



ผลของการปรับปรุงดินเปรี้ยวด้วยถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโต ผลผลิตและการตอบสนองต่อ
ความเครียดทางกายภาพของพริก (*Capsicum annuum* L. cv. Super hot)

EFFECT OF ACID SOIL AMENDMENT WITH BIOCHAR ON PLANT GROWTH, YIELD
AND PLANT RESPONSE ON ABIOTIC STRESS OF CHILI (*Capsicum annuum* L. cv.
Super hot)

พชรพล เปี้ยรักษา

ผลของการปรับปรุงดินเปรี้ยวด้วยถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโต ผลผลิตและการตอบสนองต่อ
ความเครียดทางกายภาพของพริก (*Capsicum annuum* L. cv. Super hot)



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

EFFECT OF ACID SOIL AMENDMENT WITH BIOCHAR ON PLANT GROWTH, YIELD
AND PLANT RESPONSE ON ABIOTIC STRESS OF CHILI (*Capsicum annuum* L. cv.
Super hot)



A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY
(Biotechnology)

Faculty of Science, Srinakharinwirot University

2023

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

ผลของการปรับปรุงดินเปรี้ยวด้วยถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโต ผลผลิตและการตอบสนองต่อ
ความเครียดทางกายภาพของพริก (*Capsicum annuum* L. cv. Super hot)

ของ

พชรพล เปี้ยรักษา

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขุมภรณ์ แสงงาม)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาสนี พงษ์ประยูร)

..... ที่ปรึกษาร่วม

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ปรินทร์ ชัยวิสุทธางกูร)

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิวาพร ลงยันต์)

ชื่อเรื่อง	ผลของการปรับปรุงดินเปรี้ยวด้วยถ่านชีวภาพต่อการเจริญเติบโต ผลผลิตและการตอบสนองต่อความเครียดทางกายภาพของพริก (<i>Capsicum annuum</i> L. cv. Super hot)
ผู้วิจัย	พชรพล เป็ยรักษา
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
ปีการศึกษา	2566
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชумаภรณ์ แสงงาม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. ปรินทร์ ชัยวิสุทธิทางกูร

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขี้วัวโพดต่อการเติบโต ผลผลิตและประสิทธิภาพของการสังเคราะห์ด้วยแสงของพริกขี้หนูชูเปอร์ฮอต (*Capsicum annuum* L. cv. Super hot) จากผลการทดลองในสภาพโรงเรือน พบว่า การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5.0 และ 10.0 โดยมวล ทำให้ดินเปรี้ยวมีค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 4.98 6.33 และ 7.33 ตามลำดับ ในขณะที่ดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมมีค่า pH เท่ากับ 4.23 การวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุในใบ พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมและแคโรทีนอยด์สูงในพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สอดคล้องกับค่า Pi ซึ่งพบว่าต้นพริกในชุดควบคุมมีค่า Pi สูงกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีพื้นที่ใบสูง จากการทดลองในสภาพแปลงปลูก พบว่า ดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมมีค่า pH เท่ากับ 4.29 ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ต้นต่อไร่ หรือการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 1.5 หรือ 2 ต้นต่อไร่ ทำให้ดินมีค่า pH สูงขึ้นเป็น 6.02 5.44 5.82 และ 5.97 ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ พบว่า ต้นพริกในดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมมีค่า Pi ต่ำที่สุด สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในใบพืช ซึ่งพบว่าต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันในต้นพริก พบว่า ต้นพริกชุดควบคุมมีการสะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนในพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ถ่านชีวภาพจากขี้วัวโพดสามารถใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของดินเปรี้ยวได้

คำสำคัญ : ดินเปรี้ยวจัด ถ่านชีวภาพจากขี้วัวโพด พริกขี้หนูชูเปอร์ฮอต

Title	EFFECT OF ACID SOIL AMENDMENT WITH BIOCHAR ON PLANT GROWTH, YIELD AND PLANT RESPONSE ON ABIOTIC STRESS OF CHILI (<i>Capsicum annuum</i> L. cv. Super hot)
Author	PACHARAPOL PEARAKSA
Degree	DOCTOR OF PHILOSOPHY
Academic Year	2023
Thesis Advisor	Associate Professor Sukhumaporn Saeng-Ngam , Ph.D.
Co Advisor	Professor Parin Chaivisuthangkura , Ph.D.

This research aims to study the effect of acid soil amendment with corn cob biochar application on growth, yield and efficiency of photosynthesis of pepper (*Capsicum annuum* L. cv. Super Hot). The results of the experiment in the greenhouse condition and found that when the soil amendment was 2.5, 5.0 and 10.0 %(w/w) biochar caused the pH of acidic soil increased to 4.98, 6.33, and 7.33, respectively. While the soil pH of control had a pH 4.23. The analysis of pigment content in the leaves, the results found that the chili plant of the control group had significantly higher total chlorophyll and carotenoids content than the soil amendment group, and consistent with the Pi value, which found that the control group had significantly higher Pi values than the soil amendment group. However, the soil amendment with 5.0%(w/w) biochar had highest the leaf area when compared with the control. The experiment in field conditions found that the control group had a pH of 4.29 while soil amendment with 1.5 tons/rai marl or 1, 1.5, and 2 tons/rai biochar were increased the soil pH to 6.02, 5.44, 5.82, and 5.97, respectively. When analyzing the photosynthesis efficiency, found that the chili plants in the control group had the lowest Pi values. This was consistent with total soluble sugar content in the leaves. When considering the lipid peroxidation reaction, found that the control group had significantly higher accumulations of H₂O₂ and O₂⁻ than the chili plants in soil amendment with biochar. The results revealed that the corn cobs biochar can used to improving the properties of acidic soil.

Keyword : Acid soil *Capsicum annuum* L. cv. Super Hot Corn cob biochar

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชมาภรณ์ แสงงาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ซึ่งได้ให้ความรู้ทางการศึกษาด้านสรีรวิทยาของพืชแก่ข้าพเจ้า ตลอดจนให้คำปรึกษา แนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ ให้คำสั่งสอน ตักเตือน และปลุกฝังให้ข้าพเจ้ามีระเบียบวินัยในการทำงาน ตลอดจนสนับสนุนตำราและเอกสารทางวิชาการต่างๆ และขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ปรินทร์ ชัยวิสุทธิธังกูร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ช่วยแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เทพ หาญพัฒนากิจ และอาจารย์ ดร. ศุภิกา วาณิชชัง อาจารย์ประจำคณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยภาคสนาม ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษานี้

นักวิชาการชำนาญการ ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำในด้านการเก็บรักษาพันธุกรรมพืชภายใต้สภาวะเย็นยิ่งยวด ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษานี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ศิวาพร ลงยันต์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรักษ์ ศรวงณี ยารักษ์ อาจารย์ประจำหลักสูตรเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ คณะกรรมการพิจารณาปริญญาโท และคณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาโท ที่กรุณาให้ความรู้ และคำแนะนำในการเขียนปริญญาโทที่เป็นประโยชน์ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วาสนี พงษ์ประยูร อาจารย์ประจำภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกในการสอบปากเปล่า ที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณเงินอุดหนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประเภทงบประมาณแผ่นดิน พ.ศ. 2560 สัญญาเลขที่ 061/2560 ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่อบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมให้เห็นคุณค่าของการศึกษา ให้การสนับสนุนทุนทรัพย์ ช่วยผลักดันและเป็นกำลังใจสำคัญในการศึกษา และทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย	3
สมมติฐานในการวิจัย	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	4
ดินเปรี้ยวและดินเปรี้ยวจัด.....	4
สาเหตุการเกิดดินเปรี้ยว	5
ผลกระทบของดินเปรี้ยวต่อการเจริญเติบโตของพืช	6
ผลกระทบของค่า pH ต่อแร่ธาตุภายในดิน	7
การปรับปรุงแก้ไขปัญหาดินเปรี้ยว.....	18
ถ่านชีวภาพ	20
ความหมายของถ่านชีวภาพ	20
การปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยถ่านชีวภาพ	22
พริกชี้หนู	24

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพริก	24
พริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต	25
การปลูกและการดูแลรักษาพริก.....	25
สรีรวิทยาที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและการปรับตัวของพริก	26
1. ปริมาณรงควัตถุในใบ	26
2. ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช	27
3. บทบาทของอนุมูลอิสระและการเกิดปฏิกิริยาไลพิดเปอร์ออกซิเดชันในพืช	31
4. บทบาทของโพรตีนในเซลล์พืช.....	36
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี	40
วิธีการ	41
บทที่ 4 ผลการศึกษา	54
ผลการทดลองที่ 1	54
1. ความยาวต้นและความยาวราก	54
2. น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นอ่อน	54
ผลการทดลองที่ 2	56
1. คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของดินเปรี้ยวจัดและถ่านชีวภาพจากขี้ ข้าวโพด.....	56
2. ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน	57
3. ปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง.....	58
3.1 ค่าดัชนีความเขียวของใบ.....	58
3.2 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ.....	61
3.3 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี	63

3.4 ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม	64
3.5 ปริมาณแคโรทีนอยด์.....	66
4. ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง.....	67
4.1 ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (F_v/F_m)	67
4.2 ค่า Performance index (Pi)	68
5. การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการของต้นกล้าพริกขี้หนูชูเปอร์ฮอต	69
5.1 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้.....	69
5.2 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	70
5.3 ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์	70
6. การเจริญเติบโตทางลำต้นของต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต	71
6.1 ความสูงของลำต้น	71
6.2 พื้นที่ใบ	74
ผลการทดลองที่ 3	75
1. ค่า pH ของดิน	75
2. ปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง.....	76
2.1 ค่าดัชนีความเขียวของใบ.....	76
2.2 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ.....	79
2.3 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี	81
2.4 ปริมาณแคโรทีนอยด์.....	84
2.5 ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง	87
2.5.1 ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (F_v/F_m).....	87
2.5.2 ค่า Performance index (Pi)	88
3. การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการของต้นกล้าพริกขี้หนูชูเปอร์ฮอต	91

3.1 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้.....	91
3.2 ปริมาณโพรลิน.....	93
3.3 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	95
3.4 ปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน.....	98
3.5 ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์.....	100
3.6 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก.....	102
4. การศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไลพิดเปอร์ ออกซิเดชัน.....	105
4.1 ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์คะตะเลส.....	105
4.2 ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส.....	106
บทที่ 5.....	109
สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	109
อภิปรายผลการวิจัย.....	109
สรุปผลการวิจัย.....	121
ข้อเสนอแนะ.....	121
บรรณานุกรม.....	123
ประวัติผู้เขียน.....	138

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) และ ถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพด	57
---	----



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton reaction)	11
ภาพประกอบ 2 ลำดับของขั้นของการตรวจสอบการปลดปล่อยรังสีฟลูออเรสเซนซ์ในพีท	29
ภาพประกอบ 3 กลไกการกำจัด ROS ภายในเซลล์พีท	34
ภาพประกอบ 4 ลักษณะของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตอายุ 60 วัน หลังการเพาะเมล็ด	41
ภาพประกอบ 5 แผนผังการจัดวางตำแหน่งกระถางต้นพริกของแต่ละสิ่งทดลองในสภาพโรงเรือน	44
ภาพประกอบ 6 การศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดต่อความสามารถในการใช้แสง และ การเจริญเติบโตทางลำต้นของกล้าพริกในสภาพโรงเรือน	44
ภาพประกอบ 7 แผนผังการจัดวางแปลงย่อยในแต่ละสิ่งทดลองในสภาพแปลงทดลอง	49
ภาพประกอบ 8 การเจริญเติบโตของต้นอ่อนพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในดินเปรี้ยวจัด ที่ได้รับ การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุม	55
ภาพประกอบ 9 ก. ลักษณะของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร จากผิวดิน ข. ลักษณะถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ที่ใช้ในการ ทดลอง	56
ภาพประกอบ 10 ค่า pH ของดินเปรี้ยวจัดที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด เปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมในสภาพโรงเรือน	58
ภาพประกอบ 11 ค่าดัชนีความเขียวของใบต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต หลังการ ปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุม ในสภาพ โรงเรือน	60
ภาพประกอบ 12 ลักษณะต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต อายุ 28 วัน หลังการย้ายปลูก ใน สภาพโรงเรือน.....	61

ภาพประกอบ 13 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดเปรียบเทียบกับชุดควบคุมในสภาพโรงเรือน	62
ภาพประกอบ 14 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ในต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต ที่ได้รับการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในสภาพโรงเรือน	64
ภาพประกอบ 15 ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม ในต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต ที่ได้รับการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในสภาพโรงเรือน	65
ภาพประกอบ 16 ปริมาณแคโรทีนอยด์ในต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต ที่ได้รับการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในสภาพโรงเรือน	66
ภาพประกอบ 17 ค่า F_v/F_m ของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต ที่ได้รับการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในสภาพโรงเรือน	68
ภาพประกอบ 18 ค่า P_i ของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต ที่ได้รับการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในสภาพโรงเรือน	69
ภาพประกอบ 19 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในสภาพโรงเรือน ก. ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ข. ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ ค. ปริมาณสารมาลอน-ไดอัลดีไฮด์	71
ภาพประกอบ 20 ความสูงของลำต้นของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต ภายหลังจากปรับสภาพดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพด ในสภาพโรงเรือน	73
ภาพประกอบ 21 พื้นที่ใบของลำต้นของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตภายหลังจากปรับสภาพดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดในสภาพโรงเรือน	74
ภาพประกอบ 22 ค่า pH ของดินเปรี้ยวจัดหลังจากการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพด และปูนมาร์ลเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมในสภาพแปลงทดลอง	76
ภาพประกอบ 23 ค่าดัชนีความเขียวของใบต้นพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต	78

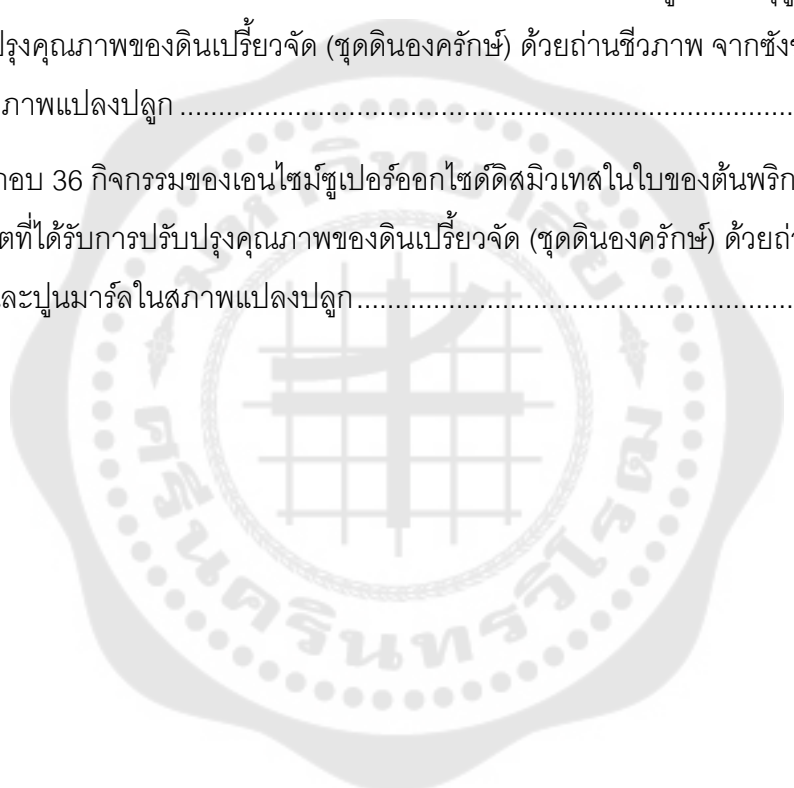
ภาพประกอบ 24 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของใบต้นพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดและปุ๋ยมาร์ลเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมในสภาพแปลงทดลอง	81
ภาพประกอบ 25 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของใบต้นพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดและปุ๋ยมาร์ลเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมในสภาพแปลงทดลอง	84
ภาพประกอบ 26 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของใบต้นพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดและปุ๋ยมาร์ลเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมในสภาพแปลงทดลอง	86
ภาพประกอบ 27 ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (F_v/F_m) ของใบต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพ จากขี้ข้าวโพดและปุ๋ยมาร์ลในสภาพแปลงปลูก	88
ภาพประกอบ 28 ค่า Performance index (Pi) ของใบต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพด และปุ๋ยมาร์ลในสภาพแปลงปลูก	90
ภาพประกอบ 29 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของใบต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพ จากขี้ข้าวโพดและปุ๋ยมาร์ลในสภาพแปลงปลูก	93
ภาพประกอบ 30 ปริมาณโพรลีนของใบต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพ จากขี้ข้าวโพดและปุ๋ยมาร์ลในสภาพแปลงปลูก.....	95
ภาพประกอบ 31 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของใบต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพ จากขี้ข้าวโพดและปุ๋ยมาร์ลในสภาพแปลงปลูก	98
ภาพประกอบ 32 ปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนของใบต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพ จากขี้ข้าวโพดและปุ๋ยมาร์ลในสภาพแปลงปลูก	100

ภาพประกอบ 33 ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ของใบต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่
ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพ จากขี้ข้าวโพดและ
ปุ๋ยมาร์ลในสภาพแปลงปลูก 102

ภาพประกอบ 34 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของใบต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่
ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพ จากขี้ข้าวโพดและปุ๋น
มาร์ลในสภาพแปลงปลูก 104

ภาพประกอบ 35 กิจกรรมของเอนไซม์อะไมเลสในใบของต้นพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่
ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพ จากขี้ข้าวโพดและปุ๋น
มาร์ลในสภาพแปลงปลูก 106

ภาพประกอบ 36 กิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดีสมิวเทสในใบของต้นพริกชี้หนูสายพันธุ์
ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพ จากขี้
ข้าวโพดและปุ๋นมาร์ลในสภาพแปลงปลูก 108



บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ในประเทศไทยมีการใช้ประโยชน์จากที่ดินเพื่อทำการเกษตรมากถึง 149.24 ล้านไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 46.53 ของพื้นที่ทั้งประเทศ แต่ในปัจจุบัน พื้นที่การเกษตรส่วนใหญ่กำลังประสบปัญหาหมอกพิษทางดิน เนื่องจากการสะสมของโลหะหนัก การชะล้างธาตุอาหารและการพังทลายของดิน รวมทั้งปัญหาดินต่าง ดินเค็ม และดินเปรี้ยว ซึ่งส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช และเป็นปัญหาที่สำคัญของประเทศ เนื่องจากพื้นที่ดินเสื่อมคุณภาพมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องมากกว่าปีละ 1 ล้านไร่

ดินเปรี้ยวและดินเปรี้ยวจัด คือ ดินที่มีค่า pH ต่ำกว่า 5.5 ในประเทศไทยพบการกระจายตัวของดินกลุ่มนี้ประมาณ 143 ล้านไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 44.6 ของพื้นที่ทั้งประเทศ เมื่อค่า pH ของดินลดลงต่ำกว่า 5.5 ธาตุอาหารพืชหลายชนิดจะอยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ และถูกชะล้างจากดิน ในขณะเดียวกัน อะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ที่เพิ่มสูงขึ้นในสารละลายดินจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาของพืช พื้นที่ดินเปรี้ยวในประเทศไทยพบได้มากบริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำภาคกลางและภาคตะวันออก ซึ่งเป็นพื้นที่ผลิตพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ สาเหตุสำคัญของดินเปรี้ยวในประเทศไทยมักเกิดจากวัตถุต้นกำเนิดดินที่มีสารประกอบกำมะถันในเนื้อดินมาก การทำการเกษตรที่ใช้ปุ๋ยเคมีมากเกินไป รวมทั้งการชะล้างหน้าดินจากฝนกรดซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการตัดไม้ทำลายป่าและการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ

