชีวภาพช่วยดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนตรัสออกไซด์และก๊าซมีเทน (Fungo et al., 2014; Qiao and Wu, 2022)

2.2.1 การผลิตถ่านชีวภาพ (process of biochar)

ถ่านชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร การผลิตถ่านชีวภาพเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงแยกสลายสสารด้วยความร้อน โดยการควบคุมความร้อน และจำกัดหรือปราศจากก๊าซออกซิเจนในการเผาไหม้ ได้ผลิตภัณฑ์ 3 ประเภท คือ ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของเหลว (bio-oil) ของแข็ง (biochar) และรูปของก๊าซ (syngas) ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งมีลักษณะเป็นสีดำ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ 44-90% ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาผลิต (Mukherjee and Weihermüller, 2018) การผลิตถ่านชีวภาพ แบ่งเป็น 6 วิธีการ คือ

1. วิธีการ slow pyrolysis เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนในการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400-550 °C ใช้ระยะเวลา 5-30 นาที ซึ่งตลอดระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงจะมีอัตราการทำความร้อนประมาณ 0.1 ถึง 1 °C/s. (Tripathi et al., 2016) ได้ผลิตภัณฑ์ (pyrolysis products) ในรูปของเหลว 30% ของแข็ง 35% และในรูปของก๊าซ 35% (Biswas et al., 2018; Nartey and Zhao, 2014) ซึ่ง Malyan et al. (2021) กล่าวว่าวิธีการ slow pyrolysis ถ่านชีวภาพที่ผลิตได้จะมีคาร์บอนในรูปที่เสถียรอยู่ประมาณ 50%

2. วิธีการ fast pyrolysis กระบวนการที่มีการใช้ความร้อนในการเปลี่ยนแปลง 500-1,250 °C ใช้ระยะเวลาคงที่ในการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ 0.5-10 s. และมีอัตราการทำความร้อนที่ 2-200 °C/s.

ซึ่งอาจสูงถึง 1,000 °C/s. ได้ผลิตภัณฑ์ในที่อยู่ในรูปของเหลว 50-75% ของแข็ง 10-30% รูปของก๊าซ 13-20% (Biswas et al., 2018; Mukherjee and Weihermüller, 2018)

3. วิธีการ gasification หรือ flash pyrolysis เป็นการเปลี่ยนแปลงโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน หรือการเปลี่ยนแปลงชีวมวลให้เป็นพลังงานในรูปก๊าซเชื้อเพลิง ใช้ความร้อนในการเปลี่ยนแปลงที่ 700-1,200 °C ระยะเวลาคงที่ในการเปลี่ยนแปลง 0.1-1 s. โดยมีอัตราการทำความร้อนมากกว่า 1,000 °C/s. ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลว 5% ของแข็ง 5-15% และรูปของก๊าซ 85% (Biswas et al., 2018; Mukherjee and Weihermüller, 2018; Malyan et al., 2021; Nartey and Zhao, 2014; Tripathi et al., 2016)

4. วิธีการ hydrothermal carbonization คือกระบวนการให้ความร้อนกับชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์ หรือเครื่องเผาไหม้ที่เป็นสภาพปิด โดยมีความดันบรรยากาศน้อยกว่า 1 MPa ซึ่งมีสารเร่งปฏิกิริยาและความชื้นเป็นองค์ประกอบภายใต้ความร้อนคงที่ 180-250 °C โดยใช้ระยะเวลา 1-12 ชั่วโมง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของเหลวและรูปของก๊าซรวมกันที่ 40% ส่วนของแข็งอยู่ที่ 30-60% (Mukherjee and Weihermüller, 2018) ซึ่ง Tripathi et al. (2016) กล่าวว่ากระบวนการ hydrothermal carbonization นั้นมีการใช้ความร้อนในการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 350-600 °C และมีอัตราการทำความร้อนอยู่ที่ 10-300 °C/s. ในระยะเวลาคงที่ในการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 15 s. ภายใต้ความดันบรรยากาศ 5-20 MPa

5. วิธีการ intermediate pyrolysis เป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วงต่ำถึงปานกลาง 400-650 °C โดยใช้ระยะเวลาคงที่ในการเปลี่ยนแปลง 0.5-20 s. มีอัตราการทำความร้อน 1-200 °C/s. ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ (pyrolysis products) ในรูปของเหลว 40-60% ของแข็ง 15-25% และรูปของก๊าซ 25% (Biswas et al., 2018; Malyan et al., 2021; Nartey and Zhao, 2014; Tripathi et al., 2016)

2.2.2 ข้อดี และข้อเสียของถ่านชีวภาพ

ข้อดี: การเติมถ่านชีวภาพช่วยลดความหนาแน่นรวมของดิน เนื่องจากถ่านชีวภาพมีความหนาแน่นรวม และความพรุนสูงทำให้ดินมีความพรุนเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันสามารถลดความหนาแน่นรวมของดินได้ ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของการเจือจาง (dilution effect) ช่วยทำให้อนุภาคของดินจับกลุ่มและรวมตัวกันกลายเป็นเม็ดดิน (Brodowski et al., 2006; Golchin et al., 1994) เพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำและการระบายน้ำของดิน ทำให้ความชื้นของดินเพิ่มขึ้น ช่วยเพิ่ม

ความสามารถในดูดซับน้ำที่เป็นประโยชน์ในดินให้กับพืชเกิดจากการมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมีผลต่อความสามารถในการดูดซับและเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวประกอบกับการมีความหนาแน่นของประจุลบบริเวณพื้นที่ผิวสูงทำให้ถ่านชีวภาพมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (แคตไอออน) ได้สูงซึ่งถ่านชีวภาพมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง (Liang et al., 2006; Yao et al., 2012b; Batista et al., 2018) เกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงสภาพของชีวมวลที่เป็นกรดซึ่งมีอนินทรีย์คาร์บอเนตและสารอินทรีย์ที่มีประจุลบเป็นองค์ประกอบ ส่งผลให้ถ่านชีวภาพมีสมบัติเป็นด่าง (Yuan et al., 2011) เพิ่มสภาพนำไฟฟ้า (EC) และอินทรีย์คาร์บอนในดิน (Major et al., 2010) เป็นแหล่งกักเก็บธาตุอาหารไว้และช่วยชะลอการสูญเสียธาตุอาหารที่ชะละลายของน้ำ เช่น ไนเตรท แอมโมเนียม ฟอสเฟต (Deenik et al., 2011; Pratiwi et al., 2016) เป็นผลมาจากการมีความพรุนสูงและปริมาณช่องว่างจำนวนมากจึงกลายเป็นแหล่งอาศัย ดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในดิน เช่น แอคติโนมัยซีส ไตรคลอเดอมา แบคทีเรียกลุ่มบาซิลลัสและเชื้อราอาร์บัสคูลาร์ไมคอไรซา ซึ่งเป็นจุลินทรีย์มีประโยชน์ช่วยควบคุมจุลินทรีย์ที่เป็นปฏิปักษ์ต่อพืช ถ่านชีวภาพยังมความสามารถกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่เกษตรกรรม และลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนตรัสออกไซด์และก๊าซมีเทน (Yanai et al., 2007)

ข้อเสีย: ถ่านชีวภาพเมื่อเติมลงในดินสามารถเคลื่อนที่ลงไปตามหน้าตัดของดิน และเกิดการสะสมอยู่ในดินชั้นล่างซึ่งอาจจะไปอุดตันช่องว่างขนาดเล็กในดินทำให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านและเกิดการขังน้ำในดินทำให้พืชชะงักการเจริญเติบโต ยังเป็นการกระตุ้นให้มีการปลดปล่อย CH_4 และ N_2O กลับขึ้นสู่บรรยากาศ (สมชาย และ ปัทมา, 2561) การเติมถ่านชีวภาพทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มสูงขึ้นหากเพิ่มขึ้นมากเกินไปอาจทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส และธาตุอาหารเสริมในดินบางตัวลดลง ซึ่งในบางครั้งการเติมถ่านชีวภาพอาจไม่ช่วยยกระดับค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน (Liu and Zhang, 2012a; Çığ et al., 2021) ยังทำให้โครงสร้างของดินถูกทำลายเป็นผลมาจากการลดลงของปริมาณแคลเซียมและแมงกานีสในดินที่ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมอนุภาคของดินส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชเป็นผลมาจากชนิดของถ่านชีวภาพ ซึ่งถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้หรือเปลือกภายนอกของผลไม้ หรือต้นไม้ และมูลสัตว์มีสารระเหยบางอย่างบางอย่างที่จุลินทรีย์หรือสิ่งมีชีวิตในดินไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย (labile c) ส่งผลให้พืชชะลอการเจริญเติบโต ได้แก่ โอลิโกแซคคาร์ไรด์ (oligosaccharides) และฟีนอลส์ (phenols) จะทำให้พืชเกิดการขาดไนโตรเจนในกระบวนการ N immobilization (Deenik et al., 2010; Spokas et al., 2011) ถ่านชีวภาพยังมีสารที่เป็นพิษกับพืช เช่น โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic

hydrocarbon: PAH) ได้แก่ แนฟธาลีน (napththalene) ที่แฝงมากับถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส (Barbosa et al., 2006) ทำให้การงอกของเมล็ดช้าลงและชะลอการเจริญเติบโตของพืช (Henner et al., 1999)

2.3 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดิน

2.3.1 สมบัติทางฟิสิกส์ของดิน (soil physical property)

เป็นวัสดุธรรมชาติที่มองเห็นและสัมผัสได้ ผ่านการผสมคลุกเคล้าของวัสดุอินทรีย์ และอนินทรีย์ซึ่งเกิดจากการสลายตัวผุพังของหินและแร่ เศษซากพืชและสัตว์ในสภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ รวมถึงระยะเวลาที่แตกต่างกัน มีความเกี่ยวข้องทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการผลิตพืช สมบัติทางฟิสิกส์ของดินนั้น ประกอบไปด้วย เนื้อดิน (soil texture) โครงสร้างของดิน (soil structure) สีดิน (soil color) ความหนาแน่นรวม (bulk density) ความพรุนของดิน (porosity) และความชื้นของดิน (soil moisture) (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

จากการศึกษาของ Njoku et al. (2015) เรื่องผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน และผลผลิตข้าวโพดในดินอันดับ Ultisol ที่เมือง abakaliki ทางตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศไนจีเรีย พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 15 t ha^{-1} ส่งผลให้ค่าเสถียรภาพของเม็ดดินและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดดินมีค่าสูงที่สุดคือ 8.32% และ 2.79 mm ตามลำดับ ขณะที่ Joseph et al. (2019) ที่ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อโครงสร้างดิน การกักเก็บอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนของดินที่มีการชะล้างพังละลายสูง (albic) ในประเทศจีน พบว่าในการใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 10, 20 และ 30 t ha^{-1} ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดดิน ที่ระดับความลึก 0-10 และ 10-20 cm มีการเพิ่มขึ้นของเม็ดดินขนาด 2.0-0.5 mm ที่ระดับความลึก 0-10 cm อยู่ที่ 31.3, 27.6 และ 31.0% ส่วนที่ระดับความลึก 10-20 cm คือ 29.9, 23.2 และ 30.6% ตามลำดับ ส่วนงานของ Mahmoud et al. (2017a) พบว่าผลของฟอสโฟยิปซั่มและถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ของดินและการดูดซึมธาตุอาหารในการผลิตข้าวโพด ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียวและการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับฟอสโฟยิปซั่ม ทำให้ความเสถียรของเม็ดดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุมและการใช้ฟอสโฟยิปซั่มเพียงอย่างเดียวคือ 61.76, 65.54, 66.62 และ 69.96% ตามลำดับ

ผลของถ่านชีวภาพต่อความหนาแน่นรวมของดิน จากการทดลองของ Ventura et al. (2012) ได้นำถ่านชีวภาพจากเศษกิ่งไม้ในอัตรา 30 และ 60 t ha^{-1} เติมลงในดินที่ระดับความลึก 5 และ 10 cm พบว่าค่าความหนาแน่นรวมของดินนั้นลดลง จากการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 60 t ha^{-1} ซึ่งส่งผลให้ความหนานแน่นรวมของดินทั้งสองระดับความลึกลดลงมากที่สุดคือ 0.98 และ 1.09 g

cm^{-3} ตามลำดับ ขณะที่ Hseu et al. (2014) ใช้ถ่านชีวภาพจากฟางข้าว ที่ผ่านกระบวนการ pyrolysis อุณหภูมิ 400 °C พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพที่อัตรา 10% (w/w) ทำให้ความหนาแน่นรวมของดินลดลงจากตำรับควบคุมคือ 1.59 เป็น 1.19 g cm^{-3} ส่วนงานทดลองของ Are et al. (2017) ที่ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์ในดินร่วนปนทราย ที่ระดับความลึก 0-10 cm ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินมีค่าลดลงคือ 1.44 g cm^{-3} นอกจากนี้ Yi et al. (2020) นำถ่านชีวภาพที่ผลิตจากมูลสัตว์และถ่านชีวภาพที่ผลิตจากต้นสนร่วมกับดินทรายและดินร่วนปนทราย ในอัตราส่วน 2 และ 7% (w/w) พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์และต้นสนในอัตราส่วน 7% ร่วมกับดินทรายและดินร่วนปนทรายทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินลดลง ซึ่งถ่านชีวภาพจากต้นสนทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินลดลงมากที่สุด Mahmoud et al. (2017b) ศึกษาผลกระทบของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางฟิสิกส์และผลผลิตของข้าวสาลีในดินเค็ม โดยใช้ถ่านชีวภาพจากขี้เลื่อยและถ่านชีวภาพจากลำต้นข้าวโพด อัตรา 5, 10, 19 t ha^{-1} พบว่าตำรับที่มีการเติมถ่านชีวภาพทำให้ค่าความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านเพิ่มขึ้น ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพจากลำต้นข้าวโพดอัตราส่วน 19 t ha^{-1} ทำให้ค่าความสามารถให้น้ำซึมผ่านได้ในดินสูงที่สุดคือ 1.489 cm hr^{-1} ส่วนค่าความหนาแน่นรวมของดินการใช้ถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดในอัตรา 19 t ha^{-1} ทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินลดลงมากที่สุดคือ 1.23 และ 1.19 g cm^{-1}

จากการทดลองของ Jien et al. (2021) ได้ศึกษาผลของถ่านชีวภาพในพื้นที่เขตร้อนที่มีการผุพังสลายตัวสูง พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 4% ที่ผ่านการบ่มร่วมกับดินเป็นระยะเวลา 1 ปี ส่งผลให้ดินมีความพรุนสูงกว่าการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 2% จากการใช้ถ่านชีวภาพจากหญ้ามิสแคนทัสที่ส่งผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์ภายในดินและผลผลิตในพื้นที่แปลงทดลอง ประเทศนอร์เวย์ พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 8 และ 25 t ha^{-1} ซึ่งการทดลองในปี 2012 การใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 8 t ha^{-1} ทำให้ดินมีความพรุนสูงที่สุด ส่วนในปี 2014 การใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 25 t ha^{-1} ทำให้ความพรุนของดินมีค่าสูงที่สุดและทุกตำรับที่ใช้ถ่านชีวภาพทำให้ดินมีความพรุนเพิ่มขึ้น (Adam et al., 2018) ขณะที่ Ndor et al. (2015a) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อคุณสมบัติของดินและอินทรีย์คาร์บอนในพื้นที่เสื่อมโทรม เขตสะวันนา ประเทศไนจีเรีย พบว่าการเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 5 และ 10 t ha^{-1} ส่งผลให้ความพรุนของดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากดินที่ไม่เติมถ่านชีวภาพคือ 36.61% เป็น 38.44 และ 39.63% ตามลำดับ

ผลของถ่านชีวภาพต่อความชื้นของดิน (soil moisture) จากการทดลองของ Jeong et al. (2012) ได้นำถ่านชีวภาพจากไม้มาบ่มร่วมกับดินจากป่าและดินจากแปลงปลูกข้าวโพด พบว่า

หลังจากบ่มดินเป็นเวลา 5 สัปดาห์ ดินจากป่าและดินจากแปลงปลูกข้าวโพดที่มีการเติมถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณความชื้นของดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากดินที่ไม่เติมถ่านชีวภาพคือ 0.41 และ 0.47 m^3 m^{-3} ขณะที่ Adekiya et al. (2020) ใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 0, 10, 20, และ 30 t ha^{-1} พบว่าการเพาะปลูกเผือกในปี 2017 และ 2018 การใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 30 t ha^{-1} ส่งผลให้ค่าความชื้นของดินเพิ่มสูงที่สุดคือ 14.9 และ 15.9% ตามลำดับ ซึ่งจากการใช้ถ่านชีวภาพในการเพาะปลูกงาดำ เมืองลาเฟียประเทศไนจีเรีย ได้ใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบและขี้เลื่อย อัตรา 0, 5 และ 10 t ha^{-1} พบว่าในการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบและถ่านชีวภาพจากขี้เลื่อยอัตรา 5 และ 10 t ha^{-1} ส่งผลให้ความชื้นของดินเพิ่มขึ้นจากวิธีการทดลองที่ไม่ใส่ถ่านชีวภาพคือ 10.66 และ 10.69% ส่วนถ่านชีวภาพจากขี้เลื่อยคือ 18.33 และ 18.67% ตามลำดับ (Ndor et al., 2015b)

Prakongkep et al. (2021) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดินทรายในเขตร้อนภายใต้ระบบเกษตรอินทรีย์ของประเทศไทย โดยทำการศึกษาในพื้นที่ทำการเกษตรอินทรีย์ 4 จังหวัด คือ 1. ชัยนาท ใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 15 t ha^{-1} $year^{-1}$ ระยะเวลาในการศึกษา 5 ปี 2. ชลบุรี เลือกใช้ถ่านชีวภาพจากสะเดาและไม้ไผ่ อัตรา 10 t ha^{-1} $year^{-1}$ ระยะเวลาในการศึกษา 10 ปี 3. ขอนแก่น ใช้ถ่านชีวภาพจากไม้ยูคาลิปตัสและไม้ประดู่ อัตรา 20 t ha^{-1} $year^{-1}$ ระยะเวลา 3 ปี และ 4. เพชรบุรี ถ่านชีวภาพที่ใช้จากไม้กระถินเทศ ต้นข้าวโพดหวาน และเปลือกทุเรียน อัตรา 10 t ha^{-1} $year^{-1}$ ระยะเวลา 7 ปีในการศึกษา พบว่าส่วนของเนื้อดิน หลังจากการศึกษาพบการเปลี่ยนแปลงของเนื้อดินจากพื้นที่ศึกษาทั้ง 4 พื้นที่ ถ่านชีวภาพทำให้อนุภาคของทรายลดลงจากวิธีการควบคุม และพบการเพิ่มขึ้นของอนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียวที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในพื้นที่ ได้แก่ จังหวัดชลบุรี จาก 83%Sand, 14%Silt, 3%Clay เป็น 81%Sand, 15%Silt, 4%Clay ส่วนความหนาแน่นของดิน พบว่าถ่านชีวภาพทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของดินที่ศึกษาทั้ง 4 พื้นที่ลดลง คือ 1.53, 1.28, 1.32 และ 1.29 g cm^{-3} และยังช่วยเพิ่มขนาดของเม็ดดินโดยส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยของเม็ดดิน และเสถียรภาพของดินเพิ่มขึ้นคือ 0.77, 1.16, 0.58 และ 1.67 mm ตามลำดับ ค่าเสถียรภาพของเม็ดดินคือ 55, 76, 43 และ 84% ตามลำดับ และมีปริมาณน้ำในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชทั้ง 4 พื้นที่คือ จังหวัดชัยนาท ชลบุรี ขอนแก่น และเพชรบุรีเพิ่มขึ้นจากกรรมวิธีควบคุม คือ 7.2, 7.4, 3.4 และ 6.5%

2.3.2 สมบัติทางเคมีของดิน (soil chemical property)

เป็นสมบัติที่มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นกับดินในการดูดซับ และแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งมีความสำคัญต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดินต่อการเจริญเติบโต

ของพืช เช่น ความเป็นกรด-ด่างของดิน สภาพนำไฟฟ้าในดิน ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน รวมถึงการควบคุมปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในดิน (นิยม, 2543)

ผลของถ่านชีวภาพต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน จากการศึกษาของ Chintala et al. (2014) พบว่าถ่านชีวภาพส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของดินกรด ซึ่งการนำถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและหญ้าสวิตช์อัตรา 52, 104 และ 156 Mg ha^{-1} ใส่ลงไปในดินเมื่อระยะเวลาผ่านไป 165 วัน พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและหญ้าสวิตช์ทุกอัตราส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้น ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 156 Mg ha^{-1} ทำให้มีค่าความเป็นกรด-ด่างของดินสูงที่สุดคือ 6.14 และ 5.69 ขณะที่ โสภิณภา และคณะ (2560) ใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงค่าความเป็นกรด-ด่างของดินในระบบเกษตร โดยใช้ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียวในอัตรา 10, 15 และ 20 kg $plant^{-1}$ และปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-16 อัตรา 10 kg $plant^{-1}$ โดยใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยเคมี อัตรา 5:5, 7.5:7.5 และ 10:10 kg $plant^{-1}$ กับต้นทุเรียนและลองกองที่อายุ 10 ปีขึ้นไป พบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไป 3 เดือนหลังจากการใส่ถ่านชีวภาพทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้น ซึ่งในการใส่ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียวที่อัตรา 20 kg และถ่านชีวภาพ 10 kg ร่วมกับปุ๋ยเคมี 10 kg ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินมีการเปลี่ยนแปลงสูงที่สุดคือ 0.75 และ 0.57 ซึ่งจากการใช้ถ่านชีวภาพจากไม้ที่ส่งผลต่อสมบัติ และศักยภาพการชะล้างในดินที่มีการผุพังสลายตัวสูง ในประเทศไต้หวัน พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากไม้ ในอัตรา 0, 2.5 และ 5% (w/w) เป็นเวลา 105 วัน ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินที่ทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 3.95 เป็น 4.65 และ 5.07 ตามลำดับ (Jien and Wang, 2013)

จากการศึกษาของ สายน้ำ และคณะ (2559) ได้ศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของดินเหนียวในสภาพโรงเรือน ใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 0, 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 kg rai^{-1} พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังในอัตรา 1,500 และ 2,000 kg rai^{-1} ส่งผลให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 2.21% ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพจากไม้เนื้อแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินและผลผลิตของเผือก ซึ่งใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 0, 10, 20 และ 30 t ha^{-1} ในดินร่วนปนทราย พบว่าในการเพาะปลูกปีที่ 1 และ 2 การใช้ถ่านชีวภาพในอัตราส่วน 30 t ha^{-1} ส่งผลให้ดินมีปริมาณอินทรียวัตถุเพิ่มสูงที่สุดคือ 5.96 และ 6.31% ตามลำดับ (Adekiya et al., 2020) ส่วนงานทดลองของ Mahmoud et al. (2017a) พบว่าจากการเติมถ่านชีวภาพอัตรา 5, 10 Mg ha^{-1} ร่วมกับฟอสโฟยิปซั่มในอัตรา 10 Mg ha^{-1} ส่งผลให้

ปริมาณของอินทรียวัตถุในดินเพิ่มขึ้นจากตำรับที่ไม่ได้เติมถ่านชีวภาพคือ 1.81, 1.84, 1.90 และ 1.94% ตามลำดับ

ผลของถ่านชีวภาพต่อค่าสภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : EC) จากการทดลองของ Taek-Keun et al. (2017) ได้ศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตของผักกาดขาวในดินร่วนปนทราย ใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 0, 18, 54 และ 90 t ha^{-1} โดยเก็บตัวอย่างดินหลังการเก็บเกี่ยวผักกาดขาวที่อายุ 49 วัน พบว่าในการใช้ถ่านชีวภาพทุกตำรับส่งผลให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของดินมีค่าเพิ่มขึ้นคือ 1.6, 1.8 และ 2.1 ds m^{-1} ตามลำดับ ขณะที่ Abbas et al. (2017) ที่ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการดูดซึมแคดเมียมในข้าวสาลี พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 1.5, 3.0 และ 5.0% ทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าในดิน (EC) เพิ่มสูงขึ้นจากตำรับควบคุมคือ 3.72, 4.61 และ 4.81 dS m^{-1} ตามลำดับ ส่วนการทดลองของ Ullah et al. (2018) พบว่าในการใช้ถ่านชีวภาพจากฟางข้าวสาลีและอ้อย อัตรา 5 และ 10 t ha^{-1} ส่งผลให้มีค่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุม ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพจากฟางข้าวสาลีและอ้อยในอัตราส่วน 10 t ha^{-1} มีค่าสภาพนำไฟฟ้าในดินสูงที่สุดคือ 0.51 และ 0.66 dS m^{-1}

ผลของถ่านชีวภาพต่อค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน (cation exchange capacity : CEC) จากการศึกษาของ Igaz et al. (2018) ที่ใช้ถ่านชีวภาพจากเยื่อกระดาษและเปลือกธัญพืชและถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจนทำการศึกษาในฤดูใบไม้ผลิและฤดูใบไม้ร่วง พบว่าทุกตำรับที่มีการใช้ถ่านชีวภาพในฤดูใบไม้ผลิและฤดูใบไม้ร่วงส่งผลให้ดินมีค่า CEC เพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุม ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 10 t ha^{-1} ร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 160 kg ha^{-1} ในฤดูใบไม้ผลิมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินคือ 205.4 mmol kg^{-1} และในฤดูใบไม้ร่วงการใช้ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียวอัตรา 10 t ha^{-1} ส่งผลให้มีปริมาณค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงที่สุดคือ 296.1 mmol kg^{-1} จากการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและหญ้าสวิตช์ในการปรับปรุงดินในอัตรา 156 Mg ha^{-1} ส่งผลให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 19.04 และ 17.51 cmol kg^{-1} ซึ่งพบว่าในการใช้ถ่านชีวภาพทำให้มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงกว่าการใช้ปูนขาวในอัตราที่เท่ากันคือ 12.19 cmol kg^{-1} (Chintala et al., 2014) ในการศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดินและความเป็นประโยชน์ของตะกั่ว ในประเทศเอธิโอเปีย พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากกะลากาแฟในอัตรา 0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5 และ 15.0 t ha^{-1} ส่งผลให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน (CEC) เพิ่มขึ้นตามปริมาณของถ่านชีวภาพ (Dume et al., 2016b) ขณะที่ ประภัสสร และคณะ (2563) ศึกษาสมบัติของถ่านชีวภาพจากแกลบและซังข้าวโพดเพื่อ

ปรับปรุงดิน โดยใช้ถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซีสที่อุณหภูมิ 500 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศที่มีปริมาณก๊าซไนโตรเจน 5 L min^{-1} พบว่าเมื่อนำถ่านชีวภาพจากแกลบและซังข้าวโพดไปทดสอบร่วมกับดินส่งผลให้ดินมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินมีค่าเพิ่มขึ้นคือ 51.22 และ 44.99 cmol kg^{-1}

ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารหลักในดิน ประกอบด้วย ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม จากการศึกษาของ เสาวคนธ์ (2557) ซึ่งนำถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่และแกลบต่อผลผลิตและประสิทธิภาพในการดูดใช้ไนโตรเจนของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 พบว่าประสิทธิภาพในการใช้ไนโตรเจน (nitrogen use efficiency: NUE) ของข้าวระยะเก็บเกี่ยวที่อายุ 120 วันหลักปักดำ การใช้ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ช่วยให้ต้นข้าวมีประสิทธิภาพในการใช้ไนโตรเจนได้สูงที่สุดแต่ไม่มีความแตกต่างกับการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบอยู่ที่ 23.05 และ 22.80 g DW g^{-1} N ซึ่งมีค่าสูงกว่าตำรับที่มีการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว ในการใช้ถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันอัตรา 0.64% (w/w) หรือ 2 t rai^{-1} ทำให้ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้นจาก 5.4 เป็น 18 mg kg^{-1} และส่งผลให้มีปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้เพิ่มมากขึ้นจาก 0.035% เป็น 0.24% (กมลชนก และคณะ, 2560) จากการทดลองของ สุทธวรรณ และคณะ (2563) ได้ศึกษาผลของปุ๋ยมูลไก่และถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมีของดินและการเจริญเติบโตของผักกาดหอมในสภาพดินกรด ซึ่งใช้ปุ๋ยมูลไก่อัตรา 500, 1,000 และ 2,000 kg rai^{-1} และถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียนอัตรา 500 และ 1,000 kg rai^{-1} พบว่าตำรับที่มีการใช้ปุ๋ยมูลไก่ในอัตรา 2,000 kg rai^{-1} ร่วมกับถ่านชีวภาพ 1,000 kg rai^{-1} ทำให้มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 20.03 และ 273.33 mg kg^{-1} ส่วนปริมาณไนโตรเจนในดินมีค่าอยู่ที่ 0.085% แต่ไม่มีความแตกต่างกับการใช้ปุ๋ยมูลไก่และถ่านชีวภาพในอัตรา 500 kg rai^{-1} คือ 0.089% ขณะที่ พจนีย์ (2564) ได้นำถ่านชีวภาพจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์เพื่อศึกษาความสามารถในการปรับปรุงดินกรดพบว่าในการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 10 และ 50 (lime requirement: LR) ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาในการทดลอง ซึ่งถ่านชีวภาพในอัตรา 50 LR ส่งผลให้ดินมีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้สูงที่สุดคือ 1,314 mg kg^{-1} จากงานวิจัยของ Li et al. (2021) ได้ศึกษาผลของถ่านชีวภาพที่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีและการเจริญเติบโตของพืชในดินกรด พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบในอัตรา 0, 0.8, 2.0 และ 4.0% ส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมทั้งหมดในดินรวมถึงปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน มีค่าเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุม ซึ่งการ

เพิ่มขึ้นปริมาณของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในดินมีความสัมพันธ์ตามปริมาณของถ่านชีวภาพที่เติมลงไปในดิน

ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารรอง ประกอบไปด้วยธาตุแคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน จากการใช้ถ่านชีวภาพจากเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ไม่ได้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่าในการใช้ถ่านชีวภาพจากเมล็ดมะม่วงหิมพานต์อัตรา 50 (lime requirement: LR) ส่งผลให้มีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้นสูงสุดคือ 3,240 mg kg^{-1} (พจนีย์, 2564) ขณะที่ Ndor et al. (2015a) ใช้ถ่านชีวภาพจากขี้เลื่อยและแกลบอัตรา 0, 5 และ 10 t ha^{-1} ในการเพาะปลูกงาดำ ประเทศไนจีเรีย พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพทุกอัตราส่วนส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงขึ้นคือ 5.14, 5.78, 0.53 และ 0.75 cmol kg^{-1} ส่วนปริมาณแมกนีเซียมที่สกัดได้ในดินมีค่าอยู่ที่ 4.76, 5.47, 0.69 และ 1.14 cmol kg^{-1} ตามลำดับ ส่วนการทดลองของ Changxun et al. (2016) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตของส้มสายพันธุ์ *Poncirus trifoliata* L. โดยใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 0, 30 และ 50 g kg^{-1} ร่วมกับดินสีแดง มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ที่ 3.73 พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพ 50 g kg^{-1} ทำให้ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้นจากการใช้ดินสีแดงเพียงอย่างเดียวคือ 88.52 และ 11.52 g kg^{-1} ตามลำดับ

ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารเสริมประกอบไปด้วย เหล็ก (Fe), แมงกานีส (Mn), โบรอน (B), โมลิบดินัม (Mo), ทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn), คลอรีน (Cl) และนิกเกิล (Ni) จากการศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกข้าวสาลีในดินที่มีการปนเปื้อน ใช้ถ่านชีวภาพจากฟางข้าวอัตรา 1.5, 3.0 และ 5.0% (w/w) ส่งผลให้ปริมาณสังกะสีและแมงกานีสที่สกัดได้ในดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณของถ่านชีวภาพที่เพิ่มขึ้นคือ 6.59, 8.22 และ 10.77 mg kg^{-1} ในสังกะสี ส่วนของแมงกานีสที่สกัดได้ในดินคือ 11.75, 14.03 และ 17.25 mg kg^{-1} ตามลำดับ (Abbas et al., 2017) ขณะที่ Mierzwa-Hersztek et al. (2020) พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพฟางข้าวสาลีที่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีของดินทราย โดยใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 0.2, 0.5, 1.0 และ 2.0% (w/w) พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพทุกอัตราทำให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินมีค่าลดลง เมื่อระยะเวลาผ่านไป 254 วัน แต่การใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 0.5 และ 1.0% ทำให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินเพิ่มสูงขึ้นคือ 1.173 และ 0.877 mg kg^{-1} ตามลำดับ ส่วนการทดลองของ Adejumo et al. (2016) ได้ศึกษาผลของปุ๋ยหมักและถ่านชีวภาพที่ผลิตในอุณหภูมิที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต กระบวนการสังเคราะห์แสงและปริมาณธาตุอาหารเสริมในการปลูกข้าวโพด จากการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบและดอกทานตะวันที่ผลิตใน

อุณหภูมิ 300 °C อัตรา 5 t ha^{-1} , 350 °C อัตรา 10 t ha^{-1} และ 400 °C อัตรา 15 t ha^{-1} ภายในพื้นที่ทดลอง เมืองอีบาตัน ประเทศไนจีเรีย พบว่าในการใช้ถ่านชีวภาพจากจากแกลบที่อุณหภูมิ 350 °C ทำให้ปริมาณเหล็กและแมงกานีสที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 2,230 และ 310 mg kg^{-1} ส่วนการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบที่อุณหภูมิ 300 °C มีปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 43.15 mg kg^{-1} และการใช้ถ่านชีวภาพจากดอกทานตะวันที่อุณหภูมิ 350 °C ส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้สูงที่สุด คือ 10.20 mg kg^{-1}

Bhattarai et al. (2015) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีของดิน ในการผลิตถั่วลันเตา ประเทศเนปาล โดยใช้ถ่านชีวภาพ 5 ชนิด คือ ถ่านชีวภาพจากแกลบ มูลสัตว์ปีก มูลแกะ ปุ๋ยคอกและไม้ อัตรา 10 t ha^{-1} พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพทุกตำรับทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในดินเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งถ่านชีวภาพจากมูลแกะทำให้มีปริมาณไนโตรเจนสูงที่สุดคือ 0.113% แต่ไม่มีความแตกต่างกับถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์ปีกอยู่ที่ 0.105% ปริมาณฟอสฟอรัสในดิน การใช้ถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์ปีก ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในดินสูงที่สุดคือ 82.53 kg ha^{-1} และปริมาณโพแทสเซียม ถ่านชีวภาพจากไม้ทำให้ปริมาณโพแทสเซียมในดินสูงที่สุดคือ 314.90 kg ha^{-1} แต่ไม่มีความแตกต่างกับการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ มูลแกะและปุ๋ยคอกคือ 314.75, 305.62 และ 301.50 kg ha^{-1} ตามลำดับ

Song et al. (2020) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อดินกรดในพื้นที่ปลูกชาน้ำมันภายใต้สภาพการบ่มดิน ใช้ถ่านชีวภาพจากชาน้ำมันที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันคือ 300, 500 และ 700 ˚C ร่วมกับดินสีแดงและดินสีม่วง ในอัตรา 3 และ 5% w/w เป็นระยะเวลา 180 วัน พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพทั้ง 2 อัตรา ในดินสีแดงและดินสีม่วง ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน ปริมาณอินทรียวัตถุ ปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน และปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้นจากกรรมวิธีที่ไม่เติมถ่านชีวภาพ ซึ่งในดินสีแดงที่ใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 5% ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีปริมาณอินทรียวัตถุ ปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน และปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าดีที่สุดคือ 14.40, 40.88, 0.70, 0.529 และ 0.0195 g kg^{-1} ตามลำดับ

2.3.3 สมบัติทางชีวภาพของดิน (soil biological property)

ดินเป็นวัสดุพรุนที่มีทั้งอากาศ น้ำ และสารอาหารต่าง ๆ เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตในดิน นับตั้งแต่พืช สัตว์ชนิดต่าง ๆ รวมถึงจุลินทรีย์หลายชนิดที่มีขนาดเล็กจนไม่สามารถมองเห็นได้ด้วย

ตาเปล่า ซึ่งการคงอยู่ของสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ทำให้เกิดกิจกรรมต่าง ๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อมที่ส่งผลต่อสมบัติของดิน ระบบนิเวศของดิน สภาพแวดล้อม (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

อิสริยาภรณ์ (2552) กล่าวว่าการเติมถ่านชีวภาพช่วยปรับปรุงดิน เกิดจากโครงสร้างของถ่านชีวภาพที่เป็นรูพรุนจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวซึ่งการเติมถ่านชีวภาพจะช่วยยกระดับค่าความเป็นกรด-ด่างของดินที่เป็นกรดให้สูงขึ้นทำให้ดินนั้นมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินมากขึ้น ขณะที่ Changxun et al. (2016) ได้ศึกษาผลของถ่านชีวภาพในการเจริญเติบโตของส้มสายพันธุ์ *Poncirus trifoliata* L. ในดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.73 โดยการใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 0, 1 และ 3% (w/w) พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 3% พบชนิดของเชื้อราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามากที่สุด ได้แก่ *Claroideoglomeraceae Claroideoglomus Glo80 VTX00278* อยู่ที่ 4.85%, *Glomeraceae Glomus Alguacil12a Glo G13 VTX00248* อยู่ที่ 13.10%, *Glomeraceae Glomus SG07 Glo2 VTX00219* อยู่ที่ 5.39%, *Glomeraceae Glomus sp. VTX00093* อยู่ที่ 58.24%, *Glomeraceae Glomus sp. VTX00096* อยู่ที่ 8.44%, *Glomeraceae Glomus sp. VTX00113* อยู่ที่ 1.13%, *Glomeraceae Glomus sp. VTX00219* อยู่ที่ 5.88% และ *Glomeraceae Glomus sp. VTX00280* อยู่ที่ 2.08% ตามลำดับ การใช้ถ่านชีวภาพที่ส่งผลต่อจำนวนของจุลินทรีย์ภายในดินที่ปลูกยางพาราในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย พบว่าจากการใช้ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ ในอัตรา 0, 5, 10 และ 20 t ha^{-1} ส่งผลต่อปริมาณความหนาแน่นของเชื้อราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในดินชั้น C3 และ C4 การใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 20 t ha^{-1} ทำให้มีปริมาณความหนาแน่นของเชื้อราไมคอร์ไรซาสูงที่สุดคือ 83.18 และ 86.14% (Herrmann et al., 2020)

จากการทดลองของ Elzobair et al. (2015) ได้ศึกษาผลกระทบของถ่านชีวภาพกับปุ๋ยคอกต่อการเจริญเติบโตของข้าว กิจกรรมของจุลินทรีย์และเอนไซม์ในอันดับดิน Aridisol ซึ่งทำการทดลองสองครั้ง โดยครั้งแรกในปี 2009 ใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 22 Mg ha^{-1} พบว่ามีจำนวนของแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบอยู่ที่ 9.3 และ 6.0 nmol g^{-1} dry soil คิดเป็น 29.5% และครั้งที่สองในปี 2012 ใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 42 Mg ha^{-1} พบจำนวนแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบคือ 8.7 และ 5.08 nmol g^{-1} dry soil คิดเป็น 20.6% ตามลำดับ ขณะที่ Xu et al. (2016) ศึกษาการเติมถ่านชีวภาพส่งไปในดินที่ส่งผลต่อการชะล้างของไนโตรเจนและจำนวนประชากรของสิ่งมีชีวิตในดิน พบว่าจากการใช้ถ่านชีวภาพจากต้นข้าวโพดในอัตรา 2, 4 และ 8% (w/w) ทำให้พบชนิดของแบคทีเรียมากที่สุด ได้แก่ *Nitrospira* และ *Nitrosomonadaceae_uncultured* พบมากเมื่อใช้ถ่านชีวภาพใน

อัตรา 8% คือ 1,220 และ 1,074 CFU *Nitrosospira, Nitrospinaceae_ uncultured* ส่วน *Nitrosomonas* พบมากที่สุดในการใช้ถ่านชีวภาพ ในอัตรา 4% คือ 201, 23 และ 23 CFU ตามลำดับ จากการนำถ่านชีวภาพจากมูลวัว เศษไม้และปุ๋ยพืชสดที่ส่งผลต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินและการเจริญเติบโตของถั่วลิสงลายเสือ พื้นที่ทุ่งหญ้าสะวันนา ในดินที่มีการสะสมของดินเหนียวในดินชั้นล่าง พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลวัวและไม้ทำให้มีปริมาณของแบคทีเรียในสถานที่ทดลองทั้งสองที่สูงกว่าตำรับควบคุม แต่การใช้ถ่านชีวภาพจากมูลวัวและไม้ร่วมกับปุ๋ยพืชสดส่งผลให้ปริมาณของแบคทีเรียสูงกว่าการใช้ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียวในสถานที่ทดลองทั้งสองแห่งคือ 10.4 และ 10.85 CFU g^{-1} จากการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยพืชสด ส่วนการถ่านชีวภาพจากไม้ร่วมกับปุ๋ยพืชสดคือ 10.12 และ 10.56 CFU g^{-1} (Adekiya et al., 2020)

สำหรับการทดลองของ Mostafa and Shaban, (2019) ศึกษาชนิดของถ่านชีวภาพที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมี จำนวนของสิ่งมีชีวิตในดินและการปลูกถั่วฟาบาในดินร่วนปนทราย โดยใช้ถ่านชีวภาพจาก 1. ลำต้นข้าวโพด ฟางข้าว ถั่วฟาบา และฝ้าย 2. กิ่งไม้ 3. ของเสียเหลือทิ้ง พบว่าทุกตำรับที่ใช้ถ่านชีวภาพส่งผลให้จำนวนของแอคติโนมัยซีทเพิ่มขึ้นมากกว่าตำรับควบคุม ซึ่งในการใช้ถ่านชีวภาพจากกิ่งไม้ อัตรา 20 และ 30% ทำให้มีจำนวนของแอคติโนมัยซีทสูงที่สุดเมื่อเวลาผ่านไป 60 วัน พบว่าจำนวนของแอคติโนมัยซีทเพิ่มขึ้นจาก 69.2 เป็น 89.3×10^{5} CFU g^{-1} dry soil และ 90 วัน คือ 95.7 เป็น 100.2×10^{5} CFU g^{-1} dry soil ตามลำดับ จากการศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพที่ส่งผลต่อปริมาณของสิ่งมีชีวิตและเอนไซม์ในดินที่เสื่อมโทรมในประเทศจีน ในดินร่วนเหนียวมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ที่ 4.57 พบว่าจากการใช้ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ อัตรา 1% (w/w) ส่งผลให้ปริมาณของแอคติโนมัยซีทในดินที่ระยะเวลา 8 และ 16 สัปดาห์มีค่าสูงที่สุดคือ 2.46 และ 2.25 nmol g^{-1} ตามลำดับ (Walelign and Mingkui, 2015) ส่วนการทดลองของ Mierzwa-Hersztek et al. (2019) ได้ประเมินคุณภาพของดินหลังจากการใช้ถ่านชีวภาพต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน โดยใช้ถ่านชีวภาพจากฟางข้าวสาลีและฟางของหญ้ามิสแคนทัสร่วมกับดินร่วนปนทรายในอัตรา 1 และ 2% จากการศึกพบว่าในการใช้ถ่านชีวภาพจากวัสดุทั้งสองชนิดส่งผลให้ปริมาณของแอคติโนมัยซีทมีจำนวนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในการใช้ถ่านชีวภาพจากฟางข้าวทั้งสองอัตราส่งผลให้มีปริมาณจำนวนแอคติโนมัยซีทสูงที่สุดคือ 1,088 และ 1,666 $\times10^{-3}$ CFU g^{-1} DM

2.4 ผลของถ่านชีวภาพต่อสิ่งแวดล้อม

ถ่านชีวภาพสามารถช่วยดึงก๊าซ CO_2 จากอากาศมากักเก็บไว้ในดิน ช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซ CH_4 ในดินได้ 20 g kg^{-1} และก๊าซ N_2O ลดลงถึง 50% ในแปลงปลูกถั่วเหลืองที่มีการเติมถ่านชีวภาพ และช่วยดูดซับแอมโมเนียมที่ระเหยจากพื้นที่เกษตรกรรม Lehmann et al. (2006) จากการศึกษาของ Liu et al. (2012b) ที่นำถ่านชีวภาพมาใช้ในการแก้ไขการปลดปล่อยก๊าซ N_2O ในแปลงปลูกข้าว 3 แห่ง ทางภาคใต้ของประเทศจีน โดยใช้ถ่านชีวภาพจากฟางข้าวสาลี อัตรา 0, 20 และ 40 t ha^{-1} ร่วมกับการไม่ใส่และใส่ปุ๋ยไนโตรเจน พบว่าจากการใช้ถ่านชีวภาพ อัตรา 20 และ 40 t ha^{-1} ทำให้ปริมาณความหนาแน่นของก๊าซ N_2O ที่ถูกปลดลปล่อยออกมาลดลงจาก 0.17 เป็น 0.10 และ 0.07 kg N_2O-N t^{-1} ตามลำดับ และพบว่าตำรับที่ใช้ถ่านชีวภาพ อัตรา 40 t ha^{-1} ร่วมกับการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน ทำให้ลดการปลดปล่อยก๊าซ N_2O ในแปลงทดลองทั้ง 3 แห่ง ได้ดีที่สุดคือ 0.87, 0.72 และ 0.68 kg N_2O N ha^{-1} ตามลำดับ ขณะที่ ณิชาภัทร และคณะ (2563) ได้ศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพต่อคุณสมบัติและการกักเก็บคาร์บอนในดินบนพื้นที่สูง อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน โดยเปรียบเทียบระหว่างการเติมถ่านชีวภาพขนาด 1-2 mm ในอัตราส่วน 0.1-3.0 % (w/w) กับการเติมตอซังข้าวโพดเพียงอย่างเดียว อัตรา 2 t rai^{-1} การเติมถ่านชีวภาพลงไปในดินทำให้ปริมาณคาร์บอนในดินเพิ่มขึ้นจากกรรมวิธีควบคุมที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพและศึกษาเกี่ยวกับการสูญเสียคาร์บอนในดิน หลังจากการบ่มดินไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 เดือน การเติมถ่านชีวภาพในทุกอัตราส่งผลให้ดินมีอัตราการสูญเสียคาร์บอนอยู่ในช่วง 0.16-0.26% ทำให้ทราบว่าการใช้ถ่านชีวภาพส่งผลในการช่วยกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในบรรยากาศมากักเก็บไว้ในดิน ซึ่งทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศนั้นมีปริมาณลดลง

Li et al. (2019) ที่ศึกษาอิทธิพลของอัตราการเติมถ่านชีวภาพและขนาดของถ่านชีวภาพต่อการไหลบ่า และการผุพังสลายตัวของดินของประเทศจีน นำถ่านชีวภาพที่มีขนาด 2.0-1.0, 1.0-0.25 และน้อยกว่า 0.25 mm. ในอัตราที่แตกต่างกัน คือ 1, 3, 5 และ 7% พบว่าการเติมถ่านชีวภาพทุกอัตราส่วนและทุกขนาด ช่วยลดการไหลบ่าของหน้าดิน โดยตำรับที่มีการใช้ถ่านชีวภาพขนาดน้อยกว่า 0.25 mm อัตรา 1% ส่งผลให้ระยะเวลาที่จะเกิดการไหลบ่าของหน้าดินเพิ่มขึ้นคือ 2.97 นาที มีการสูญเสียหน้าดินจากการไหลบ่าลดลงคือ 36.23 kg m^{-2} min^{-1} และยังช่วยให้สูญเสียดินจากการผุพังสลายตัวลดลงคือ 1.33 kg m^{-2} min^{-1} ส่วน Jien and Wang (2013) ที่ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดินและการชะล้างพังทลายในดินที่มีการผุงพังสลายตัวสูงของประเทศไต้หวัน ใช้ถ่านชีวภาพจากเศษไม้กระถิ่น อัตรา 0, 2.5 และ 5% w/w ผสมร่วมกับตัวอย่างดินจากแปลงทดลองที่

ระดับความลึก 0-25 cm ภายใต้สภาพการบ่มดินเป็นระยะเวลา 105 วัน พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพ อัตรา 5% w/w ช่วยลดการผุพังสลายตัวของดินลดลงจาก 1,458 g m^{-2} h^{-1} เป็น 532 g m^{-2} h^{-1}

Pratiwi et al. (2016) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากแกลบที่ส่งผลต่อการกักเก็บและการชะล้าง แอมโมเนียม ไนเตรท และฟอสเฟตในดินร่วน โดยใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 4% w/w พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มการดูดซึมแอมโมเนียม และไนเตรท ได้สูงกว่าการดินที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพอยู่ที่ 4.7 และ 2.1 mg N g^{-1} และเมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารที่อยู่ในสารละลายที่ผ่านการชะล้างจากดิน กรรมวิธีที่มีการใช้ถ่านชีวภาพมีปริมาณของแอมโมเนียม และไนเตรท อยู่ที่ 38.0 และ 11.5 mg kg^{-1} ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากรรมวิธีที่ไม่มีการใช้ถ่านชีวภาพคือ 48.0 และ 14.7 mg kg^{-1} ตามลำดับ จึงแสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพช่วยกักเก็บธาตุอาหารที่สูญเสียในดินได้ง่ายได้แก่ แอมโมเนียมและไนเตรทไว้ จากการใช้ถ่านชีวภาพที่ส่งผลต่อการกักเก็บและการชะล้างไนเตรท แอมโมเนียม และฟอสเฟตในดินร่วนปนทราย พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากชานอ้อย ไม้ไผ่ เปลือกถั่วลิสง และ Brazilian pepperwood ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 °C สามารถลดปริมาณการเคลื่อนที่ของไนเตรทคือ 3.70, 2.50, 0.20 และ 0.12% ตามลำดับ ซึ่งถ่านชีวภาพจาก Brazilian pepperwood ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 600 °C มีประสิทธิภาพในการดูดซึมแอมโมเนียมได้ดีที่สุดคือ 3.8, 15.7 และ 11.9% ตามลำดับ ส่วนการดูดซึมฟอสเฟต การใช้ถ่านชีวภาพจากชานอ้อย ผ่านกระบวนการไพโรไรซิสที่อุณหภูมิ 450 °C มีอัตราการดูดซึมฟอสเฟตดีที่สุดคือ 3.1% (Yao et al., 2012a)

Chaiyaraksa and Phumcharoen (2021) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพลงในดินส่งผลให้การเคลื่อนที่ของโลหะหนักลดลง การเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 5% ทำให้การเคลื่อนที่ของ Mn, Pb และ Cd ลดลงคือ 7, 10 และ 17% ตามลำดับ และเมื่อนำถ่านชีวภาพไปใช้ในดินที่มีการปนเปื้อนของน้ำมันดีเซล 2% ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของ Mn, Pb และ Cd ในดินลดลงอยู่ที่ 16, 12 และ 10% ตามลำดับ ในส่วนของ Ketrot and Wisawapipat (2021) ได้ทำการศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพและเถ้าจากกากตะกอนอ้อยต่อการตรึงตะกั่วในพื้นที่เหมืองที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก พบว่าการเติมถ่านชีวภาพและเถ้าจากกากตะกอนอ้อยอัตรา 1 และ 5% ส่งผลให้การตรึงของตะกั่วในดินลดลงที่ระยะการบ่มดิน 14, 56, 90 และ 120 วัน ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพจากกากตะกอนอ้อยทำให้ความสามารถในการตรึงตะกั่วลดลงถึง 50.35% อีกทั้งยังสามารถลดการตรึงของปรอทและแคดเมียมได้ดรที่สุดในระยะการบ่มดิน 120 วัน ขณะที่ Břendová et al. (2015) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากกะลามะพร้าวในอัตรา 0, 5, 10 และ 15% (w/w) ทำให้ปริมาณแคดเมียมและสังกะสีที่ถูกชะ

ละลายด้วยน้ำลดลงเกิดจากความสามารถในการตรึงแคดเมียมและสังกะสีได้สูงของถ่านชีวภาพที่ส่งผลให้พืชมีการดูดใช้โลหะหนักในดินลดลง ซึ่ง He et al. (2017) ที่ศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ในพื้นที่ปลูกผักกวางตุ้งที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม โดยมีการใช้ถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ที่ผลิตในอุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 300, 400 และ 500 °C แต่ละอุณหภูมิมีการเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 0, 1, 3 และ 5% (w/w) พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพที่ผ่านการผลิตในอุณหภูมิ 400 °C ในอัตรา 5% ทำให้พืชลดการใช้ประโยชน์จากแคดเมียมได้ถึง 66 % นอกจากนี้ Prapagdee and Piyatiratitivorakul (2014) ที่ศึกษาผลของเหง้ามันสำปะหลังต่อการนำใช้ประโยชน์ของแคดเมียมและสังกะสีในต้นถั่วเขียวภายใต้อัตราของถ่านชีวภาพที่แตกต่างกันคือ 0, 5, 10 และ 15% (w/w) พบว่าการการใช้ถ่านชีวภาพในอัตรา 10% (w/w) ทำให้ความสามารถในการใช้ประโยชน์ของแคดเมียมและสังกะสีในต้นถั่วเขียวลดลง ขณะที่ Zhu et al. (2015) พบว่าถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณโลหะหนักที่แลกเปลี่ยนได้ในดินลดลงและช่วยลดการสะสมของโลหะหนัก ได้แก่ Cr, Ni, Cd และ Pb ในส่วนของราก ลำต้น ใบ เปลือก (แกลบ) และเมล็ดของต้นข้าว

2.5 ผลของถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช

การนำถ่านชีวภาพมาประยุกต์เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อปรับปรุงดินที่มีความเสื่อมโทรมให้สามารถกลับมาทำการเพาะปลูกพืชได้ เนื่องจากคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่หลากหลายจึงได้นำเอาถ่านชีวภาพมาใช้ร่วมกับกระบวนการเพาะปลูกพืชเพื่อทำให้พืชนั้นมีการเจริญเติบโตที่ดี ผลผลิตสูงและช่วยประหยัดต้นทุนที่ใช้ในการผลิตด้วย

จากการศึกษาของ สุทธวรรณ และคณะ (2563) ที่ศึกษาผลของปุ๋ยมูลไก่และถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมีของดินและการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คที่ปลูกในสภาพดินกรด ซึ่งมีการใส่ปุ๋ยมูลไก่ 4 อัตรา คือ 0, 500, 1,000, 2,000 kg rai^{-1} และถ่านชีวภาพ 3 อัตรา คือ 0, 500 และ 1,000 kg rai^{-1} พบว่าในการใช้ปริมาณปุ๋ยมูลไก่ที่ 2,000 kg rai^{-1} ร่วมกับถ่านชีวภาพในอัตรา 1,000 kg rai^{-1} ทำให้ผักกาดหอมมีจำนวนใบสูงที่สุดคือ 21 ใบ และมีปริมาณผลผลิตสูงที่สุดคือ 1,723 kg rai^{-1} หากใส่ปุ๋ยมูลไก่และถ่านชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ผักกาดหอมมีความสูง จำนวนใบ ความกว้างของทรงพุ่มเพิ่มขึ้นด้วย ขณะที่ สายชล และ สิริวรรณ (2563) ได้ศึกษาผลของถ่านชีวภาพร่วมกับการจัดการปุ๋ยต่อผลผลิตและความเข้มข้นธาตุอาหารในถั่วฝักยาวไร้ค้าง โดยการใช้ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียว และถ่านชีวภาพร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมีอัตรา 500 kg rai^{-1} ปุ๋ยอินทรีย์ 500 kg rai^{-1} และ 1,000 kg rai^{-1} พบว่าการเจริญเติบโตของถั่วฝักยาว การใช้ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียวทำ

ให้มีจำนวนฝักต่อต้นสูงที่สุดคือ 24.00 pod plant^{-1} ซึ่งไม่มีความแตกต่างกับการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์ และการใช้ปุ๋ยชีวภาพร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์อัตรา 500 และ 1,000 kg rai^{-1} ทำให้ปริมาณน้ำสดและน้ำหนักแห้งของฝักสูงที่สุดคือ 187.33, 178.33, 15.39 และ 16.14 g ตามลำดับ แต่ไม่มีความแตกต่างระหว่างตำรับทดลอง ปริมาณธาตุอาหารในฝักจากการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์ 500 kg rai^{-1} มีปริมาณโพแทสเซียมสะสมสูงที่สุดคือ 2.53% และปริมาณธาตุอาหารของวัสดุปลูกหลังการเก็บเกี่ยว การใช้ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียวทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุสูงที่สุดคือ 3.33% ส่วน เกศศิรินทร์ และคณะ (2558) ศึกษาอัตราส่วนของถ่านชีวภาพต่อคุณสมบัติทางเคมีของดินปลูก การเจริญเติบโตและผลผลิตของผักสลัดกรีนคอส จากถ่านชีวภาพจากไม้ยูคาลิปตัส อัตราส่วน 500, 1,000 และ 2,000 kg rai^{-1} พบว่าถ่านชีวภาพ 2,000 kg rai^{-1} ส่งผลให้คุณสมบัติทางเคมีของดินเพิ่มขึ้น ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณอินทรียวัตถุ ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ส่วนปริมาณน้ำหนักสดต่อต้นและปริมาณผลผลิตทั้งหมดพบว่า การใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 500 และ 2,000 kg rai^{-1} ทำให้มีค่าสูงสุดแต่ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติคือ 514.16, 511.65 g , 4,936 และ 4,911 kg rai^{-1}

จากการศึกษาของ ภราภรณ์ และคณะ (2560) ศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบต่อสภาพการละลายของจุลธาตุอาหารพืชและการเจริญเติบโตของข้าวที่ปลูกในดินเนื้อปูน ใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบในอัตรา 2.0 t rai^{-1} (RHB 2.0) ที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวในด้านความสูง น้ำหนักของฟางข้าวและเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีของข้าวพันธุ์ กข 31 ที่ปลูกในดินนาเนื้อปูนในชุดดินลพบุรี มีประสิทธิภาพดีที่สุด ขณะที่ ทัพไท และคณะ (2557) ที่ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตข้าวนาสวน พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกากที่เหลือจากการผลิตน้ำหมักชีวภาพในอัตราส่วน 2,560 kg rai^{-1} ทำให้จำนวนการแตกกอของต้นข้าวหลังวันปักดำที่ 15, 30, 45, 60 และ 75 วัน มีจำนวนการแตกกอของต้นข้าวเพิ่มสูงขึ้นกว่าทุกตำรับทดลอง ส่วนผลผลิตข้าว การใช้ถ่านชีวภาพที่อัตราส่วน 2,560 kg rai^{-1} ทำให้ปริมาณน้ำหนักของเมล็ดต่อกอสูงที่สุดคือ 32.06 g แต่ในกรรมวิธีที่ใช้ถ่านชีวภาพในอัตราส่วน 640 kg rai^{-1} มีปริมาณน้ำหนักต่อกอสูงที่สุดคือ 29.33 g จากการตรวจสอบน้ำหนักเมล็ดจำนวน 1,000 เมล็ด การใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 640 และ 1,280 kg rai^{-1} ทำให้มีน้ำหนักอยู่ที่ 32.21 และ 32.31 g ตามลำดับ

สำหรับผลของถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดนั้นแสดงได้จากการศึกษาของ Are et al. (2017) ได้นำมูลสัตว์และถ่านชีวภาพจากมูลสัตว์มาใช้ในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินที่เสื่อมโทรมในพื้นที่แปลงปลูกข้าวโพด พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากมูล

สัตว์ปีกทำให้ผลผลิตข้าวโพดทั้ง 4 ฤดูปลูก ระหว่างปี 2013 ถึง 2014 มีปริมาณผลผลิตเพิ่มสูงขึ้นจากตำรับควบคุมคือ 0.89, 0.98, 0.99 และ 1.08 t ha^{-1} ตามลำดับ ขณะที่ Njoku et al. (2015) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อผลผลิตของข้าวโพดในดินอันดับ Ultisol ประเทศไนจีเรีย การใช้ถ่านชีวภาพส่งผลให้ความสูงของต้นข้าวโพด ปริมาณพื้นที่ใบและปริมาณผลผลิตข้าวโพดสูงกว่าตำรับควบคุม แต่ในตำรับที่มีการใช้ถ่านชีวภาพในอัตราส่วน 20 t ha^{-1} ทำให้ความสูงของต้นข้าวโพด ปริมาณพื้นที่ใบและผลผลิตข้าวโพดสูงที่สุดคือ 1.91 m, 5.27 และ 0.67 t ha^{-1} ตามลำดับ ส่วนการทดลองของเยาวพล และ โฉมยง (2564) ได้ศึกษาถ่านชีวภาพจากไม้มะม่วงที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดข้าวเหนียว โดยการใช้ถ่านชีวภาพต่อดินในอัตราส่วน 100:0, 75:25, 50:50 และ 25:75 พบว่าในอัตราส่วนของถ่านชีวภาพต่อดิน 50:50 ทำให้ต้นข้าวโพดนั้นมีความสูงเฉลี่ยมากที่สุด ส่วนอัตราส่วนที่ 75:25 ส่งผลให้ความกว้างของใบ น้ำหนักของฝัก ความกว้างและความยาวของฝักของต้นข้าวโพดสูงที่สุด ขณะที่ เจษฎา และคณะ (2561) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากแกลบและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดหวานที่ปลูกในพื้นที่ดินกรด พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ความสูง ความยาวฝัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฝัก ปริมาณน้ำหนักต่อฝักและผลผลิตรวมต่อพื้นที่ของข้าวโพดหวานมีค่าสูงที่สุด และในการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบอัตรา 1,000 kg rai^{-1} ร่วมกับปุ๋ยคอกอัตราส่วน 1,000 kg rai^{-1} ทำให้ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางฝัก น้ำหนักต่อฝัก ปริมาณผลผลิตรวมของข้าวโพดมากที่สุดคือ 201.94 cm, 16.06 cm, 432.23 g และ 2,428.00 kg rai^{-1} ตามลำดับ ส่วนการทดลองของ Arif et al. (2012) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพ ปุ๋ยคอก และปุ๋ยไนโตรเจนในการผลิตข้าวโพด โดยการใช้ถ่านชีวภาพอัตราส่วน 30 t ha^{-1} ปุ๋ยคอก 10 t ha^{-1} และปุ๋ยไนโตรเจน 150 kg ha^{-1} เพียงอย่างเดียวและถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยคอกและถ่านชีวภาพร่วมกับไนโตรเจน พบว่าในการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยไนโตเจนทำให้ความกว้างของใบข้าวโพด จำนวนแถวต่อฝักและจำนวนเมล็ดในฝักสูงที่สุดคือ 16 cm, 13.67 และ 342 ตามลำดับ ส่วนปริมาณน้ำหนักใน 100 เมล็ด น้ำหนักผลผลิตทั้งหมดและน้ำหนักเมล็ดที่กะเทาะออกจากฝักคือ 263 g, 12,471 และ 4,194 kg ha^{-1} ตามลำดับ ขณะที่ Budiyati et al. (2020) ศึกษาถ่านชีวภาพจากเปลือกมะพร้าวในการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และความอุดมสมบูรณ์ในดินอันดับ Ultisol ในเขตอาศัยน้ำฝนที่มีปริมาณธาตุอาหารต่ำและเป็นกรดจัดในประเทศอินโดนีเซีย พบว่าในการใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 15 t ha^{-1} ส่งผลให้ปริมาณความสูง พื้นที่ใบและปริมาณน้ำหนักแห้งทั้งหมดสูงสุดคือ 277.55 cm, 24,769.12 cm^{-2} และ 102.79 g ส่วนจำนวนเมล็ดและน้ำหนักเมล็ดมีปริมาณเพิ่มขึ้นมากที่สุด 54.98 และ 68.97%