ดังนั้นการศึกษาเพื่อหาแนวทางแก้ไขปัญหาดินเปรี้ยวทั้งในด้านการปรับปรุงคุณภาพของดินและกลไกการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมของพืชที่เจริญเติบโตในดินเปรี้ยวจึงเป็นสิ่งจำเป็นและควรดำเนินการอย่างเร่งด่วน ซึ่งปัญหาการบุกรุกและทำลายพื้นที่ป่าเพื่อรองรับการขยายตัวของเมืองและการเพิ่มพื้นที่ทางการเกษตร ส่งผลให้ธาตุคาร์บอนที่ถูกสะสมอยู่ในมวลชีวภาพถูกปลดปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศในรูปของแก๊สต่าง ๆ ผ่านกระบวนการเผาไหม้และการหมักของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและปศุสัตว์ ทำให้อุณหภูมิของชั้นบรรยากาศโลกสูงขึ้นจนส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมอย่างมาก การนำเทคโนโลยีการผลิตถ่านชีวภาพ (biochar) มาประยุกต์ใช้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร จึงสามารถช่วยลดการปล่อยธาตุคาร์บอนในรูปของ

สารประกอบต่าง ๆ ลงได้ และถ่านชีวภาพนี้ยังสามารถใช้เป็นวัสดุในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินได้อีกด้วย

ถึงแม้ว่าพืชหลายชนิดจะมีกลไกการปรับตัวเพื่อให้สามารถเจริญเติบโตได้ในดินเปรี้ยว แต่การให้ผลผลิตยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ประกอบกับในบางพื้นที่มักประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำในช่วงฤดูแล้ง จึงไม่สามารถปลูกพืชได้ พริกเป็นพืชทนแล้งกลุ่มหนึ่งที่ปลูกได้ทุกฤดูกาลและสามารถปลูกได้ทั่วประเทศของประเทศไทย เป็นพืชที่ต้องการน้ำน้อย เจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ดีในดินเกือบทุกชนิด และเป็นพืชผักเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อวิถีชีวิตของคนไทย ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกพริกประมาณ 342,398 ไร่ มีผลผลิตรวม 171 ล้านตัน การปลูกพริกจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการปลูกพืชในช่วงฤดูแล้งที่มีปริมาณน้ำทำการเกษตรจำกัด อย่างไรก็ตาม พริกจะเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ดีในดินที่มีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.0 ถึง 6.5 ดังนั้นในสภาพดินเปรี้ยวจึงต้องมีการปรับค่า pH ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดินของพริกก่อนการเพาะปลูก

การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพริกและนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินในพื้นที่ดินเสื่อมโทรมเพื่อการใช้ประโยชน์จากที่ดินให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการปลูกพริกและพืชเศรษฐกิจชนิดอื่น ๆ ต่อไปในอนาคต

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. ศึกษาผลของการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อนพริกชี้หนุสสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในสภาพหลอดทดลอง
2. ศึกษาผลของการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง และการเกิดปฏิกริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันของพริกชี้หนุสสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในสภาพโรงเรือน
3. ศึกษาผลของการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง และกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันของพริกชี้หนุสสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในสภาพแปลงทดลอง

ความสำคัญของการวิจัย

ในสภาพดินเปรี้ยวจัดที่มีค่า pH ต่ำกว่า 4.3 ไอออนของธาตุโลหะต่าง ๆ เช่น อะลูมิเนียม ไอออน (Al^{3+}) คอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) จะเพิ่มสูงขึ้นในสารละลายดิน ส่งผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืช ในขณะที่ไอออนหลายชนิด โดยเฉพาะแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่เป็นธาตุอาหารสำคัญของพืชจะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ ยิ่งไปกว่านั้น ในสภาพที่ดินมีอะลูมิเนียมไอออนความเข้มข้นสูง จะส่งผลให้รากมีความสามารถในการดูดซึมธาตุแคลเซียมลดลง ซึ่งแคลเซียมไอออนมีบทบาทสำคัญในกระบวนการส่งสัญญาณภายในเซลล์ เพื่อกระตุ้นให้พืชเกิดกลไกการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ดังนั้น การปรับปรุงคุณสมบัติของดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดที่มีฤทธิ์เป็นด่าง จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาปรับปรุงและแก้ไขปัญหาดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) เพื่อการปลูกพริกชี้หนุสสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตและนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการปลูกพริกและพืชเศรษฐกิจชนิดอื่น ๆ ต่อไป ในอนาคต

สมมติฐานในการวิจัย

1. การใช้ถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดเป็นวัสดุสำหรับการปรับปรุงดินคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้ค่า pH ของดินเพิ่มสูงขึ้น
2. การปลูกพริกชี้หนุสสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในดินที่ถูกปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีด้วยถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพด จะช่วยให้ปฏิกริยาแลพิดเปอร์ออกซิเดชันในส่วนต่าง ๆ ของต้นพริกลดลง
3. ต้นพริกชี้หนุสสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดที่ถูกปรับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีด้วยถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพด จะมีอัตราการเจริญเติบโตทางลำต้นสูงขึ้น และให้ผลผลิตสูงกว่าต้นพริกที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุม

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ดินเปรี้ยวและดินเปรี้ยวจัด
2. ถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพด
3. พริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต
4. การตอบสนองทางสรีรวิทยาบางประการเมื่อพืชได้รับความเครียดทางกายภาพ

ดินเปรี้ยวและดินเปรี้ยวจัด

ดินเปรี้ยว หมายถึง ดินที่มีค่า pH ต่ำกว่า 7 ซึ่งพบได้หลายสาเหตุ เช่น การชะล้างไอออนบวกที่มีฤทธิ์เป็นด่างในดินโดยฝนกรด รวมทั้งการใช้ปุ๋ยเคมีทางการเกษตรมากเกินไป ในขณะที่ดินเปรี้ยวจัด หมายถึง ดินที่มีค่า pH ต่ำกว่า 4.0 ซึ่งมักมีสาเหตุมาจากการสะสมของกรดกำมะถันภายในชั้นดิน ทำให้เกิดกรดรุนแรง อย่างไรก็ตาม นักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความหมายของดินเปรี้ยวจัด ตามลักษณะการเกิดและการสะสมของกรดกำมะถันไว้หลายความหมาย ดังนี้

ในปี ค.ศ. 1963 Moormann ได้ให้ความหมายของดินเปรี้ยวจัดไว้ว่า “ดินเปรี้ยวจัดเป็นดินที่มีการสะสมของแร่ไพไรต์ในชั้นดิน มักเกิดการสะสมในพื้นที่ที่มีน้ำท่วมขัง หรือพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเล เมื่อแร่ไพไรต์ถูกออกซิไดซ์จนกลายเป็นสารละลายกรดและสะสมอยู่ในดินและทำให้ค่า pH ของดินลดลงต่ำกว่า 4.0 ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชและจุลินทรีย์ในดิน” (Moormann, 1963) พื้นที่ดินเปรี้ยวและดินเปรี้ยวจัดสามารถพบได้ทั่วโลกในทุกเขตภูมิอากาศ โดยเฉพาะพื้นที่ทางทิศตะวันตกของทวีปแอฟริกา พื้นที่ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของทวีปอเมริกาใต้ และในเอเชียใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Tasnee & Sorasith, 1986) ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ทางการเกษตรทั่วโลกมากกว่าร้อยละ 30 ถึง 40

ในประเทศไทยพบดินเปรี้ยวจัดกระจายตัวอยู่ในภูมิภาคต่าง ๆ ซึ่งพบมากบริเวณที่ราบลุ่มกรุงเทพฯ ตลอดจนพื้นที่ราบลุ่มบริเวณต่าง ๆ ของภาคกลาง ดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำชายฝั่งทะเลทางภาคตะวันออกและภาคใต้ เป็นต้น ดินเปรี้ยวจัดที่พบมักมีเนื้อดินสีเทาเข้มถึงสีดำอัดตัวแน่น ยากต่อการระบายน้ำและอากาศ ปัญหาดินเปรี้ยวในประเทศไทยสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ความเป็นกรดที่เกิดจากวัตถุต้นกำเนิดดิน การชะล้างหน้าดินเป็นเวลานาน

และการใช้ปุ๋ยเคมีมากเกินไป (Baquy, Li, Xu, Mehmood, & Xu, 2017; Samac & Tesfaye, 2003; Yang et al., 2015)

สาเหตุการเกิดดินเปรี้ยว

ปัญหาดินเปรี้ยวหรือดินเปรี้ยวจัดที่เกิดขึ้นในพื้นที่ต่าง ๆ อาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ดังนี้

1. การเกิดดินเปรี้ยวจากการชะล้างของฝนกรดเป็นเวลานาน โดยเฉพาะในบริเวณเขตอุตสาหกรรมหรือบริเวณเขตภูเขาไฟที่ยังปะทุและปลดปล่อยแก๊สและหมอกควันออกมา มักมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์อยู่ในอากาศจำนวนมาก เมื่อแก๊สเหล่านี้เกิดปฏิกิริยากับไอน้ำในอากาศจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เมื่อน้ำและกรดเหล่านี้รวมตัวกันเป็นฝนกรดและตกลงมาสู่พื้นดิน ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายดินจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ไอออนบวกที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น โซเดียมไอออน (Na^+) แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) ที่สะสมอยู่ในสารละลายดินลดลง ส่งผลให้ไอออนบวกเหล่านี้มีปริมาณน้อยลง ดินจึงมีค่า pH ลดลง แสดงถึงความเป็นกรดที่เพิ่มมากขึ้น

2. การเกิดดินเปรี้ยวจากการใช้ปุ๋ยเคมีเป็นระยะเวลาอันยาวนาน โดยเฉพาะการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม ซึ่งทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) ไฮโดรเจนไอออนจะถูกปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปของธาตุไนโตรเจน นอกจากนี้กระบวนการสลายของอินทรีย์วัตถุในดิน ยังก่อให้เกิดกรดอินทรีย์หลายชนิดซึ่งทำให้ค่า pH ของดินลดลงได้

3. การเกิดดินเปรี้ยวที่มีสาเหตุมาจากวัตถุต้นกำเนิดดิน เช่น การสลายตัวของหินที่เป็นวัตถุต้นกำเนิดดินหรือการท่วมขังของน้ำทะเล (sea water sediments) น้ำกร่อย (brackish water sediments) บริเวณปากแม่น้ำ หรือพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลและป่าชายเลนทำให้เกิดดินตะกอนที่มีสิ่งมีชีวิตเจริญเติบโตอยู่ และเมื่อเกิดการทับถมของอินทรีย์วัตถุ ซัลเฟตรีดิวซิงแบคทีเรีย (sulphate-reducing bacteria) สกุล *Desulfovibrio* และ *Desulfotomaculum* จะรีดิวซ์ซัลเฟตให้อยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) โดยมีอินทรีย์วัตถุเป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ที่สะสมอยู่ในดิน เกิดเป็นสารประกอบเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS_2) หรือแร่ไพไรต์ (pyrite) การเกิดและการสะสมของแร่ไพไรต์ดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ เมื่อดินบริเวณที่มีการสะสมของแร่ไพไรต์เกิดการระบายน้ำหรือมีการถ่ายเท

อากาศเกิดขึ้น กระบวนการสะสมแร่ไฟไรต์จึงสิ้นสุดลง ในสภาวะที่มีการถ่ายเทอากาศได้ดี แร่ไฟไรต์จะถูกออกซิไดซ์โดยแก๊สออกซิเจน (O_2) เกิดเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และกำมะถันซึ่มเข้าสู่เนื้อดิน ทำให้ค่า pH ของดินลดลง กำมะถันที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์โดยแบคทีเรียสกุล *Thiobacillus* ได้แก่ *T. thioparus*, *T. thiooxidans* และ *T. ferrooxidans* ให้กลายเป็นกรดกำมะถัน ซึ่งปฏิกิริยานี้จะดำเนินไปอย่างช้า ๆ ขณะเดียวกันแร่ไฟไรต์จะทำปฏิกิริยากับเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ได้เป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) อนุมูลซัลเฟต (SO_4^{2-}) และไฮโดรเจนไอออน (H^+) จากการเกิดปฏิกิริยานี้ทำให้ดินมีค่า pH ลดลงต่ำกว่า 4.0 ซึ่งที่จุดนี้แบคทีเรีย *T. ferrooxidans* จะทำหน้าที่ออกซิไดซ์เฟอร์รัสไอออนให้กลับมาเป็นเฟอร์ริกไอออน ซึ่งทำให้กระบวนการออกซิเดชันของแร่ไฟไรต์ดำเนินต่อไป นอกจากนี้ แร่ไฟไรต์ยังสามารถถูกออกซิไดซ์โดยตรงในสภาวะที่ดินมีประจุบวก เช่น โพแทสเซียมไอออน (K^+) โซเดียมไอออน (Na^+) และไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เกิดเป็นสารประกอบจาร์ไซต์ (Jarosite) ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) สะสมอยู่ในเนื้อดิน ซึ่งสารประกอบจาร์ไซต์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นจุดสีเหลืองคล้ายผงกำมะถัน ในสภาวะเช่นนี้แร่จาร์ไซต์จะสลายตัวได้ยาก แต่ถ้าดินอยู่ในสภาวะที่มีน้ำท่วมขังแร่จาร์ไซต์จะถูกรีดิวซ์ให้สลายตัวได้เฟอร์รัสไอออน ซัลเฟตไอออน และโพแทสเซียมไอออน ดังนั้นชั้นของแร่จาร์ไซต์จึงมีสภาพไม่คงที่ มีการสร้างและสลายตัวอยู่ตลอดเวลา (Mossor-Pietraszewska, 2001; Traore, Hatchikian, Gall, & Belaich, 1982)

ผลกระทบของดินเปรี้ยวต่อการเจริญเติบโตของพืช

พื้นที่ที่ประสบปัญหาดินเปรี้ยวหรือดินเปรี้ยวจัดในเขตร้อนชื้นเกือบทั้งหมดจะพบไอออนของอะลูมิเนียม ไฮโดรเจน แมงกานีส และเหล็ก ละลายอยู่มากในสารละลายดิน ในขณะที่ไอออนของแคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม มีแนวโน้มลดลง จึงมักส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืช เนื่องจากรากของพืชมักได้รับความเสียหายจากความ เป็นกรดของดิน รวมทั้งความเป็นพิษจากไอออนต่าง ๆ ที่มีมากเกินไปในสารละลายดิน ทำให้ราก เจริญเติบโตช้า รากสั้น มีชั้นเซลล์หนากว่าปกติ เซลล์ปลายรากไม่แข็งแรงและถูกเชื้อจุลินทรีย์เข้า ทำลายได้ง่าย (Baquy et al., 2017; Hecht-Buchholz & Foy, 1981) นอกจากนี้ ค่า pH ของดิน ยังมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงรูปของธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช และอาจส่งผลให้ พืชแสดงอาการขาดธาตุต่าง ๆ ได้ เช่น ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และแคลเซียม เป็นต้น เนื่องจาก ธาตุอาหารเหล่านี้สามารถละลายน้ำได้ดีที่ค่า pH ระหว่าง 5.8 ถึง 6.3 อย่างไรก็ตาม พืชต่างชนิด กันสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีค่า pH แตกต่างกันได้ เช่น พืชตระกูลถั่วจะเจริญเติบโตได้ดี

ในดินที่มีค่า pH เป็นกลางหรือเบสอ่อน ในขณะที่มันเทศหรือมันฝรั่งสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่เป็นกรด ในขณะที่พืชส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตได้ดี ในดินที่มีค่า pH อยู่ระหว่าง 6 ถึง 7 นอกจากพืชแล้ว ค่า pH ของดินยังส่งผลต่อเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินซึ่งเกี่ยวข้องกับการหมุนเวียนของแร่ธาตุต่าง ๆ ภายในดิน แบคทีเรียจะสามารถทำงานได้ดีในสภาวะที่เป็นกรดอ่อนหรือเป็นกลาง เมื่อดินมีความเป็นกรดมากขึ้น กิจกรรมของแบคทีเรียจึงลดลง ทำให้อัตราการย่อยสลายปุ๋ยอินทรีย์เกิดขึ้นได้ยากกว่าดินปกติ (Tasnee & Sorasith, 1986)

ผลกระทบของค่า pH ต่อแร่ธาตุภายในดิน

แร่ธาตุในดินเป็นสิ่งที่พืชจำเป็นต้องได้รับอย่างเพียงพอเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบและตัวเร่งกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืช เช่น กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง กระบวนการหายใจ และการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ เป็นต้น ธาตุอาหารที่พืชได้รับจากสิ่งแวดล้อมและจำเป็นต้องใช้ในการเจริญเติบโตมีประมาณ 16 ชนิด ในสภาพดินที่แตกต่างกัน จะมีปริมาณของธาตุอาหารของพืชที่แตกต่างกัน โดยความอุดมสมบูรณ์ของธาตุอาหารภายในดินยังเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดรูปแบบของสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อมนั้น ๆ อีกด้วย ซึ่งในดินเปรี้ยวหรือดินเปรี้ยวจัด มักมีไอออนของธาตุเหล็กและอะลูมิเนียมสะสมในสารละลายดินมากถึงระดับที่ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช ในขณะที่ฟอสฟอรัส แคลเซียม และแมกนีเซียมมักอยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถดูดไปใช้ได้ พืชจึงแสดงอาการขาดแร่ธาตุต่าง ๆ เหล่านี้ โดยธาตุอาหารที่มักเป็นปัญหาต่อการปลูกพืชในดินกรด ได้แก่

1. ธาตุฟอสฟอรัส (phosphorus) เป็นธาตุอาหารหลักที่พืชใช้ในกระบวนการเจริญเติบโต เป็นองค์ประกอบของสารสำคัญหลายชนิด เช่น อะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (Adenosine triphosphate หรือ ATP) ฟอสโฟลิพิด กรดนิวคลีอิก เป็นต้น นอกจากนี้ ฟอสฟอรัสยังมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ทั้งในส่วนของโครงสร้างรากแขนงและรากฝอย กระตุ้นการออกดอก ลดอาการเหี่ยวใบจากการได้รับไนโตรเจนมากเกินไป โดยพืชจะดูดใช้ฟอสฟอรัสในรูปของไฮโดรเจนฟอสเฟต (HPO_4^{2-}) หรือไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (H_2PO_4^-) (Uchida, 2000) อย่างไรก็ตาม พืชที่เจริญเติบโตในดินเนื้อละเอียดจะได้รับฟอสเฟตต่ำกว่าดินเนื้อหยาบ เนื่องจากดินเนื้อละเอียดจะดูดตรึงฟอสเฟตไว้ในอนุภาคของดินได้มากกว่าดินเนื้อหยาบ นอกจากนี้ สารประกอบฟอสเฟตทั้งที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติหรือการใส่ปุ๋ยฟอสเฟต อาจถูกเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ยากจากการทำปฏิกิริยากับไอออนและสารประกอบต่าง ๆ เรียกว่า กระบวนการดูดตรึงฟอสฟอรัส (phosphorus fixation) ซึ่งกระบวนการดูดตรึงฟอสฟอรัสสามารถแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการ ได้แก่

1. การตกตะกอน (precipitation) เกิดจากฟอสเฟตในดินทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น อะลูมิเนียม เหล็ก และแคลเซียม เป็นต้น ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ยาก

2. การดูดซับ (adsorption) เกิดจากการดูดซับฟอสเฟตโดยอนุภาคดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติของดินนั้น ๆ เช่น ชนิดและลักษณะเนื้อดิน ค่า pH ปริมาณแร่ดินเหนียว ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน และการขังน้ำของดิน เป็นต้น

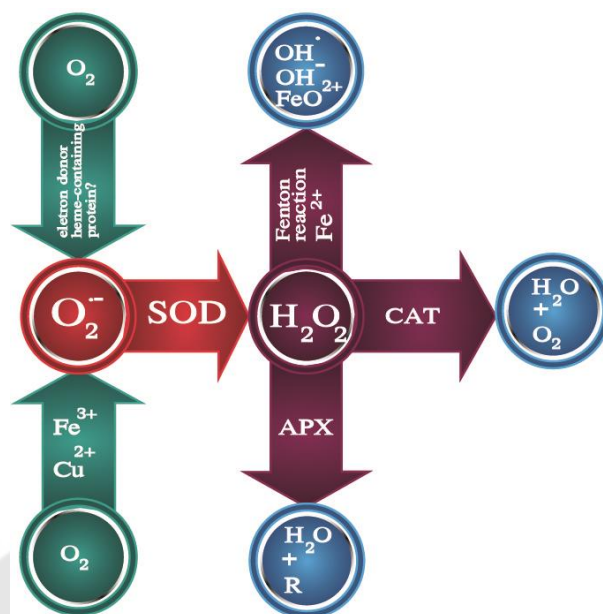
ลักษณะดินเปรี้ยวที่พบในประเทศไทยมักมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชน้อยมากหรือประมาณ 3.4 ถึง 14.8 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เนื่องจากมีไฮดรอกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีสอยู่ในสารละลายดินมาก ทำให้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในดินเปรี้ยวที่มีค่า pH ต่ำ ฟอสเฟตส่วนใหญ่จะถูกดูดซับให้อยู่ในรูปเฟอริกฟอสเฟตและอะลูมิเนียมฟอสเฟต ประกอบกับการดูดซับฟอสเฟตในดินที่มีปริมาณแร่ดินเหนียวสูงจะเกิดขึ้นได้มากกว่าในดินที่มีแร่ดินเหนียวต่ำ ในพืชที่แสดงอาการขาดฟอสฟอรัส มักปรากฏอาการให้เห็นในใบแก่ก่อน เนื่องจากฟอสฟอรัสสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายภายในต้นพืช โดยแผ่นใบมักมีสีเขียวเข้มและสีม่วงเนื่องจากการสะสมของสารแอนโทไซยานิน ปลายใบและขอบใบใหม่ ใบม้วนงอ ใบของมะเขือเทศและพริกจะมีสีม่วงบริเวณใต้ใบและเส้นใบ ใบมีขนาดเล็กกว่าปกติ ม้วนงอ ขอบใบมีสีชมพู พืชแก่ช้ำ ออกดอกช้า ติดผลและเมล็ดน้อย การเจริญเติบโตของรากหยุดชะงักและผลผลิตลดลง (Malavolta, Graner, Coury, Sobro, & Pacheco, 1995; Uchida, 2000)

2. ธาตุแมกนีเซียมเป็นธาตุที่เป็นแคตไอออนและถูกชะล้างได้ง่าย ดังนั้นในดินเนื้อละเอียดจึงมีแมกนีเซียมในปริมาณมากกว่าดินเนื้อหยาบ ธาตุแมกนีเซียมสามารถทำปฏิกิริยากับธาตุอื่นและเกิดเป็นสารประกอบได้ง่าย จึงสะสมในดินในรูปของแร่และหินหลายชนิด พืชสามารถดูดใช้ธาตุแมกนีเซียมได้ในรูปของแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ซึ่งมีอยู่น้อยมากในดิน และเกิดอย่างแข่งขันกับแคลเซียมไอออนและโพแทสเซียมไอออน บางครั้งจึงอาจพบว่าพืชที่เจริญเติบโตในดินที่มีแมกนีเซียมมากแต่ยังคงแสดงอาการขาดธาตุแมกนีเซียมได้เช่นกัน ในพืชหลายชนิดมีความต้องการธาตุแมกนีเซียมในปริมาณมาก เช่น ยาสูบ ข้าวฟ่าง ข้าวโพด ลำไย ลิ้นจี่ และพืชผักต่าง ๆ เป็นต้น เนื่องจากธาตุแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบสำคัญของคลอโรฟิลล์ นอกจากนี้ ยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์และเป็นโคแฟกเตอร์สำหรับเอนไซม์ในการ

ถ่ายโอนฟอสเฟตจากโมเลกุลของเอทีพี (adenosine triphosphate หรือ ATP) (Guo et al., 2015) ในพืชที่แสดงอาการขาดธาตุแมกนีเซียมมักปรากฏอาการให้เห็นที่ใบแก่ก่อน เนื่องจากธาตุแมกนีเซียมสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายภายในต้นพืช (Uchida, 2000) โดยพืชแต่ละชนิดจะแสดงอาการขาดธาตุแมกนีเซียมแตกต่างกัน อาการที่แสดงให้เห็นโดยทั่วไป ได้แก่ ใบล่างเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เส้นใบเขียว จนกระทั่งใบเปลี่ยนเป็นสีขาวและน้ำตาล ใบกรอบ หักง่าย เนื่องจากแมกนีเซียมมีส่วนในการสังเคราะห์โปรตีนในพืช การขาดแมกนีเซียมจึงทำให้พืชแคระแกร็น ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง (Guo et al., 2015)

3. ธาตุเหล็ก เป็นจุลธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช พืชดูดใช้ธาตุเหล็กส่วนใหญ่ในรูปของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเหล็กคีเลต (Fe-chelate) ส่วนเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) สามารถละลายน้ำได้น้อยในดิน จึงถูกดูดใช้ได้น้อยกว่า การดูดใช้ธาตุเหล็กของพืชจะเกิดอย่างแข่งขันกับไอออนของธาตุหลายชนิด เช่น แมงกานีส ทองแดง แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และสังกะสี เป็นต้น เนื่องจากธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบในกระบวนการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ จึงเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและการหายใจระดับเซลล์ของพืช โดยธาตุเหล็กจะสะสมอยู่ในคลอโรพลาสต์มากถึงร้อยละ 80 และกว่าร้อยละ 60 จะถูกสะสมอยู่ในส่วนของไทลาคอยด์ ดังนั้นหากพืชขาดธาตุเหล็ก จะส่งผลต่อการสร้างเยื่อหุ้มไทลาคอยด์และปริมาณคลอโรฟิลล์ (Connolly & Guerinet, 2002) นอกจากนี้ ธาตุเหล็กยังเป็นส่วนประกอบของฮีโมโพรตีน (heme protein) ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยวงแหวนพอร์ไฟริน และธาตุเหล็ก โดยเฉพาะไซโทโครมออกซิเดส (cytochrome oxidase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหายใจของพืช เอนไซม์คาตาเลส (catalase) และเพอร์ออกซิเดส (peroxidase) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการทำลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในคลอโรพลาสต์ นอกจากนี้ ธาตุเหล็กยังเป็นองค์ประกอบของไซโทโครม (cytochrome) ที่มีบทบาทสำคัญในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนและการสังเคราะห์ ATP ในพืช (Ejraei, 2013) ธาตุเหล็กยังเป็นส่วนประกอบของเฟอร์ริดอกซิน ซึ่งเป็นนอนฮีโมโพรตีนที่ทำหน้าที่ส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การรีดิวซ์ไนไตรต์ การรีดิวซ์ซัลเฟต และการตรึงไนโตรเจนของพืชตระกูลถั่ว จากการศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ต้านออกซิเดชัน (antioxidative enzyme) ในใบของข้าว (*Oryza sativa* L. cv. Taichung Native 1) ที่ถูกชักนำให้เกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันด้วยธาตุเหล็ก พบว่า การได้รับสารละลาย $FeSO_4$ ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ช่วยเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์แอสคอร์เบท-เปอร์ออกซิเดส (ascorbate peroxidase) และกลูตาไทโอนรีดักเตส (glutathione reductase)

ให้สูงขึ้นถึง 3 และ 1.5 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้รับสารละลาย FeSO_4 (Fang, Wang, Lin, & Kao, 2001) ในพืชที่แสดงอาการขาดธาตุเหล็ก มักปรากฏอาการให้เห็นในใบอ่อนก่อน เนื่องจากธาตุเหล็กถูกเคลื่อนย้ายได้ช้า พืชที่ขาดธาตุเหล็กจะมีการเจริญเติบโตลดลง เนื้อใบมีสีเหลืองแต่เส้นใบยังคงเขียวอยู่ (green skeleton of veins) หากอาการขาดธาตุเหล็กรุนแรงมากขึ้น ใบจะเปลี่ยนเป็นสีขาว ผลเจริญผิดปกติ และมักพบอาการขาดธาตุเหล็กในดินต่างหรือดินปูน (calcareous soils) หรือดินที่มีฟอสฟอรัสสูง ซึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบเหล็กฟอสเฟตที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Connolly & Guerinot, 2002; Ejraei, 2013) ซึ่งจากการศึกษาการเจริญเติบโตของต้นมะเขือเทศในระบบไฮโดรโพรนิคส์ โดยให้ต้นมะเขือเทศได้รับสารละลายธาตุอาหารที่มีธาตุเหล็กความเข้มข้นต่างๆ เปรียบเทียบกับต้นมะเขือเทศที่ไม่มีธาตุเหล็กในสารละลายธาตุอาหาร พบว่า ต้นมะเขือเทศมีน้ำหนักสดสูงสุด (501.08 และ 500.45 กรัมต่อกระถาง) และน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ (204.28 และ 204.62 กรัมต่อกระถาง) เมื่อได้รับสารละลายธาตุอาหารที่มีธาตุเหล็กความเข้มข้น 0.8 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การลดหรือเพิ่มความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายธาตุอาหารจะทำให้น้ำหนักของต้นมะเขือเทศลดลง ขณะที่ปริมาณคลอโรฟิลล์เฉลี่ยในใบสูงสุด 3.63 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีธาตุเหล็กความเข้มข้น 0.8 ถึง 5 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าการได้รับธาตุเหล็กในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ (Ejraei, 2013) ในดินเปรี้ยวหรือดินเปรี้ยวจัดที่มีความเป็นกรดสูงจะมีไอออนของธาตุเหล็กละลายอยู่ในสารละลายดินมากจนเกิดความเป็นพิษต่อพืชเนื่องจากเหล็กเป็นตัวเร่งให้เกิดอนุมูลอิสระที่สามารถทำลายโครงสร้างของลิวดีน โปรตีน หรือดีเอ็นเอภายในเซลล์พืชได้ (Connolly & Guerinot, 2002) ในสภาพน้ำขังเฟอร์ริกไอออนจะเปลี่ยนรูปเป็นเฟอร์รัสไอออนหากในสารละลายดินมีเฟอร์รัสไอออนมากเกินไปจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้เนื่องจากเฟอร์รัสไอออนจะเปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ให้เปลี่ยนเป็นไฮดรอกซิลแรดิคัล ($\text{OH}\cdot$) ในปฏิกิริยาเฟนตอน (Fenton reaction) ดังภาพประกอบ 1 (Connolly & Guerinot, 2002; Fang et al., 2001)



ภาพประกอบ 1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเฟนตอน (Fenton reaction)

อย่างไรก็ตาม ความเป็นพิษของธาตุเหล็กต่อพืชมีการศึกษาอย่างกว้างขวางในพืชหลายชนิด โดยเฉพาะข้าว เนื่องจากข้าวเป็นพืชที่นิยมใช้ปลูกในพื้นที่ที่ประสบปัญหาดินเปรี้ยวหรือพื้นที่ที่มักมีน้ำขัง ซึ่งพบว่า ความเป็นพิษของเหล็กที่พบในข้าวจะทำให้ใบล่างของข้าวมีจุดสีน้ำตาลเริ่มจากปลายใบและแผ่ขยายไปทั่วแผ่นใบ เมื่อมีอาการรุนแรงขึ้น จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลไหม้ทั่วทั้งแผ่นใบ ทำให้การเจริญเติบโตของข้าวชะงัก แคระแกรน มีการแตกกอลดลง รากเจริญเติบโตช้า มีรากน้อย มักพบรากมีสีน้ำตาลถึงสีดำ รวมทั้งพบลักษณะเมล็ดลีบอีกด้วย จากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันและกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในการกำจัดอนุมูลอิสระในใบของข้าว (*Oryza sativa* L. cv. Taichung Native 1) ที่ได้รับธาตุเหล็ก ($FeSO_4$) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ เปรียบเทียบกับต้นข้าวที่ไม่ได้รับธาตุเหล็ก (0 มิลลิโมลาร์) พบว่า ใบข้าวที่ได้รับธาตุเหล็กมีปริมาณของสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ สูงกว่าใบของต้นข้าวที่ไม่ได้รับธาตุเหล็กถึงร้อยละ 40 (Fang et al., 2001) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันยังส่งผลกระทบต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมต่าง ๆ ของพืช ทำให้อัตราการเจริญเติบโตของพืชลดลง จากการศึกษาผลของธาตุเหล็กต่อการเจริญเติบโตและการสะสมเหล็กในต้นอ่อนของต้นกก (*Phragmites australis* (Cav.) Trin ex. Steudel) โดยเติมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) ความเข้มข้น 0 ถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายธาตุอาหารสูตร Rorison's พบว่า น้ำหนักแห้งของราก (root) ลำต้นใต้ดิน (rhizome) และยอด (shoot) ของต้นกกที่ได้รับธาตุเหล็กความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่ำกว่าต้นกกที่ไม่ได้รับธาตุเหล็ก (0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ถึง 21.45 6.25 และ 5 เท่า ตามลำดับ เมื่อศึกษา

ปริมาณธาตุเหล็กที่สะสมในส่วนต่างๆ ของต้นกก พบว่า ต้นกกที่ได้รับธาตุเหล็กความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการสะสมธาตุเหล็กใน ราก ลำต้นใต้ดิน และยอด สูงกว่าต้นกกไม่ได้รับธาตุเหล็กถึง 107, 585, 35 เท่า ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การได้รับธาตุเหล็กความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วยให้ต้นกกมีน้ำหนักแห้งของราก ลำต้นใต้ดิน และยอด สูงที่สุด (Batty & Younger, 2003)

4. ธาตุแมงกานีส เป็นจุลธาตุในรูปของแคตไอออนพืชดูดใช้ธาตุแมงกานีส ในรูปของแมงกานีสไอออน (Mn^{2+}) แต่การสะสมในดินมักพบอยู่ในรูปของแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) ค่า pH ของดินมีผลต่อความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสเช่นเดียวกับธาตุเหล็ก โดยสมดุลของความเข้มข้นของแมงกานีสไอออนกับแมงกานีสออกไซด์ ขึ้นอยู่กับความเป็นกรดของดิน ดินที่มีค่า pH ต่ำกว่า 5.5 ธาตุแมงกานีสจะอยู่ในรูปของแมงกานีสไอออนและส่งผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตของพืช เมื่อค่า pH ลดลง ความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสจะลดลงจนพืชแสดงอาการขาดธาตุแมงกานีส อย่างไรก็ตาม ธาตุแมงกานีสอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้ง่าย เนื่องจากระดับความเข้มข้นที่เป็นประโยชน์และระดับความเข้มข้นที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ การใช้ธาตุแมงกานีสของพืชจะแข่งขันกับธาตุเหล็ก ซึ่งจากการศึกษาการสะสมธาตุแมงกานีสในมะเขือเทศที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีธาตุเหล็กความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า มะเขือเทศจะสะสมแมงกานีสมากที่สุดถึง 163.52 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้ง 1 กรัม เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีธาตุเหล็กความเข้มข้น 0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม หากความเข้มข้นของธาตุเหล็กเพิ่มขึ้นการสะสมของแมงกานีสในลำต้นจะลดลง (Ejraei, 2013)

แมงกานีสมีหน้าที่เกี่ยวกับการถ่ายทอดฟอสเฟต โดยเป็นตัวเชื่อมระหว่าง ATP และเอนไซม์ ในกระบวนการสังเคราะห์วิตามินหลายชนิด และยังมีบทบาทสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยการเพิ่มหรือลดอิเล็กตรอนที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง นอกจากนี้ แมงกานีสยังลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในเซลล์พืช โดยทำหน้าที่เปลี่ยนซูเปอร์ออกไซด์ที่เป็นพิษต่อเซลล์พืชให้กลายเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และจะสลายตัวเป็นน้ำและออกซิเจนต่อไป และยังกระตุ้นการสุกแก่ของผลผลิตพืชอีกด้วย แต่เนื่องจากแมงกานีสสามารถเคลื่อนย้ายได้ยากในต้นพืช การขาดธาตุแมงกานีสจึงมักแสดงอาการที่ใบอ่อนก่อน โดยใบอ่อนจะมีสีเหลืองหรือเขียวจาง แต่เส้นใบยังคงเขียวอยู่ อาการโดยทั่วไปคล้ายกับการขาดธาตุเหล็ก แต่จะเกิดกับใบที่เจริญเติบโตเต็มที่แล้ว การขาดธาตุแมงกานีสส่งผลให้พืชเจริญเติบโตช้า ไม่ออกดอก ไม่ติดผล ในขณะที่การดูดใช้แมงกานีสมากเกินไปจะแสดงอาการเป็นพิษ

เช่นเดียวกับความเป็นพิษของธาตุเหล็ก อย่างไรก็ตาม พืชส่วนใหญ่สามารถทนต่อความเป็นพิษของแมงกานีสได้ดี เช่น ยาสูบ ถั่วเหลือง พืชตระกูลถั่ว กัญชง กาแฟ เป็นต้น (Uchida, 2000)