Amaral et al. (2019) ได้นำถ่านชีวภาพ และปุ๋ยหมักไปใช้ในการปลูกพริกชี้ฟ้าแดงพบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่และกะลามะพร้าว ส่งผลให้ความสูง ความยาวใบ จำนวนผลพริกและน้ำหนักของผลพริกคือ 64.08 cm, 12.46 cm, 15.00 fruits และ 162.83 g จากถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ ส่วนถ่านชีวภาพจากกะลามะพร้าวคือ 65.67 cm, 11.60 cm, 17.17 fruits และ 172.98 g มีค่าสูงกว่าตำรับควบคุม ตามลำดับ ขณะที่ Wisnubroto et al. (2017) ได้ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของพริกชี้ฟ้าแดง *Capsicum Annum* L. พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจนและปุ๋ยคอก ส่งผลให้ความสูงของต้นพริกที่อายุ 2 และ 4 เดือน มีความสูงสูงที่สุดคือ 39.29 และ 72.15 cm ซึ่งยังส่งผลให้ความยาวของพริก น้ำหนักของพริก 10 เม็ด และปริมาณผลผลิตรวมสูงที่สุดคือ 17.20 cm, 120.66 g และ 14.60 t ha^{-1} ตามลำดับ จากการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลไก่ ปุ๋ยหมัก มูลไก่ มูลแพะและมูลวัวในการปลูกพริกชี้ฟ้าแดง พบว่าจากการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลไก่ ในอัตรา 15 t ha^{-1} ส่งผลให้ต้นพริกมีการเจริญเติบโตในด้านความสูง จำนวนใบ เส้นรอบวงของต้นพริก จำนวนผลต่อต้น น้ำหนักผลพริกหนึ่งผลและปริมาณผลผลิตทั้งหมดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากตำรับควบคุมอยู่ที่ 95.62 cm, 112.31 sheet, 13.36 mm, 95.77 fruits, 15.15 g, และ 1,395 g ตามลำดับ (Mahendra et al., 2020) ขณะที่ พชรพล และ สุขุมาภรณ์ (2561) ได้ศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสงของพริกขี้หนูภายใต้สภาพดินเปรี้ยว จากการศึกษาพบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 2.5, 5 และ 10% (w/w) ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเมื่อระยะเวลาผ่านไป 56 วัน เพิ่มสูงขึ้น ขณะเดียวกันการใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 2.5% ส่งผลให้พริกมีความสูง และพื้นที่ของใบสูงที่สุดคือ 25.80 cm และ 26.14 cm^2 และยังทำให้พริกที่ปลูกจากตำรับทดลองนี้มีค่าดัชนีความเขียวของใบร่วมถึงปริมาณรวมของน้ำตาลที่ละลายน้ำได้สูงที่สุดจากตำรับที่มีการใช้ถ่านชีวภาพ คือ 41.39 SPAD value และ 49.99 mg g^{-1}

Suksawat et al. (2017) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากลำไย และการควบคุมวัชพืชด้วยเศษของต้นข้าวโพดในบริเวณพื้นที่ปลูกลำไย พบว่าในระยะเวลา 7 เดือน การใช้ถ่านชีวภาพ 5.0% ร่วมปุ๋ยมูลสัตว์ทำให้ต้นลำไยมีการเจริญเติบโตสูงที่สุดอยู่ที่ 55 cm ขณะที่ Yasmin et al. (2020) พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยมูลไส้เดือน ส่งผลให้ต้นส้มเขียวหวานมีความสูง เส้นรอบวง ความกว้างของทรงพุ่ม จำนวนกิ่งสูงสุดคือ 3.26 m, 34.63 cm, 6.05 m, 31.68 branch $plant^{-1}$ ตามลำดับ และยังส่งผลให้มีน้ำหนักต่อผล ปริมาณผลผลิตรวมในปี 2018-2019 และปี 2019-2020 คือ 56.34 fruits $plant^{-1}$, 202.08 g, 8.23 และ 7.98 t ha^{-1} ตามลำดับ

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1. การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีดินบางประการภายใต้การชะละลายในดิน

3.1.1 พื้นที่และระยะเวลาในการศึกษา

ศึกษาในพื้นที่ของคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ ระยะเวลาในการศึกษา ทำการทดลองระหว่าง เดือนสิงหาคม - พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 โดยทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของดินทั้ง 3 ชุดดิน ได้แก่ 1. ดินร่วนปนทราย เป็นตัวแทนชุดดินสันทราย (San Sai series: Sai) พิกัด UTM: 47Q 502917E 2093293N 2. ดินร่วนเหนียวปนทราย เป็นตัวแทนชุดดินหล่มสัก (Lom Sak series: La) พิกัด UTM: 47Q 488441E 1996760N 3. ชุดดินหางดง เป็นตัวแทนดินเหนียว (Hang Dong series: Hd) พิกัด UTM: 47Q 498978E 2088683N ทำการวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีของดินหลังการทดลองในห้องปฏิบัติการทางดินและปุ๋ยขั้นสูง คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

3.1.2 แผนการทดลองและสิ่งทดลอง

โดยทำการวางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (factorial in randomized complete block design: RCBD) โดยมี 2 ปัจจัย ปัจจัยที่ 1 คือ ดินตัวแทนชุดดินจำนวน 3 ชุดดิน คือ ดินร่วนปนทราย (ตัวแทนชุดดินสันทราย; Sai) = S_1, ดินร่วนเหนียวปนทราย (ตัวแทนชุดดินหล่มสัก; La) = S_2, ดินเหนียว (ตัวแทนชุดดินหางดง; Hd) = S_3 ร่วมกับปัจจัยที่ 2 การเติมถ่านชีวภาพ ได้แก่ ไม่ใส่ถ่านชีวภาพ = B_1, ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด = B_2, ถ่านชีวภาพจากแกลบ = B_3 ซึ่งทุกตำรับทดลองมีการผสมถ่านชีวภาพร่วมกับตัวแทนชุดดิน และมูลวัว ในอัตราส่วน 2:1:1 คือ ดิน 2 ส่วน ถ่านชีวภาพ 1 ส่วน และ มูลวัว 1 ส่วน ในวัสดุรองรับทรงกระบอก ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm สูง 40 cm ระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับ 30 cm จำนวน 4 ซ้ำ 9 ตำรับทดลอง

3.2 การทดลองที่ 2 ผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีดินบางประการในดินร่วนปนทรายภายใต้สภาพการบ่มดิน

3.2.1 พื้นที่และระยะเวลาในการศึกษา

ศึกษาในพื้นที่ของอาคารปฏิบัติการและฝึกอบรมดินและปุ๋ยชั้นสูง คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ และทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินในห้องปฏิบัติการทางดินและปุ๋ยขั้นสูง คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ ระหว่างเดือนมกราคม-สิงหาคม พ.ศ. 2565

3.2.2 แผนการทดลองและสิ่งทดลอง

ทำการวางแผนทดลองแบบแบบสปริทพลอทสุ่มสมบูรณ์ (split plot in completely randomized design: CRD) ประกอบด้วยปัจจัยหลัก (main plot) คือชนิดของถ่านชีวภาพ 1. ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด 2. ถ่านชีวภาพจากแกลบ ปัจจัยรอง (sub plot) คืออัตราของถ่านชีวภาพในอัตรา 0%, 2.5% และ 5.0% w/w จำนวน 4 ซ้ำ 6 ตำรับทดลอง

โดยเก็บตัวอย่างดินทราย พิกัด UTM: 47Q 504153E 2088198N ที่ระดับความลึก 0-30 cm นำตัวอย่างดิน จำนวน 200 g ร่วมกับถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบในอัตราส่วน 0, 2.5 และ 5.0% (w/w) ทำการบ่มดินกับถ่านชีวภาพโดยปรับความชื้นให้อยู่ในระดับ 60% ของความชื้นดินที่จุดอิ่มตัวด้วยน้ำ บ่มดินในระบบปิดด้วยถุงซิปล๊อคขนาด 6×9 นิ้ว ทำการบ่มดินที่ระยะเวลา 0, 60, 120 และ 180 วัน เมื่อครบระยะเวลาการบ่มดิน นำตัวอย่างดินที่บ่มมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของดินหลังการทดลอง

3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีบางประการของดินหลังการทดลอง

3.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ของดินในการทดลองที่ 1

ปริมาณเนื้อดิน (soil texture) โดยวิธี hydrometer method ชั่งตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.0 mm จำนวน 50 g เติมสารละลายแคลกอน 5% จำนวน 100 ml น้ำกลั่น 100 ml นำไปเข้าเครื่องปั่น เป็นเวลา 5 นาที ให้สารละลายเข้ากัน เทลงในกระบอกตวงขนาด 1,000 ml ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 1,000 ml คนสารแขวนลอยแล้ววัดค่าที่ 40 วินาที และ 2 ชั่วโมง วัดอุณหภูมิหลังจากวัดค่า และบันทึกผล (Andrés et al., 2014)

ความชื้นของดิน (soil moisture) ชั่งตัวอย่างดินจำนวน 10 g ลงในบีกเกอร์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำออกจากตู้อบ นำไปชั่งหาน้ำหนักของปริมาณของแข็งทั้งหมด น้ำหนักที่คงเหลืออยู่ของของแข็งที่เหลือ และน้ำหนักส่วนที่หายไป นำมาวิเคราะห์ผลดังสมการ

$$\text{ความชื้นของดิน\%} = \frac{(\text{น้ำหนักดินก่อนอบ-น้ำหนักดินหลังอบ})}{\text{น้ำหนักดินก่อนอบ}} \times 100 \qquad (1)$$

ความหนาแน่นอนุภาคของดิน (particle density) ชั่งน้ำหนัก volumetric flask ขนาด 50 ml ชั่งตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.0 mm เทลงไปประมาณหนึ่งในสามของ volumetric flask ชั่งน้ำหนัก volumetric flask จากนั้นเติมน้ำกลั่นลงไปสองในสามของ volumetric flask เขย่าให้ดินกับน้ำเข้ากัน อุ่น volumetric flask บนเตาไฟฟ้า เขย่าเป็นครั้งจนกระทั่งน้ำที่ผสมดินเริ่มเดือด ต้มต่อไปอีก 10 นาที แล้วยกลง ทิ้งไว้ให้ volumetric flask เย็นจนอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง เติมน้ำกลั่นลงไปใน volumetric flask จนเต็มปริมาตร ชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล นำมาวิเคราะห์ผลดังสมการ (คณาจารย์สาขาปฐพีศาสตร์, 2560)

$$D_S = \frac{m2 - m_1}{100 - (m_3 - m_2)} \qquad (2)$$

D_s = ความหนาแน่นของอนุภาค (g cm^{-3})

m_1 = น้ำหนักของโวลุมเมตริกฟลาส (g)

m_2 = น้ำหนักของโวลุมเมตริกฟลาสเมื่อมีดินบรรจุอยู่ (g)

m_3 = น้ำหนักของโวลุมเมตริกฟลาสเมื่อมีดินและน้ำบรรจุอยู่ จนถึงขีดบอกปริมาตร 100 ml g^{-1}

3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินในการทดลองที่ 1

การวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน ชั่งดินที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2.0 mm จำนวน 10 g ต่อน้ำ 25 ml หรือ อัตราส่วนดิน : น้ำ (1:2.5) คนให้เข้ากันแล้วทิ้งไว้ 5 นาที ทำเช่นนี้ติดต่อกัน 2 ครั้งและครั้งที่ 3 คนให้เข้ากันทิ้งไว้ 15 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่อง pH-meter (Wayne, 1980)

ค่าสภาพนำไฟฟ้าของดิน (electrical conductivity : EC) ชั่งดินที่ร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2.0 mm จำนวน 5 g ต่อน้ำ 25 ml หรืออัตราส่วนดิน: น้ำ (1:5) คนให้ดินกับน้ำเข้ากันเป็น

ระยะ ๆ นาน 30 นาที แล้วทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่า EC ด้วยเครื่อง electrical conductivity meter (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ชั่งดินที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 0.5 mm จำนวน 0.5 g เติมสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ 10 ml และเติม H_2SO_4 เข้มข้น 20 ml ทิ้งไว้ 30 นาที เติมน้ำกลั่น 100 ml หยด indicator (O-phenanthroline ferrous complex) 4 หยด ไตเตรทด้วย $FeSO_4$ 0.5 N จนเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นที่สีน้ำตาลปนแดง (Walkley and Black, 1947)

ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน (cation exchange capacity : CEC) ชั่งตัวอย่างดินขนาด 2.0 mm จำนวน 10 g เติมสารละลาย NH_4OAc pH 7 1 N จำนวน 25 ml นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที นาน 30 นาที จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge 5 นาที เทสารละลายทิ้ง และทำแบบนี้อีก 2 ครั้ง ล้างเอาส่วนของ NH_4OAc ที่เหลืออยู่ด้วย ethyl alcohol จำนวน 25 ml นำไปเขย่านาน 30 นาที และเทสารละลายทิ้ง ทำแบบนี้อีก 1 รอบ เมื่อทำกระบวนการล้างด้วย ethyl alcohol จากนั้นทำการไล่ที่ NH_4^+ ออกจากดินด้วยการเติม acidified NaCl 10% จำนวน 25 ml เขย่า 30 นาที และเทเก็บไว้ในขวดสต๊อก ทำเช่นนี้อีก 1 รอบ และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 75 ml จากนั้นนำไปกลั่นเพื่อหาปริมาณ NH_4^+ ด้วยเครื่องกลั่นไนโตรเจนรุ่น FOSS Kjeltec 8100 และไตเตรทด้วย HCl 0.05 N (FAO, 2008)

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน (available phosphorous) โดยใช้วิธี CAL (calcium acetate lactate) ชั่งตัวอย่างดินที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2.0 mm จำนวน 1 g สกัดด้วยน้ำยา CAL 20 ml นำไปเขย่า 2 ชั่วโมง นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge 3 นาที เพื่อให้ดินตกตะกอน กรองสารละลาย นำสารละลายไปพัฒนาสีดูดสารละลายจากขวดสต๊อก 1 ml เติม reagent B 4 ml ทิ้งไว้ 30 นาที นำไปอ่านปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ในดินด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophosphotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-1100 อ่านค่า %T ที่ wave length 882 nm (Oenorm, 2006)

ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน การสกัดตัวอย่างดินชั่งตัวอย่างดินที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2.0 mm จำนวน 5 g เติมน้ำยาสกัด NH_4OAC pH 7 จำนวน 25 ml เขย่าด้วยเครื่องเขย่า 30 นาที นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge 3 นาที ให้ดินตกตะกอนกรองสารด้วยกระดาษกรองเก็บไว้ในขวดสต๊อก

การอ่านค่าโพแทสเซียม ดูดตัวอย่างจากขวดสต๊อก 2 ml ลงใน volumetric flask ขนาด 50 ml ก่อนจะใส่ตัวอย่างลงใน volumetric flask ให้เติมน้ำเปล่าลงไปก่อนเล็กน้อย ปรับปริมาณเท เก็บไว้ในขวด 20 ml

การอ่านค่าแคลเซียมและแมกนีเซียม ดูดตัวอย่างจากสต๊อกโพแทสเซียม 5 ml ลงใน volumetric flask ขนาด 25 ml เติม lanthanum oxide 5 % จำนวน 2.5 ml ปรับปริมาณเทเก็บไว้ในขวด 20 ml นำไปอ่านด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS) ยี่ห้อ GBC รุ่น SavantAA∑ ตามวิธีของ (Wayne, 1980)

ปริมาณเหล็ก แมงกานีส สังกะสีและทองแดงที่สกัดได้ในดิน ชั่งตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.0 mm จำนวน 10 g เติมน้ำยาสกัด DTPA (diethylene triamine pentaacetic acid) จำนวน 25 ml นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า 2 ชั่วโมง แล้วนำมาปั่นเหวี่ยง ด้วยเครื่อง centrifuge 5 นาที ให้ดินตกตะกอนกรองด้วยกระดาษกรอง เก็บไว้ในขวดสต๊อก นำไปอ่านด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS) ยี่ห้อ GBC รุ่น SavantAA∑ ตามวิธีของ (Wayne, 1980)

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินในการทดลองที่ 2

การทดลองที่ 2 มีการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีดินคล้ายกับการทดลองที่ 1 แต่ได้มีการเพิ่มการวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

ปริมาณกำมะถันที่สกัดได้ ชั่งตัวอย่างดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.0 mm จำนวน 6 g เติมน้ำยาสกัด 500 ppm. P จำนวน 30 ml นำไปเขย่าด้วนเครื่องเขย่า 1 ชั่วโมง นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge 5 นาที ให้ดินตกตะกอน กรองด้วยกระดาษกรอง เก็บไว้ในขวดสต๊อก

การอ่านค่ากำมะถัน ดูดตัวอย่างจากขวดสต๊อก 10 ml ลงใน volumetric flask ขนาด 25 ml เติมสาร H_2O : $HClO_3$ อัตรา 1:1 จำนวน 1 ml เติม $BaCl_2.2H_2O$ จำนวน 1 g เขย่าทันทีให้ $BaCl_2.2H_2O$ ละลายจนหมด เติม 0.25 % gum acacia 1 ml ทิ้งไว้ 5 นาที นำไปอ่านด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-1100 อ่านค่า %Abs ที่ wave length 420 nm (Tabatabai, 1983)

3.3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) ตามแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (factorial in randomized complete block design: RCBD) ในการทดลองที่ 1 และตามแผนกรทดลองแบบสปริทพลอทสุ่มสมบูรณ์ (split plot in completely randomized design: CRD) ในงานทดลองที่ 2 แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีการจัดกลุ่มของสิ่งทดลอง (Least Significant Difference: LSD)

3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ

ค่าความเป็นกรด-ด่าง ชั่งตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ผ่านตะแกรงร่อน 2.0 mm จำนวน 3 g ต่อน้ำปราศจากไอออน 30 ml หรืออัตราส่วน 1:10 นำไปเขย่า 1 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้นาน 30 นาที นำไปวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่อง pH-meter (Singh et al., 2017)

ค่าสภาพนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพ (electrical conductivity : EC) ทำเช่นเดียวกับค่าความเป็นกรด-ด่าง แต่นำไปวัดค่าด้วยเครื่อง electrical conductivity meter (Singh et al., 2017)

ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในถ่านชีวภาพ ชั่งตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ผ่านตะแกรงร่อน 0.5 mm จำนวน 0.1 g เติมสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ 10 ml และเติม H_2SO_4 เข้มข้น 20 ml ทิ้งไว้ 30 นาที เติมน้ำกลั่น 100 ml หยด indicator (O-phenanthroline ferrous complex) 4 หยด ไตเตรทด้วย $FeSO_4$ 0.5 N จนเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นที่สีน้ำตาลปนแดง (Walkley and Black, 1947)

ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity : CEC) ชั่งตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.0 mm จำนวน 1.000x g เติมสารละลาย NH_4OAc pH 7 1 N 40 ml เขย่าให้สารละลายและถ่านชีวภาพเข้ากัน 15 ชั่วโมง เทตัวอย่างดินลงใน buchner funnel ซึ่งรองด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 42 ขณะเทตัวอย่างถ่านชีวภาพใช้แรงดูดจากเครื่อง suction เบา ๆ ชะถ่านชีวภาพที่ติดค้างใน centrifuge tube ด้วย NH_4OAc อีก 50 ml โดยแบ่งเป็น 2 ครั้ง ปรับปริมาตรด้วย NH_4OAc ให้ได้ 100 ml จากนั้นล้างเอาส่วนของ NH_4OAc ที่เหลืออยู่ตามช่องว่างด้วย ethyl alcohol จำนวน 30 ml โดยแบ่งครั้งละ 10 ml เมื่อทำกระบวนการล้างด้วย ethyl alcohol ทำการไล่ที่ NH_4^+ ออก นำถ่านชีวภาพใส่ลงใน centrifuge tube เติมสารละลาย 2M KCl จำนวน 40 ml ตั้งทิ้งไว้ 15 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาเทตัวอย่างลงใน buchner funnel ชะตัวอย่างถ่านชีวภาพด้วย 2M KCl จำนวน 50 ml แบ่งเติมครั้งละ 10 ml 5 ครั้ง เทสารละลายทั้งหมดเก็บไว้ใน volumetric flask ปรับปริมาตรด้วย 2M KCl ให้ได้ 100 ml จากนั้นนำไปกลั่นเพื่อหาปริมาณ NH_4^+ ด้วยเครื่อง FOSS Kjeltec 8100 และไตเตรทด้วย HCl 0.05 N (Graber et al., 2017)

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P) ชั่งตัวอย่างถ่านชีวภาพ 0.35 g เติมสารละลาย citic acid จำนวน 35 ml อัตรา 1:100 นำไปเข้าเครื่อง ultrasonic นาน 10 นาที นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า 30 นาที ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 4000 รอบ/นาที นาน 10 นาที นำไปกรองให้ได้สารละลาย นำไปอ่านปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้ในดินด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophosphotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-1100 อ่านค่า %T ที่ wave length 420 nm (Wang et al., 2012)

ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ (available K, Ca and Mg) ชั่งตัวอย่างถ่านชีวภาพ 0.5 g เติม HCl 0.1 M จำนวน 25 ml นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า 2 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้นาน 16 ชั่วโมง นำมากรองด้วยกระดาษกรอง เบอร์ 42 เก็บไว้ในขวดสต๊อก

การอ่านค่าโพแทสเซียม ดูดตัวอย่างจากขวดสต๊อก 5 ml ลงใน volumetric flask ขนาด 50 ml ก่อนจะใส่ตัวอย่างลงใน volumetric flask ให้เติมน้ำเปล่าลงไปก่อนเล็กน้อย ปรับปริมาณแล้วเทเก็บไว้ในขวด 20 ml

การอ่านค่าแคลเซียมและแมกนีเซียม ดูดตัวอย่างจากสต๊อกโพแทสเซียม 5 ml ลงใน volumetric flask ขนาด 25 ml เติม lanthanum oxide 5 % จำนวน 2.5 ml ปรับปริมาณเทเก็บไว้ในขวด 20 ml นำไปอ่านด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS) ยี่ห้อ GBC รุ่น SavantAAΣ ตามวิธีของ (Camps-Arbestain et al., 2017)

ปริมาณเหล็ก แมงกานีส สังกะสีและทองแดงที่ละลายได้ในน้ำ (water soluble) ชั่งตัวอย่างถ่านชีวภาพ 0.3 g เติมน้ำปราศจากไอออน 30 ml เขย่านาน 24 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยง 5 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง นำไปอ่านด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS) ยี่ห้อ GBC รุ่น SavantAAΣ (ปรับปรุงจาก Yusiharni and Gilkes, 2012)

3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของมูลวัว

การวัดความเป็นกรด-ด่างของดิน ชั่งดินที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2.0 mm จำนวน 5 g ต่อน้ำ 25 ml หรือ อัตราส่วนดิน : น้ำ (1:5) คนให้เข้ากันแล้วทิ้งไว้ 5 นาที ทำเช่นนี้ติดต่อกัน 2 ครั้งและครั้งที่ 3 คนให้เข้ากันทิ้งไว้ 15 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่อง pH-meter (Wayne, 1980)

ค่าสภาพนำไฟฟ้าของดิน (electrical conductivity : EC) ชั่งดินที่ร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2.0 mm จำนวน 5 g ต่อน้ำ 25 ml หรืออัตราส่วนดิน: น้ำ (1:5) คนให้ดินกับน้ำเข้ากันเป็น

ระยะ ๆ นาน 30 นาที แล้วทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่า EC ด้วยเครื่อง electrical conductivity meter (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553)

การเตรียมตัวอย่างพืช ชั่งตัวอย่างมูลวัวแห้งที่บดและร่อนผ่านตะแกรง 2 mm 1 g เติมกรดผสม HNO_3 : $HCLO_4$ (nitric acid : percholric acid อัตราส่วน 6:1) จำนวน 15 ml ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง นำมาตั้งบน hot plate ในอุณหภูมิ 150-200 องศาเซลเซียล จนกระทั่งกลายเป็นสีขาวนำมาปรับด้วยปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 25 ml เก็บสารละลายไว้ในขวดสต๊อก เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุทั้งหมดในมูลวัว

ปริมาณไนโตรเจน (total nitrogen) ชั่วตัวอย่างพืช 0.2 g ในหลอดย่อย เติมกรด H_2SO_4 เข้มข้น 7 ml และเติม catalyst 1 gram นำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยตัวอย่างจนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีขาว เมื่อเย็นจึงนำมาเติม NaOH 40% จนสารมีสีน้ำตาลหรือสีน้ำเงิน นำไปเข้าเครื่องกลั่น โดยใช้ boric acid 2% เพื่อรอรับสารที่ได้จากการกลั่นจนได้สารประมาณ 75 ml จากนั้นนำไปกลั่นด้วยเครื่อง FOSS Kjeltec 8100 และไตเตรตด้วย HCl 0.05 N เพื่อหาปริมาณ (FAO, 2008)

ปริมาณฟอสฟอรัส ดูดสารสกัดตัวอย่างมูลวัวที่ย่อยจากขวดสต๊อก 5 ml เติมสาร mixed reagent จำนวน 5 ml ทิ้งไว้ 20 นาที จากนั้นเข้าเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-1100 อ่านค่า %T ที่ wave length 470 nm (FAO, 2008)

ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมในมูลวัว ดูดตัวอย่างมูลวัวที่ย่อยจากขวด สต๊อก 2 ml ลงใน volumetric flask ขนาด 100 ml ก่อนจะใส่ตัวอย่างลงใน volumetric flask ให้เติมน้ำเปล่าลงไปเล็กน้อย ก่อนปรับปริมาณและเทเก็บไว้ในขวด 30 ml

การอ่านค่าแคลเซียมและแมกนีเซียม ดูดตัวอย่างจากสต๊อกโพแทสเซียม 5 ml ลงใน volumetric flask ขนาด 25 ml เติม lanthanum oxide 5 % จำนวน 2.5 ml ปรับปริมาณ เทเก็บไว้ นำไปอ่านด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS) ยี่ห้อ GBC รุ่น SavantAAΣ (FAO, 2008)

ปริมาณเหล็ก แมงกานีส สังกะสีและทองแดงทั้งหมดในมูลวัว อ่านจากสต๊อกตัวอย่างมูลวัวที่ย่อยแล้ว นำไปอ่านด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AAS) ยี่ห้อ GBC รุ่น SavantAAΣ ตามวิธีของ (FAO, 2008)

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์

การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีดินบางประการภายใต้การชะละลายในดิน

สมบัติทางของดินก่อนการทดลอง

สมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีบางประการของดินก่อนการทดลอง

ตัวแทนชุดดินสันทราย (San Sai: Sai) มีปริมาณอนุภาคของดินทราย 66.8% อนุภาคของทรายแป้ง 17.3% และอนุภาคของดินเหนียว 15.9% มีเนื้อดินเป็น ดินร่วนปนทราย (sandy loam) มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.16 ค่าสภาพนำไฟฟ้าคือ 28.7 µS cm^{-1} ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ 0.52% ปริมาณอินทรียวัตถุคือ 0.89% ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินคือ 1.96 cmol kg^{-1} ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินคือ 70.6 mgP kg^{-1} ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนในดินได้คือ 14 mgK kg^{-1} ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินคือ 832 mgCa kg^{-1} และ 134 mgMg kg^{-1} ส่วนปริมาณธาตุอาหารเสริมในดิน มีปริมาณทองแดง เหล็ก แมงกานีสและสังกะสีที่สกัดได้ในดินคือ 0.32, 36.0, 22.8 และ 1.29 mg kg^{-1} ตามลำดับ

ตัวแทนชุดดินหล่มสัก (Lom Sak: La) อนุภาคดินทราย 48.8% อนุภาคทรายแป้ง 23.3% และอนุภาคดินเหนียว 27.9% เนื้อดินเป็น ดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.79 ค่าสภาพนำไฟฟ้า 161 µS cm^{-1} มีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์คือ 0.87% ปริมาณอินทรียวัตถุคือ 1.50% ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินคือ 12.7 cmol kg^{-1} ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินคือ 200 mgP kg^{-1} ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินคือ 258 mgK kg^{-1} ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินคือ 3,049 mgCa kg^{-1} และ 277 mgMg kg^{-1} ปริมาณธาตุอาหารเสริมในดิน ปริมาณทองแดง เหล็ก แมงกานีสและสังกะสีที่สกัดได้ในดินคือ 1.59, 65.3, 33.7 และ 1.20 mg kg^{-1} ตามลำดับ

ตัวแทนชุดดินหางดง (Hang Dong: Hd) ประกอบด้วยอนุภาคของดินทราย 6.8% อนุภาคของทรายแป้ง 27.3% และอนุภาคของดินเหนียว 65.9% เนื้อดินเป็น ดินเหนียว (clay) มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.91 ค่าสภาพนำไฟฟ้าของดิน 68.7 µS cm^{-1} ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ 1.70% ปริมาณอินทรียวัตถุคือ 2.93% ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินคือ 22.2 cmol kg^{-1} ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินคือ 70.9 mgP kg^{-1} ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินคือ 164 mgK kg^{-1} ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินคือ 3,569 mgCa kg^{-1} และ

590 mgMg kg^{-1} ปริมาณทองแดง เหล็ก แมงกานีสและสังกะสีที่สกัดได้ในดินคือ 3.86, 58.8, 34.6 และ 1.91 mg kg^{-1} ตามลำดับ (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 สมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีบางประการของดินก่อนการทดลองในการทดลองที่ 1

Property	San Sai: (Sai)	Lom Sak: (La)	Hang Dong: (Hd)
Sand (%)	66.8	48.8	6.8
Silt (%)	17.3	23.3	27.3
Clay (%)	15.9	27.9	65.9
Texture	Sandy loam	Sandy Clay loam	Clay
$pH_{(1:2.5)}$	7.16	6.79	6.91
$EC_{(1:5)}$ (µS cm^{-1})	28.7	161.0	68.7
OC (%)	0.52	0.87	1.70
OM (%)	0.89	1.50	2.93
CEC (cmol kg^{-1})	1.96	12.7	22.2
Avail. P (mg kg^{-1})	70.6	200	70.9
Exch. K (mg kg^{-1})	14	258	164
Exch. Ca (mg kg^{-1})	832	3,049	3,569
Exch. Mg (mg kg^{-1})	134	277	590
Exch. Cu (mg kg^{-1})	0.32	1.59	3.86
Exch. Fe (mg kg^{-1})	36.0	65.3	58.8
Exch. Mn (mg kg^{-1})	22.8	33.7	34.6
Exch. Zn (mg kg^{-1})	1.29	1.20	1.91

Sai = San Sai series, La = Lom Sak series, Hd = Hang Dong series, Avail = Available, Exch = Exchangeable

สมบัติทางเคมีบางประการของถ่านชีวภาพ และมูลวัวก่อนการทดลอง

สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ มีค่าความเป็นกรด-ด่างคือ 8.98 และ 7.49 มีค่าสภาพนำไฟฟ้าคือ 2,130 และ 1,000 µS cm^{-1} มีปริมาณคาร์บอนอินทรีย์คือ 11.4 และ 9.4% ปริมาณอินทรียวัตถุคือ 19.7 และ 16.2% ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน 59.2 และ 35.5 cmol kg^{-1} ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 0.72 และ 1.39 g kg^{-1} ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ 3.62 และ 1.30 g kg^{-1} ปริมาณแคลเซียมที่เป็นประโยชน์คือ 1.69 และ 4.90 g kg^{-1}

และปริมาณแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์คือ 0.44 และ 1.01 g kg^{-1} ปริมาณเหล็กที่ละลายได้ในน้ำคือ 102 และ 8.10 mg kg^{-1} ปริมาณแมงกานีสที่ละลายได้ในน้ำคือ 0.24 และ 2.89 mg kg^{-1} และปริมาณสังกะสีที่ละลายได้ในน้ำ 0.87 และ 0.37 mg kg^{-1}

สมบัติทางเคมีดินบางประการของมูลวัว ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.10 สภาพนำไฟฟ้าคือ 9,320 µS cm^{-1} ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ 23.0% มีปริมาณอินทรียวัตถุ 39.7% ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในมูลวัวคือ 1.88 %N ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดในมูลวัวคือ 5.50 g kg^{-1} ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในมูลวัวคือ 3.91 g kg^{-1} ปริมาณแคลเซียมทั้งหมดในมูลวัวคือ 21.1 g kg^{-1} และปริมาณแมกนีเซียมทั้งหมดในมูลวัวคือ 1.11 g kg^{-1} ส่วนปริมาณธาตุอาหารเสริมทั้งหมดในมูลวัวได้แก่ ปริมาณทองแดงทั้งหมดคือ 42.7 mg kg^{-1} ปริมาณเหล็กทั้งหมดคือ 3,677 mg kg^{-1} ปริมาณแมงกานีสทั้งหมดคือ 1,093 mg kg^{-1} และปริมาณสังกะสีทั้งหมดคือ 380 mg kg^{-1} (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีบางประการของถ่านชีวภาพ และมูลวัวก่อนการทดลองในการทดลองที่ 1

Property	Corncob Biochar	Rice husk Biochar	Cow manure
$pH_{(1:5)}$	8.98	7.49	6.10
$EC_{(1:5)}$ (µS cm^{-1})	2,130	1,000	9,320
OC (%)	11.4	9.4	23.0
OM (%)	19.7	16.2	39.7
CEC (cmol kg^{-1})	59.2	35.5	-
Total N (%)	-	-	1.88
P (g kg^{-1})	0.72	1.39	5.50
K (g kg^{-1})	3.62	1.30	3.91
Ca (g kg^{-1})	1.69	4.90	21.1
Mg (g kg^{-1})	0.44	1.01	1.11
Cu (mg kg^{-1})	ND	ND	42.7
Fe (mg kg^{-1})	102	8.10	3,677
Mn (mg kg^{-1})	0.24	2.89	1,093
Zn (mg kg^{-1})	0.87	0.37	380

Corncob and Rice husk biochar analysis for P, K, Ca and Mg Available, water Soluble element to Cu, Fe, Mn and Zn in biochar. Cow manure analysis for total P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn and Zn.