5. ธาตุแคลเซียม เป็นธาตุอาหารรองที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ในดินทั่วไปมีแคลเซียมอยู่ร้อยละ 0.1 ถึง 2 โดยพืชใช้แคลเซียมจากดินในรูปของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) อย่างไรก็ตาม ในพื้นที่ดินเปรี้ยวหรือดินเปรี้ยวจัด รวมทั้งดินในเขตที่มีฝนตกชุกจะมีปริมาณแคลเซียมลดลง การดูดซึมแคลเซียมจะเกิดบริเวณปลายรากของพืชแบบไม่ใช้พลังงาน (passive process) จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการคายน้ำของพืช ดังนั้นความชื้นของดินที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการดูดใช้แคลเซียมของพืช (White & Broadley, 2003) นอกจากนี้ แคลเซียมเป็นองค์ประกอบสำคัญของผนังเซลล์ซึ่งอยู่ในรูปของแคลเซียมเพกเตต (calcium pectate) ซึ่งสารนี้จะเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างเซลล์ต่าง ๆ ให้เชื่อมติดกัน ทำให้ผนังเซลล์และเนื้อเยื่อพืชแข็งแรงขึ้น (Uchida, 2000) ยิ่งไปกว่านั้น แคลเซียมยังมีส่วนช่วยในการตกตะกอนกรดออกซาลิกที่มีความเป็นพิษต่อพืชให้อยู่ในรูปของแคลเซียมออกซาลेटและยังลดความเป็นพิษของทองแดง แมกนีเซียม และเหล็ก ลดการดูดซึมธาตุโพแทสเซียมและเป็นโคแฟกเตอร์ให้กับเอนไซม์ โปรตีนคิเนส และแอลฟาอะไมเลส ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการย้ายแป้งจากแหล่งสะสมไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช รวมทั้งทำหน้าที่ย่อยสลายแป้งที่สะสมในเมล็ดเพื่อใช้ในระหว่างการงอกของเมล็ด นอกจากนี้ แคลเซียมยังมีบทบาทสำคัญต่อการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส ดังนั้นพืชที่ขาดธาตุแคลเซียมจะมีผลต่อการพัฒนาของเนื้อเยื่อเจริญ เช่น ปลายยอด ปลายราก ตาดอก และ ตาข้าง เป็นต้น เนื้อเยื่อบริเวณนี้จะแห้งตายและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลหรือสีดำ (Uchida, 2000) ในมะเขือเทศและพริกหวานที่ขาดธาตุแคลเซียมจะเกิดอาการก้านดำบริเวณผล (blossom-end rot of tomato and pepper) และอาการยอดไหม้ในผักกาดหอม (tip burn of lettuce) นอกจากนี้ แคลเซียมไอออนยังเป็นตัวส่งสัญญาณทุติยภูมิที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางชีววิทยาต่าง ๆ ภายในเซลล์พืช รวมทั้งการตอบสนองต่อปัจจัยทางกายภาพต่าง ๆ เช่น แสง อุณหภูมิ ฮอริโมนพืช เป็นต้น (Poutrain et al., 2011) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมไอออนในไซโทพลาซึมเกี่ยวข้องกับการทำงานของ Ca^{2+} -binding proteins เช่น Ca^{2+} -dependent protein kinase (CDPKs) และ calmodulins (CaMs) (Zhang, Bi-Feng, Liang, Jones, & Ying-Tang, 2002)

ปริมาณ Ca^{2+} ที่พืชดูดใช้มีความเกี่ยวข้องกับการทำงานของโปรตีน calmodulins ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการตอบสนองต่อสิ่งเร้าที่พืชได้รับอย่างจำเพาะ (Inostroza-Blancheteau et al., 2012) ควบคุมกระบวนการตอบสนองต่อความเครียด

จากปัจจัยทางกายภาพ การตอบสนองต่อแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitropism) แสง (phototropism) ตลอดจนการเติบโตและการพัฒนาของพืช (Du & Poovaiah, 2005; T. Yang & Poovaiah, 2003; Zhang & Lu, 2003) โดย calmodulins เป็นโปรตีนที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของโปรตีนหลายชนิดภายในเซลล์พืช (Kim, Chung, Yun, & Cho, 2009) จากการศึกษาการยับยั้งการทำงานของโปรตีน calmodulins แสดงให้เห็นว่า การตอบสนองของพืชต่อสิ่งแวดล้อมหลายประการขึ้นอยู่กับการแสดงออกของยีน ที่ทำหน้าที่สังเคราะห์โปรตีน calmodulins ซึ่งจากการศึกษาของ Doherty และคณะ ในปี ค.ศ. 2009 พบว่า โปรตีน calmodulins ช่วยให้ต้นอะราบิโดพซิส (*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.) สามารถทนต่อความเครียดจากความเย็นและการแช่แข็งได้ดีขึ้น (Doherty, Buskirk, Myers, & Thomashow, 2009)

6. ธาตุอะลูมิเนียม เป็นธาตุที่พบมากเป็นอันดับที่ 3 ในชั้นเปลือกโลก ส่วนใหญ่พบในรูปของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (aluminosilicate) มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ละลายออกมาในรูปของสารละลายดิน (Rengel, 2004) ซึ่งสารประกอบอะลูมิเนียมที่พบในสารละลายดินจะแตกต่างกันตามค่า pH ของดิน โดย $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ จะพบในดินที่มีค่า pH 4 ถึง 5 ในขณะที่ Al^{3+} มักพบในดินที่มีค่า pH 5.5 ถึง 7 และ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ พบในดินที่มีค่า pH 7 ถึง 8 (Abreu, Muraoka, & Lavorante, 2003; Delhaize & Ryan, 1995; Mossor-Pietraszewska, 2001; Panda, Baluska, & Matsumoto, 2009) ซึ่งธาตุอะลูมิเนียมจะแสดงความเป็นพิษต่อพืชเมื่อดินมีสภาวะความเป็นกรดสูง (pH น้อยกว่า 5.5) ซึ่งดินที่มีสารประกอบอะลูมิเนียมสะสมมากกว่า 10 ถึง 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะก่อให้เกิดความเป็นพิษที่รุนแรงต่อระบบรากพืช (Kawano, Kadono, Furichi, Muto, & Lapeyrie, 2003; Kochian, Hoekenga, & Pineros, 2004; Kochian, Pineros, & Hoekenga, 2005) และใบเลี้ยง (Chang, Yamamoto, & Matsumoto, 1999) พืชส่วนใหญ่มักมีการสะสมของอะลูมิเนียมในใบไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้ง 1 กรัม เนื่องจากการเคลื่อนย้ายอะลูมิเนียมเป็นไปอย่างช้า ๆ ภายในต้นพืช อย่างไรก็ตาม พืชบางชนิดสามารถสะสมอะลูมิเนียมในใบได้สูงถึง 30 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักแห้ง 1 กรัม (Han, Shi, Ma, Ruan, & Zhao, 2007; Mossor-Pietraszewska, 2001) โดยอะลูมิเนียมส่งเสริมให้เกิดการสะสมของ reactive oxygen species (ROS) เช่น superoxide radicals, hydroxyl radical และ hydrogen peroxide เป็นต้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในส่วนของเยื่อหุ้มเซลล์ และส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมต่าง ๆ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดความเครียด

ออกซิเดทีฟ (oxidative stress) ภายในต้นพืช (Panda et al., 2009; Yamamoto, Kobayashi, Devi, Rikiishi, & Matsumoto, 2002; Yamamoto, Kobayashi, Devi, Rikiishi, & Matsumoto, 2003) เมื่อเกิดความเครียดออกซิเดทีฟจะมีการแสดงออกของยีนและการสังเคราะห์เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการกำจัด ROS ภายในเซลล์พืช เช่น catalase (CAT) superoxide dismutase (SOD), peroxidases (POD), alternative oxidase (AOX) เป็นต้น (Basu, 2013; Panda et al., 2009)

เมื่ออนุมูลอิสระมีความเข้มข้นสูงจนก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช ส่งผลให้การเจริญของปลายยอดและปลายรากลดลง ซึ่งอาการมักแสดงออกอย่างรุนแรงในส่วนของรากมากกว่าส่วนยอด (Chang et al., 1999) พืชที่ได้รับความเครียดจากอนุมูลอิสระมักมีระบบรากแคระแกร็น เนื่องจากอนุมูลอิสระไปยับยั้งการยืดยาวของราก ส่งผลให้ปลายรากและรากแขนงมีชั้นเซลล์หนา มีสีน้ำตาล ประสิทธิภาพในการดูดน้ำและธาตุอาหารลดลง อีกทั้งการดูดซึมอนุมูลอิสระของรากพืชยังเกิดขึ้นอย่างแข่งขันกับแคลเซียมไอออนอีกด้วย (Inostroza-Blancheteau et al., 2012; Panda et al., 2009; Pavlovkin, Pal'ove-Balang, Kolarovic, & Zelinová, 2009) ซึ่งพืชที่อยู่ในระยะที่เป็นต้นกล้าจะได้รับผลกระทบมากกว่าพืชที่มีอายุมาก (Thornton, Schaedle, & Raynal, 1986) โดยกลไกการลดความเป็นพิษของอนุมูลอิสระในพืชสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการ ดังนี้ 1. การกำจัดออก (exclusion) 2. การทนทาน (tolerance) อย่างไรก็ตาม พืชมักจัดการกับความเครียดจากอนุมูลอิสระโดยการกำจัดออก (Inostroza-Blancheteau et al., 2012) โดยอาศัยกลไกที่เกิดจากกิจกรรมของไมโทคอนเดรีย (Brunner & Sperisen, 2013; Nunes-Nesi, Brito, Inostroza-Blancheteau, Fernie, & Araújo, 2014) ตลอดจนการเคลื่อนย้ายกรดอินทรีย์ (Brunner & Sperisen, 2013; Ryan et al., 2010) ซึ่งความเป็นพิษจากอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นบริเวณรากพืชจะถูกกำจัดออกโดยกลไกการหลังกรดอินทรีย์ แอนไอออน (exclusion mechanism) ได้แก่ มาเลต (malate) ซิเตรท (citrate) และออกซาเลท (oxalate) โดยกรดเหล่านี้จะถูกปล่อยออกมาจากรากเพื่อลดความเป็นพิษของอนุมูลอิสระไอออนบริเวณรากพืช (Yang et al., 2015) กลไกการต้านทานดังกล่าวสามารถพบได้ในกลุ่มของพืชไร่ เช่น ข้าว ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ ข้าวไรย์ และข้าวโพด รวมทั้งพืชมีเนื้อไม้ เช่น พืชในสกุล *Picea*, สกุล *Cryptomeria* และสกุล *Pinus* พืชใบกว้าง เช่น พืชในสกุล *Populus* สกุล *Eucalyptus* สกุล *Citrus* และสกุล *Melaleuca* (Brunner & Sperisen, 2013) ซึ่งความเครียดที่เกิดจากการได้รับอนุมูลอิสระไอออน ในปริมาณต่าง ๆ จะเป็นตัวกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่ควบคุมการสังเคราะห์กรดเหล่านี้ (Inostroza-Blancheteau et al., 2012; Ma, 2007; Ryan et al., 2010) โดยการ

แสดงออกของยีนที่ทำหน้าที่สังเคราะห์สารเหล่านี้จะมีการแสดงออกมากในกลุ่มของพืชที่มีความต้านทานต่ออนุมูลนิยมไอออนมากกว่ากลุ่มของพืชที่ไม่ต้านทานต่ออนุมูลนิยมไอออน

อะลูมิเนียมไม่ได้มีผลเสียต่อพืชเฉพาะบริเวณรากเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชด้วย ในกลุ่มของพืชที่ไวต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียมไอออน จะพบว่าอะลูมิเนียมไอออนส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง (Mahalovic, Drazic, & Vucinic, 2008; Mukhopadhyay et al., 2012) สัดส่วนของคลอโรฟิลล์ เอ และ บี ผิดปกติ (Mmayi, Musyimi, Netondo, & Sikuku, 2015) อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและประสิทธิภาพการใช้แสง (quantum yield efficiency) ของพืชลดลง (Lazarevic, Horvat, & Poljak, 2014; Mahalovic et al., 2008; Mmayi et al., 2015) การถ่ายทอดอิเล็กตรอนถูกยับยั้ง (Xin-Yan, Yang, Lu, Ye, & Chen, 2015) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้อาจไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในพืชที่มีกลไกการต้านทานต่ออนุมูลนิยมไอออน (S. Ali, Zeng, Qiu, & Zhang, 2011; Lazarevic et al., 2014; Peixoto, Matta, & Cambraia, 2002; Xin-Yan et al., 2015) รวมทั้งยังพบว่า ความเป็นพิษของอะลูมิเนียมไอออนมีผลต่อการแพร่ของไอน้ำผ่านปากใบ (stomatal conductance) (Mukhopadhyay et al., 2012)

ปัจจุบัน การศึกษาทั่วโลกที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองของพืชต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียมไอออนที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้รับการศึกษามากในกลุ่มของไม้ผล มะเขือเทศ ถั่วเหลือง ข้าวโพด และธัญพืช (Peixoto et al., 2002) ส่วนในพืชยืนต้นยังมีการศึกษาไม่มากนัก รวมทั้งการศึกษาคัดแปลงพันธุ์พืชเพื่อให้ได้ลักษณะที่ทนต่ออะลูมิเนียมไอออนยังสามารถช่วยให้การปลูกพืชในดินเปรี้ยวหรือดินเปรี้ยวจัดมีผลผลิตสูงขึ้นได้ โดยจากการศึกษาผลของความเป็นกรดและความเป็นพิษของอะลูมิเนียมต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของยูคาลิปตัส (*Eucalyptus* sp.) โดย Yang และคณะ ในปี ค.ศ. 2015 โดยปลูกยูคาลิปตัสในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่มีอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0 และ 4.4 มิลลิโมลาร์ มีค่า pH 3.0 และ 4.0 จากผลการทดลอง พบว่า ต้นยูคาลิปตัสทั้งที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า pH 3.0 และ 4.0 เมื่อได้รับอะลูมิเนียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 4.4 มิลลิโมลาร์ จะมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (net photosynthesis rate) ต่ำกว่าชุดควบคุม (อะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0 มิลลิโมลาร์) (Yang et al., 2015) นอกจากนี้ ปริมาณคลอโรฟิลล์ของต้นกล้วยคาลิปตัสยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อได้รับอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4.4 มิลลิโมลาร์ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งเกิดจากอะลูมิเนียมความเข้มข้นสูงเป็นตัวขัดขวางการดูดใช้ธาตุแมกนีเซียมที่เป็นโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ (B. Ali et al., 2008)

นอกจากความเป็นพิษของอะลูมิเนียมจะแสดงให้เห็นได้จากปริมาณคลอโรฟิลล์ และอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิที่ลดลงแล้ว ความเป็นพิษของอะลูมิเนียมยังส่งผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตของใบพืช ด้วย จากการทดลองปลูกต้นกล้าของส้ม (*Citrus reshni* Hort. ex Tanaka) อายุ 8 สัปดาห์ในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ความเข้มข้น 0.25 เท่า ที่เติมอะลูมิเนียมซัลเฟตออกตาเดคะไฮเดรต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้น 2 มิลลิโมลาร์ เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้รับอะลูมิเนียม พบว่า ต้นกล้าส้มที่ได้รับสารละลายธาตุอาหารที่มีส่วนผสมของอะลูมิเนียมมีการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และการแพร่ของไอน้ำผ่านปากใบลดลง และยังมีผลให้การทำงานของเอนไซม์ sucrose phosphate synthase (SPS) และความเข้มข้นของ 3-phosphoglycerate (PGA) ในใบลดลง และยังส่งผลให้ค่า photochemical quenching coefficient (qP) และการถ่ายทอดอิเล็กตรอนผ่านระบบแสงสอง (PSII) ลดลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (Chen, Qi, Smith, & Liu, 2005)

อย่างไรก็ตาม การระบุความผิดปกติของพืชที่เกิดจากความเป็นพิษของอะลูมิเนียมหรือไม่นั้น สามารถทำได้ยาก เนื่องจากลักษณะอาการที่พืชแสดงออกจะมีลักษณะคล้ายการขาดธาตุฟอสฟอรัส ใบบางกรณีความเป็นพิษของอะลูมิเนียมยังส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายแคลเซียมในพืช ทำให้พืชแสดงอาการขาดแคลเซียมร่วมด้วย เนื่องจากการดูดน้ำธาตุแคลเซียมของรากเกิดขึ้นอย่างแข่งขันกับธาตุอะลูมิเนียม และส่งผลถึงการแสดงออกของยีนสังเคราะห์โปรตีนแคลโมดูลินในพืช ซึ่งเป็นโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการส่งสัญญาณภายในเซลล์ด้วยแคลเซียมไอออนในพืชอีกด้วย

การปรับปรุงแก้ไขปัญหาดินเปรี้ยว

ในดินที่ประสบปัญหาดินเปรี้ยวและมีค่า pH ต่ำ จนก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช จำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีของดินโดยเติมวัสดุที่มีฤทธิ์เป็นเบสลงในดิน โดยอนุมูลไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ที่มีฤทธิ์เป็นเบสจะไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H⁺) ในสารละลายดินเปรี้ยว เมื่อไฮโดรเจนไอออนในสารละลายดินลดลง ไฮโดรเจนไอออนที่อยู่ในกรดแผลงของดินจะถูกปลดปล่อยออกมาแทนที่ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นและดำเนินต่อไปจนกว่าไฮโดรเจนไอออนจะหมดไป โดยการแก้ไขสภาพดินกรดต้องอาศัยสารที่มีคุณสมบัติเป็นเบสในปริมาณที่มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนที่เป็นกรดแผลงในเนื้อดิน การเพิ่มค่า pH ของดินสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสภาพแวดล้อม ลักษณะการใช้ประโยชน์ของดินและชนิดของพืชที่ปลูก ดังนี้

1. การจัดการน้ำ เนื่องจากปัญหาดินเปรี้ยวในประเทศไทยส่วนใหญ่เกิดจากวัตถุต้นกำเนิดดินที่มีแร่ไฟโรต์อยู่ในชั้นดินมาก เมื่อดินแห้งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแร่ไฟโรต์ ทำให้ดินมีความเป็นกรดสูง การจัดการน้ำโดยการขังน้ำในพื้นที่นาข้าวเป็นระยะเวลานาน สลับกับการระบายน้ำอย่างสม่ำเสมอ จะช่วยลดปริมาณธาตุเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีส ที่เป็นพิษต่อพืชได้ ในพื้นที่ดินเปรี้ยวที่มีแร่ไฟโรต์อยู่ในชั้นดินตั้งแต่ชั้นผิวดินถึงที่ระดับความลึกประมาณ 100 เซนติเมตร การปรับปรุงดินเปรี้ยวโดยการจัดการน้ำอาจใช้เวลาเพียง 3 ถึง 5 ปี จึงช่วยให้ดินมีความเหมาะสมต่อการปลูกพืชได้ แต่ในดินเปรี้ยวที่มีแร่ไฟโรต์อยู่ในระดับตื้นกว่า 100 เซนติเมตร อาจต้องใช้เวลามากกว่า 5 ถึง 10 ปี ในการจัดการดิน อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินเปรี้ยวโดยการจัดการน้ำยังมีข้อจำกัดอยู่มาก เนื่องจากสามารถดำเนินการได้ในพื้นที่ที่มีการชลประทานที่ดี และการขังน้ำในระดับและระยะเวลาที่ไม่เหมาะสมยังส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืชอีกด้วย

2. การจัดการดิน โดยใช้ปุ๋ยที่มีคุณภาพและความสามารถในการปรับปรุงค่า pH ของดินได้แตกต่างกัน เช่น ปุ๋ยขาวจากเปลือกหอยเผา จะช่วยแก้ไขสภาพดินกรดได้รวดเร็ว ใช้ปริมาณน้อย แต่มีราคาแพงและเป็นอันตรายต่อผิวหนังขณะขึ้น ในขณะที่ปุ๋ยมาร์ลหรือปุ๋ยหินฝุ่นจะแก้ไขความเป็นกรดของดินได้ช้ากว่าปุ๋ยขาว แต่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ ราคาถูกหาง่าย นอกจากนี้ สารชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในการปรับค่า pH ของดิน ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) และโดโลไมท์ (CaMg(CO₃)₂) เป็นต้น (Inostroza-Blancheteau et al., 2012)

อย่างไรก็ตาม การใส่ปุ๋ยแต่ละครั้งอาจเกิดการตกค้างในดินนาน 4 ถึง 5 ปี ซึ่งในสภาพดินเปรี้ยวจัดนั้นอิทธิพลของปุ๋ยจะแสดงเฉพาะในฤดูปลูกนั้น ๆ เมื่อดินแห้งค่า pH ของดิน

จะลดลงอีกครั้ง (Brinkman, Ve, Tinh, Hau, & Mensvoort, 1993) ดังนั้นเกษตรกรจึงต้องใส่ปุ๋ยอย่างต่อเนื่องในการทำการเกษตร เพื่อให้ผลผลิตที่ได้ตรงตามความต้องการ ซึ่งการใส่ปุ๋ยขาว 1 ตันต่อเฮกตาร์ ในดินเปรี้ยวจัดที่มีค่า pH ระหว่าง 2.97 ถึง 3.36 จะส่งผลให้อัตราการดูดซับฟอสฟอรัสของดินลดลงร้อยละ 3.1 ถึง 13.1 ตามลำดับ (Ogunwale & Shamsuddin, 1999) ดังนั้น การใส่ปุ๋ยเพื่อปรับปรุงค่า pH ของดินเป็นระยะเวลานานอาจมีผลต่อการดูดซับธาตุฟอสฟอรัสของดินในอนาคตได้



ถ่านชีวภาพ

ความหมายของถ่านชีวภาพ

ในปี ค.ศ. 2009 Lehmann และ Joseph ได้ให้คำจำกัดความของถ่านชีวภาพไว้ดังนี้ “ถ่านชีวภาพ หมายถึง วัสดุที่มีคาร์บอนอยู่อย่างเข้มข้น ถูกผลิตภายใต้กระบวนการให้ความร้อนจากการเผาไหม้ มีลักษณะคล้ายถ่านหุงต้มแต่มีความแตกต่างกันตรงที่ถ่านชีวภาพถูกผลิตเพื่อวัตถุประสงค์สำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติของดินในงานด้านการเกษตร” (Lehmann & Joseph, 2009) อย่างไรก็ตาม คำว่า ไบโอชาร์ (biochar) หรือถ่านชีวภาพถูกใช้ครั้งแรกโดย Karaosmanoglu และคณะในปี ค.ศ. 2000 ซึ่งศึกษาเปรียบเทียบวิธีการผลิตถ่านชีวภาพต่อคุณภาพของถ่านชีวภาพและการตอบสนองของพืช (Karaosmanoglu, Isigigür-Ergüdenle, & Sever, 2000) ต่อมาในปี ค.ศ. 2011 Mukherjee และคณะ ได้ให้ความเห็นเกี่ยวกับคำว่าถ่านชีวภาพไว้ว่า “คำว่าถ่านชีวภาพนี้ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงวัสดุที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้และมีการใช้งานอย่างจำเพาะในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินและเพื่อเก็บกักคาร์บอนในดิน เพื่อลดความเข้มข้นของคาร์บอน (charcoa)” (Mukherjee, Zimmerman, & Harris, 2011) ดังนั้น การจะเลือกใช้คำใด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการใช้งานเป็นหลัก นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังถูกใช้แทนด้วยคำว่า ถ่านเพื่อการเกษตร (agrichar) คาร์บอนชีวภาพ (biocarbon) คาร์บอนอินทรีย์ที่มีการเผาไหม้ (pyrogenic organic carbon) ถ่านชีวภาพผลิตโดยวิธีเผาไหม้โดยใช้ความร้อนและความดันสูง (hydrothermal biochar) คาร์บอนดำ (black carbon) ถ่านชีวภาพที่มีการเผาไหม้ (pyrogenic biochar)

ถ่านชีวภาพผลิตได้จากการนำวัสดุจากธรรมชาติหลายชนิด รวมทั้งวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและกากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น แกลบ (Abrishamkesh, Gorji, Asadi, Bagheri-Marandi, & Pourbabaee, 2015; Masulili, Utomo, & Syechfani, 2010) ช้างข้าวโพด (Mullen et al., 2010; Worasuwannarak, Potisri, & Tanthapanichakoon, 2006) ปุ๋ยคอก กิ่งไม้ ใบไม้ (Lehmann & Joseph, 2009) โดยนำวัสดุเหล่านี้มาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงชนิดของสารโดยใช้ความร้อนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนหรือมีออกซิเจนในระดับน้อยที่สุด (Brunner & Sperisen, 2013; Mohan, Pittman, & Steele, 2006) ส่งผลให้เกิดการสลายพันธะเคมีของสารและเกิดสารใหม่ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่

1. ถ่านชีวภาพ (bio charcoal) เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านสิ่งแวดล้อม โดยถ่านชีวภาพช่วยลดมลพิษจาก

แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และสามารถนำไปผลิตเป็นวัตถุดิบต่าง ๆ เช่น วัสดุดูดซับน้ำมัน วัสดุก่อสร้าง วัสดุกรอง และวัสดุปรับปรุงคุณสมบัติของดิน เป็นต้น

2. แก๊สไพโรไลซิส (pyrolysis gas) เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่ไม่ผ่านการควบแน่น เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจน และแก๊สที่มีมวลโมเลกุลต่ำ เป็นต้น

3. น้ำมันชีวภาพ (pyrolysis oil หรือ bio-oil) ประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิดและสารประกอบออกซิเจน เช่น แอลกอฮอล์ และกรดอินทรีย์ เป็นต้น สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวแทนเชื้อเพลิงดีเซลหรือใช้สกัดเป็นสารเคมี ซึ่งน้ำมันชีวภาพที่ได้มีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวสีน้ำตาลแดงเข้มไปจนถึงสีดำ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและวิธีการให้ความร้อน

กระบวนการไพโรไลซิส จะอาศัยการควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาที่แตกต่างกัน ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้จึงแตกต่างกันและสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี (Mohan et al., 2006; Verheijen, Jones, Rickson, & Smith, 2009) ดังนี้

1. การแยกสลายอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาในหน่วยวินาที มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียสต่อวินาที วิธีการนี้จะได้ถ่านชีวภาพประมาณร้อยละ 20 ของเหลวร้อยละ 60 และแก๊สร้อยละ 20 (Brunner & Sperisen, 2013; Mullen et al., 2010)

2. การแยกสลายอย่างช้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลามากกว่า 1 ชั่วโมง มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 ถึง 7 องศาเซลเซียสต่อวินาที วิธีการนี้จะทำให้ได้ถ่านชีวภาพร้อยละ 35 ของเหลวร้อยละ 30 และแก๊สร้อยละ 35 (Brunner & Sperisen, 2013) ถ่านชีวภาพซึ่งประกอบด้วยผลึกคาร์บอนที่มีรูพรุนมาก จึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพของดิน การใส่ถ่านชีวภาพลงในดินช่วยให้การระบายน้ำและอากาศของดินดีขึ้น ดินอุ้มน้ำได้ดีขึ้น และสามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นประจุบวกและประจุลบได้เนื่องจากลักษณะพื้นผิวที่เป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพ จึงช่วยยึดธาตุอาหารต่าง ๆ ในดินไว้ จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ยให้สูงขึ้น เป็นการประหยัดการใช้ปุ๋ย ลดต้นทุน เพิ่มกำไร และเพิ่มผลผลิตให้กับเกษตรกร (Glaser, Lehmann, & Zech, 2002; Lehmann & Rondon, 2006)

ซึ่งจากการศึกษา พบว่า การนำถ่านชีวภาพไปใส่ในดินเป็นระยะเวลาจนถึง 100 ปี คาร์บอนจะถูกกักเก็บในดินได้มากกว่าร้อยละ 40 ในขณะที่อินทรีย์วัตถุที่ไม่ผ่านการกระบวนการไพโรไลซิสจะถูกย่อยสลายและปลดปล่อยออกมาในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์

ทั้งหมด (Atkinson, Fitzgerald, & Hipps, 2010; Lehmann, Gaunt, & Rondon, 2006; Tupthai, Jintrawet, & Lordkaew, 2013) นอกจากนี้ ค่า pH ของถ่านชีวภาพส่วนใหญ่จะมีค่ามากกว่า 7 จึงใช้เป็นวัสดุสำหรับลดความเป็นกรดของดินได้ ทั้งนี้คุณสมบัติของถ่านถ่านชีวภาพจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาผลิตและกระบวนการผลิต (Verheijen et al., 2009)

การปรับปรุงคุณสมบัติของดินด้วยถ่านชีวภาพ

ในทางการเกษตร มีการนำถ่านชีวภาพมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงคุณสมบัติของดิน ซึ่งถ่านชีวภาพช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Rajkovich et al., 2012) เนื่องจากถ่านชีวภาพจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ย คุณสมบัติที่เป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพสามารถดักจับธาตุอาหารไว้ไม่ให้ถูกชะล้างไปก่อนที่พืชจะดูดซึมไปใช้ได้ (Masahide Yamato, Yasuyuki Okimori, Irhas Fredy Wibowo, Saifuddin Anshori, & Makoto Ogawa, 2006) เช่นเดียวกับผลของการปลูกข้าวในนาที่เติมถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่และแกลบซึ่งพบว่า เมื่อถึงระยะเก็บเกี่ยว (120 วันหลังปักดำ) ข้าวที่ปลูกโดยใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับการใส่ปุ๋ยเคมี 1 ครั้ง ให้ผลผลิตไม่แตกต่างจากการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว เนื่องจากถ่านชีวภาพช่วยกักเก็บและปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างช้า ๆ นอกจากนี้ การใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับปุ๋ยไนโตรเจนยังช่วยให้พืชมีค่าดัชนีการใช้ธาตุไนโตรเจนสูงกว่าการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่า การใส่ถ่านชีวภาพลงในดินที่ใช้ปลูกข้าวช่วยให้ข้าวมีประสิทธิภาพในการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนสูงขึ้น เพราะถ่านชีวภาพที่มีค่าความจุที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange capacity; CEC) สูง จึงดูดซับไนโตรเจนไว้และค่อย ๆ ปลดปล่อยออกมา ทำให้สูญเสียไนโตรเจนออกไปในรูปแก๊สน้อยลง (Hemavong, 2014) และเนื่องจากถ่านชีวภาพมีค่า pH เป็นกลางไปจนถึงเบสอ่อน จึงสามารถใช้เป็นวัสดุสำหรับปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีของดินได้ โดยเฉพาะในสภาพดินกรดที่มีค่า pH ต่ำ ซึ่งขัดขวางการเจริญเติบโตของพืช

มีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ถ่านชีวภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเพื่อการปลูกพืชหลายชนิด ได้แก่ ข้าวโพด (*Zea mays* L.) ถั่วพุ่ม (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) ถั่วลิสง (*Arachis hypogaea* L.) (Masahide Yamato et al., 2006) เป็นต้น และจากการศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินในพื้นที่ชุ่มน้ำเพื่อการปลูกมันเทศ (*Ipomoea batatas* (L.) Lam. cv. Beniazuma) ด้วยถ่านชีวภาพจากแกลบ โดยเติมถ่านชีวภาพในแปลงปลูก พบว่า มันเทศมีจำนวนราก ความยาวราก เส้นผ่านศูนย์กลางของราก รวมทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง สูงกว่ามันเทศชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมถ่านชีวภาพ (Kitaya, Hirai, Yanase, Mori, & Kiyota, 2000)

รวมทั้งการศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบในการปรับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินเค็มสำหรับการปลูกถั่วเลนทิว (*Lens culinaris* Medik) โดยเปรียบเทียบการปลูกถั่วในดินที่ผสมถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 3.3 เปรียบเทียบกับถั่วชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพในดินช่วยให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคดินมากขึ้นและช่วยให้รากมีน้ำหนักแห้งสูงกว่าชุดควบคุมถึง 1 เท่า (Abrishamkesh et al., 2015)

รวมทั้งการศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพจากแกลบต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของข้าวโพดหวานในพื้นที่ดินเปรี้ยว โดยผสมถ่านชีวภาพจากแกลบน้ำหนัก 1 ตันต่อไร่ ในดินเปรี้ยวก่อนการปลูกข้าวโพดหวาน จากผลการศึกษา พบว่า การปลูกต้นข้าวโพดหวานในดินเปรี้ยวที่ปรับคุณสมบัติด้วยถ่านชีวภาพ ช่วยให้ต้นข้าวโพดหวานมีการเจริญเติบโตสูงขึ้น มีความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางฝักเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการปลูกข้าวโพดในดินเปรี้ยวชุดควบคุม (Kanjanakesorn, Chatphuak, Tangsuwan, & Sangmanee, 2018)

นอกจากการปรับคุณสมบัติทางกายภาพของดินแล้ว การฝังกลบถ่านชีวภาพในดินยังเป็นการกักเก็บธาตุคาร์บอนให้สะสมอยู่ในชั้นดิน จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดการปลดปล่อยคาร์บอนในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมีเทน (CH_4) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่นำไปสู่ปัญหาสภาวะโลกร้อน เนื่องจากคาร์บอนจำนวนมากที่เป็นองค์ประกอบหลักของถ่านชีวภาพมีความทนทานต่อการย่อยสลายของเชื้อจุลินทรีย์และสูญหายไปจากดินได้ยาก (Verheijen et al., 2009; Winsley, 2007) จากการเปรียบเทียบการเติมฟางข้าวหรือถ่านชีวภาพจากไม้ยูคาลิปตัสลงในดินสำหรับปลูกข้าวในอัตรา 1 ถึง 4 ตันต่อไร่ ร่วมกับการใช้ปุ๋ยเคมี พบว่า ผลผลิตข้าวไม่มีความแตกต่างกัน ในขณะที่การเติมถ่านชีวภาพจากไม้ยูคาลิปตัสทำให้ดินมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนน้อยกว่าดินชุดควบคุม อย่างไรก็ตาม การเติมฟางข้าวจะมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนออกมามากที่สุด (Saenjan, Thammasome, Phy, & Tulaphitak, 2015) ดังนั้น ถ่านชีวภาพจึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการแก้ปัญหาดินเปรี้ยวที่เป็นปัญหาต่อการเจริญเติบโตของพืช แม้ว่าพืชหลายชนิด รวมทั้งข้าวหลายสายพันธุ์สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพดินเปรี้ยว แต่ผลผลิตที่ได้ยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ซึ่งอาจไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน ประกอบกับในแต่ละช่วงของปีอาจไม่สามารถปลูกพืชเหล่านี้ได้ในพื้นที่ดินเปรี้ยวเนื่องจากปัญหาการขาดแคลนน้ำ ทำให้ปริมาณน้ำเพื่อการเกษตรมีอยู่อย่างจำกัด

พริกเป็นพืชทนแล้งที่สามารถปลูกได้ทุกฤดูกาลและทั่วทุกภาคของประเทศ และเป็นพืชที่มนุษย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทั้งในด้านอาหาร อุตสาหกรรม การแพทย์ เกษตรกรรม รวมทั้งเครื่องสำอาง ประกอบกับการผลิตพริกในปัจจุบันยังไม่เพียงพอต่อความต้องการจึงเป็นพืชที่ควรได้รับการส่งเสริมให้ปลูกนอกฤดูทำนา อย่างไรก็ตาม ต้นพริกจะ

เจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ดีในสภาพดินที่เหมาะสม มีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.0 ถึง 6.5 ดังนั้นในสภาพดินเปรี้ยวจึงต้องมีการปรับสภาพดินให้มีค่า pH อยู่ในระดับที่เหมาะสมก่อนการลงปลูก

พริกชี้หนู

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพริก

พริกเป็นไม้ล้มลุกหรือไม้พุ่มขนาดเล็ก มีเนื้อไม้ อายุหลายฤดูกาล สูง 45 ถึง 75 เซนติเมตร หรืออาจสูงได้ถึง 150 เซนติเมตร มีถิ่นกำเนิดในแถบทวีปอเมริกาใต้ มนุษย์รู้จักนำพริกมาใช้เป็นเครื่องเทศเป็นระยะเวลาานานกว่า 9,000 ปี และมีการเพาะปลูกพริกเพื่อการใช้ประโยชน์มานานกว่า 7,000 ปี หลักฐานยืนยันสำคัญคือการค้นพบก้อนอุจาระที่เปลี่ยนเป็นหินแข็งที่มีอายุมากกว่า 9,000 ปี และยังพบซากของต้นพริกอายุกว่า 2,000 ปี ในเทวสถานของเปรู ในปี พ.ศ. 2036 Alvarez Chanca เป็นคนแรกที่นำพริกเข้ามาปลูกในประเทศสเปน ต่อมาคนสเปนเรียกพริกว่า Chili อย่างไรก็ตาม พริกเริ่มเป็นที่รู้จักของชาวอังกฤษและประเทศต่าง ๆ ในทวีปยุโรปกลางเริ่มรู้จักพริกในช่วงปี พ.ศ. 2098 และในช่วงปี พ.ศ. 2300 พ่อค้าชาวโปรตุเกสก็ได้นำพริกจากยุโรปไปปลูกในอินเดียและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ พริกถูกนำไปปลูกแพร่หลายในทวีปแอฟริกาและเอเชีย โดยการปลูกและพัฒนาสายพันธุ์พริกในแถบทวีปเอเชียจะเน้นที่รสชาติความเผ็ด ในขณะที่การพัฒนาสายพันธุ์ในทวีปยุโรปจะเน้นที่สีมากกว่าความเผ็ด ส่วนในประเทศจีนเริ่มมีรายงานการปลูกพริกในช่วงปี พ.ศ. 2243 ปัจจุบันความหลากหลายทางสายพันธุ์ของพริกมีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและการปรับปรุงสายพันธุ์โดยมนุษย์เพื่อให้ได้สายพันธุ์ลูกผสมที่ตรงตามความต้องการของมนุษย์ อย่างไรก็ตาม พริกแต่ละสายพันธุ์ยังคงมีลักษณะร่วมที่คล้ายกัน ดังนี้

ราก (root) เป็นระบบรากแก้ว เจริญตามแนวตั้งลึกลงในดินได้มากกว่า 1.2 เมตร และแผ่ขยายในแนวระดับได้ประมาณ 1 เมตร รากแขนงของพริกจะแตกออกและสานกันแน่นเมื่อพริกมีอายุมากขึ้น

ลำต้น (stem) ลำต้นมีเนื้อไม้ มีเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นประมาณ 1 เซนติเมตร แตกกิ่งมาก การเจริญของกิ่งเป็นแบบ dichotomous คือ กิ่งเจริญจากลำต้นเพียง 1 กิ่ง แล้วเพิ่มจำนวนของกิ่งแบบทวีคูณ ลำต้นมีลักษณะเป็นเหลี่ยม มีขนเล็กน้อย

ใบ (leaf) เป็นใบเดี่ยว แผ่นใบบาง (alternate) เรียงตัวแบบสลับ รูปขอบขนาน (acuminate) หรือรูปไข่ (ovate) ไปจนถึงรูปรี (elliptical) ปลายใบแหลม (acuminate) ก้านใบยาวประมาณ 0.5 ถึง 2.5 เซนติเมตร หรืออาจยาวได้ถึง 10 เซนติเมตร ผิวเรียบหรือมีขนเล็กน้อย

ดอก (flower) เป็นดอกเดี่ยวหรือออกเป็นคู่ บริเวณปลายยอด ก้านดอกอาจชี้ขึ้นหรือโค้งยาวประมาณ 1.5 เซนติเมตร ผิวเรียบ กลีบเลี้ยงเชื่อมติดกัน ปลายกลีบเลี้ยงแยกเป็น 5 แฉก เจริญติดอยู่กับผลจนผลสุก กลีบดอกสีขาวไปจนถึงสีม่วงประมาณ 5 ถึง 6 กลีบ

ผล (fruit) และเมล็ด (seed) ผลแบบ indehiscent berry มีหลายแบบแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ ทั้งขนาด รูปร่าง และสี ผลอ่อนมักมีสีเขียว ผลสุกจะมีสีได้หลากหลายตั้งแต่สีม่วง แดง ส้ม เหลือง ขั้วผล (peduncle) สั้นและหนา ภายในมีเมล็ดจำนวนมาก เมล็ดแบนรูปไต เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 ถึง 5 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร สีเหลืองอ่อน

พริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต

พริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต (*Capsicum annuum* L. cv. Super hot) เป็นไม้ล้มลุก ทรงพุ่มขนาดใหญ่ ลำต้นสูง 80 ถึง 130 เซนติเมตร การเจริญของกิ่งเป็นแบบ dichotomous ใบเป็นใบเดี่ยว รูปไข่หรือวงรี แผ่นใบแบบ ผิวเรียบเป็นมัน ในขณะที่เป็นต้นกล้าและต้นที่เติบโตเต็มที่ ใบที่อยู่ใกล้โคนต้นมีขนาดค่อนข้างใหญ่ กว้าง 2 ถึง 4 เซนติเมตร ยาว 3 ถึง 8 เซนติเมตร ดอกออกบริเวณข้อจำนวน 1 ถึง 5 ดอก กลีบดอกสีเขียวอ่อน ไม่มีจุด ไม่มีหยักที่กลีบดอก เมล็ดสีน้ำตาลอ่อน กลมแบน ผลสดขนาดเล็กยาว 5 ถึง 8 เซนติเมตร ในขณะที่ยังอ่อนผลสดมีสีเขียว เมื่อผลสุกมีสีแดงส้ม ขั้วผลใหญ่ เนื้อหนา ทนต่อการขนส่ง และมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าพริกสายพันธุ์อื่น ผลผลิตต่อไร่สูงเฉลี่ย 5 ถึง 6 ตันต่อไร่ อายุการเก็บเกี่ยวนาน 5 ถึง 6 เดือน

การปลูกและการดูแลรักษาพริก

1. การเตรียมดิน ไถพรวนดินและรองพื้นด้วยปุ๋ยขี้วัวในอัตรา 75 กิโลกรัมต่อไร่ จากนั้นรดน้ำเพื่อปรับสภาพดินและกำจัดเชื้อในดินที่เป็นสาเหตุของโรคพืช บ่มดินประมาณ 7 ถึง 10 วัน ยกร่องกว้าง 1 เมตร สูง 20 เซนติเมตร แล้วจึงคลุมผ้าขาว เเจาะรูผ้าขาวให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ห่างกัน 10 เซนติเมตร เพื่อป้องกันวัชพืชในแปลงปลูก

2. การเพาะกล้า แช่เมล็ดพริกในสารชีวภาพที่เร่งรากและใบอัตรา 3 ถึง 5 มิลลิลิตร ต่อน้ำ 20 ลิตร 1 คืน เพื่อกระตุ้นการงอกของพริก จากนั้นนำเมล็ดพริกขึ้นจากน้ำ ห่อด้วยผ้าขาวบางชุบน้ำอีก 1 คืน จึงหว่านเมล็ดลงในแปลงเพาะ เมื่อต้นกล้าแตกใบแรกหรือประมาณ 7 วันหลังการหว่าน จึงย้ายมาเพาะในถาดหลุมอีกประมาณ 25 ถึง 30 วัน ก่อนย้ายปลูกในแปลงที่เตรียมไว้

3. การให้น้ำ พริกเป็นพืชทนแล้งได้ดี แต่ในระยะเริ่มออกดอก พริกจะต้องการน้ำมากกว่าปกติ ซึ่งหากให้น้ำไม่เพียงพอจะทำให้ดอกและผลอ่อนหลุดร่วงได้ ในสภาพอากาศ

ค่อนข้างเย็น อุณหภูมิเฉลี่ย 10 ถึง 15 องศาเซลเซียส จะทำให้พริกเจริญเติบโตไม่ค่อยดี ติดดอกต่ำ และดอกร่วง

4. การใส่ปุ๋ย ขึ้นอยู่กับชนิดและคุณภาพของดินที่ปลูก ในดินทั่ว ๆ ไป จะใส่ปุ๋ยคอกอัตรา 3 ถึง 4 ตันต่อไร่ ผสมกับปุ๋ยวิทยาศาสตร์สูตร 15-15-15 ในอัตรา 20 ถึง 50 กิโลกรัมต่อไร่ โดยใส่ในดินระหว่างแปลงปลูก แล้วไถพรวนกลบในระยะที่พริกเริ่มมีตาดอก นอกจากนี้ พริกยังต้องการธาตุอาหารเสริม หลังจากการใส่ปุ๋ยแล้วประมาณ 1 ถึง 2 สัปดาห์ ควรฉีดปุ๋ยน้ำทางใบ เพื่อให้พริกสามารถนำไปใช้ได้เร็วขึ้น

5. การเก็บเกี่ยว พริกจะเริ่มให้ผลผลิตได้หลังจากย้ายปลูกเป็นระยะเวลา 75 ถึง 90 วัน ในระยะแรกผลผลิตจะน้อยและเพิ่มจำนวนขึ้นตามลำดับ และผลผลิตจะเริ่มลดลงเมื่อพริกเริ่มแก่ เมื่อพริกอายุได้ 6 ถึง 7 เดือน หลังย้ายปลูกต้นจะเริ่มโทรมและหยุดการให้ผลผลิต ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการดูแลรักษา โดยพริกอาจให้ผลผลิตได้นานถึง 1 ปี

สรรพวิทยาที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและการปรับตัวของพริก

1. ปริมาณรงควัตถุในใบ

ปริมาณรงควัตถุในใบ (pigment content) ได้แก่ คลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ เป็นต้น เป็นรงควัตถุที่พบในคลอโรพลาสต์และเป็นโครงสร้างสำคัญที่ทำให้พืชสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ เนื่องจากรงควัตถุเหล่านี้ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงและนำพลังงานแสงเหล่านี้ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง อย่างไรก็ตาม ความเครียดที่พืชได้รับอาจส่งผลต่อการสร้างและสลายของรงควัตถุในใบ โดยเฉพาะคลอโรฟิลล์ ซึ่งสามารถสลายตัวได้ง่าย (Iturbe-Ormaetxe, Escuredo, Arrese-Igor, & Becana, 1998) ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง (Manivannan et al., 2007; Ommen, Donnelly, Vanhoutvin, Oijen, & Manderscheid, 1999) สอดคล้องกับการศึกษาของ Mafakheri และคณะ ในปี ค.ศ. 2010 ที่พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ของ chickpea (*Cicer arietinum* L.) จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อได้รับความเครียดจากความแล้ง (Mafakheri, Siosemardeh, Bahramnejad, Struik, & Sohrabi, 2010) เช่นเดียวกับการศึกษาผลของความเครียดจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของต้น *Phaseolus vulgaris* L. ที่พบว่า การได้รับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 50 ถึง 200 มิลลิโมลาร์ ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0 มิลลิโมลาร์) ในขณะที่

แคโรทีนอยด์จะมีปริมาณลดต่ำกว่าชุดควบคุมเมื่อได้รับสารละลายไซเตียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม (Taibi et al., 2016) หรือการศึกษาผลกระทบร่วมกันของความเป็นกรด (pH 3.0 และ 4.0) และอะลูมิเนียมความเข้มข้นสูงต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ของต้นอ่อนของ ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus* sp.) นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณของคลอโรฟิลล์ของยูคาลิปตัสที่ได้รับ ความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพจะมีปริมาณลดลงต่ำกว่าชุดควบคุมที่ไม่ได้รับความเครียด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Yang et al., 2015)

อย่างไรก็ตาม การตอบสนองต่อสภาวะเครียดและการปรับตัวเพื่อให้สามารถ รอดชีวิตจากสภาวะเครียดทางกายภาพต่าง ๆ ได้ พืชต้องมีกลไกการปรับตัวเพื่อป้องกันตัวเอง ไม่ให้ได้รับความเสียหายจากความเครียดที่ได้รับหรือให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด รวมทั้งยังต้อง มีการซ่อมแซมระบบที่ถูกทำลายจากสภาวะเครียดนั้น ๆ ให้เป็นปกติในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งการ รักษาระดับคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์เป็นหนึ่งในกลไกที่พืชใช้ปรับตัวเพื่อให้อยู่รอดได้ในสภาวะ เครียด การสกัดรงควัตถุด้วยตัวทำละลายไม่มีขั้ว เช่น เอทานอล อะซิโตน และไดเมทิลซัลฟอกไซด์ และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 480 649 และ 665 นาโนเมตร (Aroyehun, Makinde, & Isa, 2016; Makinde & Akande, 2012; Sumanta, Haque, Nishika, & Suprakash, 2014) หรือการวัดค่าดัชนีความเขียวของแผ่นใบ (SPAD value) ด้วยเครื่อง คลอโรฟิลล์มิเตอร์สามารถบ่งบอกถึงปริมาณของรงควัตถุชนิดต่าง ๆ ในใบพืชได้ จากการศึกษา ปริมาณคลอโรฟิลล์ของข้าวสาลีที่ได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้นสูงและความเครียด ต่าง ๆ จากสภาพแวดล้อม โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของค่าดัชนีความเขียวและปริมาณ คลอโรฟิลล์ที่สกัดได้ พบว่า ค่าดัชนีความเขียวจะสูงขึ้นตามปริมาณคลอโรฟิลล์ที่เพิ่มขึ้น (Ommen et al., 1999)

2. ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช

คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุ (pigment) ที่อยู่ในคลอโรพลาสต์ สามารถดูดกลืนแสง ในช่วงของแสงสีแดงที่ความยาวคลื่น 640 ถึง 700 นาโนเมตร ซึ่งกระตุ้นให้อิเล็กตรอนใน คลอโรพลาสต์อยู่ในสภาวะเร้าขั้นที่หนึ่ง (first excited state) และแสงสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่น ในช่วง 400 ถึง 450 นาโนเมตร ซึ่งกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในคลอโรพลาสต์อยู่ในสภาวะเร้าขั้นที่สอง (second excited state) ซึ่งการลดระดับอิเล็กตรอนจากสภาวะเร้าที่ไม่เสถียรกลับสู่สภาวะพื้น (ground state) หรือ de-excitation ระดับพลังงานที่ใช้กระตุ้นอิเล็กตรอนจะถูกลดลงจาก 2 กระบวนการ ได้แก่

1. การนำพลังงานไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthetic energy; P) คือพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดการถ่ายทอดอิเล็กตรอนจากศูนย์กลางปฏิกิริยา (reaction center) ในระบบแสงสอง (photosystem II; PSII)

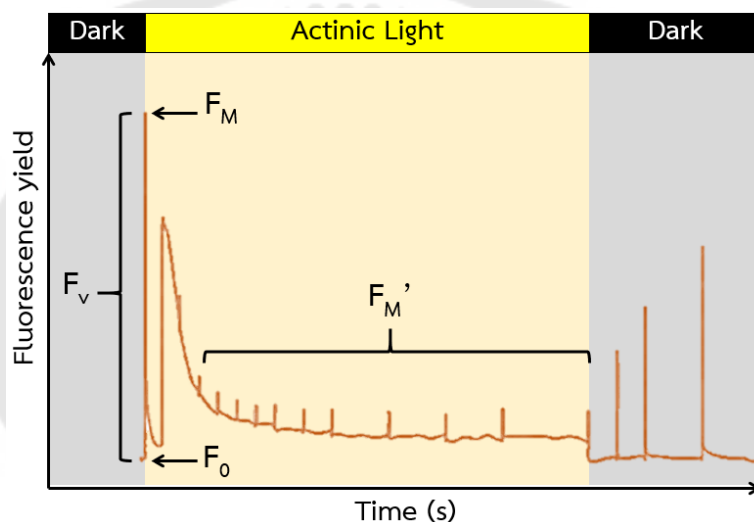
2. การปลดปล่อยพลังงานในรูปของพลังงานความร้อน (thermal dissipation as heat; H) และคลื่นแสงหรือรังสีคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence, F) ดังนั้น รังสีคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์จึงสามารถใช้ทำนายถึงประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชได้ (Rungrat et al., 2016)

คลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (chlorophyll fluorescence, F) คือ แสงสีแดงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 680 ถึง 720 นาโนเมตร เป็นช่วงของคลื่นแสงที่มีพลังงานต่ำกว่าช่วงแสงที่พืชดูดกลืนได้ โดยการปลดปล่อยพลังงานในรูปของรังสีฟลูออเรสเซนซ์จะไม่เกินร้อยละ 3 ของแสงที่ส่องผ่านใบพืชและเกือบทั้งหมดเกิดขึ้นบริเวณศูนย์กลางปฏิกิริยาของระบบแสงสอง ทั้งนี้เมื่อใบอยู่ในที่มีดหรือไม่ได้รับแสงเป็นระยะเวลาหนึ่ง (ประมาณ 20 ถึง 30 นาที) การเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจะไม่เกิดขึ้น ตัวรับอิเล็กตรอน (quinone acceptor) ที่ต่ออยู่กับศูนย์กลางปฏิกิริยาของระบบแสงสอง (reaction center of PSII; CRII) จะอยู่ในสถานะเปิด เมื่อให้พลังงานแสงที่มีความเข้มแสงไม่มากพอ จะทำให้เกิดการแยกอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของน้ำ (modulated measuring light) พลังงานส่วนนี้จะถูกถ่ายเทออกมาในรูปของรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่เรียกว่า รังสีฟลูออเรสเซนซ์ต่ำสุด (minimum fluorescence yield, F_0) เมื่อให้ความเข้มแสงที่สูงมากจน saturation pulse มากกว่า 6,000 ไมโครโมล โปรตอนต่อตารางเมตรวินาที เป็นระยะเวลา 0.5 ถึง 1 วินาที ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเข้าสู่ระบบ quinone acceptor จึงอยู่ในสภาพรีดิวซ์เต็มที่ (fully reduced state) ถ้าใบยังได้รับแสงต่อไปจะเกิดพลังงานส่วนเกินที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ในการถ่ายทอดอิเล็กตรอน จึงมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา ค่าฟลูออเรสเซนซ์ที่ตำแหน่งนี้ เรียกว่า รังสีฟลูออเรสเซนซ์สูงสุด (maximum fluorescence yield, F_M) ความแตกต่างของค่า F_0 และ F_M เรียกว่า variable fluorescence (F_V) ค่าเหล่านี้สามารถใช้อธิบายถึงประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดที่พืชนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (maximum quantum efficiency of PSII, F_V/F_M) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) (Li, Wu, Sun, & Zhang, 2013)

$$FV/FM = FM - F_0 / FM \quad (1)$$

ในกรณีที่ใบพืชได้รับพลังงานแสง สามารถวัดค่าประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบแสงสองได้ ในขณะที่ใบพืชได้รับแสง เรียกค่าของรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่วัดได้ในตำแหน่งนี้ว่า steady-state fluorescence (F_S) และเมื่อให้แสงที่มีความเข้มข้นสูงมากกว่าจุด saturation pulse ใบพืชจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีฟลูออเรสเซนซ์สูงสุด (maximum fluorescence yield, F_M') (ภาพประกอบ 2) โดยค่า F_M จากสภาวะที่พืชไม่ได้รับแสง ค่า F_S และค่า F_M' สามารถใช้อธิบายประสิทธิภาพของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนผ่านระบบแสงสองได้ดังสมการที่ (2)

$$\text{Light quantum yield of PSII} = (F_M - F_S) / F_M' \quad (2)$$



ภาพประกอบ 2 ลำดับของขั้นของการตรวจสอบการปลดปล่อยรังสีฟลูออเรสเซนซ์ในพืช

นอกจากนี้ การให้แสงที่มีความเข้มข้นสูงมากจนทำให้ศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสงสอง (reaction center II, RCII) ปิดทั้งหมดชั่วขณะและเกิดรังสีฟลูออเรสเซนซ์สูงสุดเมื่อ RCII เกิดการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนอีกครั้ง และอยู่ในสภาวะที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้อีกครั้งจนทำให้รังสีฟลูออเรสเซนซ์ลดระดับลง ซึ่งเป็นการลดระดับลงจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่เรียกว่า photochemical quenching (qP) สามารถอธิบายถึงสัดส่วนของ quinine pool ที่เปิดรับอิเล็กตรอนได้หลังจากเคลื่อนย้ายไปยังตัวรับอิเล็กตรอนในลำดับถัดไป ซึ่งค่า qP สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3)

$$qP = (F_M - F_S) / (F_M - F_0) \quad (3)$$

ในขณะที่การปลดปล่อยพลังงานโดยวิธีการอื่น ๆ เรียกว่า non-photochemical quenching (qN) เป็นการวัดพลังงานที่ไม่ได้สูญเสียไปในรูปของรังสีฟลูออเรสเซนซ์ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$qN = 1 - [(F_M - F_S) / (F_M - F_0)] \quad (4)$$

เนื่องจากรงควัตถุชนิดต่าง ๆ ทำหน้าที่จับพลังงานแสงและส่งพลังงานแสงมายังคลอโรฟิลล์ เอ ชนิดพิเศษที่อยู่ในศูนย์กลางปฏิกิริยา ดังนั้น ประสิทธิภาพในการใช้แสงของพืชและปริมาณรงควัตถุในใบพืชจึงมีความสัมพันธ์กัน (Dingkuhn, Datta, Javellana, Pamplona, & Schnier, 1992) การศึกษาความสามารถในการใช้แสงของพืชจึงมักศึกษาควบคู่ไปกับการวัดปริมาณรงควัตถุชนิดต่าง ๆ ในใบพืช เช่น การศึกษาความเครียดจากสารละลายเกลือต่อค่าดรชนี้ความเขียวของใบและปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่ปลดปล่อยออกจากใบของต้น Reps (*Brassica napus* L.) โดย Pak และคณะ (2009) ซึ่งพบว่า การได้รับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้น 14 และ 18 dS m⁻¹ เป็นระยะเวลา 30 วัน ทำให้ค่าดรชนี้ความเขียวและค่า F_v/F_m ของใบลดลง โดยการได้รับสารละลายเกลือที่ความเข้มข้น 18 dS m⁻¹ ทำให้ค่า qP ของใบลดลงสูงสุดถึง 4 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ได้รับสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 2.5 dS m⁻¹ สอดคล้องกับค่า qN ที่เพิ่มสูงกว่าชุดควบคุม เมื่อต้น Reps ได้รับสารละลายเกลือที่ความเข้มข้นสูงขึ้น (Pak, Nabipour, & Meskarbashee, 2009)

ในสภาวะดินเปรี้ยวที่มีอะลูมิเนียมไอออนอยู่ในสารละลายดินมากจนมีผลยับยั้งการพัฒนาและการเจริญเติบโตของรากพืช ทำให้การดูดใช้น้ำและธาตุอาหารของรากพืชลดลง พืชจึงอาจได้รับความเครียดจากการขาดน้ำได้ นอกจากนี้ อะลูมิเนียมไอออนยังส่งเสริมให้เกิดการสะสมของ free radicle ภายในเซลล์พืช โดยเฉพาะกลุ่มของ reactive oxygen species (ROS) (Yamamoto et al., 2002) เช่นเดียวกับความเครียดที่พืชได้รับจากมลภาวะต่าง ๆ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โอโซน (O₃) ไนโตรออกไซด์ (NO_x) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และความเครียดอื่น ๆ ที่พืชได้รับจากสภาพแวดล้อม (Muneer, Kim, Choi, Lee, & Lee, 2014) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน โดย ROS ไม่เพียงแต่ทำให้เกิดความเสียหายต่อเยื่อหุ้มเซลล์เท่านั้น แต่ยังทำความเสียหายกับเยื่อหุ้มคลอโรพลาสต์และโครงสร้างที่มีเยื่อหุ้มอื่น ๆ ภายในเซลล์ (Christine H Foyer & Noctor, 2005a, 2005b; Mittler, Vanderauwera, Gollery, & Breusegem, 2004) การเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันจาก ROS จึงส่งผลต่อความคงตัวของโปรตีนชนิดต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของระบบแสงในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ที่ฝังตัวอยู่บนเยื่อหุ้มไทลาคอยด์