ND = Not determined

สมบัติทางฟิสิกส์ของดินหลังการทดลอง

ความชื้น และความหนาแน่นอนุภาคของดิน

จากการศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน ความชื้นของดินที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร ส่วนตัวแทนของชุดดินที่ใช้ในการศึกษา (ปัจจัย A) พบว่า ดินเหนียวมีความชื้นในดินสูงที่สุดคือ 35.8% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติกับทุกตำรับทดลองยกเว้นดินร่วนเหนียวปนทรายคือ 32.4% ส่วนดินร่วนปนทรายมีความชื้นในดินน้อยที่สุดคือ 25.8% ส่วนปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดส่งผลให้มีปริมาณความชื้นในดินสูงที่สุดคือ 39.6% แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 35.1% ขณะที่การไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้มีปริมาณความชื้นในดินน้อยที่สุดคือ 19.3% ผลของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพบว่าการเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดส่งผลให้ความชื้นในดินเพิ่มขึ้นจากตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 31.3% พบว่าในดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบทำให้มีปริมาณความชื้นในดินสูงที่สุดคือ 42.9% แต่ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติกับดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 42.5% ส่วนดินร่วนปนทรายเพียงอย่างเดียวทำให้มีปริมาณความชื้นในดินน้อยที่สุดคือ 6.9% ส่วนระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร ปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่าดินเหนียวมีปริมาณความชื้นในดินสูงที่สุดคือ 55.4% มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง แต่ดินร่วนปนทรายมีปริมาณความชื้นในดินน้อยที่สุดคือ 31.8% ส่วนปัจจัยที่ 2 (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดทำให้ปริมาณความชื้นในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 60.0% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ซึ่งการไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้มีปริมาณความชื้นในดินน้อยที่สุดคือ 20.8% สำรับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A×B) พบว่าที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร ปริมาณความชื้นในดินไม่มีความแตกต่างในทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 41.8% ซึ่งดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ปริมาณความชื้นในดินสูงที่สุดคือ 71.9% และตำรับที่ใช้ดินร่วนปนทรายเพียงอย่างเดียวทำให้ปริมาณความชื้นในดินน้อยที่สุดคือ 8.2% (ตารางที่ 3)

สำหรับความหนาแน่นอนุภาคของดิน ที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร ตัวแทนของชุดดินที่ใช้ในการศึกษา (ปัจจัย A) พบว่าดินร่วนปนทรายมีความหนาแน่นอนุภาคสูงที่สุดคือ 2.30 g cm^{-3} แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับดินร่วนเหนียวปนทรายคือ 2.29 g cm^{-3} และดินเหนียวมีความหนาแน่นอนุภาคน้อยที่สุดคือ 2.22 g cm^{-3} ส่วนปัจจัยที่ 2 (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้ความหนาแน่นอนุภาคของดินสูงที่สุดคือ 2.37 g cm^{-3} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ความหนาแน่นอนุภาคของดินน้อยที่สุดคือ 2.21 g cm^{-3} ขณะที่ผลของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A×B) พบว่ามีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.27 g cm^{-3} ซึ่งดินร่วนปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้ความหนาแน่นอนุภาคของดินสูงที่สุดคือ 2.42 g cm^{-3} และการใช้ดินเหนียวร่วมกับถ่านชีวภาพ

จากซังข้าวโพดมีความหนาแน่นอนุภาคน้อยที่สุดคือ 2.14 g cm^{-3} ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร ตัวแทนของชุดดินที่ใช้ในการศึกษา (ปัจจัย A) พบว่าชนิดของดินไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ ซึ่งดินเหนียวมีความหนาแน่นอนุภาคสูงที่สุดคือ 2.32 g cm^{-3} และดินร่วนปนทรายมีความหนาแน่นอนุภาคน้อยที่สุดคือ 2.29 g cm^{-3} (ตารางที่ 3) สำหรับปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่า ตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีความหนาแน่นอนุภาคสูงที่สุดคือ 2.38 g cm^{-3} และการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบมีค่าความหนาแน่นอนุภาคน้อยที่สุดคือ 2.22 g cm^{-3} แต่ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพบว่า ความหนาแน่นอนุภาคดินที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลองมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.30 g cm^{-3} ซึ่งดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ทำให้ความหนาแน่นอนุภาคของดินสูงที่สุดคือ 2.46 g cm^{-3} แต่ดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบและดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบมีค่าความหนาแน่นอนุภาคของดินน้อยที่สุดคือ 2.20 g cm^{-3}

ตารางที่ 3 ผลของถ่านชีวภาพต่อความชื้น และความหนาแน่นอนุภาคของดินหลังการทดลอง

Treatment		Soil moisture (-------------%-------------)		Soil particle density (-------------g cm^{-3}-------------)	
Soil Depth		0-15 cm	15-30 cm	0-15 cm	15-30 cm
Soil Series (A)					
Sai	SL	25.8b	31.8b	2.30a	2.29
La	SCL	32.4ab	38.3b	2.29a	2.30
Hd	C	35.8a	55.4a	2.22b	2.32
F-test		*	**	**	ns
Biochar (B)					
NB (control)		19.3b	20.8c	2.37a	2.38
CCB		39.6a	60.0a	2.21b	2.31
RHB		35.1a	44.7b	2.22b	2.22
F-test		**	**	**	ns
(AxB)					
Sai	SL×NB	6.9e	8.2	2.42	2.43
	SL×CCB	39.0abc	51.8	2.21	2.23
	SL×RHB	31.5abcd	35.4	2.27	2.20
La	SCL×NB	23.8d	19.3	2.36	2.39
	SCL×CCB	42.5ab	56.3	2.27	2.23
	SCL×RHB	30.9bcd	39.2	2.23	2.27
Hd	C×NB	27.1d	34.9	2.33	2.32
	C×CCB	37.4abc	71.9	2.14	2.46
	C×RHB	42.9a	59.3	2.18	2.20
Grand Mean		31.3	41.8	2.27	2.30
F-test		*	ns	ns	ns
CV (%)		26.21	17.80	1.97	9.43

Sai = San Sai series, La = Lom Sak series, Hd = Hang Dong series, SL = sandy loam, SCL = sandy clay loam, C = clay, NB = non-biochar, CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$

ผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงอนุภาคของเนื้อดินที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร

จากการวิเคราะห์ผลของถ่านชีวภาพที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอนุภาคของเนื้อดิน ตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) พบว่าดินร่วนปนทรายมีองค์ประกอบของอนุภาคดินทรายสูงที่สุดคือ 71.0% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และดินเหนียวมีองค์ประกอบของอนุภาคของดินทรายน้อยที่สุดคือ 21.9% ($P \leq 0.01$) ส่วนปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการเติมถ่านทั้งสองชนิดทำให้มีองค์ประกอบของอนุภาคดินทรายเพิ่มขึ้นจากตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพ โดยถ่านชีวภาพจากแกลบทำให้มีปริมาณองค์ประกอบของอนุภาคดินทรายสูงที่สุดคือ 47.0% ซึ่งไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 45.9% แต่การไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้มีปริมาณอนุภาคดินทรายน้อยที่สุดคือ 38.0% สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A×B) พบว่าดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบมีอนุภาคดินทรายสูงที่สุดคือ 72.9% มีความแตกต่างในทางสถิติกับทุกตำรับทดลองยกเว้นดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 72.0% ซึ่งดินเหนียวเพียงอย่างมีปริมาณอนุภาคดินทรายน้อยที่สุดคือ 13.7% ขณะที่อนุภาคทรายแป้ง ปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่า ดินร่วนเหนียวปนทรายมีอนุภาคทรายแป้งสูงที่สุดคือ 39.6% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนดินร่วนปนทรายมีปริมาณอนุภาคทรายแป้งน้อยที่สุดคือ 16.2% ส่วนการเติมถ่านชีวภาพ (ปัจจัย B) พบว่าตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีอนุภาคดินทรายแป้งสูงที่สุดคือ 27.5% แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 26.4% สำหรับความสัมพันธ์ชนิดของดินกับการเติมถ่านชีวภาพ พบว่าไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง โดยดินร่วนเหนียวปนทรายมีปริมาณอนุภาคดินทรายแป้งสูงที่สุดคือ 41.5% และดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบมีปริมาณอนุภาคดินทรายแป้งน้อยที่สุดคือ 15.0% อนุภาคดินเหนียว ปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่าดินเหนียวมีอนุภาคดินเหนียวสูงที่สุดคือ 54.2% มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนดินร่วนปนทรายมีปริมาณอนุภาคดินเหนียวน้อยที่สุดคือ 12.8% ($P \leq 0.01$) ส่วนปัจจัย B การเติมถ่านชีวภาพ พบว่าตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้มีอนุภาคดินเหนียวสูงที่สุดคือ 34.5% มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ซึ่งการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบส่งผลให้มีอนุภาคดินเหนียวน้อยที่สุดคือ 27.2% ขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพบว่า ดินเหนียวเพียงอย่างมีปริมาณอนุภาคดินเหนียวสูงที่สุดคือ 62.9% มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบทำให้ดินมีอนุภาคดินเหนียวน้อยที่สุดคือ 12.1% (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงอนุภาคของเนื้อดินที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร

Soil Series		Soil texture (%)									
		Sand			Silt				Clay		
		NB	CCB	RHB	NB	CCB	RHB	Mean	NB	CCB	RHB
Sai	SL	68.2b	72.0a	72.9a	17.6	15.9	15.0	16.2c	14.2e	12.1e	12.1e
La	SCL	32.2d	40.6c	41.2c	41.5	38.3	38.9	39.6a	26.3c	21.1d	19.9d
Hd	C	13.7f	25.2e	26.9e	23.4	24.8	23.5	23.9b	62.9a	50.0b	49.6b
Mean					27.5a	26.4ab	25.8b				
F-test			*			ns				**	

Sai = San Sai series, La = Lom Sak series, Hd = Hang Dong series, SL = sandy loam, SCL = sandy clay loam, C = clay, NB = non-biochar, CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$

ผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงอนุภาคของเนื้อดินที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร

จากการวิเคราะห์ผลของถ่านชีวภาพที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอนุภาคของเนื้อดิน ปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่าดินร่วนปนทรายมีองค์ประกอบของอนุภาคดินทรายสูงที่สุดคือ 70.9% ขณะที่ดินเหนียวมีองค์ประกอบของอนุภาคของดินทรายน้อยสุดคือ 20.6% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติ (P≤0.01) ส่วนการเติมถ่านชีวภาพ (ปัจจัย B) พบว่าการใช้ถ่านทั้งสองชนิดทำให้มีองค์ประกอบของอนุภาคดินทรายเพิ่มขึ้นจากตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพ โดยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบส่งผลให้ปริมาณองค์ประกอบของอนุภาคดินทรายสูงที่สุดคือ 46.3% แต่การไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้มีปริมาณอนุภาคดินทรายน้อยที่สุดคือ 37.0% ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A×B) พบว่าดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบมีอนุภาคดินทรายสูงที่สุดคือ 72.9% แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลองกับตำรับที่ใช้ดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 72.5% ส่วนดินเหนียวที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณอนุภาคดินทรายน้อยที่สุดคือ 11.9% อนุภาคทรายแป้งในส่วนตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) ที่ส่งผลต่ออนุภาคดินทรายแป้ง พบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายมีอนุภาคทรายแป้งสูงที่สุดคือ 40.0% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนดินร่วนปนทรายมีปริมาณอนุภาคทรายแป้งน้อยที่สุดคือ 16.5% ส่วนปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้มีอนุภาคดินทรายแป้งสูงที่สุดคือ 28.4% มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ซึ่งการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 25.4% สำหรับผลของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย

(A×B) ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง พบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายมีปริมาณอนุภาคดินทรายแป้งสูงที่สุดคือ 42.3% และดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบมีอนุภาคดินทรายแป้งน้อยที่สุดคือ 15.0% อนุภาคดินเหนียว พบว่าตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) ดินเหนียวมีอนุภาคดินเหนียวสูงที่สุดคือ 55.0% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนดินร่วนปนทรายมีอนุภาคดินเหนียวน้อยที่สุดคือ 12.6% ($P \leq 0.01$) สำหรับปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้มีอนุภาคดินเหนียวสูงที่สุดคือ 34.6% แต่การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้อนุภาคดินเหนียวน้อยที่สุดคือ 26.6% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A×B) พบว่าดินเหนียวเพียงอย่างมีปริมาณอนุภาคดินเหนียวสูงที่สุดคือ 63.0% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบทำให้ดินมีอนุภาคดินเหนียวน้อยที่สุดคือ 12.10 และ 10.9% (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงอนุภาคของเนื้อดินที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร

Soil Series		Soil texture (%)									
		Sand			Silt				Clay		
		NB	CCB	RHB	NB	CCB	RHB	Mean	NB	CCB	RHB
Sai	SL	67.5b	72.5a	72.9a	17.8	16.6	15.0	16.5c	14.7e	10.9e	12.1e
La	SCL	31.7d	40.1c	42.2c	42.3	39.8	37.9	40.0a	26.0c	20.1d	19.9d
Hd	C	11.9f	26.2e	23.6e	25.1	24.9	23.3	24.4b	63.0a	48.9b	53.1b
Mean					28.4a	27.1ab	25.4b				
F-test			**			ns				**	

Sai = San Sai series, La = Lom Sak series, Hd = Hang Dong series, SL = sandy loam, SCL = sandy clay loam, C = clay, NB = non-biochar, CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; NS = Not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$

ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมีดินหลังการทดลองที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลองที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน ปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายมีค่าความเป็นกรด-ด่างของดินสูงที่สุดคือ 7.58 ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับดินเหนียวคือ 7.55 ($P \leq 0.01$) ขณะที่การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินสูงที่สุดคือ 7.61 แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 7.49 ซึ่งการไม่เติมถ่านชีวภาพมีค่าความเป็นกรด-ด่างของดินน้อยที่สุดคือ 7.43 ในส่วนความสัมพันธ์ของปัจจัย (A×B) พบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินสูงสุดคือ 7.89 แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับดินเหนียวที่ไม่เติมถ่านชีวภาพคือ 7.65 และดินร่วนเหนียวปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยที่สุดคือ 7.26 ส่วนค่าสภาพนำไฟฟ้าในดินพบว่าตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) ดินเหนียวมีค่าสภาพนำไฟฟ้าในดินสูงที่สุดคือ 217 μS cm^{-1} ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับดินร่วนเหนียวปนทรายคือ 212 μS cm^{-1} ดินร่วนปนทรายมีค่าสภาพนำไฟฟ้าน้อยที่สุดคือ 154 μS cm^{-1} ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพบว่าไม่มีความแตกต่างกันในทาสถิติ ซึ่งดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 342 μS cm^{-1} ขณะที่ดินร่วนปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีค่าสภาพนำไฟฟ้าน้อยที่สุดคือ 51 μS cm^{-1} (ตารางที่ 6) ปริมาณอิทรียวัตถุในดินพบว่าตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) ดินเหนียวมีปริมาณอินทรียวัตถุในดินสูงที่สุดคือ 6.98% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างนัยสำคัญยิ่งและดินร่วนปนทรายมีปริมาณอินทรียวัตถุน้อยที่สุดคือ 1.83% ส่วนปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินสูงที่สุดคือ 5.34% แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 4.83% ซึ่งการไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณอินทรียวัตถุในดินน้อยที่สุดคือ 1.58% สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A×B) พบว่าดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินสูงที่สุดคือ 9.07% มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลองยกเว้นดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 9.03% และดินร่วนปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณอินทรียวัตถุน้อยที่สุดคือ 0.36% ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินพบว่าตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) ดินเหนียวมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงที่สุดคือ 26.5 cmol kg^{-1} และดินร่วนปนทรายมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินน้อยที่สุดคือ 5.1 cmol kg^{-1} ขณะที่ปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบทำให้ปริมาณค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงที่สุดคือ 18.0 cmol kg^{-1} แต่ไม่มีความแตกต่างกับการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 17.1% และการไม่เติมถ่านชีวภาพส่งผลให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินน้อยที่สุดคือ 12.4 cmol kg^{-1} ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย พบว่าดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบส่งผลให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงที่สุดที่คือ 32.0 cmol kg^{-1} โดยมีความแตกต่างในทางสถิติระหว่าง

ตำรับทดลองยกเว้นดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 27.7 cmol kg^{-1} และดินร่วนปนทรายเพียงอย่างเดียวมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินมีค่าน้อยที่สุดคือ 3.1 cmol kg^{-1}

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ในส่วนของปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่าดินร่วนปนทรายมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุดคือ 264 mgP kg^{-1} ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติตกับดินร่วนเหนียวปนทรายคือ 242 mgP kg^{-1} และดินเหนียวมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินน้อยที่สุดคือ 170 mgP kg^{-1} ขณะที่การเติมถ่านชีวภาพ (ปัจจัย B) ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุดคือ 303 mgP kg^{-1} ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 300 mgP kg^{-1} ซึ่งการไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินน้อยที่สุดคือ 12.4 mgP kg^{-1} ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพบว่าดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุดคือ 405 mgP kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ซึ่งดินเหนียวที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินน้อยที่สุดคือ 31 mgP kg^{-1} ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) พบว่าในดินร่วนเหนียวปนทรายมีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 543 mgK kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ซึ่งดินร่วนปนทรายมีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินน้อยที่สุดคือ 196 mgK kg^{-1} ส่วนปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 659 mgK kg^{-1} และพบว่าการไม่เติมทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินน้อยที่สุดคือ 182 mgK kg^{-1} ($P \leq 0.01$) สำหรับผลความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 924 mgK kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และดินร่วนปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินน้อยที่สุดคือ 57 mgK kg^{-1} (ตารางที่ 6)

ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) พบว่าดินเหนียวมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 10,185 mgCa kg^{-1} ขณะที่ดินร่วนปนทรายมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินต่ำที่สุดคือ 5,202 mgCa kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 8,317 mgCa kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติยกเว้นการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 7,411 mgCa kg^{-1} ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (ปัจจัย A×B) ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติ พบว่าดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 11,713 mgCa kg^{-1} และดินร่วนเหนียวปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินน้อยที่สุดคือ 3,241 mgCa kg^{-1} ปริมาณแมกนีเซียมที่

แลกเปลี่ยนได้ในดิน ปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่าดินเหนียวมีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 1,817 mgMg kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ขณะที่ดินร่วนเหนียวปนทรายมีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินน้อยที่สุดคือ 839 mgMg kg^{-1} ส่วนปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) การเติมถ่านชีวภาพจากแกลบส่งผลให้มีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 1,516 mgMg kg^{-1} แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 1,442 mgMg kg^{-1} และการไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณแมกนีเซียมในดินน้อยที่สุดคือ 575 mgMg kg^{-1} ขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A×B) พบว่าดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดส่งผลให้ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 2,527 mgMg kg^{-1} และดินร่วนปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณแมกนีเซียมในดินน้อยที่สุดคือ 319 mgMg kg^{-1} แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง (ตารางที่ 7)

ปริมาณธาตุอาหารเสริมที่สกัดได้ในดิน ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดิน ตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) พบว่าดินเหนียวมีปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 3.77 mgCu kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และพบว่าดินร่วนปนทรายมีปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 0.53 mgCu kg^{-1} ส่วนปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติ โดยพบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้มีปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 2.08 mgCu kg^{-1} แต่การเติมถ่านชีวภาพจากแกลบส่งผลให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 2.02 mgCu kg^{-1} ขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A×B) พบว่าดินเหนียวที่ไม่เติมถ่านชีวภาพส่งผลให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 4.18 mgCu kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลองอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ขณะที่ดินร่วนปนทรายเพียงอย่างเดียวมีปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินมีค่าน้อยที่สุดคือ 0.25 mgCu kg^{-1} ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดิน พบว่าปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) ดินร่วนเหนียวปนทรายมีปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 72.0 mgFe kg^{-1} ส่วนดินร่วนปนทรายมีปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินน้อยสุดคือ 29.6 mgFe kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง สำหรับการเติมถ่านชีวภาพ (ปัจจัย B) พบว่าการไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 61.0 mgFe kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ซึ่งการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบทำให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินมีค่าน้อยที่สุดคือ 45.9 mgFe kg^{-1} ขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพบว่า ดินร่วนเหนียวปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพส่งผลให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 78.4 mgFe kg^{-1} ซึ่งไม่มีความแตกต่างมนทางสถิติกับดินเหนียวเพียงอย่างเดียวคือ 72.3 mgFe kg^{-1} และดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 25.1 mgFe kg^{-1} ($P \leq 0.01$) ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดิน ตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) พบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายมีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 49.9 mgMn kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งแต่ดินร่วนปนทราย

มีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 19.3 mgMn kg^{-1} ส่วนปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 40.4 mgMn kg^{-1} ซึ่งไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 39.0 mgMn kg^{-1} และการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบส่งผลให้มีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 36.8 mgMn kg^{-1} ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย A และ B พบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 52.8 mgMn kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติยกเว้นตำรับของดินร่วนเหนียวปนทรายและดินเหนียวที่ไม่เติมถ่านชีวภาพคือ 50.9 และ 50.8 mgMn kg^{-1} ตามลำดับ ขณะที่ดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดพบปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 17.9 mgMn kg^{-1} ($P \leq 0.01$) ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดิน ในส่วนปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่าดินเหนียวทำให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 19.6 mgZn kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ซึ่งดินร่วนปนทรายมีปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 3.9 mgZn kg^{-1} สำหรับปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 18.2 mgZn kg^{-1} และการไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 1.5 mgZn kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ผลความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัยพบว่าดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 28.7 mgZn kg^{-1} ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลองกับดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 28.3 mgZn kg^{-1} และพบว่าดินร่วนปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 0.3 mgZn kg^{-1} (ตารางที่ 7)

ตารางที่ 6 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมี และปริมาณธาตุอาหารหลักของดินหลังการทดลองที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร

Treatment		$pH_{(1:2.5)}$	EC ($\mu S\ cm^{-1}$)	OM (%)	CEC ($cmol\ kg^{-1}$)	P	K
						(----mg kg^{-1}----)	
Soil Series (A)							
Sai	SL	7.41b	154b	1.83c	5.1c	264a	196c
La	SCL	7.58a	212a	2.92b	15.9b	242a	543a
Hd	C	7.55ab	217a	6.98a	26.5a	170b	442b
F-test		**	*	**	**	**	**
Biochar (B)							
NB (control)		7.43b	111c	1.58b	12.4b	74b	182c
CCB		7.61a	284a	5.34a	17.1a	303a	659a
RHB		7.49ab	188b	4.83a	18.0a	300a	340b
F-test		**	**	**	**	**	**
(AxB)							
Sai	SL×NB	7.38cd	51	0.36e	3.1d	33f	57f
	SL×CCB	7.47bcd	218	2.82bcd	6.1d	405a	320cde
	SL×RHB	7.37cd	194	2.31cd	6.1d	354ab	209e
La	SCL×NB	7.26d	151	1.51de	14.2c	157e	267de
	SCL×CCB	7.89a	291	4.13b	17.5bc	296bc	924a
	SCL×RHB	7.59bc	194	3.12bc	15.9bc	274cd	438c
Hd	C×NB	7.65ab	131	2.85bcd	19.8b	31f	220e
	C×CCB	7.49bcd	342	9.07a	27.7a	258cd	732b
	C×RHB	7.51bcd	177	9.03a	32.0a	221d	373cd
Grand Mean		7.51	194	3.91	15.8	225	394
F-test		**	ns	**	**	**	**
CV (%)		1.77	31.94	18.91	14.82	13.39	16.14

Sai = San Sai series, La = Lom Sak series, Hd = Hang Dong series, SL = sandy loam, SCL = sandy clay loam, C = clay, NB = non-biochar, CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * P ≤ 0.05, ** P ≤ 0.01

ตารางที่ 7 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมของดินหลังการทดลองที่ระดับความลึก 0-15 เซนติเมตร

Treatment		Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
		(----------------------------		mg kg^{-1}			----------------------------)
Soil Series (A)							
Sai	SL	5,202b	876b	0.53c	29.6c	19.3c	3.9c
La	SCL	5,399b	839b	1.85b	72.0a	49.9a	11.8b
Hd	C	10,185a	1,817a	3.77a	55.9b	46.9b	19.6a
F-test		**	**	**	**	**	**
Biochar (B)							
NB (control)		5,058b	575b	2.06	61.0a	40.4a	1.5c
CCB		8,317a	1,442a	2.08	50.7b	39.0ab	18.2a
RHB		7,411a	1,516a	2.02	45.9b	36.8b	15.5b
F-test		*	**	ns	**	**	**
(AxB)							
Sai	SL×NB	3,341	319	0.25f	32.2d	19.4c	0.3e
	SL×CCB	6,831	847	0.62e	25.1d	17.9c	5.6d
	SL×RHB	5,433	1,464	0.73e	31.5d	20.7c	5.7d
La	SCL×NB	3,241	481	1.75d	78.4a	50.9a	2.8de
	SCL×CCB	6,409	952	2.03c	77.1a	52.8a	20.4b
	SCL×RHB	6,547	1,084	1.78cd	60.5b	45.8b	12.3c
Hd	C×NB	8,592	924	4.18a	72.3a	50.8a	1.6de
	C×CCB	11,713	2,527	3.59b	49.8c	46.2b	28.7a
	C×RHB	10,252	1,999	3.54b	45.7c	43.9b	28.3a
Grand Mean		6,929	1,177	2.05	52.5	38.7	11.7
F-test		ns	ns	**	**	**	**
CV (%)		39.92	39.89	6.90	9.49	5.45	20.50

Sai = San Sai series, La = Lom Sak series, Hd = Hang Dong series, SL = sandy loam, SCL = sandy clay loam, C = clay, NB = non-biochar, CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * P ≤ 0.05, ** P ≤ 0.01

ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมีดินหลังการทดลองที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลองที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน ตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติ ซึ่งดินร่วนเหนียวปนทรายส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินสูงที่สุดคือ 7.65 ส่วนดินร่วนปนทรายทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินน้อยที่สุดคือ 7.57 สำหรับปัจจัย B พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินสูงที่สุดคือ 7.61 แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 7.85 และการไม่เติมถ่านชีวภาพมีค่าความเป็นกรด-ด่างของดินน้อยที่สุดคือ 7.38 ในส่วนผลของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A×B) พบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินสูงที่สุดคือ 8.12 แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 7.84 ซึ่งดินร่วนเหนียวปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยที่สุดคือ 7.16 ค่าสภาพนำไฟฟ้าในดิน ในส่วนของปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายมีค่าสภาพนำไฟฟ้าในดินสูงที่สุดคือ 272 $\mu S\ cm^{-1}$ ซึ่งไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลองกับดินเหนียวคือ 229 $\mu S\ cm^{-1}$ โดยดินร่วนปนทรายมีค่าสภาพนำไฟฟ้าน้อยที่สุดคือ 182 $\mu S\ cm^{-1}$ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพบว่าไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 228 $\mu S\ cm^{-1}$ ซึ่งดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 383 $\mu S\ cm^{-1}$ ขณะที่ดินร่วนปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีค่าสภาพนำไฟฟ้าน้อยที่สุดคือ 41 $\mu S\ cm^{-1}$ (ตารางที่ 8) ปริมาณอิทรียวัตถุในดินพบว่าตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) ดินเหนียวมีปริมาณอินทรียวัตถุในดินสูงที่สุดคือ 6.01% และดินร่วนปนทรายมีปริมาณอินทรียวัตถุน้อยที่สุดคือ 1.95% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างนัยสำคัญยิ่ง ส่วนการเติมถ่านชีวภาพ (ปัจจัย B) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินสูงสุดคือ 5.14% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ซึ่งตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณอินทรียวัตถุในดินน้อยที่สุดคือ 1.53% สำหรับผลของความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัย (A×B) พบว่าดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินสูงที่สุดคือ 8.10% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลองยกเว้นดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 7.16% และดินร่วนปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณอินทรียวัตถุน้อยที่สุดคือ 0.33% ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินพบว่าในส่วนตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) ดินเหนียวส่งผลให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงที่สุดคือ 29.5 $cmol\ kg^{-1}$ และดินร่วนปนทรายมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินน้อยที่สุดคือ 5.7 $cmol\ kg^{-1}$ ขณะที่การเติมถ่านชีวภาพ (ปัจจัย B) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบส่งผลให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 19.4 $cmol\ kg^{-1}$ แต่ไม่มีความแตกต่างกับการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดที่มีค่าคือ 19.1% ซึ่งการไม่เติมถ่านชีวภาพส่งผลให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินน้อยที่สุดคือ 13.0 $cmol\ kg^{-1}$

ความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัย (A×B) พบว่าดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบส่งผลให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงที่สุดที่คือ 35.2 cmol kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างทุกตำรับทดลองยกเว้นดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 30.6 cmol kg^{-1} ส่วนดินร่วนปนทรายเพียงอย่างเดียวทำให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินน้อยที่สุดคือ 2.9 cmol kg^{-1}

ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่าในดินร่วนปนทรายมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุดคือ 490 mgP kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และดินเหนียวมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินน้อยที่สุดคือ 194 mgP kg^{-1} ในส่วนการเติมถ่านชีวภาพ (ปัจจัย B) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุดคือ 432 mgP kg^{-1} ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 426 mgP kg^{-1} ขณะที่การไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินน้อยที่สุดคือ 72 mgP kg^{-1} ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A×B) พบว่า ดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุดคือ 737 mgP kg^{-1} แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 698 mgP kg^{-1} ซึ่งดินเหนียวที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินน้อยที่สุดคือ 26 mgP kg^{-1} (ตารางที่ 8) ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ตัวแทนของชุดดินพบว่าในดินร่วนเหนียวปนทรายมีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 643 mgK kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนดินร่วนปนทรายมีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินน้อยที่สุดคือ 196 mgK kg^{-1} ขณะที่ปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 818 mgK kg^{-1} และการไม่เติมถ่านชีวภาพพบปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินน้อยที่สุดคือ 182 mgK kg^{-1} ($P \leq 0.01$) สำหรับผลของความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยพบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 1,152 mgK kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลองอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนดินร่วนปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินน้อยที่สุดคือ 50 mg kg^{-1}

ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ในส่วนของปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่าดินเหนียวมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 12,227 mgCa kg^{-1} ส่วนดินร่วนเหนียวปนทรายมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินต่ำที่สุดคือ 5,112 mgCa kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ขณะที่ปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 11,017 mgCa kg^{-1} ซึ่งมีความ

แตกต่างในทางสถิติยกเว้นการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 8,243 mgCa kg^{-1} ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A×B) ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 8,292 mgCa kg^{-1} พบว่าดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 11,571 mgCa kg^{-1} ซึ่งดินร่วนเหนียวปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินน้อยที่สุดคือ 2,666 mgCa kg^{-1} ($P \leq 0.01$) ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ในส่วนตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) พบว่าดินเหนียวมีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 2,018 mgMg kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนดินร่วนเหนียวปนทรายมีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินน้อยที่สุดคือ 816 mgMg kg^{-1} ขณะที่ปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบส่งผลให้มีปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 1,667 mgMg kg^{-1} แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 1,397 mgMg kg^{-1} และการไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณแมกนีเซียมในดินน้อยที่สุดคือ 604 mgMg kg^{-1} ขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัย (A×B) พบว่าดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบส่งผลให้ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 2,794 mgMg kg^{-1} แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลองกับดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 2,347 mgMg kg^{-1} และดินร่วนเหนียวปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณแมกนีเซียมในดินน้อยที่สุดคือ 448 mgMg kg^{-1} (ตารางที่ 9)

ปริมาณธาตุอาหารเสริมที่สกัดได้ในดิน ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดิน ปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่าดินเหนียวมีปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 3.97 mgCu kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และดินร่วนปนทรายมีปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 0.61 mgCu kg^{-1} ส่วนปัจจัย B (การเติมถ่านชีวภาพ) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้มีปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 2.35 mgCu kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ แต่การเติมถ่านชีวภาพจากแกลบส่งผลให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 2.07 mgCu kg^{-1} สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A×B) พบว่าดินเหนียวที่ไม่เติมถ่านชีวภาพส่งผลให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 4.16 mgCu kg^{-1} แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 4.09 mgCu kg^{-1} ขณะที่ดินร่วนปนทรายเพียงอย่างเดียวมีปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินมีค่าน้อยที่สุดคือ 0.24 mgCu kg^{-1} ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินตัวแทนของชุดดิน (ปัจจัย A) พบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายมีปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 77.1 mgFe kg^{-1} แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับดินเหนียวที่มีปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินคือ 61.1 mgFe kg^{-1} ส่วนดินร่วนปนทรายมีปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินน้อยสุดคือ 41.1 mgFe kg^{-1} สำหรับการเติมถ่านชีวภาพ (ปัจจัย B) พบว่าไม่มีความแตกต่างในทางสถิติ โดยตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 65.7 mgFe kg^{-1} และการเติมถ่าน

ชีวภาพจากแกลบทำให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินมีค่าน้อยที่สุดคือ 49.1 mgFe kg^{-1} ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัย มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 59.8 mgFe kg^{-1} พบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 95.9 mgFe kg^{-1} และดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 33.4 mgFe kg^{-1} แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติ ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดิน ปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายมีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 52.4 mgMn kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนดินร่วนปนทรายมีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 21.9 mgMn kg^{-1} ส่วนการเติมถ่านชีวภาพ (ปัจจัย B) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 42.5 mgMn kg^{-1} ซึ่งไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับตำรับที่ไม่มีเติมถ่านชีวภาพคือ 40.9 mgMn kg^{-1} และการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบส่งผลให้มีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าน้อยที่สุดคือ 38.0 mgMn kg^{-1} ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (A×B) พบว่าดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 57.9 mgMn kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนดินร่วนเหนียวปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 19.8 mgZn kg^{-1} ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินในส่วนปัจจัย A (ตัวแทนของชุดดิน) พบว่าดินเหนียวมีปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 17.3 mgZn kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนดินร่วนปนทรายมีปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 3.5 mgZn kg^{-1} ขณะที่การเติมถ่านชีวภาพ (ปัจจัย B) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 17.1 mgZn kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งและการไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 1.4 mgZn kg^{-1} และผลความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัย (A×B) พบว่าดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบทำให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 25.6 mgZn kg^{-1} แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลองกับดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 25.1 mg kg^{-1} ซึ่งดินร่วนปนทรายที่ไม่เติมถ่านชีวภาพส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 0.2 mgZn kg^{-1} (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 8 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมี และปริมาณธาตุอาหารหลักของดินหลังการทดลองที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร

Treatment		$pH_{(1:2.5)}$	EC (μS cm^{-1})	OM (%)	CEC (cmol kg^{-1})	P	K
						(----mg kg^{-1}----)	
Soil Series (A)							
Sai	SL	7.57	182b	1.95c	5.7c	490a	268c
La	SCL	7.65	272a	3.18b	15.3b	256b	643a
Hd	C	7.58	229ab	6.01a	29.5a	194b	501b
F-test		ns	**	**	**	**	**
Biochar (B)							
NB (control)		7.38c	122c	1.53c	13.0b	72b	182c
CCB		7.85a	346a	5.14a	19.1a	426a	818a
RHB		7.58b	215b	4.46b	19.4a	432a	413b
F-test		**	**	**	**	**	**
(AxB)							
Sai	SL×NB	7.36de	41	0.33f	2.9d	35c	50e
	SL×CCB	7.84ab	319	2.97cd	7.2d	698a	458c
	SL×RHB	7.49cd	186	2.54de	7.1d	737a	296d
La	SCL×NB	7.16e	193	1.49e	13.6c	154bc	271d
	SCL×CCB	8.12a	383	4.36b	16.4c	286b	1,152a
	SCL×RHB	7.68bc	239	3.69bc	16.0c	297b	507c
Hd	C×NB	7.60bcd	133	2.76cd	22.6b	26c	223d
	C×CCB	7.58bcd	335	8.10a	30.6a	295b	844b
	C×RHB	7.56bcd	219	7.16a	35.2a	261bc	437c
Grand Mean		7.60	228	3.71	16.8	310	471
F-test		**	ns	**	*	**	**
CV (%)		1.92	19.15	15.61	18.75	39.24	11.28

Sai = San Sai series, La = Lom Sak series, Hd = Hang Dong series, SL = sandy loam, SCL = sandy clay loam, C = clay, NB = non-biochar, CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * P ≤ 0.05, ** P ≤ 0.01

ตารางที่ 9 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมของดินหลังการทดลอง ที่ระดับความลึก 15-30 เซนติเมตร

Treatment		Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
		(-------------------------------		mg kg^{-1}			-----------------------------)
Soil Series (A)							
Sai	SL	7,537b	832b	0.61c	41.1b	21.9c	3.5c
La	SCL	5,112b	816b	1.96b	77.1a	52.4a	11.3b
Hd	C	12,227a	2,018a	3.97a	61.1ab	47.1b	17.3a
F-test		**	**	**	**	**	**
Biochar (B)							
NB (control)		5,616b	604b	2.07b	65.7	40.9ab	1.4c
CCB		11,017a	1,397a	2.35a	64.5	42.5a	17.1a
RHB		8,243ab	1,667a	2.12b	49.1	38.0b	13.6b
F-test		**	**	*	ns	*	**
(AxB)							
Sai	SL×NB	5,648	449c	0.24e	49.7	24.0d	0.2e
	SL×CCB	11,571	914bc	0.77d	33.4	19.8d	5.0d
	SL×RHB	5,392	1,134b	0.80d	40.2	21.9d	5.3d
La	SCL×NB	2,666	448c	1.80c	95.9	50.0b	2.7de
	SCL×CCB	6,448	930bc	2.18c	75.9	57.9a	21.3b
	SCL×RHB	6,222	1,071b	1.90c	59.4	49.2b	9.8c
Hd	C×NB	8,533	914bc	4.16a	71.5	48.8b	1.3de
	C×CCB	15,033	2,347a	4.09ab	64.2	49.7b	25.1ab
	C×RHB	13,116	2,794a	3.64b	47.7	42.9c	25.6a
Grand Mean		8,292	1,222	2.18	59.8	40.5	10.7
F-test		ns	*	**	ns	*	**
CV (%)		44.91	32.64	11.27	31.97	9.36	19.79

Sai = San Sai series, La = Lom Sak series, Hd = Hang Dong series, SL = sandy loam, SCL = sandy clay loam, C = clay, NB = non-biochar, CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * P ≤ 0.05, ** P ≤ 0.01

การทดลองที่ 2 ผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีดินบางประการในดินร่วนปนทรายภายใต้สภาพการบ่มดิน

การทดลองนี้ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของดินบางประการในดินร่วนปนทราย ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่างของดิน ค่าสภาพนำไฟฟ้า ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียมและกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ร่วมทั้งปริมาณธาตุอาหารเสริมในดิน ได้แก่ ปริมาณเหล็ก แมงกานีส สังกะสีและทองแดงที่สกัดได้ในดินภายใต้สภาพการบ่มดินที่ระยะเวลา 0, 60, 120 และ 180 วัน

สมบัติของดินก่อนการทดลอง

สมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีของดินบางประการก่อนการบ่มดิน

ผลการวิเคราะห์สมบัติฟิสิกส์ของดิน มีปริมาณอนุภาคดินทรายคือ 70.1% ปริมาณของอนุภาคทรายแป้งคือ 17.3% และปริมาณของอนุภาคดินเหนียว 12.6% ดินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีเนื้อดินเป็น ดินร่วนปนทราย (sandy loam)

สมบัติทางเคมีดินบางประการ โดยดินมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.76 ค่าสภาพนำไฟฟ้า 99.6 $\mu S\ cm^{-1}$ ปริมาณอินทรียวัตถุคือ 1.07% ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน 4.90 $cmol\ kg^{-1}$ ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน 10.8 $mg\ kg^{-1}$ ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินคือ 35.2 $mg\ kg^{-1}$ ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมและกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดินคือ 625, 41.4 และ 17.9 $mg\ kg^{-1}$ ส่วนปริมาณธาตุอาหารเสริมในดิน มีปริมาณทองแดง เหล็ก แมงกานีสและสังกะสีที่สกัดได้ในดินคือ 1.08, 591, 2.60 และ 1.40 $mg\ kg^{-1}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 สมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีของดินบางประการก่อนการทดลองในการทดลองที่ 2

Property	Soil Sample
Sand (%)	70.1
Silt (%)	17.3
Clay (%)	12.6
Texture	Sandy loam
$pH_{(1:2.5)}$	6.76
$EC_{(1:5)}$ (µS cm^{-1})	99.6
OC (%)	0.62
OM (%)	1.07
CEC (cmol kg^{-1})	4.90
Avail. P (mg kg^{-1})	10.8
Exch. K (mg kg^{-1})	35.2
Exch. Ca (mg kg^{-1})	625
Exch. Mg (mg kg^{-1})	41.4
Exch. S (mg kg^{-1})	17.9
Exch. Cu (mg kg^{-1})	1.08
Exch. Fe (mg kg^{-1})	591
Exch. Mn (mg kg^{-1})	2.60
Exch. Zn (mg kg^{-1})	1.40

Avail = Available, Exch = Exchangeable

สมบัติทางเคมีบางประการของถ่านชีวภาพก่อนการทดลอง

สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ มีค่าความเป็นกรด-ด่างคือ 10.73 และ 7.59 ค่าสภาพนำไฟฟ้าคือ 1,650 และ 493 µS cm^{-1} ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ 6.10 และ 4.10% มีปริมาณอินทรียวัตถุ 10.6 และ 7.0% มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนคือ 48.0 และ 45.5 cmol kg^{-1} ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 0.91 และ 0.66 g kg^{-1} ปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ 3.94 และ 1.40 g kg^{-1} ปริมาณแคลเซียมที่เป็นประโยชน์ 1.80 และ 1.20 g kg^{-1} ปริมาณแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ คือ 0.71 และ 0.75 g kg^{-1} ส่วนปริมาณเหล็ก แมงกานีสและ

สังกะสีที่ละลายได้ในน้ำของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดคือ 12.4, 0.79 และ 42.1 mg kg^{-1} และในถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 8.30, 23.1 และ 17.3 mg kg^{-1} ตามลำดับ (ตารางที่ 11)

ตารางที่ 11 สมบัติทางเคมีบางประการของถ่านชีวภาพก่อนการทดลองในการทดลองที่ 2

Property	Corncob Biochar	Rice husk Biochar
$pH_{(1:5)}$	10.73	7.59
$EC_{(1:5)}$ (µS cm^{-1})	1,650	493
OC (%)	6.10	4.10
OM (%)	10.6	7.0
CEC (cmol kg^{-1})	48.0	45.5
Avail. P (g kg^{-1})	0.91	0.66
Avail. K (g kg^{-1})	3.94	1.40
Avail. Ca (g kg^{-1})	1.80	1.20
Avail. Mg (g kg^{-1})	0.71	0.75
WS. Cu (g kg^{-1})	ND	ND
WS. Fe (mg kg^{-1})	12.4	8.30
WS. Mn (mg kg^{-1})	0.80	23.1
WS. Zn (mg kg^{-1})	42.1	17.3

Avail = Available, WS = Water Soluble element, ND = Not determined

ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมีดินบางประการหลังการบ่มดินที่ระยะ 0 วัน

สมบัติทางเคมีดินบางประการหลังการบ่มดินที่ระยะ 0 วัน ในส่วนของชนิดถ่านชีวภาพพบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดส่งผลให้ความเป็นกรด-ด่าง ค่าสภาพนำไฟฟ้า ปริมาณอินทรียวัตถุ ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงกว่าถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 7.16, 180 µS cm^{-1}, 1.68%, 6.53 cmol kg^{-1} และ 258 mg kg^{-1} ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติ ขณะที่ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ปริมาณแมงกานีสและสังกะสีที่สกัดได้พบว่าถ่านชีวภาพจากแกลบมีค่าสูงที่สุดคือ 502, 4.15 และ 7.54 mg kg^{-1} (ตารางที่ 12)

สำหรับการพิจารณาการใช้ถ่านชีวภาพในการทดลองครั้งนี้ พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 2.5% w/w ทำให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าสภาพนำไฟฟ้า ปริมาณอินทรียวัตถุ

ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียม ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมและกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ และปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีความแตกต่างกันในทางสถิติทางมีนัยสำคัญยิ่ง

ผลของปัจจัยชนิดและอัตราของถ่านชีวภาพ พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าสภาพนำไฟฟ้าของดินมีค่าสูงที่สุดคือ 7.62 และ 239 µS cm^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ปริมาณอินทรียวัตถุในดินไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง ส่วนค่าความจุลแกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน พบว่าถ่านชีวภาพจากแกลบทำให้ดินมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงที่สุด โดยอัตรา 5.0% w/w มีค่าคือ 7.28 cmol kg^{-1} ($P \leq 0.01$) การใช้ถ่านชีวภาพทั้งสองชนิด อัตรา 2.5 และ 5.0% w/w ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าเพิ่มจากตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพ แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 5.0% w/w ทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงสุดที่ระยะการบ่มดิน 0 วัน คือ 423 mgK kg^{-1} (ตารางที่ 12) ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน มีความแตกต่างในสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง โดยการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ดินมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 580 mgCa kg^{-1} ส่วนปริมาณแมกนีเซียมกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ปริมาณทองแดงและเหล็กที่สกัดได้ในดิน ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง (ตารางที่ 13) ส่วนปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ทำให้มีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 5.98 mgMn kg^{-1} และพบว่าถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 19.8 mgZn kg^{-1} ($P \leq 0.01$)

ตารางที่ 12 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมี และปริมาณธาตุอาหารหลักหลังการบ่มดินที่ระยะ 0 วัน

Treatment	$pH_{(1:2.5)}$	EC (µS cm^{-1})	OM (%)	CEC (cmol kg^{-1})	P	K
					(----mg kg^{-1}----)	
Biochar						
CCB	7.16a	180a	1.69a	6.53b	19.1	258a
RHB	6.82b	126b	1.58b	5.88a	18.2	134b
F-test	*	**	*	**	ns	**
Application rate						
0%	6.68c	115c	1.53b	5.62c	10.8c	31c
2.5%	7.03b	155b	1.59b	6.28b	16.9b	226b
5.0%	7.28a	189a	1.78a	6.72a	28.3a	332a
F-test	**	**	**	**	**	**
Biochar×Application rate						
CCB 0%	6.68cd	115d	1.53	5.62d	10.8	31e
CCB 2.5%	7.20b	185b	1.68	5.86cd	17.3	320b
CCB 5.0%	7.62a	239a	1.86	6.15c	29.3	423a
RHB 0%	6.68d	115d	1.53	5.62d	10.8	31e
RHB 2.5%	6.87bc	124c	1.50	6.69b	16.5	132d
RHB 5.0%	6.93bc	139c	1.71	7.28a	27.3	240c
Grand Mean	6.99	153	1.63	6.20	18.6	196
F-test	**	**	ns	**	ns	**
CV (%)	1.17	6.18	5.31	3.90	12.29	11.96

CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * $P \le 0.05$, ** $P \le 0.01$

ตารางที่ 13 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมหลังการบ่มดินที่ระยะ 0 วัน

Treatment	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	(---------------------------------mg kg^{-1}--------------------------------)						
Biochar							
CCB	475b	36.3	12.2	0.85	104	3.64b	5.07b
RHB	502a	36.2	13.0	0.83	99	4.15a	7.54a
F-test	**	NS	NS	NS	NS	**	*
Application rate							
0%	411c	34.3b	10.5b	0.90a	109a	3.30bc	1.33c
2.5%	491b	36.9a	13.9a	0.82b	100ab	3.05c	11.84a
5.0%	564a	37.5a	13.5a	0.80b	95b	5.34a	5.75b
F-test	**	*	**	*	**	**	**
Biochar×Application rate							
CCB 0%	411e	34.3	10.5	0.90	109	3.30c	1.33d
CCB 2.5%	466d	36.8	11.9	0.83	99	2.93d	3.7c
CCB 5.0%	548b	37.8	14.3	0.83	103	4.70b	10.2b
RHB 0%	411e	34.3	10.5	0.90	109	3.30cd	1.33d
RHB 2.5%	516c	37.0	13.5	0.80	91	3.18cd	7.8b
RHB 5.0%	580a	37.3	15.0	0.78	97	5.98a	19.8a
Grand Mean	489	36.2	12.6	0.84	101	3.90	6.30
F-test	*	ns	ns	ns	ns	**	**
CV (%)	3.39	5.16	11. 94	8.67	7.13	3.94	13.99

CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * $P \le 0.05$, ** $P \le 0.01$

ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมีดินบางประการหลังการบ่มดินที่ระยะ 60 วัน

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีดินหลังการบ่มดินที่ 60 วัน พบว่าถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน ค่าสภาพนำไฟฟ้าในดิน ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงกว่าถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 7.32, 215 µS cm^{-1} และ 299 mg kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ขณะที่ปริมาณแมกนีเซียม กำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ปริมาณแมงกานีสและสังกะสีสกัดได้ในดิน การใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบส่งผลมีค่าสูงที่สุดคือ 37.9, 23.1, 3.21 และ 10.24 ตามลำดับ ($P\leq0.01$)

ส่วนการใช้ถ่านชีวภาพในการทดลองครั้งนี้ พบว่าการไม่เติมถ่านชีวภาพ (0% w/w) ส่งผลให้ปริมาณทองแดงและเหล็กที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 1.02 และ 143 mg kg^{-1} ซึ่งมีค่าแตกต่างในทางสถิติอย่ามีนัยสำคัญยิ่ง การใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 2.5% w/w ทำให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 15.70 mg kg^{-1} ถ่านชีวภาพ อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าสภาพนำไฟฟ้าของดิน ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินและปริมาณธาตุอาหารรอง ได้แก่ ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน และปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (ตารางที่ 14)

สำหรับผลของปัจจัยชนิดและอัตราของถ่านชีวภาพ พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดอัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าสภาพนำไฟฟ้าของดินมีค่าสูงที่สุดคือ 8.40 และ 257 µS cm^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งระหว่างตำรับทดลอง ปริมาณอินทรียวัตถุในดินไม่มีความแตกต่างในทางสถิติโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.60% ตำรับที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด 5.0% w/w ทำให้มีปริมาณอินทรียวัตถุในดินสูงที่สุดคือ 1.84% และพบว่าตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณอินทรียวัตถุในดินน้อยที่สุดคือ 1.45% ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5.46 cmol kg^{-1} พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 5.0% w/w ทำให้มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงที่สุดคือ 5.83 cmol kg^{-1} ($P\leq0.01$) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน พบว่าตำรับที่มีการเติมถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้นจากตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 24.0 mgP kg^{-1} การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 5.0% w/w มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุดคือ 36.0 mgP kg^{-1} ขณะที่ตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินน้อยที่สุดคือ 13.5 mgP kg^{-1} โดยทุกตำรับทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ส่วนปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดอัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 467 mgK kg^{-1} และตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าน้อยที่สุดคือ 33

mgK kg^{-1} ($P \leq 0.01$) ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ทำให้ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 613 mgCa kg^{-1} และ 40.8 mgMg kg^{-1} ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง โดยตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินน้อยที่สุดคือ 498 mgCa kg^{-1} และ 33.8 mgMg kg^{-1} ตามลำดับ ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ทำให้มีปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 26.8 mgS kg^{-1} ซึ่งไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับ การเติมถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 2.5% w/w คือ 25.8 mgS kg^{-1} และตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพส่งผลให้มีปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดินน้อยที่สุดคือ 16.6 mgS kg^{-1} ขณะที่ตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพส่งผลให้ปริมาณทองแดงและเหล็กที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 1.03 mgCu kg^{-1} และ 143 mgFe kg^{-1} (ตารางที่ 15) และพบว่าตำรับที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบอัตรา 2.5% w/w มีปริมาณทองแดงและเหล็กที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 0.75 mgCu kg^{-1} และ 76 mgFe kg^{-1} ตามลำดับ โดยทุกตำรับไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดิน พบว่าตำรับที่เติมถ่านชีวภาพจาก อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 6.45 mgMn kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และตำรับที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 1.08 mgMn kg^{-1} ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดิน ตำรับที่เติมถ่านชีวภาพส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินเพิ่มขึ้นจากตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพ ซึ่งการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 5.0% w/w ทำให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 21.65 mgZn kg^{-1} โดยมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง

ตารางที่ 14 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมี และปริมาณธาตุอาหารหลักหลังการบ่มดินที่ระยะ 60 วัน

Treatment	$pH_{(1:2.5)}$	EC (μS cm^{-1})	OM (%)	CEC (cmol kg^{-1})	P (---mg kg^{-1}---)	K
			Biochar			
CCB	7.32a	215a	1.63	5.47	24.0	299a
RHB	6.58b	178b	1.58	5.46	24.0	137b
F-test	**	**	ns	ns	ns	**
			Application rate			
0%	5.87c	189b	1.45b	5.29	13.5c	33c
2.5%	7.28b	182b	1.55b	5.51	23.0b	271b
5.0%	7.70a	218a	1.80a	5.59	35.5a	350a
F-test	**	**	**	ns	**	**
			Biochar×Application rate			
CCB 0%	5.87d	189b	1.45	5.29d	13.5	33e
CCB 2.5%	7.69b	199b	1.58	5.29d	22.5	396b
CCB 5.0%	8.40a	257a	1.84	5.83a	36.0	467a
RHB 0%	5.87d	189b	1.45	5.29d	13.5	33e
RHB 2.5%	6.88c	165b	1.52	5.73b	23.5	146d
RHB 5.0%	6.99c	179b	1.76	5.34c	35.0	233c
Grand Mean	6.95	196	1.60	5.46	24.0	218
F-test	**	**	ns	*	ns	**
CV (%)	1.34	9.04	6.15	5.84	5.29	4.32

CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * $P \le 0.05$, ** $P \le 0.01$

ตารางที่ 15 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมหลังการบ่มดินที่ระยะ 60 วัน

Treatment	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	(----------mg kg^{-1}----------)						
Biochar							
CCB	552	35.2b	18.9b	0.90	111	2.35b	5.41b
RHB	555	37.9a	23.1a	0.88	111	3.21a	10.24a
F-test	NS	*	*	ns	ns	*	**
Application rate							
0%	498b	33.8b	16.6b	1.02a	143a	1.80b	1.58c
2.5%	561a	37.4a	23.1a	0.88b	78c	1.23b	15.70a
5.0%	601a	38.5a	23.4a	0.78b	111b	5.31a	6.20b
F-test	**	**	**	**	**	**	**
Biochar×Application rate							
CCB 0%	498	33.8	16.6c	1.03	143	1.80c	1.58d
CCB 2.5%	568	35.5	20.3b	0.80	79	1.08c	7.50b
CCB 5.0%	590	36.3	19.9b	0.88	112	4.18b	21.65a
RHB 0%	498	33.8	16.6c	1.03	143	1.80c	1.58d
RHB 2.5%	554	39.3	25.8a	0.75	76	1.38c	4.90bc
RHB 5.0%	613	40.8	26.8a	0.88	110	6.45a	9.75b
Grand Mean	554	36.5	21.0	0.89	111	2.78	7.82
F-test	ns	ns	*	ns	ns	**	**
CV (%)	6.63	5.92	10.82	9.35	11.19	14.75	12.51

CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$

ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมีดินบางประการหลังการบ่มดินที่ระยะ 120 วัน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินที่บ่มร่วมกับถ่านชีวภาพ ในส่วนชนิดของถ่านชีวภาพ พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินโดยมีค่า 6.75 และ 314 mg kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติอย่ามีนัยสำคัญยิ่ง แต่พบว่าค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ปริมาณแมงกานีสและสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดจากการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบคือ 6.50 cmol kg^{-1}, 23.8, 3.56 และ 9.08 mg kg^{-1} ตามลำดับ (ตารางที่ 16)

ส่วนอัตราการใช้ถ่านชีวภาพในการทดลองครั้งนี้พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 7.23, 1.98%, 7.06 cmol kg^{-1}, 35.9, 375, 586, 41.4 และ 5.69 mg kg^{-1} ตามลำดับ

สำหรับผลของปัจจัยชนิดและอัตราของถ่านชีวภาพ พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดอัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินมีค่าสูงที่สุดคือ 8.03 มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ค่าสภาพนำไฟฟ้าในดินไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 5.0% w/w ทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าในดินสูงที่สุดคือ 312 μS cm^{-1} ปริมาณอินทรียวัตถุในดินไม่มีความแตกต่างในทางสถิติโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.66% ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w มีปริมาณอินทรียวัตถุสูงที่สุดคือ 2.02% และถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 2.5% w/w มีค่าน้อยที่สุดคือ 1.43% (ตารางที่ 16) ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงที่สุดคือ 7.38 cmol kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีค่าความจุลแกเปลี่ยนแคตไอออนในดินน้อยที่สุด คือ 5.76 cmol kg^{-1} ($P \leq 0.01$) ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน พบว่าตำรับที่มีการเติมถ่านชีวภาพทำให้ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้นจากตำรับที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพ โดยการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบ อัตรา 5.0% w/w ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุดคือ 37.5 และ 34.3 mgP kg^{-1} ตามลำดับ ส่วนปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินพบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 5.0% w/w ทำให้มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 483 mgK kg^{-1} มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนตำรับที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพมีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินน้อยที่สุดคือ 32 mgK kg^{-1} สำหรับปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่าตำรับที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบทั้งสองอัตรา ทำให้ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุม แต่ไม่มีความ

แตกต่างทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง (ตารางที่ 17) ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่า การใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 28.2 mgS kg^{-1} ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับตำรับที่ใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 5.0% w/w และถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 2.5% w/w คือ 27.4 และ 24.6 mgS kg^{-1} ตามลำดับ ($P \leq 0.01$) ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินไม่มีความแตกต่างทางสถิติโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.68 mgCu kg^{-1} มีค่าลดลงจากการบ่มถ่านชีวภาพร่วมกับดินที่ระยะ 0 และ 60 วัน ซึ่งตำรับที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 0.78 mgCu kg^{-1} และการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบทั้งสองอัตรา มีปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินน้อยสุดคือ 0.60 mgCu kg^{-1} ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินที่ระยะบ่มดิน 120 วัน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 112 mgFe kg^{-1} มีค่าสูงสุดจากการบ่มดินทุกระยะ ตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 134 mgFe kg^{-1} ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 2.5% w/w มีปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินน้อยสุดคือ 88 mgFe kg^{-1} ขณะที่การใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 6.70 mgMn kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 2.5% w/w ทำให้มีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 1.63 mgMn kg^{-1} ขณะที่การใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 19.60 mgZn kg^{-1} มีความแตกต่างกันทางสถิติระหว่างตำรับทดลองอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ซึ่งตำรับที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพทำให้มีปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าน้อยที่สุดคือ 1.15 mgZn kg^{-1} ($P \leq 0.01$)

ตารางที่ 16 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมี และปริมาณธาตุอาหารหลักหลังการบ่มดินที่ระยะ 120 วัน

Treatment	$pH_{(1:2.5)}$	EC (μS cm^{-1})	OM (%)	CEC (cmol kg^{-1})	P	K
					(---mg kg^{-1}---)	
Biochar						
CCB	6.75a	294	1.62	6.17b	22.5	314a
RHB	6.09b	284	1.71	6.50a	21.2	149b
F-test	**	ns	ns	*	ns	**
Application rate						
0%	5.52c	285	1.48b	5.76c	10.5c	32c
2.5%	6.51b	282	1.52b	6.18b	19.1b	287b
5.0%	7.23a	300	1.98a	7.06a	35.9a	375a
F-test	**	ns	**	**	**	**
Biochar×Application rate						
CCB 0%	5.52c	285	1.48	5.76d	10.5	32e
CCB 2.5%	6.70b	285	1.43	6.01cd	19.5	427b
CCB 5.0%	8.03a	312	1.95	6.74b	37.5	483a
RHB 0%	5.52c	285	1.48	5.76d	10.5	32e
RHB 2.5%	6.33b	279	1.62	6.35bc	18.8	148d
RHB 5.0%	6.42b	289	2.02	7.38a	34.3	268c
Grand Mean	6.42	289	1.66	6.33	21.8	231
F-test	**	ns	ns	**	ns	**
CV (%)	1.99	11.19	9.42	1.99	7.50	5.46

CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$

ตารางที่ 17 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมหลังการบ่มดินที่ระยะ 120 วัน

Treatment	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	(---mg kg^{-1}---)						
Biochar							
CCB	545	37.2	21.8b	0.69	114	2.80b	4.29b
RHB	551	38.7	23.8a	0.66	110	3.56a	9.08a
F-test	ns	ns	*	ns	ns	**	**
Application rate							
0%	507c	34.3c	18.7b	0.78a	134a	2.10b	1.15b
2.5%	552b	38.1b	26.0a	0.61b	90b	1.75b	13.91a
5.0%	586a	41.4a	23.8a	0.64ab	112ab	5.69a	5.00b
F-test	**	**	**	**	**	**	**
Biochar×Application rate							
CCB 0%	507	34.3	18.7b	0.78	134	2.10c	1.15c
CCB 2.5%	550	37.0	19.3b	0.63	92	1.63c	3.50c
CCB 5.0%	578	40.3	27.4a	0.68	115	4.68b	8.23b
RHB 0%	507	34.3	18.7b	0.78	134	2.10c	1.15c
RHB 2.5%	553	39.3	24.6a	0.60	88	1.88c	6.50b
RHB 5.0%	595	42.5	28.2a	0.60	110	6.70a	19.60a
Grand Mean	548	37.9	22.8	0.68	112	3.18	6.69
F-test	ns	ns	**	ns	ns	**	**
CV (%)	2.20	4.33	11.44	13.41	14.29	8.09	17.70

CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$

ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมีดินบางประการหลังการบ่มดินที่ระยะ 180 วัน

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีดินหลังการบ่มดินร่วมกับถ่านชีวภาพที่ระยะ 180 วัน ในส่วนชนิดของถ่านชีวภาพ พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินและปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าคือ 6.84 และ 271 mg kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างกันในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ขณะที่ถ่านชีวภาพจากแกลบ ทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ปริมาณแมงกานีสและสังกะสีที่สกัดได้ในดินคือ 1.55%, 6.87 cmol kg^{-1}, 25.1, 44.9, 2.98 และ 10.66 mg kg^{-1} ตามลำดับ ($P \leq 0.01$)

ขณะที่อัตราการใช้ถ่านชีวภาพในการทดลองครั้งนี้ พบว่าการเติมถ่านชีวภาพ อัตรา 0% w/w (ไม่เติมถ่านชีวภาพ) ทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าในดินและปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 291 µS cm^{-1} และ 1.02 mg kg^{-1} การใช้ถ่านชีวภาพ อัตรา 2.5% w/w ส่งผลให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินและปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินโดยมีค่าคือ 1.55%, 27.1 และ 15.70 mg kg^{-1} ตามลำดับ ส่วนอัตราการใช้ถ่านชีวภาพ 5.0% w/w ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในดิน ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียมและกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ปริมาณเหล็กและแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 7.84, 7.38 cmol kg^{-1}, 357, 595, 50.6, 30.3, 121 และ 4.49 mg kg^{-1} ตามลำดับ (ตารางที่ 18)

สำหรับผลของปัจจัยชนิดและอัตราของถ่านชีวภาพ โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของดินและค่าสภาพนำไฟฟ้าในดินมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.77 และ 280 µS cm^{-1} ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ดินมีค่าความเป็นกรด-ด่างในดินสูงที่สุดคือ 7.84 และ 291 µS cm^{-1} ขณะที่ตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีความเป็นกรด-ด่างของดินน้อยที่สุดคือ 6.09 และ 266 µS cm^{-1} (ตารางที่ 18) ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน การใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 1.67% ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติยกเว้นตำรับที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 2.5% w/w คือ 1.63% ($P \leq 0.01$) และการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 7.74 cmol kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง และพบว่าตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินน้อยที่สุดคือ 5.91 cmol kg^{-1} ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 20.5 mg kg^{-1} ซึ่งมีความแตกต่างกันในทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 5.0% w/w ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 35.0 mgP kg^{-1} ขณะที่ตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินน้อยที่สุดคือ 10.8 mgP kg^{-1} และการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดอัตราสูงที่สุด (5.0% w/w) ทำให้มีปริมาณโพแทสเซียมและ

แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงสุดคือ 408 และ 635 mg kg^{-1} ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันในทางสถิติระหว่างตำรับทดลองอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 558 mg kg^{-1} ตำรับที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุดคือ 52.8 mgMg kg^{-1} พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 2.5% w/w ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าน้อยที่สุดคือ 39.5 mgMg kg^{-1} โดยไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ (ตารางที่ 19) ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 34.2 mgS kg^{-1} ซึ่งไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับตำรับที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดอัตรา 5.0% w/w คือ 32.4 mgS kg^{-1} ($P \leq 0.01$) ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดิน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.90 mgCu kg^{-1} ซึ่งตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้มีปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 1.02 mgCu kg^{-1} ซึ่งตำรับที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดอัตรา 2.5% w/w ส่งผลให้มีปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 0.80 mgCu kg^{-1} โดยทุกตำรับทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดิน ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 99 mgFe kg^{-1} พบว่าตำรับที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดคือ 124 mgFe kg^{-1} ขณะที่การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด อัตรา 2.5% ทำให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 84 mgFe kg^{-1} ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดิน การเติมถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ทำให้มีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 5.38 mgMn kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างตำรับทดลอง และพบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 2.5% w/w ส่งผลให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าน้อยที่สุดคือ 1.22 mgMn kg^{-1} ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.67 mgZn kg^{-1} พบว่าตำรับที่เติมถ่านชีวภาพจากแกลบอัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดคือ 21.05 mgZn kg^{-1} มีความแตกต่างในทางสถิติกับทุกตำรับทดลองโดยตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพ มีปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินน้อยที่สุดคือ 1.60 mgZn kg^{-1} (ตารางที่ 19)

ตารางที่ 18 ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมี และปริมาณธาตุอาหารหลักหลังการบ่มดินที่ระยะ 180 วัน

Treatment	$pH_{(1:2.5)}$	EC ($\mu S\ cm^{-1}$)	OM (%)	CEC ($cmol\ kg^{-1}$)	P	K
					(---mg kg^{-1}---)	
Biochar (main)						
CCB	6.84a	283	1.40b	6.49b	16.0b	271a
RHB	6.70b	276	1.55a	6.87a	25.1a	180b
F-test	*	ns	**	**	**	**
Application rate (sub)						
0%	6.09b	291a	1.34b	5.91c	10.8c	48c
2.5%	6.37b	277ab	1.55a	6.75b.	27.1a	272ba
5.0%	7.84a	270b	1.53a	7.38a	23.8b	357a
F-test	**	*	**	**	**	**
Biochar×Application rate (main×sub)						
CCB 0%	6.09	269	1.34b	5.91d	10.8d	48e
CCB 2.5%	6.58	289	1.42b	6.55c	19.3c	358b
CCB 5.0%	7.84	291	1.43b	7.01b	35.0a	408a
RHB 0%	6.09	266	1.34b	5.91d	10.8d	48e
RHB 2.5%	6.16	272	1.63a	6.96b	18.0c	185d
RHB 5.0%	7.84	291	1.67a	7.74a	29.5b	306c
Grand Mean	6.77	280	1.47	6.68	20.5	226
F-test	ns	ns	**	**	**	**
CV (%)	3.81	4.68	4.83	2.94	5.20	3.37

CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$

ตารางที่ 19 ผลของถ่านชีวภาพต่อปริมาณธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมหลังการบ่มดินที่ระยะ 180 วัน

Treatment	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	(------------------------------------			mg kg^{-1}			------------------------------------)
				Biochar			
CCB	580a	43.4b	27.7	0.90	99	2.47b	5.42b
RHB	535a	44.9a	28.1	0.91	100	2.98a	10.66a
F-test	ns	*	ns	ns	ns	**	*
				Application rate			
0%	537b	42.3b	24.3b	1.02a	89b	2.35b	1.60c
2.5%	542b	39.6b	29.1a	0.83b	89b	1.34c	15.70a
5.0%	595a	50.6a	30.3a	0.86b	121a	4.49a	5.68b
F-test	**	**	**	**	**	**	**
				Biochar×Application rate			
CCB 0%	537b	42.3	24.3b	1.02	89	2.35c	1.60d
CCB 2.5%	570b	39.5	26.4b	0.80	84	1.45d	4.28c
CCB 5.0%	635a	48.5	32.4a	0.88	124	3.60b	10.40b
RHB 0%	537a	42.3	24.3b	1.02	89	2.35c	1.60d
RHB 2.5%	515	39.8	25.8b	0.85	94	1.22d	7.08b
RHB 5.0%	555b	52.8	34.2a	0.85	119	5.38a	21.05a
Grand Mean	558	44.2	27.9	0.90	99	2.73	7.67
F-test	*	ns	**	ns	ns	**	**
CV (%)	4.74	4.71	6.32	5.83	12.25	7.94	22.78

CCB = corncob biochar, RHB = rice husk biochar; ns = not significant.

Mean in the same column followed by different letters were significantly different by LSD test at * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$

วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองที่ 1 เรื่องผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมีดินบางประการภายใต้การชะละลายในดิน

ผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของดินหลังการทดลอง การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบส่งผลให้ความชื้นในดินร่วนปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทรายและดินเหนียวมีค่าเพิ่มขึ้นจากดินที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพในดินทั้ง 2 ระดับความลึก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pühringer (2016) ที่รายงานว่าการเติมถ่านชีวภาพส่งผลให้ความชื้นในดินเพิ่มขึ้นจากตำรับที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพ โดยการเพิ่มขึ้นของความชื้นในดินนั้นมาจากการมีความพรุนที่สูงของถ่านชีวภาพส่งผลให้ปริมาตรช่องว่างในถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจึงสามารถดูดซับและกักเก็บของเหลวไว้ได้ (Brewer et al., 2014) ซึ่งถ่านชีวภาพยังทำให้ความหนาแน่นอนุภาคของดินลดลงจากดินที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพในดินระดับบนและระดับล่าง สอดคล้องกับงานทดลองของ Usowicza et al. (2016) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากไม้ในพื้นที่บริเวณทุ่งหญ้าและพื้นที่รกร้าง พบว่าที่ใช้ถ่านชีวภาพจากไม้ในอัตรา 30 $Mg\ ha^{-1}$ ทำให้ความหนาแน่นอนุภาคของดินในพื้นที่รกร้างมีค่าลดลงจากการเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 10 $Mg\ ha^{-1}$ ถึง 14% นอกจากนี้ Blanco-Canqui (2017) กล่าวว่าการเติมถ่านชีวภาพในดินส่งผลให้ความหนาแน่นอนุภาคของดินลดลงประมาณ 14-64% ซึ่ง Brewer et al. (2009) พบว่าถ่านชีวภาพมีความหนาแน่นของอนุภาคที่ต่ำ คือ 1.54-2.06 $g\ cm^{-3}$ จึงทำให้ความหนาแน่นอนุภาคของดินลดลง ส่วนผลต่อการเปลี่ยนแปลงอนุภาคของเนื้อดิน พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบในดินทั้ง 3 ชนิดทำให้ปริมาณอนุภาคดินเหนียวและอนุภาคทรายแป้งลดลงแต่ส่งผลให้อนุภาคดินทรายมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของอนุภาคดินเกิดจากผลของถ่านชีวภาพที่ทำให้เกิดการกระจายขนาดของอนุภาคดิน (เสาวนีย์ และ ทวีวงศ์, 2564) ขณะเดียวกันถ่านชีวภาพยังทำให้อนุภาคดินจับกลุ่มกันกลายเป็นเม็ดดิน (Brodowski et al., 2006) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอนุภาคดินทราย สมบัติทางเคมีของดินหลังการทดลอง พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบในดินร่วนเหนียวปนทรายมีค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้นจากดินที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพทั้งสองระดับความลึก โดยการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้สูงที่สุดคือ (7.89 ในดินบนและ 8.12 ในดินล่าง) ซึ่งเป็นผลมาจากการมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงของถ่านชีวภาพ (ตารางที่ 2) และสอดคล้องกับ Nigussie et al. (2012) ที่ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมในดินที่ไม่ปนเปื้อนและปนเปื้อนโครเมียม พบว่าการเติมถ่านชีวภาพ

ในดินอัตรา 0, 5 และ 10 t ha^{-1} ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณของถ่านชีวภาพและมีค่าสูงกว่าตำรับควบคุม (ไม่เติมถ่านชีวภาพ) สภาพนำไฟฟ้าในดิน เป็นค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ใช้ในการประเมินปริมาณเกลือที่ละลายอยู่ในน้ำหรือสารละลายดิน ซึ่งจากการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบในดินทั้ง 3 ชนิดส่งผลให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพ พบว่าการเติมถ่านชีวภาพในช่วยยกระดับค่าสภาพนำไฟฟ้าในดินร่วนปนทรายได้ดีที่สุดมีค่าเฉลี่ยในดินระดับบนอยู่ที่ 206 µS cm^{-1} ส่วนดินระดับล่างอยู่ที่ 252 µS cm^{-1} และเป็นไปในทิศทางเดียวกับงาน Chintala et al. (2014) ที่ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมีในดินกรด พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและหญ้า switchgrass ในอัตราที่แตกต่างกันส่งผลให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าของดินเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุมตามปริมาณของถ่านชีวภาพ ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบส่งผลให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินร่วนปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทรายและดินเหนียวเพิ่มขึ้นทั้งสองระดับความลึก ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับ Timilsina et al. (2017) ที่ทำการศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติดินบางประการและผลผลิตของหัวไชเท้าที่ปลูกในดินทรายปนร่วน พบว่าปริมาณอินทรียวัตถุหลังการเก็บเกี่ยวหัวไชเท้าตำรับที่มีการเติมถ่านชีวภาพ 5, 10, 15 และ 20 Mg ha^{-1} มีปริมาณอินทรียวัตถุมากกว่าตำรับควบคุม ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณอินทรียวัตถุในดินมาจากถ่านชีวภาพนั้นมีปริมาณอินทรีย์คาร์บอนสูงและเป็นวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง การใช้ถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียวยังไม่สามารถเพิ่มปริมาณอินทรียวัตถุในดินได้ดีเท่าที่ควรจึงแนะนำให้มีการเติมปุ๋ยอินทรีย์ลงไปด้วย ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดิน ถ่านชีวภาพมีปริมาณค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่สูง (ตารางที่ 2) เป็นผลจากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ (ไพโรไลซิส) ที่ทำให้ถ่านชีวภาพมีโครงสร้างทางเคมีที่มีพื้นที่ผิวสูง และมีความหนาแน่นของประจุลบในปริมาณพื้นที่ผิวสูง จึงทำให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุได้สูง ซึ่งจากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าการเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดยังส่งผลให้มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุม โดยมีค่าเฉลี่ยในดินระดับบนอยู่ที่ 15.8 cmol kg^{-1} และ 16.8 cmol kg^{-1} ในดินระดับล่าง ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน การเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพทั้งสองระดับความลึก และการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบในดินร่วนปนทรายมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุด สอดคล้องกับงานทดลองของ Yusif et al. (2020) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมีดินในดินกรด พบว่าการเติมถ่านชีวภาพอัตรา 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 t ha^{-1} หลังจากเติมถ่านชีวภาพที่ระยะเวลา 9 และ 15 สัปดาห์ ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็น

ประโยชน์ในดินเพิ่มขึ้นตามอัตราการเติมถ่านชีวภาพทั้งสองช่วงเวลา ซึ่งการเพิ่มขึ้นของฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน โดยดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 6-7 จะทำให้การละลายของฟอสเฟตในรูปที่ละลายน้ำได้ดีที่สุด (Busman et al., 2009) ซึ่ง Glaser and Lehr (2019) กล่าวว่าจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ถ่านชีวภาพที่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีดิน พบว่าการเติมถ่านชีวภาพในดินช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในพื้นที่เกษตรกรรมได้สูงถึง 460% ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินพบว่าในดินร่วนปนทรายดินร่วนเหนียวปนทรายและดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุม (ไม่เติมถ่านชีวภาพ) ทั้งสองระดับความลึก โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 419 mg kg^{-1} ในดินบน และ 616 mg kg^{-1} ในดินล่าง ซึ่งสอดคล้องกับ Ghorbani and Amirahmadi (2018) ที่ศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากแกลบต่อสมบัติทางเคมีดินบางประการในดินกรด และการดูดซับธาตุอาหาร พบว่าจากการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบอัตรา 2 และ 4% ทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่ละลายได้ในน้ำ ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราการเติมถ่านชีวภาพและมีค่าสูงกว่าตำรับควบคุม จากการศึกษาของ (สายจิต และ โสรญา, 2558) ที่เติมถ่านชีวภาพจากเปลือกทุเรียน เปลือกกล้วยและเมล็ดแมคคาเดเมีย อัตรา 5% ในแปลงปลูก olive tree พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 12 เดือน ถ่านชีวภาพทั้ง 3 ชนิดทำให้ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในดินเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุม (0.51%) เป็น 0.55, 0.59 และ 0.55% ตามลำดับ ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน การเติมถ่านชีวภาพซังข้าวโพดและแกลบ ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้นจากตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพในดินระดับบน ซึ่งสอดคล้องกับ บรรเจิดลักษณ์ และ รติกร (2559) ที่เติมถ่านชีวภาพในแปลงปลูกข้าวโพดฝักอ่อน อัตรา 0.5, 1, 2 และ 3 t rai^{1} พบว่าการเติมถ่านชีวภาพส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินที่ฤดูปลูก 1 และ 2 มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอัตราของถ่านชีวภาพและมีค่าสูงกว่าแปลงควบคุม (ไม่เติมถ่านชีวภาพ) และ Izilan et al. (2022) ที่เติมถ่านชีวภาพจากทะลายปาล์ม ในอัตรา 0, 5, 10 และ 20 t ha^{-1} มีการผสมกับมูลแพะและปุ๋ยเคมีจำนวน 500 kg ha^{-1} พบว่าการเติมถ่านชีวภาพอัตรา 20 t ha^{-1} ทำให้ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้น 230% และปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้น 119% ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน เนื่องจาก ในถ่านชีวภาพมีองค์ประกอบของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่สูง และคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่มีพื้นที่ผิวสูงจึงช่วยดูดซับธาตุอาหารได้ดี (Amonette and Joseph, 2009; Cheng et al., 2008) แต่ที่ระดับ

ความลึก 15-30 cm การเติมถ่านชีวภาพจากแกลบในดินร่วนปนทรายส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าลดลงจากตำรับควบคุม ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดิน พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบส่งผลให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินร่วนปนทราย และดินร่วนเหนียวปนทรายมีค่าเพิ่มขึ้นจากตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพทั้งสองระดับความลึก เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Khanmohammadi et al. (2017) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพอัตรา 7.3, 14.5 และ 29.0 Mg ha^{-1} ส่งผลให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุมจาก 4.86 เป็น 4.86, 4.96 และ 4.94 mg kg^{-1} ตามลำดับ ขณะที่การเติมถ่านชีวภาพในดินเหนียวกับทำให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินมีค่าลดลงทั้งสองระดับความลึก สอดคล้องกับ Yang et al. (2016) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่และฟางข้าว ที่มีขนาดของอนุภาคถ่านชีวภาพหยาบ (<1 mm) และละเอียด (<0.25 mm) ในอัตรา 1 และ 5% ส่งผลให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินมีค่าลดลง โดยถ่านชีวภาพจากฟางข้าวอัตรา 5% ทำให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินลดลงมีค่าอยู่ที่ 94.8% (หยาบ) และ 97.3% (ละเอียด) ให้เห็นว่าไม่ใช่แค่ปัจจัยของชนิดของถ่านชีวภาพเพียงอย่างเดียวที่แต่ยังมีปัจจัยของขนาดอนุภาคถ่านชีวภาพที่ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณทองแดงในดิน ส่วนปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดิน การเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดในดินร่วนปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทรายและดินเหนียว ทำให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินค่าลดลงจากตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพในดินทั้งสองระดับความลึก ซึ่งสอดคล้องกับ Velli et al. (2021) ที่ศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียต่อการเจริญเติบโต สมบัติทางเคมีของดินและปริมาณโลหะหนักในดินที่ปลูกมะเขือเทศพบว่าสมบัติทางเคมีของดินหลังการเก็บเกี่ยวมะเขือเทศตำรับที่มีการเติมถ่านชีวภาพส่งผลให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินมีค่าน้อยกว่าตำรับควบคุม ขณะที่ศึกษาของ Zeka et al. (2022) พบว่าจากการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและเปลือกถั่วลิสง อัตรา 0, 5, 10 และ 15 t ha^{-1} ทำให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการเติมถ่านชีวภาพและมากกว่าตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพ การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดในดินร่วนปนทรายทำให้มีปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าลดลง แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมถ่านชีวภาพในดินเหนียวทั้งสองระดับความลึก ซึ่งการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบทำให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินร่วนปนทรายมีค่าสูงกว่าตำรับควบคุมในดินระดับบนแต่มีค่าน้อยกว่าตำรับควบคุมในดินระดับล่าง แต่การเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดในดินเหนียวทำให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าน้อยกว่าตำรับควบคุม (ไม่เติมถ่านชีวภาพ)ในดินระดับบน ส่วนในดินระดับล่างการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดในดินเหนียวส่งผลให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมถ่านชีวภาพจากแกลบกลับทำให้มีค่าลดลงจากตำรับควบคุม ใกล้เคียงกับ Alves

et al. (2021) ศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียและชานอ้อยที่ส่งผลต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตของหัวผักกาดหวาน (sugar beet) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสีย อัตรา 5.0% และถ่านชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสียผสมกับถ่านชีวภาพจากชานอ้อยในอัตรา 2.5 และ 5.0% ส่งผลให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวมีค่าลดลง ขณะที่การเติมถ่านชีวภาพผสม อัตรา 7.5 และ 10.0% ทำให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวหัวผักกาดหวานมีค่าเพิ่มจากดินก่อนปลูก ซึ่ง Adamu and Junaidu (2021) พบว่าจากการวิเคราะห์ตัวอย่างดินที่เติมถ่านชีวภาพอัตรา 4 และ 16 t ha^{-1} ร่วมกับการเติมสารละลายธาตุอาหารเสริม อัตรา 0.5 และ 1 L ha^{-1} พบว่าปริมาณแมงกานีสทั้งหมดในดินหลังการเก็บเกี่ยวกระเจี๊ยบเขียวมีปริมาณลดลงจากดินก่อนการทดลอง ซึ่งส่วนหนึ่งอาจจะถูกพืชนำไปใช้ในการเจริญเติบหรือถูกถ่านชีวภาพกักเก็บเอาไว้แล้วค่อย ๆ ปลดปล่อยกลับสู่ดินอย่างช้า ๆ ปริมาณสังกะสีที่แลกเปลี่ยนได้ในดินการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และแกลบส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่แลกเปลี่ยนได้ในดินทั้ง 3 ชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุม (ไม่เติมถ่านชีวภาพ) ทั้งสองระดับความลึก สอดคล้องกับ Rasulia et al. (2021) ที่เติมถ่านชีวภาพจากข้าวสาลี ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 650 °C ลงในดินเนื้อปูน (Calcareous soil) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากดินที่ไม่เติมถ่านชีวภาพ (ควบคุม) ทั้ง 4 ชนิดจาก 0.29, 0.45, 0.33 และ 0.38 mg kg^{-1} เป็น 0.76, 1.12, 0.75 และ 0.96 mg kg^{-1} ตามลำดับ ขณะที่ Namgay et al. (2010) ที่ศึกษาอิทธิพลของถ่านชีวภาพกับดินต่อความเป็นประโยชน์ของ As, Cd, Cu, Pb และ Zn ในข้าวโพด โดยใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 0, 5 และ 15 g kg^{-1} ร่วมกับการเติมธาตุอาหารเสริม (trace element) อัตรา 0, 10 และ 50 mg kg^{-1} พบว่าการเติมถ่านชีวภาพและธาตุอาหารเสริมร่วมกันส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินหลังการเก็บเกี่ยวข้าวโพดมีค่าเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุมตามปริมาณการเติมถ่านชีวภาพ

ส่วนของการชะละลายในดินการเติมถ่านจากแกลบมีแนวโน้มในการชะลอการสูญเสียธาตุอาหารในส่วนของปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมและสังกะสีในดินร่วนปนทราย ส่วนถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดปริมาณช่วยชะลดการสูญเสียปริมาณแมกนีเซียมและสังกะสีในดินเหนียว สอดคล้องกับ Ippolito et al. (2012) พบว่าการเติมถ่านชีวภาพจากหญ้า switchgrass ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ในอุณหภูมิ 250 °C ส่งผลให้การชะละลายของแคลเซียมและแมกนีเซียมในดินมีปริมาณลดลง ซึ่งจากการศึกษา Sun et al. (2017) พบว่าการเติมปุ๋ยยูเรียร่วมกับการเติมถ่านชีวภาพอัตรา 0.5%, 1.0%, 2.0% และ 4.0% ส่งผลให้การชะละลายของไนโตรเจนในรูป NH_4^+, NO_3^- และ total- N มีปริมาณการสูญเสียลดลงตามอัตราของถ่านชีวภาพที่เพิ่มขึ้น และ Ventura et al. (2013) ศึกษาการ

เติมถ่านชีวภาพในดินที่ระยะเวลา 4 เดือน และ 1 ปี พบว่าการเติมถ่านชีวภาพที่ระยะเวลา 1 ปี มีการสูญเสีย NO_3^- น้อยกว่าดินที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลของถ่านชีวภาพที่ส่งผลต่อการช่วยลดการชะละลายของธาตุอาหารในดิน ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่างที่สูง ปฏิกิริยาเคมีของพื้นที่ผิวจำเพาะ การย่อยสลายของอินทรียวัตถุ อายุ ขนาด และคุณภาพของถ่านชีวภาพ (Laird and Rogovska, 2015)

การทดลองที่ 2 เรื่องศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีดินบางประการในดินร่วนปนทรายภายใต้สภาพการบ่มดิน

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีดินบางประการ การใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบที่บ่มร่วมกับดินร่วนปนทราย เป็นระยะเวลา 0, 60, 120 และ 180 วัน พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดทุกอัตราทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุมทุกระยะการบ่มดิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jabin and Rani (2020) พบว่าถ่านชีวภาพจากแกลบและใบมะพร้าว ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินลูกลังและดินทรายเพิ่มสูงขึ้นทุกระยะการบ่มดินเป็นไปได้ว่าตัวของถ่านชีวภาพนั้นมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงจึงช่วยยกระดับค่าความเป็นกรด-ด่างของดินให้เพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 11) ส่วนสภาพนำไฟฟ้าในดินที่ระยะเวลาการบ่มดิน 0 วัน การเติมถ่านชีวภาพทุกตำรับทดลองทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุม ส่วนระยะการบ่มดิน 60 วัน พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทุกอัตราทำให้สภาพนำไฟฟ้าในดินเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุม การเพิ่มขึ้นของสภาพนำไฟฟ้าในดินเกิดจากปริมาณองค์ประกอบของกลุ่มเกลือที่สะสมอยู่ในชนิดพืชที่แตกต่างกัน เช่น ถ่านชีวภาพหญ้า switchgrass และถ่านชีวภาพจากส่วนของใบและซังข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในอุณหภูมิเดียวกันมีปริมาณสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนและปริมาณเถ้าสูงกว่าถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้ (Brewer et al., 2011) ซึ่งสอดคล้องกับ Shah et al. (2017) การเติมถ่านชีวภาพในอัตรา 0, 5, 10 และ 20 t ha^{-1} ที่ระยะการบ่ม 0, 5, 10 และ 50 วัน ทำให้สภาพนำไฟฟ้าในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุม นอกจากนี้ Vidana Gamage et al. (2016) รายงานว่าการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบในดิน Non-Calcic Brown และ Reddish Brown Earth ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สภาพนำไฟฟ้าของดินลดลง ขณะที่การบ่มดิน 120 และ 180 วัน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างตำรับทดลองของสภาพนำไฟฟ้า การใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ อัตรา 2.5% w/w ที่ระยะการบ่มดิน 120 วัน มีปริมาณอินทรียวัตถุในดินที่ต่ำกว่าตำรับควบคุม ซึ่งอาจเกิดจากการนำคาร์บอนที่อยู่ในดินไปใช้ในการทำกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตในดิน แต่การใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ อัตรา 5.0% w/w ทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินสูงสุดที่ระยะ

บ่มดิน 0, 60 และ 120 วัน สอดคล้องกับ Mohan et al. (2018) ที่บ่มดินร่วมกับถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ อัตรา 0.5, 1.5 และ 3.0% ที่ระยะเวลา 107 วัน ส่งผลให้ดินมีปริมาณอินทรียวัตถุในดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณของถ่านชีวภาพ ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบทุกอัตราส่วนทำให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินเพิ่มขึ้นทุกระยะการบ่มดิน การเพิ่มขึ้นของปริมาณค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินเกิดจากสมบัติของถ่านชีวภาพที่มีพื้นที่ผิวสูง และมีความหนาแน่นของประจุลบในบริเวณพื้นที่ผิวสูง (Amonette and Joseph, 2009) ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับธาตุอาหาร การแลกเปลี่ยนประจุบวกและประจุลบในดินได้สูง (Cheng et al., 2008) ทำให้เมื่อเติมถ่านชีวภาพลงไปในดินจึงสามารถเพิ่มค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินให้สูงได้ ซึ่งสอดคล้องกับ Chintala et al. (2014) ที่ใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและหญ้าสวิตช์ อัตรา 52, 104 และ 156 Mg ha^{-1} บ่มร่วมกับดินกรด เมื่อบ่มครบ 165 วัน ทำให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุม ซึ่งการเติมถ่านชีวภาพในปริมาณที่สูงจะส่งผลทำให้ปริมาณความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงตามไปด้วย ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน มีค่าผันแปรไปตามปริมาณของถ่านชีวภาพทั้งสองชนิด โดยพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุมทุกระยะการบ่มดิน ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Addisu and Seyoum (2021) พบว่าดินที่ผ่านการบ่มด้วยถ่านชีวภาพที่ได้จากเปลือกกาแฟ อัตรา 10 และ 20 t ha^{-1} ทำให้มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงขึ้นจากตำรับควบคุม จาก 7.48 mg kg^{-1} เป็น 9.48 และ 13.56 mg kg^{-1} ตามลำดับ จากการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบมีผลทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากตำรับควบคุมในทุกระยะการบ่มดินอย่างชัดเจน เช่นเดียวกันกับงานทดลองของ Inal et al. (2015) ที่บ่มดินร่วมกับถ่านชีวภาพจากมูลไก่ เป็นระยะเวลา 70 วัน มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงขึ้นตามอัตราการใช้ถ่านชีวภาพ และใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Zhang et al. (2019) ที่รายงานว่าหลังจากการบ่มถ่านชีวภาพร่วมกับดิน ที่ระยะ 140 วัน ส่งผลทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากดินที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพ ปริมาณธาตุอาหารรองในดินที่ผ่านการบ่มในระยะเวลาต่าง ๆ พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบทุกอัตราทำให้ปริมาณธาตุอาหารรองที่แลกเปลี่ยนได้ในดินนั้นสูงกว่าตำรับควบคุมในทุกช่วงเวลาของการบ่มดิน ซึ่งสอดคล้องกับงานทดลองของ Dume et al. (2017) ที่ทำการบ่มดินร่วมกับถ่านชีวภาพจากเปลือกกาแฟและซังข้าวโพดที่ผ่านระบวนการไพโรไลซิส 350 และ 500 °C ในอัตราที่แตกต่างกัน พบว่าตำรับที่ใช้ถ่านชีวภาพส่งผลทำให้ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้น

จากตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพ ในงานทดลองเรื่องนี้พบว่าปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้สูงขึ้นเมื่อมีการเติมถ่านชีวภาพที่ได้จากซังข้าวโพดและแกลบแต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับตำรับควบคุม โดยอัตราที่ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินคือ อัตรา 5.0% w/w ทั้งในระยะการบ่มดินที่ 60 และ 120 วัน ตามลำดับ แต่พบว่าที่ระยะการบ่มดิน 180 วัน การเติมถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 2.5% w/w ทำให้ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินลดลงกว่าตำรับควบคุม และการเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิด อัตรา 2.5% w/w ส่งผลให้ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าลดลงกว่าตำรับควบคุม (ไม่เติมถ่านชีวภาพ) ขณะที่ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดินจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการบ่มโดยพบว่าอัตรา 5.0% w/w มีผลทำให้ปริมาณกำมะถันสูงกว่าอัตรา 2.5% w/w และการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบมีแนวโน้มต่อการเพิ่มของปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้สูงกว่าถ่านชีวภาพที่ได้จากซังข้าวโพด ปริมาณธาตุอาหารเสริมหลังการบ่มดิน พบว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบในอัตรา 2.5 และ 5.0% w/w ทำให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินต่ำกว่าตำรับควบคุมที่ทุกระยะการบ่มดิน ซึ่งสอดคล้องกับ Tsai and Chang (2019) พบว่าการบ่มถ่านชีวภาพร่วมกับดินร่วนเหนียวที่ปฏิกิริยาดินเป็นกรดเล็กน้อยถึงด่างเล็กน้อย ทำให้ปริมาณทองแดงที่สกัดได้ในดินมีค่าลดลง แต่ในดินเหนียวที่เป็นกรดเล็กน้อยการใช้ถ่านชีวภาพทำให้ดินหลังการบ่มมีปริมาณทองแดงที่สกัดได้สูงกว่าตำรับควบคุม ซึ่งความแตกต่างนี้อาจมีผลมาจากลักษณะของเนื้อดินที่ใช้ในการศึกษา ส่วนการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ อัตรา 5.0% w/w ส่งผลให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินมีน้อยกว่าตำรับควบคุมหลังการบ่มดินที่ 60 และ 120 วัน ซึ่ง Dume et al. (2016a) รายงานว่าจากการใช้ถ่านชีวภาพจากเปลือกกาแฟ และซังข้าวโพดในอัตรา 0, 5, 10 และ 15 t ha^{-1} ทำให้ปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินมีค่าลดลงหลังจากบ่มดินที่ระยะเวลา 3 เดือน ขณะที่การบ่มดิน 180 วัน พบว่ามีปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินสูงกว่าตำรับควบคุม และการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ อัตรา 5.0% w/w ทำให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงสุดที่ระยะการบ่มดิน 120 วัน ซึ่งมาจากองค์ประกอบของถ่านชีวภาพเองที่มีปริมาณแมงกานีสสูงคือ 23.1 g kg^{-1} ส่วนงานวิจัยของ Abujabhah et al. (2016) บ่มถ่านชีวภาพร่วมกับดินร่วนเหนียว ดินร่วน และดินร่วนปนทราย ในอัตรา 0, 2.5, 5 และ 10% w/w การใช้ถ่านชีวภาพทำให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินทั้งสามชนิดที่ค่าลดลงจากตำรับควบคุม หลังบ่มร่วมกับดินนาน 10 เดือน ซึ่ง Hailegnaw et al. (2020) ใช้ถ่านชีวภาพอัตรา 0.5, 2, 5 และ 8% w/w บ่มกับดินเนื้อร่วน และร่วนเหนียว พบว่าดินที่มี ค่าพีเอช <6.00 การใช้ถ่านชีวภาพทุกอัตราส่งผลให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินลดลง ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินเพิ่มขึ้นจากการเติมถ่านชีวภาพ

ทั้ง 2 ชนิด และ 2 อัตรา โดยปริมาณสังกะสีที่สกัดได้มีค่าสูงสุดตลอดระยะการบ่มดินตามปริมาณตามปริมาณของสังกะสีที่วิเคราะห์ได้ (ตารางที่ 11) สอดคล้องกับงานทดลองของ Hass et al. (2012) การถ่านชีวภาพจากมูลไก่ที่ผ่านระบวนการไพโรไลซิส 350 และ 700 °C ในอัตราที่แตกต่างกันบ่มร่วมกับดินเป็นนาน 8 สัปดาห์ ทำให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินเพิ่มขึ้น

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

ผลศึกษาการทดลองที่ 1 เรื่องผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีดินบางประการภายใต้การชะละลายในดิน

ทำการศึกษาระหว่างเดือนสิงหาคม-พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

สมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ทำให้ความชื้นในดินระดับบนและระดับล่างสูงกว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ซึ่งการไม่เติมถ่านชีวภาพทำให้ความหนานแน่นอนุภาคของดินมีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติ ขณะที่การใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบในดินเหนียวมีผลทำให้ความชื้นของดินระดับบนมีค่าสูงที่สุด แต่ไม่มีความแตกต่างกับการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดในดินร่วนเหนียวปนทราย การใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดในดินร่วนปนทราย การใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดในดินเหนียวและการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบในดินร่วนปนทราย การเติมถ่านชีวภาพจากแกลบทำให้อนุภาคทรายแป้งและอนุภาคดินเหนียวที่เป็นองค์ประกอบของเนื้อดินมีปริมาณลดลง มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงอนุภาคของเนื้อดินสูงกว่าการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด โดยพบว่าทั้งในดินระดับบนและดินระดับล่างมีอนุภาคของดินทรายสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการไม่เติมถ่านชีวภาพและการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ขณะที่อนุภาคของทรายแป้งและอนุภาคของดินเหนียวกับพบว่าเมื่อเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอนุภาคของทรายแป้งและอนุภาคของดินเหนียวมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับตำรับควบคุม ซึ่งการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบในดินร่วนปนทรายมีผลต่ออนุภาคของดินทรายสูงที่สุดแต่ไม่มีความแตกต่างกับการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทั้งสองระดับความลึก ซึ่งการไม่เติมถ่านชีวภาพในดินเหนียวทำให้อนุภาคดินเหนียวสูงที่สุดในดินระดับบนและดินระดับล่าง

สมบัติทางเคมีของดิน

การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินร่วนปนทรายและดินร่วนเหนียวปนทรายมีค่าเพิ่มขึ้นจากดินที่ไม่เติมถ่านชีวภาพ ขณะที่การเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดในดินเหนียวทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินมีค่าต่ำกว่าตำรับที่ไม่เติมถ่านชีวภาพทั้งดิน

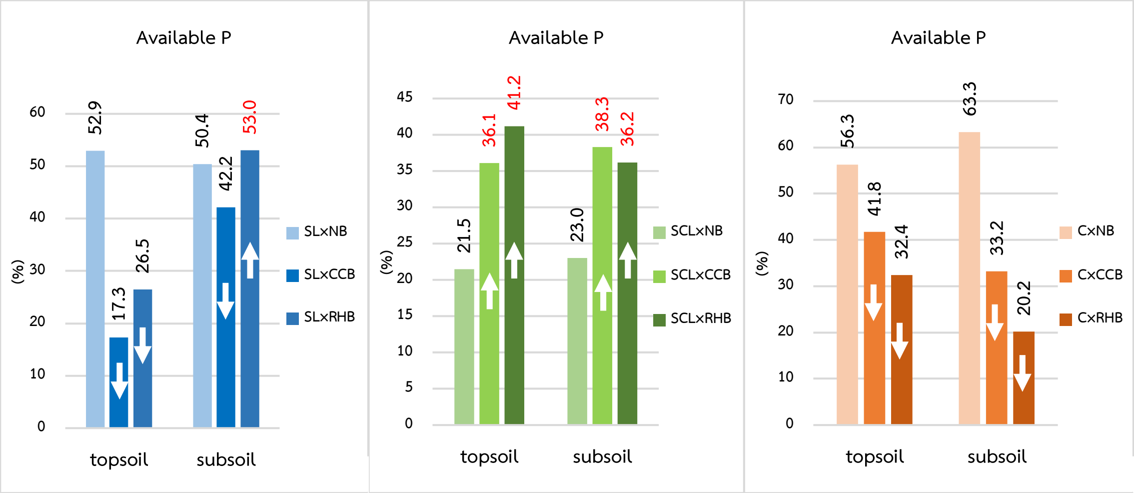
ระดับบนและระดับล่าง และการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบทำให้สภาพนำไฟฟ้าในดินทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นจากดินที่ไม่เติมถ่านชีวภาพทั้ง 2 ระดับความลึก และยังทำให้ดินเหนียวมีปริมาณอินทรียวัตถุและค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินสูงที่สุดในดินระดับบนและดินระดับล่าง

การใช้ถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงกว่าการไม่เติมถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญทั้งสองระดับความลึก โดยในดินระดับบนการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดในดินร่วนปนทรายมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุด ส่วนดินระดับล่างการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบในดินดินร่วนปนทรายทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูงที่สุด ขณะที่การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดในดินร่วนเหนียวปนทรายส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงสุดทั้งสองระดับความลึก การเติมถ่านชีวภาพจากแกลบในดินร่วนเหนียวปนทรายทำให้ปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินระดับบนสูงที่สุด ซึ่งการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดในดินร่นเหนียวปนทรายมีปริมาณแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินระดับล่างสูงที่สุด และการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบในดินร่วนเหนียวปนทรายทำให้ปริมาณแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงที่สุดในดินระดับบนและดินระดับล่าง

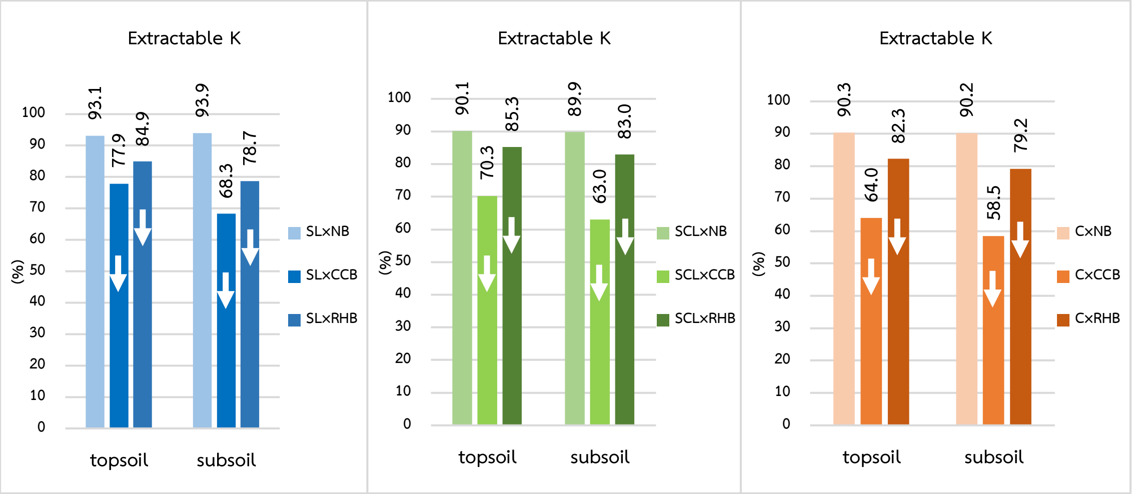
การไม่เติมถ่านชีวภาพในดินเหนียวทำให้ปริมาณทองแดงที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงสุดทั้งในดินระดับบนและดินระดับล่าง ขณะที่การไม่เติมถ่านชีวภาพในดินร่วนเหนียวปนทรายมีปริมาณเหล็กที่สกัดได้ในดินสูงที่สุดแต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติกับการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดในดินร่วนเหนียวปนทรายและดินเหนียวที่ไม่เติมถ่านชีภาพในดินระดับบน ส่วนการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดทำให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดในดินระดับล่าง โดยพบว่าการเติมถ่านชีวภาพในดินร่วนปนทรายส่งผลให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดในดินระดับบนและดินระดับล่าง ขณะที่การเติมถ่านชีวภาพทั้งสองชนิดทำให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุด ในดินทั้งสองระดับความลึก ซึ่งการเติมถ่านชีวภาพในดินเหนียวมีปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดในดินทั้งสองระดับความลึก

ในส่วนของการชะละลายในดินถ่านชีวภาพจากแกลบมีแนวโน้มในการชะลอการสูญเสียธาตุอาหารในดินร่วนปนทราย และดินร่วนเหนียวปนทรายในส่วนของปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียมและสังกะสีในดิน ขณะที่ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดช่วยชะลอการสูญเสียธาตุอาหารในดินเหนียวในส่วนของปริมาณแมกนีเซียมและสังกะสีในดิน

จากการเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ ช่วยลดปริมาณการสูญเสียธาตุฟอสฟอรัสในดินร่วนปนทรายและดินเหนียว (ภาพที่ 1) ขณะเดียวกันยังช่วยลดการสูญเสียธาตุโพแทสเซียมในดินร่วนปนทราย ดินร่วนเหนียวปนทรายและดินเหนียว (ภาพที่ 2) ทั้งสองระดับความลึก



ภาพที่ 1 ผลของถ่านชีวภาพต่อการชะลอการสูญเสียธาตุฟอสฟอรัสในดิน



ภาพที่ 2 ผลของถ่านชีวภาพต่อการชะลอการสูญเสียธาตุโพแทสเซียมในดิน

ผลการศึกษาการทดลองที่ 2 เรื่องศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีดินบางประการในดินร่วนปนทรายภายใต้สภาพการบ่มดิน

ทำการศึกษาระหว่างเดือนมกราคม-สิงหาคม พ.ศ. 2565 สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

สมบัติทางเคมีของดิน

การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด มีแนวโน้มทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในดิน และสภาพนำไฟฟ้าของดินเพิ่มขึ้น การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ อัตรา 5.0% w/w ทำให้ปริมาณอินทรียวัตถุในดินมีค่าสูงที่สุดทุกระยะการบ่มดิน ขณะที่การเติมถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ทำให้ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินมีค่าสูงที่สุด ที่ระยะการบ่มดิน 180 วัน การใส่ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบทั้งสองอัตราทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าเพิ่มขึ้นจากตำรับที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพ ซึ่งการเติมถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ทำให้ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงที่สุดที่ระยะการบ่มดิน 60 และ 120 วัน และยังส่งผลให้ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงที่สุดตลอดระยะการบ่มดิน การเติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบอัตรา 2.5% w/w ทำให้มีปริมาณทองแดงและเหล็กที่สกัดได้ในดินลดลงเมื่อเทียบกับการไม่ใส่ถ่านชีวภาพ การเติมถ่านชีวภาพจากแกลบ อัตรา 5.0% w/w ทำให้ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดตลอดระยะการบ่มดิน และการใช้ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบทั้งสองอัตราทำให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินสูงกว่าการไม่ใส่ถ่านชีวภาพ ซึ่งการเติมในอัตรา 2.5% w/w ส่งผลให้ปริมาณสังกะสีที่สกัดได้ในดินมีค่าสูงที่สุดตลอดระยะการบ่มดิน

ข้อเสนอแนะ

ใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบ เพราะถ่านชีวภาพจากแกลบทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรด-ด่างของดินจะส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดินทำให้พืชสามารถนำธาตุอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ดีขึ้น

บรรณานุกรม

กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. **ลักษณะและสมบัติของชุดดินในภาคเหนือ และที่สูงตอนกลางของประเทศไทย**. สำนักสำรวจดิน และวางแผนการใช้ที่ดิน. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน. 82 น.

---. 2553. **คู่มือการปฏิบัติงาน กระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https:// OSD-03.pdf (10 มกราคม 2565).**

---. 2558. **สถานภาพทรัพยากรดิน และที่ดินของประเทศไทย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.elibrary.ldd.go.th/library/flip/bib9456f/bib9456f.html. (8 มกราคม 2565)**

---. 2561**. ข้อมูลชุดดิน (Soil Series) 17 จังหวัดภาคเหนือ. 2561. ดินออนไลน์ บริการขอมูลดิน และ การใช้ที่ดิน, กรมพัฒนาที่ดิน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://dinonline.ldd.go.th/SoilSeries.aspx. (25 เมษายน 2566)**

กลุ่มวิเคราะห์สภาพการใช้ที่ดิน. 2561. **การใช้ที่ดินภาคเหนือ กองนโยบายและแผนการใช้ที่ดิน. [ระบบออนไลน์. แหล่งที่มา: http:// www1.ldd.go.th/ web_OLP/ report_research_N.html (21 ธันวาคม 2564).**

เกศศิรินทร์ แสงมี, ธีระรัตน์ ชินแสน และ ณัฐพงษ์ พันธุภา. 2558. การศึกษาอัตราส่วนของถ่านชีวภาพต่อคุณสมบัติทางเคมีของดินปลูก และผลผลิตของผักสลัดกรีนคอส. น. 746-758. ใน **การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53**. 3-6 กุมภาพันธ์ 2558 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

กมลชนก เจริญศรี, วรชาติ วิศวพิพัฒ์, ทิมทอง ดรุณสนธยา และ ณัฐพร ประคองเก็บ. 2560. อิทธิพลของถ่านชีวภาพจากปาล์มน้ำมันต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช และการละลายของฟอสฟอรัสในดินนาเปรี้ยวจัด. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**, 48(2), 270-283.

กองสำรวจดินและวิจัยทรัพยากรดิน. 2558. **ชุดดินภาคเหนือ ความรู้พื้นฐานเพื่อการเกษตร**. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน. 83 น.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีศาสตร์. 2548. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.** กรุงเทพฯ. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พิมพ์ครั้งที่ 10.

คณาจารย์สาขาปฐพีศาสตร์. 2560. **คู่มือบทปฏิบัติการทางปฐพีศาสตร์เบื้องต้น**. เชียงใหม่: สาขาวิชาปฐพีศาสตร์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

เจษฎา กาญจนเกษตร, ธงชัย ชาติเผือก, อิสระ ตั้งสุวรรณ และ เกศศิรินทร์ แสงมณี. 2561. ผลของถ่านชีวภาพจากแกลบและปุ๋ยอินทรีย์ต่อการเจริญเติบโต และผลผลิตของข้าวโพดหวานที่ปลูกในพื้น

ที่ดินกรด. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**, 49(1), 194-198.

ณิชาภัทร สิทธิวรนนท์, ชูชาติ สันธทรัพย์ และ ฟ้าไพลิน ไชยวรรณ. 2563. ผลของการใช้ถ่านชีวภาพต่อสมบัติและการกักเก็บคาร์บอนในดินบนพื้นที่สูง อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน. **วารสารเกษตร**, 36(1), 69-78

ทัพไท หน่อสุวรรณ, อรรถชัย จินดะเวช และ สิทธิชัย ลอดแก้ว. 2557. ความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอชาร์เพื่อเพิ่มผลผลิตในระบบการผลิตข้าวนาสวน. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม**, 32(2), 184-193.

นิยม บุญพิคำ. 2543. **ปฐพีวิทยา**. กรุงเทพฯ. คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถานบันราชภัฏจันทรเกษม. 332 น.

บรรเจิดลักษณ์ จินตฤทธิ์ และ รติกร ณ ลำปาง. 2559. ผลงานฉบับเต็ม. น. 1-60. **เรื่องการประเมินคุณภาพดินและการใช้ถ่านชีวภาพ (ไบโอชาร์) เพื่อเพิ่มคาร์บอนในดินและเพิ่มผลผลิตพืชผักอินทรีย์ในพื้นที่ดินกรด.** ขอประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิชาการเกษตรเชี่ยวชาญ. กรุงเทพฯ: กองวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน.

ประภัสสร รัตนไพบูลย์, นิกราน หอมตวง, ณัฐวุฒิ ดุษฎี, ภคมน ปินตานา และ ชูรัตน์ ธารารัตน์. 2563. การวิเคราะห์คุณสมบัติถ่านชีวภาพจากแกลบและซังข้าวโพดเพื่อปรับปรุงดิน. **วารสารวิชาการพลังงานทดแทน**, 3(3), 74-79.

พจนีย์ แสงมณี. 2564. คุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และความสามารถในการปรับปรุงดินกรด. **วารสารเกษตร**, 37(1), 39-49.

พชรพล เปียรักษา และ สุขุมาภรณ์ แสงงาม. 2561. ผลของการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพของการสังเคราะห์ด้วยแสงของพริกขี้หนูซูเปอร์ฮอทภายใต้สภาวะดินเปรี้ยว. **แก่นเกษตร**, 46(1), 338-343.

ภราภรณ์ เหล็กสุงเนิน, วรชาติ วิศวพิพัฒ์ และ ดาวจรัส เกตุโรส. 2560. ผลของการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบต่อสภาพการละลายของจุลธาตุอาหารพืชและการเจริญเติบโตของข้าวที่ปลูกในดินเนื้อปูน. **วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์**, 4(3), 65-74.

เยาวพล ชุมพล และ โฉมยง ไชยอุบล. 2564. ผลขอลถ่านไม้มะม่วงชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดข้าวเหนียว. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี**, 9(1), 113-125.

รัตถชล อ่างมณี, กัญจน์นรี ช่วงฉ่ำ และ อรรณพ หอมจันทร์. 2560. สมบัติของไบโอชาร์ที่ผลิตจากเศษข้าวโพดและศักยภาพในการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน. **วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์**, 12(1), 1-11.

สมชาย บุตรนันท์ และ ปัทมา วิตยากร. 2561. มหัศจรรย์ถ่านชีวภาพกับผลกระทบสองขั้ว. **แก่น**

เกษตร, 46(6), 1167-1176.

สายจิต ดาวสุโข และ โสรญา รอดประเสริฐ. 2558. การพัฒนาคุณภาพดินโดยใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. **วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์**, 4(4), 95-102.

สายชล สุขญาณกิจ และ สิริวรรณ สมิทธิอาภรณ์. 2563. ผลของถ่านชีวภาพร่วมกับการจัดการปุ๋ยต่อผลผลิต และความเข้มข้นธาตุอาหารในถั่วฝักยาวไร้ค้าง. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 28(3), 434-454.

สายน้ำ อุดพ้วย, ชัชธนพร เกื้อหนุน, พีรพงษ์ เชาวนพงษ์ และ ปิยะนันท์ วิวัฒน์วิทยา. 2559. ผลของถ่านชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังต่อสมบัติทางเคมีของดินเหนียวในสภาพโรงเรือน. น.328-335. ใน **การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54,** 2-5 กุมภาพันธ์ 2559 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

สุทธวรรณ วชิรธนุศร, อรประภา เทพศิลปวิสุทธิ์, พักตร์เพ็ญ ภูมิพันธ์ และ สมชาย ชคตะการ. 2563. ผลของปุ๋ยมูลไก่และถ่านชีวภาพต่อสมบัติทางเคมีของดิน และการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊คที่ปลูกในสภาพดินกรด. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 28(2), 343-355.

เสาวคนธ์ เหมวงษ์. 2557. ผลการถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ และแกลบต่อผลผลิต และประสิทธิภาพการดูดใช้ไนโตรเจนของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**, 16(1), 69-75.

เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม และ ทวีวงศ์ ศรีบุรี. 2564. **ถ่านชีวภาพและการประยุกต์ใช้เพื่อการเกษตรกรรมอย่างยั่งยืน.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

โสภิณภา นันตา, จันทร์เพ็ญ ชุมแสง และ นงคราญ กาญจนประเสริฐ. 2560. ประสิทธิภาพของถ่านชีวภาพต่อการปรับปรุงค่าความเป็นกรด-ด่าง และเพิ่มธาตุอาหารพืชในระบบเกษตรไม้ผล. น. 2517-2528. ใน **การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ เครือข่ายบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏภาคเหนือ ครั้งที่ 17**. 21 มกราคม 2560 ณ ศูนย์วัฒนธรรมภาคเหนือตอนล่าง วังจันทร์ริเวอร์วิว จังหวัดพิษณุโลก. พิษณุโลก. มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม.

อิสริยาภรณ์ ดำรงรักษ์. 2552. การใช้ถ่านจากการเผาในสภาพอับอากาศในการปรับปรุงดิน. **วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา**, 4(2), 22-37.

Abujabhah, I. S., Doyle, R., Bound, S. A. & Bowman, J. P. 2016. The effect of biochar loading rates on soil fertility, soil biomass, potential nitrification, and soil community metabolic profiles in three different soils. **Journal of Soils and Sediments**, 16: 2211-2222.

Abbas. T., Rizwan, M., Ali, S., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M. F., Abbas, F., Hannan, F., Rinklebe, J. & Ok, Y. S. 2017. Effect of biochar on cadmium bioavailability and

uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination. **Ecotoxicology and Environmental Safety***,* 140, 37-47.

Adam, O. T., Christophe, M., Simon, W., Anne, S., Monique, C., Bernard, B. & Daniel, P. R. 2018. Miscanthus biochar had limited effects on soil physical properties, microbial biomass, and grain yield in a four-year field experiment in Norway. **Agriculture***,* 8(11)*,* 1-9.

Adamu, M. B. & Junaidu, U. G. 2021. Effect of biochar and supplementary application of micronutrient on soil and growth of okra in Lafia, Nigeria. **International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology***,* 6(1)*,* 1-8.

Addisu, A. S. & Seyoum, E. G. 2021. Effect of incubation study of coffee husk on the amendment of chemical properties on Acid soil. **International journal of research studies in agricultural sciences***,* 7(7)*,* 35-41.

Adejumo, S. A., Owolab, M. O. & Odesola, I. F. 2016. Agro-physiologic effects of compost and biochar produced at different temperatures on growth, photosynthetic pigment and micronutrients uptake of maize crop. **African journal of agricultural research***,* 11(8)*,* 661-673.

Adekiya, A. O., Olaniran, A. F., Adenusi, T. T., Aremu, C., Ejue, W. S., Iranloye, M. L., Gbadamosi, A. & Olayanju, A. 2020. Efects of cow dung and wood biochars and green manure on soil fertility and tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) performance on a savanna Alfsol. **Scientifc reports***,* 10(1)*,* 1-10.

Alves, B. S. Q., Zelaya, K. P. S., Colen, F., Frazão, L. A., Napoli, A., Parikh, S. J. & Fernandes, L. A. 2021. Effect of sewage sludge and sugarcane bagasse biochar on soil properties and sugar beet production. **Pedosphere***,* 31(4)*,* 572-582.

Amaral, H. D. D. R., Situmeang, Y. P. & Suarta, M. 2019. The effects of compost and biochar on the growth and yield of red chili plants. **Journal of Physics: Conference Series.** 4th Annual Applied Science and Engineering Conference. 1402(3), 1-6.

Amonette, J. E. & Joseph, S. 2009.Characteristics of biochar: micro chemical properties. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.). **Biochar for Environmental Management: Science and Technology** (pp. 35-45). London: Earthscan.

Andrés, N. B., Ana, V. S., Leonardo, P., Deborah, T., Daniel, B., Raquel, M. & Adriana, G. L. 2014. Soil texture analyses using a hydrometer: modification of the Bouyoucos method. **Cienciae Investigacion Agraria**, 41(2), 263-271.

Are, K. S., Adelana, A. O., Fademi, I. O. & Aina, O. A. 2017. Improving physical properties of degraded spoil: Potential of poultry manure and biochar. **Agriculture and Natural Resources**, 51, 454-462.

Arif, M., Ali, A., Umair, M., Munsif, F., Ali, K., Inamullah., Saleem, M., & Ayub, G. 2012. Effect of biochar, fym and mineral nitrogen alone and in combination on yield and yield components of maize. **Sarhad Journal of Agriculture**, 28(2), 191-195.

Asai, H., Samson, B. K., Stephan, H. M., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T. & Horie, T. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. 1. soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. **Field Crops Research**, 111(2), 81-84.

Batista, E. M. C. C., Shultz, J., Matos, T. T. S., Fornari, M. R., Ferreira, T. M., Szpoganicz, B., Freitas, R. A. De. & Mangrich, A. S. 2018. Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. **Scientific reports**, 8(1), 1-9.

Barbosa, J. M. d. S., Ré-Poppi, N & Santiago-Silva, M. 2006. Polycyclic aromatic hydrocarbons from wood pyrolyis in charcoal production furnaces. **Environmental Research**, 101(3): 304-311.

Bhattarai, B., Neupane, J., Dhakal, S. P., Nepal, J., Gnyawali, B., Timalsina, T. & Poudel, A. 2015. Effect of biochar from different origin on physio-chemical properties of soil and yield of garden pea (Pisum sativum L.) at Paklihawa, Rupandehi, Nepal. **World Journal of Agricultural Research**, 3(4), 129-138.

Biswas, H., Prabhavathi, M., Patil, S. L., Kumar, S. & Morade, A. S. 2018. Application of biochar a as soil amendment theory and practce. In A. Rakshit, B. Sarkar & P. Abhilash (Eds.). **Soil Amendment for Sustainability**, (pp. 159-174). Boca Raton, Florida: CRC Press.

Blanco-Canqui, H. 2017. Biochar and soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, 81(4), 687-711.

Brewer, C. E., Schmidt-Rohr, K., S., K. J. & Brown, R. C. 2009. Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, 28(3), 386-396.

Brewer, C. E., Unger, R., Schmidt-Rohr, K. & Brown, R. C. 2011. Criteria to select biochars for field studies based on biochar chemical properties. **BioEnergy Research**, 4(4), 312-323.

Brewer, C. E., Chuang, V. J., Masiello, C. A., Gonnermann, H., Gao, X., Dugan, B., Driver, L. E., Panzacchi, P., Zygourakis, K. & Davies, C. A. 2014. New approaches to measuring biochar density and porosity. **Biomass and Bioenergy**, 66, 176-185.

Brodowski, S., John, B., Flessa, H & Amelung, W. 2006. Aggregate-occluded black carbon in soil. **European Journal of Soil Science**, 57(4): 539-546.

Břendová, K., Tlustoš, P & Száková, J. 2015. Biochar immobilizes cadmium and zinc and improves phytoextraction potential of willow plants on extremely contaminated soil. **Plant, Soil and Environment**, 61(7): 303-308.

Busman, L., Lamb, J., Randall, G., Rehm, G. & Schmitt, M. 2009. The nature of phosphorus in soil. University of Minnesota, **Minnesota Extension Service**. WW-06795-GO.

Budiyati, I., Mapegau. & Marlina. 2020. Coconut husk biochar application on increasing growth and yield of maize plant, and improvement fertility of Ultisol dry land. **Systematic Review Pharmacy**, 11(2), 187-192.

Camps-Arbestain, M., Shen, Q., Wang, T., Zwieten, L. V. & Novak, J. 2017. Available nutrients in biochar. In B. Singh, M. Camps-Arbestain & J. Lehmann (Eds.). **Biochar: a guide to analytical methods** (pp. 109-125). Australia: Csiro publishing.

Chaiyaraksa, C & Phumcharoen, K. 2021. Reduction of heavy metal movement in soil contaminated with diesel using corncob-biochar. **EnvironmentAsia**, 14(1): 41-51.

Changxun, G., Zhiyong, P. & Shu'ang, P. 2016. Effect of biochar on the growth of *Poncirus trifoliata* (L.) Raf. seedling in gannan acidic red soil. **Soil science and plant nutrition**, 62(2), 194-200.

Cheng, C. H., Lehmann, J. & Engelhard, M. H. 2008. Natural oxidation of black carbon

in soils: Changes in molecular form and surface charge along a climosequence. **Geochimica et Cosmochimica Acta***,* 72(6)*,* 1598-1610.