ภายในคลอโรพลาสต์ ทำให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชลดลง จากการศึกษาของ Muneer และคณะ ในปี ค.ศ. 2014 โดยกำหนดให้ต้นสตรอเบอร์รี่ได้รับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไนโตรออกไซด์ (NO_x) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า การได้รับมลภาวะทั้ง 3 ชนิด ทำให้เกิดการสะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) และซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O₂⁻) สูงกว่าชุดควบคุมที่ไม่ได้รับมลภาวะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเฉพาะในกลุ่มของต้นสตรอเบอร์รี่ที่ได้รับมลภาวะที่ความเข้มข้นสูงมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนสูงกว่าชุดควบคุมถึง 3 เท่า และเมื่อพิจารณาจากปริมาณรงควัตถุในใบของ พบว่า คลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์มีปริมาณลดลงต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมาก และสอดคล้องกับผลของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (net photosynthesis rate) และค่า maximum quantum efficiency of PSII (F_v/F_m) ที่มีค่าลดลงเมื่อต้นสตรอเบอร์รี่ได้รับความเครียดจากมลภาวะ (Muneer et al., 2014) จากการศึกษาข้างต้นนี้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของ ROS ภายในเซลล์พืชทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ลดลง ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและประสิทธิภาพการใช้แสงของพืช

3. บทบาทของอนุมูลอิสระและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในพืช

ปัจจัยทางกายภาพ (physical factor) และชีวภาพ (biological factor) ได้แก่ คลื่นความร้อน ความหนาวเย็น ความเข้มแสงที่มากเกินไป การขาดน้ำ ความเค็ม ค่า pH โลหะหนัก มลภาวะในดิน โรคพืช การเข้าทำลายต้นพืชโดยแมลง รวมทั้งสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ล้วนทำให้พืชเกิดความเครียดและนำไปสู่การเกิดและสะสมอนุมูลอิสระ (free radicals) ภายในเซลล์พืช โดยอนุมูลอิสระ คือ สารที่มีอิเล็กตรอนอิสระ (unpaired electron) อย่างน้อย 1 อิเล็กตรอน เกิดขึ้นได้เมื่อพันธะระหว่างอะตอมแตกออก อนุมูลอิสระไม่เสถียรและไวต่อการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารที่อยู่ข้างเคียง จึงทำให้สารข้างเคียงที่สูญเสียอิเล็กตรอนหรือได้รับอิเล็กตรอนจะกลายเป็นอนุมูลอิสระและเข้าทำปฏิกิริยากับสารอื่นต่อไปเป็นลำดับ (Cornelli, 2009) ระดับความเป็นพิษของอนุมูลอิสระขึ้นอยู่กับความสามารถในการ oxidized สารชีวโมเลกุลชนิดอื่น ๆ ซึ่งสารที่สามารถออกซิไดซ์สารอื่น ๆ ได้ เรียกว่า รีแอคทีฟสปีชีส์ (reactive species, RS) แบ่งออกได้หลายชนิดตามโมเลกุลที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้

อย่างไรก็ตาม สารที่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ไม่จำเป็นต้องเป็นสารในกลุ่ม free radical เท่านั้น หากเป็นสารในกลุ่ม non-radical ที่มีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ก็จัดอยู่ในกลุ่มของ RS ด้วยเช่นกัน RS ที่พบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของรีแอคทีฟออกซิเจนสปีชีส์ (reactive oxygen species, ROS) ได้แก่ ออกซิเจนเรดิคัล (oxygen radical, O₂⁻)

ซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (superoxide radical, $O_2^{\cdot-}$) ไฮดรอกซิลแรดิคัล (hydroxyl radical, OH^{\cdot}) ไฮโดรเปอร์ออกซิล แรดิคัล (hydroperoxyl radical, HO_2^{\cdot}) เพอรอกซิลแรดิคัล (peroxyl radical, RO_2^{\cdot}) อัลคอกซิลแรดิคัล (alkoxyl radical, RO^{\cdot}) คาร์บอเนตแรดิคัล (carbonate radical, $CO_3^{\cdot-}$) ซิงเกิลทอกซิเจน (singlet oxygen, $^1O_2^*$) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2) โอโซน (ozone, O_3) และออกกานิกเพอรอกไซด์ (organic peroxide, $ROOH$) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่า RS ยังสามารถเกิดได้ในรูปของรีแอคทีฟคลอไรด์สปีชีส์ (reactive chloride species) ได้แก่ คลอรีนแรดิคัล (chlorine radical, Cl^{\cdot}) กรดไฮโปคลอริก (hypochloric acid, $HOCl$) ไนทริลคลอไรด์ (nitryl chloride, NO_2Cl) และแก๊สคลอรีน (chlorine gas, Cl_2) เป็นต้น และรูปของรีแอคทีฟไนโตรเจนสปีชีส์ (reactive nitrogen species) ได้แก่ ไนตริกออกไซด์แรดิคัล (nitric oxide radical, NO^{\cdot}) ไนโตรเจนไดออกไซด์แรดิคัล (nitrogen dioxide radical, NO_2^{\cdot}) ไนตริกออกไซด์ (nitric oxide, HNO_2) เพอรอกซิไนโตร (peroxynitrite, $ONOO^{\cdot}$) กรดเพอรอกซิลไนตริก (peroxynitrous acid, $ONOOH$) และไนทริลคลอไรด์ (nitryl chloride, $NOOCl$) เป็นต้น (Cornelli, 2009)

ธาตุออกซิเจน (oxygen) เป็นธาตุที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ เนื่องจากเกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ภายในอะตอมของออกซิเจนประกอบด้วยอนุภาคมูลฐาน โดยมีโปรตอนจำนวน 8 อนุภาค และนิวตรอนจำนวน 8 ถึง 10 อนุภาค อยู่รวมกันบริเวณนิวเคลียสของอะตอม และมีอิเล็กตรอนจำนวน 8 อิเล็กตรอนเคลือบที่รอบนิวเคลียสใน 5 orbital ($1S^2 2S^2 2P^4$) ซึ่งอิเล็กตรอนวงนอกไม่ได้เข้าคู่กัน ทำให้ออกซิเจนไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่อกออกซิเจนรับอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของโลหะ หรือลิพิดฟรีแรดิคัล (lipid free radical) จึงเกิดซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัลแอนไอออน (superoxide radical anion) ซึ่งเป็นออกซิไดซิงเอเจนท์ (oxidizing agent) ที่รุนแรง นอกจากนี้ เมื่อกออกซิเจนได้รับรังสียูวี (ultraviolet, UV) จะเกิดเป็นซิงเกิลทอกซิเจน (singlet oxygen) ซึ่งเป็นออกซิไดซิงเอเจนท์ที่ไวกว่าซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัลแอนไอออน เพื่อลดอันตรายจาก ROS ที่เกิดขึ้น เซลล์ของสิ่งมีชีวิตจึงต้องเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของ ROS ให้เป็นน้ำซึ่งไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

สำหรับเซลล์พืชที่ได้รับความเครียดจากปัจจัยต่าง ๆ และมีการกระตุ้นให้เกิด ROS ภายในเซลล์ ROS จะกระตุ้นให้เกิดการสังเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิด ได้แก่ กลุ่มสารต้านอนุมูลอิสระที่มีคุณสมบัติเป็นเอนไซม์ เช่น เอนไซม์คะตะเลส (catalase, CAT) เอนไซม์แอสคอร์เบทเพอรอกซิเดส (ascorbate peroxidase, APX) เอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (superoxide dismutase, SOD) เอนไซม์มอนด์ไฮโดรแอสคอร์เบทรีดักเตส (mono dehydro

ascorbate reductase) เอนไซม์ดีไฮโดรแอสคอร์เบตรีดักเตส (dehydro ascorbate reductase) เอนไซม์กลูต้าไธโอน-เอส-ทรานสเฟอเรส (glutathione-S-transferase, GST) และเอนไซม์กลูต้าไธโอนรีดักเตส (glutathione reductase) เป็นต้น สารต้านอนุมูลอิสระที่ไม่ได้เป็นเอนไซม์ เช่น แอสคอร์เบต (ascorbate) กลูต้าไธโอน (glutathione) โทโคฟีรอล (tocopherol) และแคโรทีนอยด์ (carotenoid) เป็นต้น (Muneer et al., 2014; Panda et al., 2009; Sugie, Naydenov, Mizuno, Nakamura, & Takumi, 2006) อย่างไรก็ตาม สารต้านอนุมูลอิสระเหล่านี้มีกิจกรรมในการกำจัดอนุมูลอิสระได้แตกต่างกัน

ในขณะที่เซลล์เกิดกระบวนการเมแทบอลิซึมหรือได้รับความเครียดจากปัจจัยต่าง ๆ อย่างรุนแรงและต่อเนื่องจนไม่สามารถเปลี่ยนโมเลกุลของ ROS หรืออนุมูลอิสระชนิดอื่น ๆ ให้อยู่ในรูปที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยาได้ทั้งหมด อนุมูลอิสระเหล่านี้จะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างระดับเซลล์และเนื้อเยื่อผ่านกระบวนการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน (Carvalho & Helena, 2008) โดยไฮดรอกซิลเรดิคัลเป็นสาร ROS ตั้งต้นที่เกิดขึ้น ในแต่ละวันภายในเซลล์ 1 เซลล์จะเกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลขึ้นมากกว่า 4 ล้านโมเลกุล หรือในอัตรา 50 โมเลกุลต่อวินาที และยังเป็น ROS รูปหนึ่งที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก เคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว ละลายน้ำได้ และทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว (Ayala, Munoz, & Arguelles, 2014; Halliwell & Gutteridge, 1984) และสามารถถูกเปลี่ยนไปเป็น ROS ชนิดอื่น ๆ ต่อไปด้วยกระบวนการภายในเซลล์ (ภาพประกอบ 3) การเกิด lipid peroxidation ภายในเซลล์แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

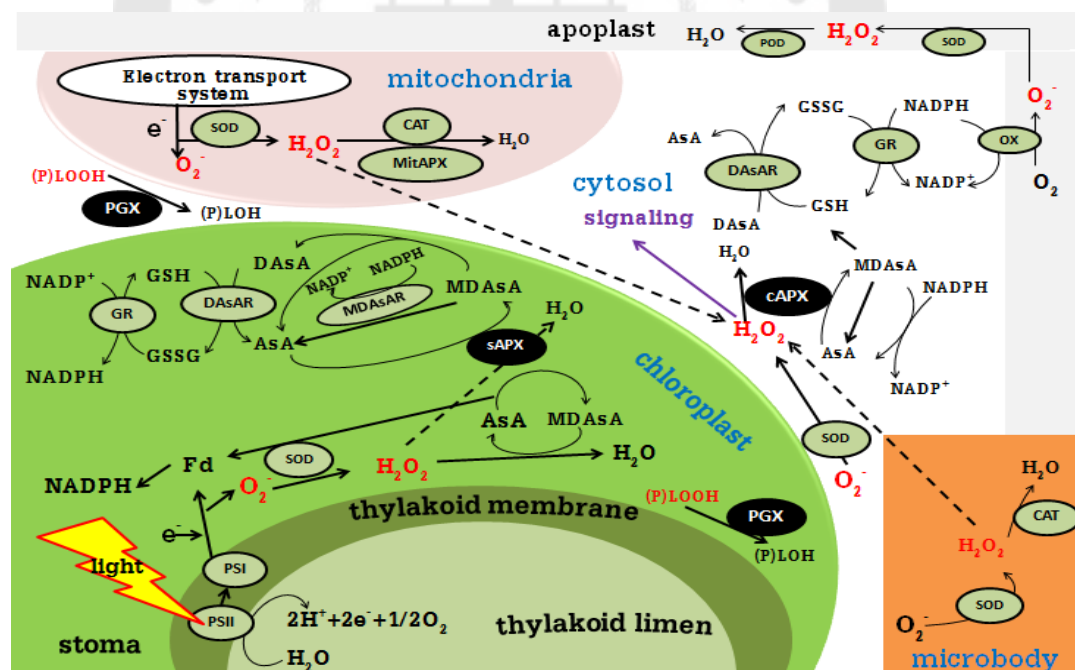
1. initiation phase เริ่มจากอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนบริเวณกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่เป็นโครงสร้างภายในเซลล์เกิดเป็น L^{\cdot}

2. propagation phase โดย L^{\cdot} จาก initiation phase จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจนได้เป็น LOO^{\cdot} และ/หรือเข้าจับกับไฮโดรเจนบริเวณกรดไขมันไม่อิ่มตัวอีกครั้ง โดยเกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่จนได้ $LOOH$

3. termination phase ซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง LOO^{\cdot} โดยวิตามินอีและได้สารตัวใหม่ที่ไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Yin, Xu, & Porter, 2011) ในขณะที่ $O_2^{\cdot-}$ และ HO^{\cdot} จะถูกเปลี่ยนให้เป็น H_2O_2 และ H_2O โดยผ่านกระบวนการที่อาศัยการทำงานของเอนไซม์ (enzymatic processes) และ/หรือไม่อาศัยการทำงานของเอนไซม์ (nonenzymatic processes) (Ayala et al., 2014; Shigeoka et al., 2002)

ในการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันจากความเครียดออกซิเดทีฟ (oxidative stress) ภายในเซลล์หรือส่วนต่าง ๆ ของพืช ภายหลังจากการได้รับผลกระทบ

จากความเครียดทางกายภาพและชีวภาพ มักนิยมจากระดับความเข้มข้นของ H_2O_2 และ $O_2^{\cdot-}$ ที่เพิ่มสูงขึ้นหรือลดลง เนื่องจาก H_2O_2 เป็นสารที่เกิดขึ้นได้จากกิจกรรมต่าง ๆ ของพืช (C.H. Foyer & Shigeoka, 2011; Junglee, Urban, Sallanon, & Lopez-Lauri, 2014) โดยในปี ค.ศ. 2002 Hsieh และคณะ พบว่า ต้นมะเขือเทศที่ได้รับการถ่ายยีนทนแล้ง (*CBF1*) มีปริมาณน้ำ (water content) ในต้นสูงกว่าชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการถ่ายยีน สอดคล้องกับปริมาณ H_2O_2 ในใบของชุดที่ได้รับการถ่ายยีนที่ลดลงต่ำกว่าชุดควบคุมถึง 7 เท่า (Hsieh, Lee, Charng, & Chan, 2002) เช่นเดียวกับการทดลองของ Behnamnia และคณะ (2009) ที่ศึกษาผลของ 24-epibrassinolide (EBL, $C_{28}H_{48}O_6$, MW = 480) ที่ระดับความเข้มข้น 0.01 และ 1 ไมโครโมลาร์ ต่อความสามารถในการทนทานต่อความแห้งแล้งของมะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum* Mill. var. Tomba (BB204)) โดยการรดให้น้ำเป็นระยะเวลา 0 ถึง 5 วัน พบว่า ใบมะเขือเทศที่ได้รับ EBR มีความเข้มข้นของ H_2O_2 ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ได้รับสาร EBR ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพรลีน (proline) ที่เป็นสารป้องกันแรงดันออสโมติก (osmoprotectant) ชนิดหนึ่งที่พืชสร้างขึ้นเมื่อได้รับความเครียดจากการขาดน้ำ (Behnamnia, Kalantari, & Ziaie, 2009)



ภาพประกอบ 3 กลไกการกำจัด ROS ภายในเซลล์พืช

จากการศึกษาความสัมพันธ์แบบซิมไบโอซิส (symbiosis) ของ Arbuscular mycorrhizal 2 ชนิด ได้แก่ *Funneliformis mosseae* และ *Rhizophagus intraradices* กับมะเขือเทศ (*Solanum lycopersicum*) ในสภาวะเครียดจากการขาดน้ำ ซึ่งพบว่า เมื่อมะเขือเทศได้รับความเครียดจากการขาดน้ำปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโพรลีนเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับต้นมะเขือเทศที่ได้รับน้ำปกติ (Chitarra et al., 2016) ถึงแม้ว่าการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันจะได้ LOOH เป็นผลผลิตหลัก แต่ LOOH ยังสามารถถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้อีกหลายชนิด เช่น สารมาลondiอัลดีไฮด์ (malondialdehyde, MDA) สารโพรพานอล (propanal) สารเฮกซานอล (hexanal) และสาร 4-ไฮดรอกซีลโนเนนอล (4-hydroxynonenal, 4-HNE) โดย MDA จัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่พบมากที่สุด และเป็นผลผลิตสุดท้ายของปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน ในขณะที่ 4-HNE มีความเป็นพิษต่อเซลล์สูงที่สุด (Ayala et al., 2014; Esterbauer, Eckl, & Ortner, 1990; Janero, 1990)

ในการศึกษาการตอบสนองต่อความเครียดและการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันภายในเซลล์พืช จึงมักนิยามวิเคราะห์ปริมาณ MDA ที่สะสมอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยการทำปฏิกิริยากับกรดไธโอบาร์บิทรูริก (thiobarbituric acid, TBA) (Esterbauer et al., 1990; Pryor, 1989; Velikova, Jordanov, & Edreva, 2000) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ MDA มักสอดคล้องกับปริมาณของ H_2O_2 ที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน (Behnamnia et al., 2009; Chitarra et al., 2016) สอดคล้องกับผลการศึกษา ในต้น Indian mustard (*Brassica juncea* L.) ที่ได้รับความเครียดจาก NaCl ความเข้มข้น 100 และ 200 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณ H_2O_2 เพิ่มขึ้นกว่าชุดควบคุมที่ไม่ได้รับสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ถึง 2.5 และ 3.5 เท่า ตามลำดับ และยังส่งผลให้มีปริมาณ MDA เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (Ahmad et al., 2015)

จากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันในต้นอ่อนของข้าว (*Oryza sativa* L.) สายพันธุ์ที่ไวต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียมภายใต้ความเครียดจากอะลูมิเนียม พบว่า การได้รับสารละลายธาตุอาหารที่มีอะลูมิเนียมความเข้มข้น 80 $\mu\text{mol/L}$ เป็นระยะเวลา 56 ชั่วโมง ส่งผลให้มีปริมาณ MDA สะสมในใบของข้าวเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 90 เมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ได้รับอะลูมิเนียม (Meriga, Reddy, Rao, Reddy, & Kishor, 2004) เช่นเดียวกับการเพาะเลี้ยงต้นโบราโก (*Borago officinalis* L.) ในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland's ที่เติมอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ความเข้มข้น 20 40 และ 60 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้เติมอะลูมิเนียมคลอไรด์ (อะลูมิเนียมคลอไรด์ 0 มิลลิโมลาร์) เมื่อตรวจสอบปริมาณ MDA ที่สะสมในใบ พบว่า ต้นโบราโกที่ได้รับสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น

20 40 และ 60 มิลลิโมลาร์ต่อลิตร มีปริมาณ MDA สูงกว่าชุดควบคุมถึง 1.67 2.41 2.78 เท่า ตามลำดับ (Shahnaz, Shekoofeh, Kourosh, & Moohamadbagher, 2011)