Chintala, R., Mollinedoa, J., Schumachera, T. E., Maloa, D. D. & Julson, J. L. 2014. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. **Archives of Agronomy and Soil Science.** *,* 60(3)*,* 393-404.

Çığ, F., Sönmez, F., Nadeem, M. A. & Sabagh, A. E. 2021. Effect of biochar and PGPR on the growth and nutrients content of einkorn wheat (*Triticum monococcum* L.) and post-harvest soil properties. **Agronomy***,* 11(2418)*,* 1-18.

Deenik, J. L., McClellan, T., Uehara, G., Antal, M. J & Campbell, S. 2010. Charcoal volatile mattercontent influences plant growth and soil nitrogen transformations. **Soil Science Society of America Journal**, 74(4): 1259-1270.

Deenik, J. L., Diarra, A., Uehara, G., Campbell, S., Sumiyoshi, Y & Antal Jr, M. J. 2011. Charcoal ash and volatile matter effects on soil properties and Plant Growth in an Acid Ultisol. **Soil Science**, 176(7): 336-345.

Ding, Y., Liu, Y. X., Wu W. X., Shi, D. Z., Yang, M. & Zhong, Z. K. 2010. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns. **Water Air Soil Pollut***,* 213, 47-55.

Dume, B., Ayele, D., Regassa, A. & Barecha, G. 2016a. Interactive effects of biochar in soil related to feedstock and pyrolysis temperature. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences***,* 16(3)*,* 442-448.

Dume, B., Mosissa, T. & Nebiyu, A. 2016b. Effect of biochar on soil properties and lead (Pb) availability in a military camp in south west Ethiopia. African Journal of Environmental Science and technology, 10(3), 77-85.

Dume, B., Ayele, D., Regassa, A. & Berecha, G. 2017. Improving available phosphorus in acidic soil using biochar. **Journal of Soil Science and Environmental Management***,* 8(4)*,* 87-94.

Elzobair K. A., Stromberger, M. E., Ippolito, J. A. & Lentz, R. D. 2015. Contrasting effects of biochar versus manure on soil microbial communities and enzyme activities in an Aridisol. **Chemosphere***,* 142, 1-8.

FAO. 2008. **FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulleti**. FAO, Rome, Italy.

Fungo, B., Guerena, D., Thiongo, M., Lehmann, J., Neufeldt, H. & Kalbitz, K. 2014. N_2O and CH_4 emission from soil amended with steam-activated biochar. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science,** 177(1), 34-38.

Ghorbani, M. & Amirahmadi, E. 2018. Effect of rice husk Biochar (RHB) on some of chemical properties of an acidic soil and the absorption of some nutrients. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management,** 22(3), 313-317.

Glaser, B. & Lehr, V. L. 2019. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. **Scientific Reports**, 9(1), 1-9.

Golchin, A., Oades, J. M., Skjemstad, O. J & Clarke, P. 1994. Soil structure and carbon cycling, **Australian Journal of Soil Research**, 32(5): 1043-1068.

Graber, E. R., Singh, B., Hanley, K. & Lehmann, J. 2017. Determination of cation exchange capacity in biocha. In B. Singh, M. Camps-Arbestain & J. Lehmann (Eds.). **Biochar: a guide to analytical methods** (pp. 74-84). Australia: Csiro publishing.

Hailegnaw, N. S., Mercl, F., Pračke, K., Praus, L., Száková, J. & Tlustoš, P. 2020. The role of biochar and soil properties in determining the available content of Al, Cu, Zn, Mn, and Cd in soil. **Agronomy** 10(6), 1-15.

Hass, A., Gonzalez, J. M., Lima, I. M., Godwin, H. W., Halvorson, J. J. & Boyer, D. G. 2012. Chicken manure biochar as liming and nutrient source for acid appalachian soil. **Journal of Environmental Quality** 41(4), 1096-1106.

He, H., Pan, J., Yu, P., Chen, G & Li, H. 2017. Effects of hybrid giant napier biochar on cadmium migration in a cabbage-soil system contaminated with cadmium and butachlor. **Polish Journal of Environmental Studies**, 26(2): 619-625.

Henner, P., Schiavon, M., Druelle, V & Lichtfouse, E. 1999. Phytotoxicity of ancient gaswork soils. effect of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on plant germination. **Organic Geochemistry**, 30(8): 963-969.

Herrmann, L., Lesueur, D., Robin, A., Robain, H., Wiriyakitnateekul, W. & Bräu, L. 2020. Impact of biochar application dose on soil microbial communities associated with rubber trees in North East Thailand. **Science of the Total Environment**, 689: 970-979.

Hseu. Z. Y., Jien, S. H., Chien, W. H. & Liou, R. C. 2014. Impacts of biochar on physical properties and erosion potential of a mudstone slopeland soil. **The Scientific world journal**, 1-10.

Igaz, D., Šimanský, V., Horák, J., Kondrlová, E., Domanová, J., Rodný, M. & Buchkina, N. P. 2018. Can a single does of biochar affect selected soil physical and chemical characteristics. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, 66(4), 421-428.

Inal, A., Gunes, A., Sahin, O., Taskin, M. B. & Kaya, E. C. 2015. Impacts of biochar and processed poultry manure, applied to a calcareous soil, on the growth of bean and maize. **Soil Use and Management** 31(1), 106-113.

Ippolito, J. A., Novak, J. M., Busscher, W. J., Ahmedna, M., Rehrah, D. & Watts, D. W. 2012. Switchgrass biochar aff ects two Aridisols. **Journal of Environmental Quality** 41(4), 1123-1130.

Izilan, N. I. S., Sari, N. A., Othman, N. M. I. & Mustaffha, S. 2022. The effects of biochar-compost on soil properties and plant growth performance grown in a sandy-loam soil. p. 1-6. In **The 4th International Conference on Sustainability Agriculture and Biosystem**. Earth and Environmental Science.

Jabin, P. P. N. & Rani, B. 2020. Effect of biochar and farmyard manure on soil chemical properties at different periods of incubation. **Journal of Soils and Crops**, 30(2), 213-220.

Jeong, C. Y., Wang, J. J., Dodla, S. K., Eberhardt, T. L. & Groom, L. 2012. Effect of biochar amendment on tylosin adsorption-desorption and transport in two different soils. **Journal of Environmental Quality**, 41(4), 1185-1192.

Jien, S. H. & Wang, C. S., 2013. Effect of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. **Catena**, 110, 225-233.

Jien, S. H., Kuo, Y. L., Liao, C. S., Wu, Y. T., Igalavithana, A. D., Tsang, D. C. W. & Ok, Y. S. 2021. Effect of field scale in situ biochar incorporation in soil environment in a tropical highly weathered soil. **Environmental Pollution**, 272, 1-11.

Joseph, U. E., Toluwase, A. O., Kehinde, E. O., Omasan, E. E., Tolulope, A. Y., George, O. O., Zhao, C. & Hongyan, W. 2019. Effect of biochar on soil structure and storage of soil organic carbon and nitrogen in the aggregate fractions of an Albic soil.

Archives of agronomy and soil science, 66(1), 1-12.

Ketrot, D. & Wisawapipat, W. 2021. Lead immobilization in mining contaminated soil using biochar and ash from sugarcane. **Plant, Soil and Environment**, 67(8), 474-481.

Khanmohammadi, Z., Afyuni, M. & Mosaddeghi, M. R. 2017. Effect of sewage sludge and its biochar on chemical properties of two calcareous soils and maize shoot yield. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 63(2), 198-212.

Laird, D. & Rogovska, N. (2015). Biochar effects on nutrient leaching. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.). **Biochar for Environmental Management**.

Lehmann, J., Gaunt, J. & Rondon, M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems- A review. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, 11(1), 403-427.

Lehmann J. & Joseph S. 2009. An Introduction. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), **Biochar for Environmental Management**. (pp 1-9). London: Routledge.

Li, X., Shen, Q., Zhang, D., Mei, X., Ran, W., Xu, Y. & Yu, G. 2013. Functional groups determine biochar properties (pH and EC) as studied by two-dimensional^{13} C NMR correlation spectroscopy. **PLOS ONE**, 8(6), 1-7.

Li, Y., Zhang, F., Yang, M., Zhang, J. & Xie, Y. 2019. Impacts of biochar application rates and particle sizes on runoff and soil loss in small cultivated loess plots under simulated rainfall. **Science of the Total Environment**, 649, 1403-1413.

Li, S., Li, Z., Feng, X., Zhou, F., Wang, J. & Li, Y. 2021. Effect of biochar addition on the soil chemical properties, bacterial community structure and rape growth in an acid purple soil. **Plant, Soil and Environment,** 67(3), 121-129.

Liang, B., Lehmann J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., Nell, B. O., Skjemstad, J. O., Thies, J., Luizão, F. J., Petersen, J. & Neves, E. G. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. **Soil Science Society of America Journal**, 70(1,719-711,730.

Liu, X. H. & Zhang, X. C. 2012a. Effect of biochar on ph of alkaline soils in the loess plateau: results from incubation experiments. **International Journal of Agriculture & Biology**, 14(5), 65-70.

Liu, X. Y., Qu, J. J., Li, L. Q., Zhang, A. F., Jufeng, Z., Zheng, J. W. & Pan, G. X. 2012b. Can biochar amendment be an ecological engineering technology to depress N_2O emission in rice paddies a cross site field experiment from South China. **Ecological Engineering**, 42, 162-173.

Lv, Y., Zhao, X., Shu, Y., Chang, H., Zhao, S. & Liu, S. 2021. Effect of biochar on the migration and leaching of phosphorus in black soil. **Paddy and Water Environment**, 19, 1-9.

Mahmoud, E., Baroudy, A. E., El-Kader, N. A., Othman, S. & Khamisy, R. E. 2017a. Effects of phosphogypsum and biochar addition on soil physical properties and nutrients uptake by maize yield in vertic torrifluvents. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, 8(8), 1-23.

Mahmoud, E., El-Beshbeshy, T. R., El-Kader, N. E. A., Shal, R. E. & Khalafallah, N. 2017b. Bio Char Impacts on physical properties and wheat yield of salt affected soils. **International Journal of Research and Science publication**, 2(1), 1-10.

Mahendra, I. K. A., Situmeang, Y. P. & Suarta, S. 2020. Effect of biochar and compost from chicken, goat, and cow manure on cultivation of red chili (Capsicum annuum L). **Sustainable Environment Agricultural Science**, 4(2), 95-101.

Malyan, S. K., Kumar, S. S., Fagodiya, R. K., Ghosh, P., Kumar, A., Singh, R. & Singh, L. 2021. Biochar for environmental sustainability in the energy-water-agroecosystem nexus. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 149, 1-20.

Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J. & Lehmann, J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna Oxisol. **Plant soil**, 333, 117-128.

Mierzwa-Hersztek, M., Gondek, K., Klimkowicz-Pawlas, A., Chmiel, M. J., Dziedzic, K. & Taras, H. 2019. Assessment of soil quality after biochar application based on enzymatic activity and microbial composition. **International agrophysics**, 33(3), 331-336.

Mierzwa-Hersztek, M., Wolny-Koładka, K., Gondek K., Gałązka, A. & Gawryjołek, K. 2020. Effect of coapplication of biochar and nutrients on microbiocenotic

composition, dehydrogenase activity index and chemical properties of sandy soil. **Waste and Biomass Valorization**, 11, 3911-3923.

Mohan, D., Abhishek, K., Sarswat, A., Patel, M., Singh, P. & Pittman Jr, C. U. 2018. Biochar production and applications in soil fertility and carbon sequestration–a sustainable solution to crop-residue burning in India. **RSC Advances**, 8(1), 508-520.

Mostafa, F. A. & Shaban, Kh. A. H. 2019. Effect of different types of biochar on soil chemical properties, microbial community, pathogenic fungi and faba bean productivity. **Scientific Journal of Agricultural Sciences**, 1(2), 72-86.

Mukherjee, S. & Weihermüller, L. 2018. Biochar. In A. Rakshit, B. Sarkar & P. Abhilash, (Eds.). **Soil Amendment for Sustainability**, (pp. 145-157). Boca Raton, Florida: CRC Press.

Namgay, T., Singh, B. & Singh, B. P. 2010. Influence of biochar application to soil on the availability of As, Cd, Cu, Pb, and Zn to maize (*Zea mays* L.). **Australian Journal of Soil Research**, 48(7), 638-647.

Ndor, E., Amana, S. M. & Asadu, C. L. A. 2015a. Effect of biochar on soil properties and organic carbon sink in degraded soil of southern guinea savanna zone, Nigeria. **International Journal of Plant & Soil Science**, 4(3), 252-258.

Ndor, E., Jayeoba, O. J. & Asadu, L. A. 2015b. Effect of biochar soil amendment on soil properties and yield of sesame varieties in Lafia, Nigeria.**American Journal of Experimental Agriculture**, 9(4), 1-8.

Nigussie, A., Kissi E., Misganaw, M. & Ambaw, G. 2012. Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (*lactuca sativa*) grown in chromium polluted soils. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences**, 12(3), 369-376.

Njoku, C., Mbah, C. N., Igboji, P. O., Nwite, J. N. & Chibuike, C. C. 2015. Effect of biochar on selected soil physical properties and maize yield in an Ultisol in Abakaliki Southeastern Nigeria. **Journal of Agricultural Science**, 4(12), 864-870.

Nartey, O. D. & Zhao, B. 2014. Biochar preparation, characterization, and adsorptive capacity and its effect of bioavailability of contaminants: an overview.

Advances in Materials Science and Engineering*,* 14, 1-12.

Oenorm, L., 1087, 2006. **Chemical analysis of soils-**Determination of "plant-available" phosphorus and potassium by the calcium-acetate-lactate (CAL)-method.

Prakongkep, N., Gilkes, R. J., Wisawapipat, W., Leksungnoen, P., Kerdchana, C., Inboonchuay, T., Delbos, E., Strachan, L. J., Ariyasakul, P., Ketdan, C. & Hammecker, C. 2021. Effects of biochar on properties of tropical sandy soilsunder organic agriculture. **Journal of Agricultural Science***,* 13(1)*,* 1-17.

Prapagdee, S & Piyatiratitivorakul, S. 2014. Application of biochar for enhancing Cadmium and Zinc phytostabilization in Vigna radiata L. cultivation. **Water, Air, & Soil Pollution**, 225(12): 2233.

Pratiwi, E. P. A., Hillary, A. K., Fukuda, T. & Shinogi, Y. 2016. The effects of rice huck char on ammonium, nitrate and phosphate retention and leaching in loamy soil. **Geoderma,** 277, 61-68.

Pühringer, H. 2016. **Effects of different biochar application rates on soil fertility and soil water retention in on-farm experiments on smallholder farms in Kenya.** Master's Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences.

Rasulia, F., Owliaiea, H., Najafi-Ghirib, M. & Adhamia, E. 2021. Effect of biochar on potassium fractions and plant-available P, Fe, Zn, Mn and Cu concentrations of calcareous soils. **Arid Land Research and Management***,* 36(1)*,* 1-26.

Qiao, Y. & Wu, C. 2022. Nitrogen enriched biochar used as CO_2 adsorbents: a brief review. Carbon Capture Science & Technology, 2, 1-7.

Shah, T., Khan, S. & Shah, Z. 2017. Soil respiration, pH and EC as influenced by biochar. **Soil and Environment***,* 36(1)*,* 77-83.

Sika, M. P. & Hardie, A. G. 2013. Effect of pine wood biochar on ammonium nitrate leaching and availability in a South African sandy. **European Journal of Soil Science***,* 65(1)*,* 113-119.

Singh, B., Dolk, M. M., Shen, Q. & Camps-Arbestain, M. 2017. Biochar pH, electrical conductivity and liming Potential. In B. Singh M. Camps-Arbestain & J. Lehmann (Eds.). **Biochar: a guide to analytical methods** (pp. 23-38). Australia: Csiro publishing,.

Song, Q., He, Y., Wu, Y., Chen, S., Zhang, T. & Chen, H. 2020. Biochar Impacts on acidic soil from *Camellia Oleifera* plantation: A short-term soil Incubation study. **Agronomy***,* 10(9)*,* 1-20.

Spokas, K. A., Novak, J. K., Stewart, C. E., Cantrell, K. B., Uchimiya, M., DuSaire, M. G & Ro, K. S. 2011. Qualitative analysis of volatile organic compounds on biochar. **Chemosphere**, 85(5): 869-882.

Suksawat, C., Ariyadet, C., Sutigoolabud, P. & Sangchyoswat, C. 2017. Towards a zero-waste model in longan farms: Impact of longan biochar and corn mulch Ventura. on longan plantation soils. Journal of Thai Interdisciplinary Research, 12(2), 1-7.

Sun, H., Lu, H., Chu, L., Sfao, H. & Shi, W. 2017. Biochar applied with appropriate rates can reduce N leaching, keep N retention and not increase NH_3 volatilization in a coastal saline soil. **Science of the Total Environment***,* 575, 820-825.

Tabatabai, M. A. 1983. Sulfur. In A. L. Page (Ed.). **Methods of Soil Analysis Part** 2. (pp. 501-538): America Society of Agronomy Monograph. No. 9. Madison, Wisconsin. U.S.A.

Taek-Keun, O., lee, J. H., Kim, S. H. & Lee, H. C. 2017. Effect of biochar application on growth of Chinese cabbage (*Brassica chinensis*). **Korean Journal of Agricultural Science***,* 44(3)*,* 359-365.

Thies, J. E. & Rillig, M. C. 2009. Characteristics of biochar: Biological Properties. In Lehmann J. & Joseph S. (Eds.), **Biochar for Environmental Management** (pp. 85-122). London: Routledge.

Timilsina, S., Khanal, E. R., Shah, S. C., Shrivastav, C. P. & Khanal, A. 2017. Effects of biochar applicaton on soil properties and production of radish (Raphanus sativus l.) On loamy sand soil. **Journal of Agriculture and Forestry University***,* 1, 103-111.

Tripathi, M., Sahu, J. N. & Ganesan, P. 2016. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste thorough pyrolysis: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews***,* 55, 467-481.

Tsai, C. C. & Chang, Y. F. 2019. Carbon Dynamics and Fertility in Biochar-Amended Soils with Excessive Compost Application. **Agronomy***,* 9(9)*,* 1-15.

Ullah, Z., Jamali, A. Z., Ali, M., Khan, B., Yousaf, S. & Ziad, T. 2018. Effect of biochar on soil chemical properties in relation at different intervals. **Journal of Biodiversity and Environmental Sciences***,* 12(5)*,* 272-277.

Usowicza, B., Lipieca, J., Łukowskia, M., Marczewskib, W. & Usowicz, J. 2016. The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow. **Soil and Tillage Research***,* 164, 45-51.

Velli, P., Manolikaki, L. & Diamadopoulos, E. 2021. Effect of biochar produced from sewage sludge on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) growth, soil chemical properties and heavy metal concentrations. **Journal of Environmental Management***,* 297(113325)*,* 1-10.

Ventura, F., Salvatorelli, F., Piana, S., Pieri, L. & Pisa, P. R. 2012. The effects of biochar no the physical properties of bare soil. **Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh***,* 103(1), 5-11.

Ventura, M., Sorrenti, G., Panzacchi, P., George, E. & Tonon, G. 2013. Biochar Reduces Short-Term Nitrate Leaching from A Horizon in an Apple Orchard. **Journal of Environmental Quality***,* 42(1), 76-82.

Vidana Gamage, D. N., Mapa, R. B., Dharmakeerthi, R. S. & Biswas, A. 2016. Effect of rice-husk biochar on selected soil properties in tropical Alfisols. **Soil Research***,* 54(3)*,* 302-310.

Walelign, D. & Mingkui, Z. 2015. Effect of biochar application on microbial biomass and enzymatic activities in degraded red soil. **African Journal of Agricultural Research***,* 10(8)*,* 755-766.

Walkley, A. & Black, I. A. 1947. Chromic acid titration method for determination of soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal***,* 63, 257.

Wang, T., Camps-Arbestain, M., Hedley, M. & Bishop, P. 2012. Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. **Plant and Soil***,* 357, 173-187.

Wayne, E. S. 1980. **Handbook on Reference Method for Soil testing**. Council on soil testing and plant analysis (ed). Athens: University of Georgia. 130 p.

Wisnubroto, El. I., Utomo, W. H. & Indrayatie, E. R. 2017. Residual effect of biochar on growth and yield of red chili (*Capsicum Annum* L.). **Journal of Advanced**

Agricultural Technologies, 4(1), 28-31.

Xu, N., Tan, G., Wang, H. & Gai, X. 2016. Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbialbiomass and bacterial community structure. **European Journal of Soil Biology**, 74, 1-8.

Yanai, Y., Toyota, K & Okazaki, M. 2007. Effects of charcoal addition on N2O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. **Soil Science and Plant Nutrition**, 53(2): 181-188.

Yang, X., Liu, J., McGrouther, K., Huang, H., Lu, K., Guo, X., He L., Lin, X., Che L., Ye, Z. & Wang, H. 2016. Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil. **Environmental Science and Pollution Research**, 23(2), 974-984.

Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M. & Zimmerman, A. R. 2012a. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. **Chemosphere**, 89(11), 1467-1471.

Yao, Y., Gao B., Chen, H., Jiang, L., Inyang, M., Zimmerman, A. R., Cao, X., Yang, L., Xue, Y. & Li, H. 2012b. Adsorption of sulfamethoxazole on biochar and its impact on reclaimed water irrigation. **Journal of Hazardous Materials**, 209-210, 408-413.

Yasmin, M., Rahman, M. A., Shikha, F. S., Rahman, M. S., Jubaidur, R. & Sultana, R. 2020. Effect of biochar and vermicompost as an organic soil amendment in sweet orange. **Journal of Wastes and Biomass Management**, 2(2), 24-27.

Yi, S., Chang, N, Y. & Imhoff, P. T. 2020. Predicting water retention of biochar-amended soil from independent measurements of biochar and soil properties. **Advances in water resources**, 142, 1-14.

Yao, J. H., Xu, R. K & Zhang, H. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. **Bioresource Technology**, 102(3): 3488-3497.

Yunlong, L., Cheng, J., Lee, X., Chen, Y., Gao, W., Pan, W. & Tang, Y. 2019. Effect of biochar-based fertilizers on nutrient leaching in a tobacco-planting soil. **Acta Geochim**, 38(1), 1-7.

Yusif, S. A., Mohammed, M. A., Popoola, N. O., Yekeen, H., Nabayi, A. & Yakubu, H. 2020.Ameliorative effect of biochar application on selected chemical properties

of Acidic soil. **Bulgarian Journal of Soil Science**, 5(2), 142-151.

Yusiharni, E. & Gilkes, R. 2012. Minerals in the ash of Australian native plants. **Geoderma**, 189-190, 369-380.

Zeka, M., Njira, K. O. W., Bailey, L., Chimungu, J. G., Ligowe, I. S. & Nalivata, P. C. 2022. Effects of biochar feedstock type and rate on soil properties, soybean nodulation and nitrogen fixation. **Research Square**, 1-15.

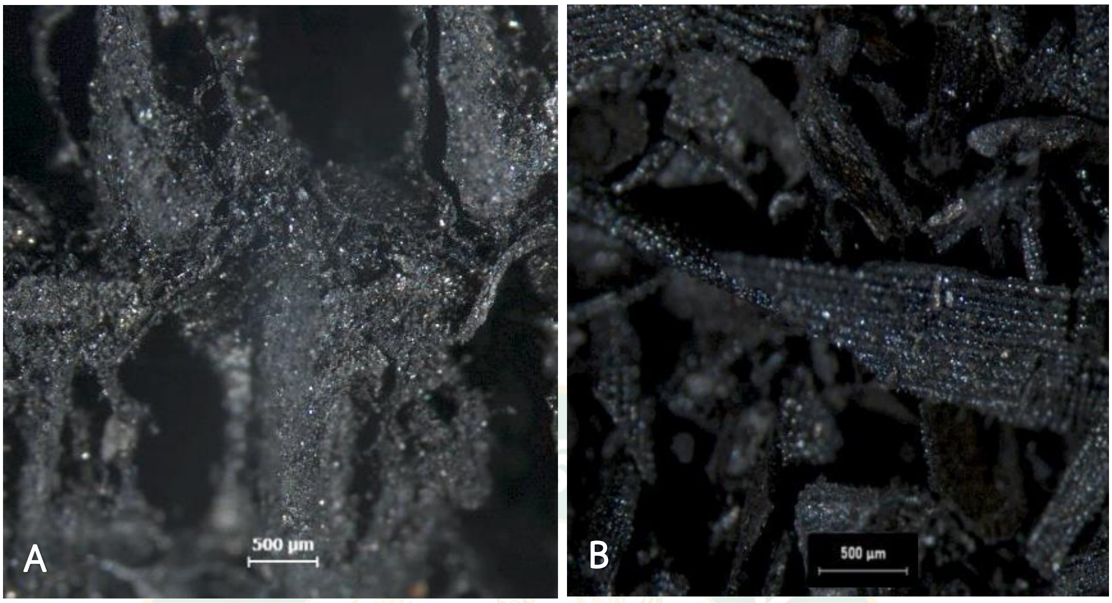
Zhang, W., Niu, J., Morales V. L., Chen, X., Hay, A. G., Lehmann, J. & Steenhuis, T. S. 2010. Transport and retention of biochar particles in porous media: effect of pH, ionic strength, and particle size. **Ecohydrology**, 3(4), 497-508.

Zhang, F., Huang, C., Yang, M., Zhang, J. & Shi, W. 2019.Rainfall simulation experiments indicate that biochar addition enhances erosion of loess-derived soils. **Land Degradation & Development**, 30(18), 2272-2286.

Zhu, Q., Wu, J., Wand, L., Yang, G & Zhang, X. 2015. Effect of biochar on heavy metal speciation of paddy soil. **Water Air Soil Pollut**, 226(12): 1-10

ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY
แม่โจ้ ๘๐



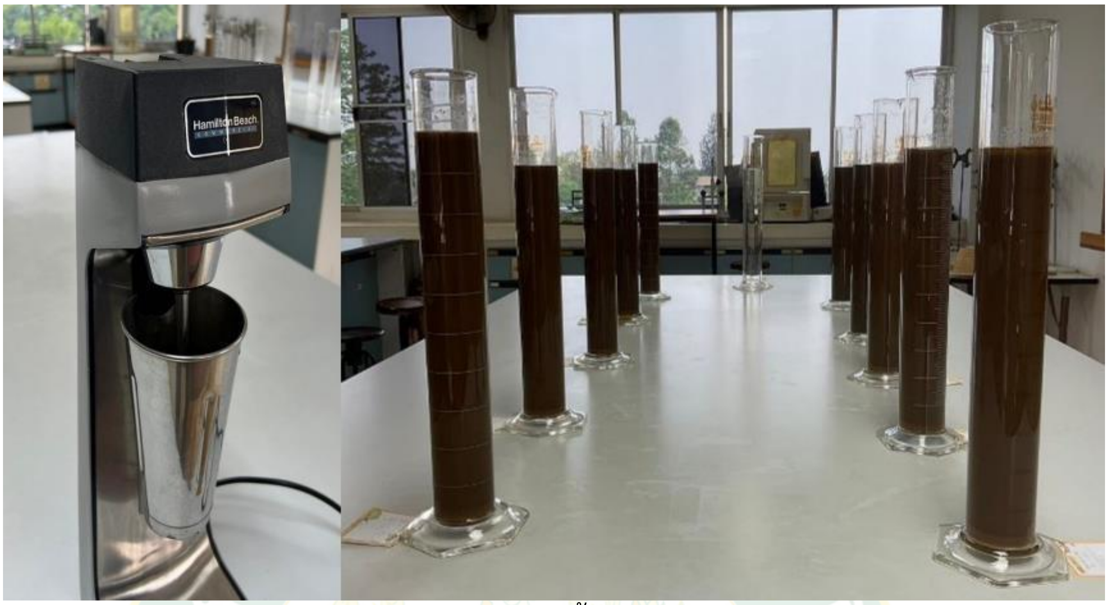
ภาพภาคผนวก 1 ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (A) และถ่านชีวภาพจากแกลบ (B)

ภาพภาคผนวก 2 การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของถ่านชีวภาพต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีดินบางประการภายใต้การชะละลาย

ภาพภาคผนวก 3 ดินร่วนปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ

ภาพภาคผนวก 4 ดินร่วนเหนียวปนทรายที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ

ภาพภาคผนวก 5 ดินเหนียวที่เติมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและแกลบ

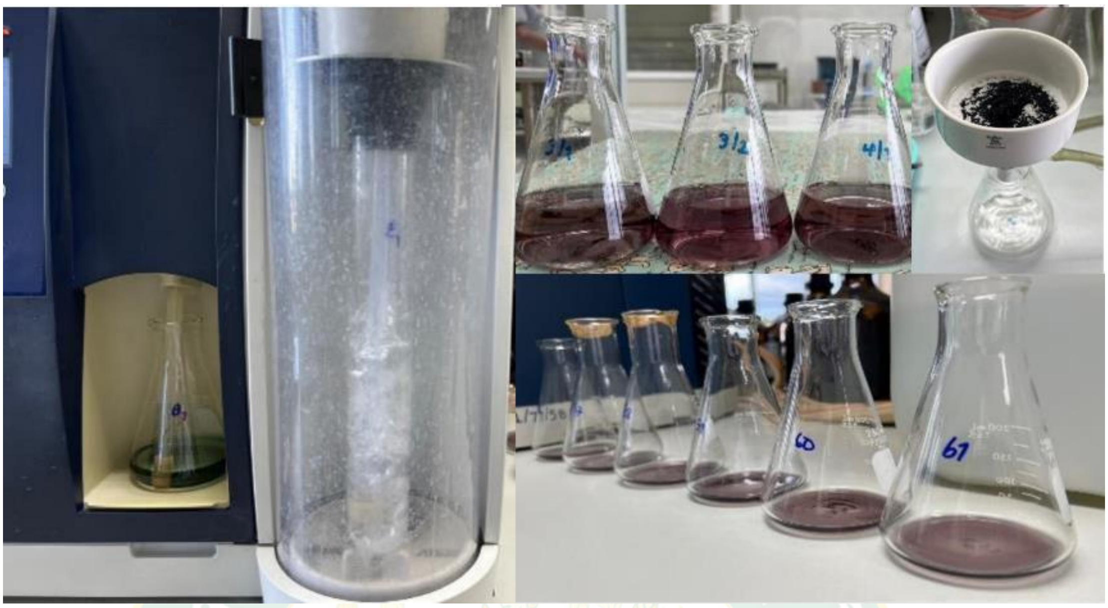


ภาพภาคผนวก 6 การวิเคราะห์เนื้อดินก่อนและหลังการทดลอง

ภาพภาคผนวก 7 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของอนุภาคดิน

ภาพภาคผนวก 8 การวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของดินและถ่านชีวภาพ

ภาพภาคผนวก 9 การวิเคราะห์ปริมาณอินทรียวัตถุในดินและปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ในถ่านชีวภาพ



ภาพภาคผนวก 10 การวิเคราะห์ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนในดินและถ่านชีวภาพ

ภาพภาคผนวก 11 การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินและถ่านชีวภาพ

ภาพภาคผนวก 12 การวิเคราะห์ปริมาณกำมะถันที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน

ภาพภาคผนวก 13 การวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียม ปริมาณธาตุอาหารเสริมในดินและถ่านชีวภาพ

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล ศรัณย์ จันทร์วงศ์

เกิดเมื่อ 24 กรกฎาคม 2540

ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2558 มัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนธีรกานท์บ้านโฮ่ง จังหวัดลำพูน
พ.ศ. 2562 ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกษตรศาสตร์)
สาขาวิชาปฐพีศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่
ระหว่างการศึกษา ได้ทำปัญญหาพิเศษ เรื่องผลของสาร
ชีวภัณฑ์ต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวาน

MAEJO UNIVERSITY