อย่างไรก็ตาม แม้ว่า ROS จะเป็นสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และนำไปสู่การตายของเซลล์ แต่โมเลกุลของ ROS ยังทำหน้าที่เป็นสัญญาณโมเลกุล (signaling molecule) ภายในเซลล์พืช (Christine H. Foyer, Lelandais, & Kunert, 1994) และยังทำหน้าที่ควบคุมการเจริญเติบโต การพัฒนา การตอบสนองต่อความเครียดทางกายภาพและทางชีวภาพ และโปรแกรมการตายของเซลล์ (Bailey-Serres & Mittler, 2006) เมื่อพืชได้รับความเครียดจากการสูญเสียน้ำ กรดแอบไซซิก (abscisic acid, ABA) จะกระตุ้นให้เกิดการสังเคราะห์ ROS ภายในเซลล์ปากใบ โดย ROS ทำให้เกิดการปิดปากใบจากการกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนย้ายแคลเซียมไอออนผ่าน Ca^{2+} channels บริเวณเยื่อหุ้ม guard cell (Wang & Song, 2008) ดังนั้น การศึกษาปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นหรือกิจกรรมของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่กำจัด ROS ภายในเซลล์จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยยืนยันได้ว่า ปริมาณของ ROS ที่เพิ่มขึ้น เกิดจากการส่งสัญญาณภายในเซลล์พืชเพื่อกระตุ้นให้เกิดการเจริญเติบโตตามธรรมชาติ หรือเป็นการเกิด ROS จากปัจจัยภายนอกที่พืชได้รับ นอกจากนี้ ยังมีรายงานที่ต้น Indian mustard ที่ได้รับไซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นสูง ทำให้มีการสะสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารมาลอนไดอัลดีไฮด์สูงขึ้น ซึ่งการศึกษาเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกลไกการกำจัด ROS ได้แก่ เอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) และเอนไซม์ peroxidase activity (POD) พบว่า เอนไซม์ SOD และเอนไซม์ POD มีกิจกรรมของเพิ่มสูงขึ้นเมื่อได้รับไซเดียมคลอไรด์ที่มีระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (Ahmad et al., 2015) และมีรายงานว่า ในต้นมะเขือเทศที่ได้รับการถ่ายยีนทนแล้ง (*CBF1*) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เป็นน้ำมีกิจกรรมของเอนไซม์ CAT สูงกว่าต้นมะเขือเทศในชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการถ่ายยีน ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลดลงต่ำกว่าต้นมะเขือเทศที่ไม่ได้รับการถ่ายยีน (Hsieh et al., 2002)

4. บทบาทของโพรลีนในเซลล์พืช

โพรลีน (Proline) เป็นกรดอะมิโนชนิดหนึ่งในสิ่งมีชีวิตที่ถูกสร้างจากกรดกลูตามิก (glutamic acid) เช่นเดียวกับ อาร์จินีน (arginine) และกลูตามีน (glutamine) (Kishor, Polavarapu, Kumari, Sunita, & Sreenivasulu, 2015; Sharma & Verslues, 2010)

โพรลีนเป็นกรดอะมิโนที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงถึง 14 กิโลกรัมต่อน้ำ 1 กิโลกรัม (Kishor et al., 2015) กระบวนการสังเคราะห์โพรลีนเริ่มต้นจากการเปลี่ยนสารกลูตาเมต (glutamate) เป็น glutamic-g-semialdehyde (GSA) โดยการทำงานของเอนไซม์ g-glutamyl kinase และ glutamic-g-semialdehyde dehydrogenase จากนั้น GSA เกิดกระบวนการ dehydration โดยไม่มีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้อง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสาร pyrroline-5-carboxylate reductase จากปฏิกิริยานี้จะได้โพรลีนโดยโพรลีนบางส่วนจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนและบางส่วนถูกเคลื่อนย้ายไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืชผ่านทางท่อลำเลียงอาหาร ในสภาวะปกติพืชมีการสังเคราะห์และสะสมโพรลีนอยู่ในระดับต่ำและถูกควบคุมโดยกระบวนการ feedback inhibition อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์และสะสมโพรลีนยังเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อพืชอยู่ในระยะสร้างดอก ซึ่งจากการศึกษาการสะสมของกรดอะมิโนหลายชนิดในส่วนต่าง ๆ ของต้นมะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum* cv Moneymaker) พบว่าดอกมะเขือเทศมีการสะสมโพรลีนสูงขึ้นไปถึง 60 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเยื่อบริเวณใบ ราก และผล และยังพบอีกว่าปริมาณกรดอะมิโนต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโพรลีนมากกว่าร้อยละ 70 ที่พบในดอกสะสมอยู่ในละอองเรณู (Schwacke et al., 1999) และการศึกษาปริมาณกรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ ในผลส้ม ซึ่งพบการสะสมของโพรลีนสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรดอะมิโนชนิดอื่น ๆ (Clements & Leland, 1962)

นอกจากนี้ การสังเคราะห์และสะสมโพรลีนในพืชบางชนิดที่ได้รับความเครียดจากปัจจัยต่าง ๆ (Verbruggen & Hermans, 2008) เช่น ความร้อน ความหนาวเย็น ความเค็ม ความสมบูรณ์ของธาตุอาหาร โลหะหนัก (Bassi & Sharma, 1993) รังสียูวี (Saradhi, AliaArora, & Prasad, 1995) และการขาดน้ำ (Choudhary, Sairam, & Tyagi, 2005) เป็นต้น อาจเพิ่มสูงขึ้นกว่าพืชปกติถึง 100 เท่า ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช (Verbruggen & Hermans, 2008) ซึ่งปัจจัยทางกายภาพเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุสำคัญที่นำไปสู่สภาพการขาดน้ำของพืช เมื่อพืชได้รับความเครียดจากการขาดน้ำ เพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเซลล์และส่วนต่าง ๆ ของพืช พืชจะปรับค่าศักย์ออสโมติกภายในเซลล์ด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายภายในเซลล์ โดยการสังเคราะห์และสะสมโพรลีนที่เป็นสารป้องกันแรงดันออสโมติก (osmoprotectant) เช่นเดียวกับ น้ำตาล กรดอินทรีย์ บีทีน ไกลซีน เป็นต้น (Borgo, Marur, & Vieira, 2015) เพื่อป้องกันความเสียหายของเซลล์ที่เกิดจากความเครียดออสโมติก (osmotic stress) อย่างไรก็ตาม โพรลีนเป็นสารที่พืชสังเคราะห์และสะสมมากที่สุด สาเหตุหนึ่งอาจเป็นเพราะโพรลีน

เป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนให้กับพืชภายหลังจากกระบวนการสลายโพรงอินทรีย์ซึ่งสามารถนำคาร์บอนและไนโตรเจนเหล่านี้ไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ (Hare & Cress, 1997)

จากการศึกษาการถ่ายยีน *P5CS* (Δ -pyrroline-5-carboxylate synthetase) ซึ่งเป็นยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์โพรงอินทรีย์ให้กับต้นยาสูบ (*Nicotiana tabacum* cv Xanthi) และศึกษาการเกิด overexpression เมื่อยาสูบได้รับความเครียดจากการขาดน้ำ พบว่า ยาสูบที่ได้รับการถ่ายยีน *P5CS* มีการสะสมโพรงอินทรีย์ในใบสูงกว่า 5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับพืชปกติ (Kishor et al., 2015) และจากการศึกษาการเกิด overexpression ของยีน *P5CS* ในต้น *Arabidopsis* ที่กระตุ้นให้เกิดการแสดงออกของยีน *P5CS* จะช่วยส่งเสริมให้เกิดการสร้างดอกเร็วกว่าและมีจำนวนดอกมากกว่าพืชปกติ (Mattioli et al., 2008) ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่า ต้นอะราบิโดพซิสมีการสะสมโพรงอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเจริญเติบโตบนอาหารเพาะเลี้ยงที่มีโพรีเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol, PEG) แมนนิทอล (mannitol) และโซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride, NaCl) ที่ความเข้มข้นสูงขึ้น (Sharma & Verslues, 2010)

สำหรับพืชที่เจริญเติบโตในพื้นที่ดินเปรี้ยวที่มีอะลูมิเนียมไอออนในสารละลายดินที่ระดับความเข้มข้นสูง จนส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาของราก พืชจึงมักแสดงอาการขาดน้ำร่วมด้วย ส่งผลให้เกิดการสังเคราะห์และสะสมโพรงอินทรีย์ในต้นพืช จากการศึกษาผลของความเครียดจากอะลูมิเนียมร่วมกับความเครียดจากการขาดน้ำต่อการเจริญเติบโตและการสะสมโพรงอินทรีย์ในข้าวฟ่าง (*Sorghum bicolor* L. Moench) พบว่า ต้นข้าวฟ่างที่ได้รับอะลูมิเนียมความเข้มข้น 400 ไมโครโมลาร์ มีการสะสมของโพรงอินทรีย์สูงกว่าการได้รับอะลูมิเนียมความเข้มข้น 200 ไมโครโมลาร์ อยู่ 1.5 เท่า ส่วนต้นข้าวฟ่างที่ได้รับความเครียดจากการขาดน้ำด้วยโพรีเอทิลีนไกลคอลความเข้มข้นร้อยละ 7.0 มีการสะสมของโพรงอินทรีย์สูงกว่าการได้รับโพรีเอทิลีนไกลคอลความเข้มข้นร้อยละ 4.4 อยู่ 1.8 เท่า

อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาระหว่างต้นข้าวฟ่างที่ได้รับอะลูมิเนียมความเข้มข้นสูงสุด (400 ไมโครโมลาร์) เปรียบเทียบกับการได้รับโพรีเอทิลีนไกลคอลความเข้มข้นสูงสุด (ความเข้มข้นร้อยละ 7.0) พบว่า การได้รับโพรีเอทิลีนไกลคอลความเข้มข้นสูงมีปริมาณโพรงอินทรีย์สะสมสูงถึง 10 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับที่ได้รับอะลูมิเนียมความเข้มข้นสูง ในขณะเดียวกัน การศึกษาปัจจัยร่วมระหว่างอะลูมิเนียมและความแล้งจากโพรีเอทิลีนไกลคอล พบว่า ต้นข้าวฟ่างที่ได้รับปัจจัยร่วมกันระหว่างอะลูมิเนียมความเข้มข้น 400 ไมโครโมลาร์ และโพรีเอทิลีนไกลคอลความเข้มข้นร้อยละ 7.0 มีการสะสมของโพรงอินทรีย์สูงกว่าการได้รับปัจจัย

ร่วมกันระหว่างอะลูมิเนียมความเข้มข้น 400 ไมโครโมลาร์ และโพรวินิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น
ร้อยละ 4.4 ถึง 1.9 เท่า (Zaifnejad & Sullivan, 1997)



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดและดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์)
2. เตรียมแปลงปลูกโดยปรับสภาพดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดและเตรียมกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต
3. ปลูกและบำรุงรักษาต้นพริกชี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตในดินเปรี้ยวจัดตั้งแต่ระยะต้นกล้า (อายุ 60 วัน) ถึงระยะสิ้นสุดการเก็บเกี่ยวผลผลิต (อายุ 105 วัน หลังการย้ายปลูก)
4. ศึกษาการเจริญเติบโตทางลำต้น ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง และการให้ผลผลิตของพริกชี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่เติมถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดหรือปุ๋ยมาร์ล
5. วิเคราะห์ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โพรลีน และน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ในพริกชี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดหรือปุ๋ยมาร์ล
6. วิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุบางชนิดที่สะสมในพริกชี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดและดินเปรี้ยวจัดที่เติมถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดหรือปุ๋ยมาร์ล

วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี

1. วัสดุและอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน
2. วัสดุและอุปกรณ์สำหรับเตรียมต้นกล้า ได้แก่ เมล็ดพริกชี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต (*Capsicum annum* L. cv. Super hot) ดินผสม (ประกอบด้วย ดินร่วน ขุยมะพร้าว และถ่านแกลบ (อัตราส่วน 1:1:1))
3. วัสดุและอุปกรณ์และจักรกลการเกษตรสำหรับเตรียมแปลงปลูก ได้แก่ อุปกรณ์ระบบน้ำหยด อุปกรณ์ระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ให้แสงสว่าง เป็นต้น
4. วัสดุและอุปกรณ์สำหรับวัดคุณสมบัติทางเคมีของดินและถ่านชีวภาพ

5. วัดคลอโรฟิลล์และอุปกรณ์สำหรับวัดการเจริญเติบโตทางลำต้นและการให้ผลผลิต ได้แก่ เครื่อง chlorophyll meter (SPAD-502 Minolta Co., Ltd., Japan) และเครื่อง chlorophyll fluorometer (FMS 2; Hansatech Instruments, King's Lynn, UK)

6. วัดคลอโรฟิลล์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบทุติยภูมิบางชนิดในพืช

7. วัดคลอโรฟิลล์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกลไกการกำจัดอนุมูลอิสระ

วิธีการ

1. การเตรียมกล้าพริก โดยแช่เมล็ดพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต (*Capsicum annuum* L. cv. Super hot) ในน้ำเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ห่อด้วยผ้าขาวบางและบ่มในภาชนะปิดเป็นระยะเวลา 3 วัน แช่เมล็ดพริกส่วนหนึ่งไปใช้ในการทดลองที่ 1 เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดแต่การเจริญเติบโตของต้นอ่อนพริก ส่วนของเมล็ดที่เหลือ ทำการเพาะเมล็ดบนวัสดุปลูกที่มีส่วนผสมของดินร่วนต่อขุยมะพร้าวต่อแกลบดำในอัตราส่วน 1:1:1 ในถาดเพาะเมล็ด อนุบาลต้นกล้าในโรงเรือนที่มีแสงรำไร รดน้ำวันละ 1 ครั้ง จนกระทั่งต้นกล้าพริกมีใบจริง 8 ใบ อายุประมาณ 60 วัน คัดเลือกต้นกล้าพริกที่มีขนาดใกล้เคียงกันไปใช้ในการทดลองที่ 2 และ 3 ต่อไป (ภาพประกอบ 4)



ภาพประกอบ 4 ลักษณะของต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตอายุ 60 วัน หลังการเพาะเมล็ด

2. ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (corn cob biochar) ได้จากการนำซังข้าวโพดดิบมาผ่านกระบวนการแยกสลายอย่างรวดเร็วด้วยความร้อนสูงประมาณ 500 องศาเซลเซียส ในสภาพไร้ออกซิเจน วัดค่า pH ของดิน โดยใช้ดินน้ำหนัก 20 กรัม ผสมในน้ำ 20 มิลลิลิตร คนส่วนผสมให้เข้ากันทุก ๆ 5 นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที และตั้งส่วนผสมทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 30 นาที จึงวัดค่า pH ของดินด้วย pH meter

3. ดินเปรี้ยวจัด (strongly acid soil) ที่ใช้ในการศึกษาได้จากการสำรวจและเก็บตัวอย่างดินภาคสนามที่ระดับความลึกประมาณ 30 เซนติเมตร จำนวน 5 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งห่างกัน 2 เมตร บริเวณแปลงทดลอง 2 คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขตองครักษ์ (100.976447E, 14.104970N) วัดค่า pH ของดิน โดยใช้ดินที่แห้งสนิทน้ำหนัก 20 กรัม ผสมในน้ำ 20 มิลลิลิตร คนส่วนผสมให้เข้ากันทุก ๆ 5 นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที และตั้งส่วนผสมทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 30 นาที จึงวัดค่า pH ของดินด้วย pH meter

4. การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อนพริกขี้หนูซูเปอร์ฮอตในสภาพหลอดทดลอง เตรียมดินเปรี้ยวจัดที่ได้จากการสำรวจในข้อ 3 มาผึ่งในที่ร่มให้แห้งสนิท ผสมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด กำหนดให้

สิ่งทดลองที่ 1 ดินเปรี้ยวจัดที่ไม่ได้รับถ่านชีวภาพ (ชุดควบคุม)

สิ่งทดลองที่ 2 ดินเปรี้ยวจัดที่เติมถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 โดยมวล

สิ่งทดลองที่ 3 ดินเปรี้ยวจัดที่เติมถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยมวล

สิ่งทดลองที่ 4 ดินเปรี้ยวจัดที่เติมถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 10.0 โดยมวล

บ่มดินที่ผ่านการผสมไว้เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ จึงบรรจุวัสดุปลูกในขวดแก้วขนาด 8 ออนซ์ รดน้ำพอชุ่ม นำเมล็ดพริกขี้หนูที่ผ่านการแช่น้ำและบ่มในที่ชื้นตามขั้นตอนในข้อ 1 มาปลูกจำนวน 10 เมล็ดต่อขวด โดยกำหนดให้มีสิ่งทดลองละ 3 ข้ว ปิดฝาขวดและเพาะเลี้ยงต้นพริกภายใต้แสง LED สีขาวที่ความเข้มแสง 37 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ บันทึกการเจริญเติบโตของต้นอ่อนพริกโดยวัดความยาวต้น ความยาวราก น้ำหนักสดของต้นและน้ำหนักสดของราก

5. การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ต่อความสามารถในการใช้แสงและการเจริญเติบโตทางลำต้นของกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในสภาพโรงเรือน

5.1 การเตรียมดินสำหรับปลูกและการดูแลรักษาต้นพริก เก็บตัวอย่างดินเปรี้ยวจัดจากบริเวณที่ออกสำรวจในข้อ 3 ดำเนินการในสภาพเรือนเพาะชำของภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขตประสานมิตร (100.565348E, 13.745468N) ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560 วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) 4 สิ่งทดลอง (treatment) สิ่งทดลองละ 8 ซ้ำ ซ้ำละ 2 ค่าสังเกต (1 ค่าสังเกตคือต้นพริกจำนวน 1 ต้น) กำหนดให้ดินเปรี้ยวจัดในแต่ละสิ่งทดลองได้รับถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดที่ความเข้มข้นดังนี้

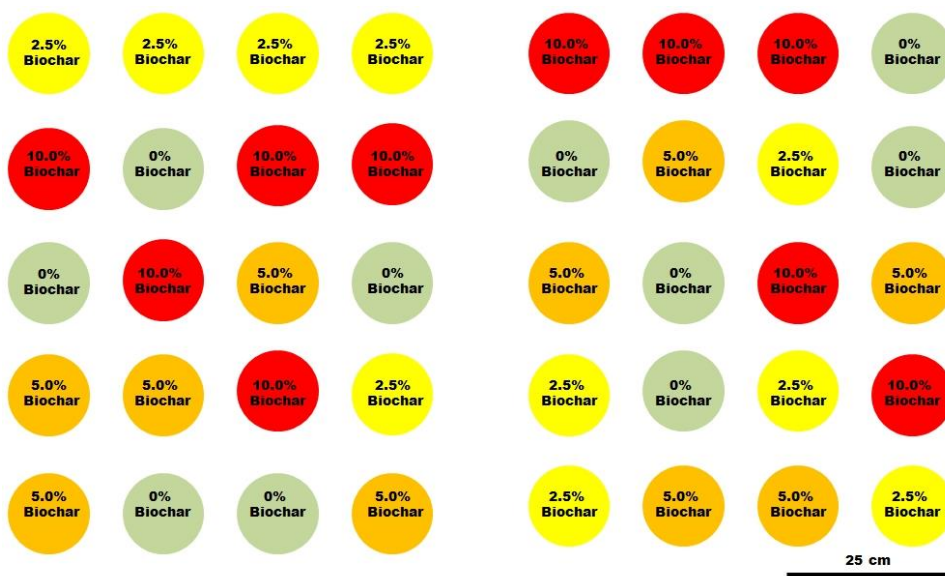
สิ่งทดลองที่ 1 ดินเปรี้ยวจัดที่ไม่ได้รับถ่านชีวภาพ (ชุดควบคุม)

สิ่งทดลองที่ 2 ดินเปรี้ยวจัดที่เติมถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 โดยมวล

สิ่งทดลองที่ 3 ดินเปรี้ยวจัดที่เติมถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 5.0 โดยมวล

สิ่งทดลองที่ 4 ดินเปรี้ยวจัดที่เติมถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 10.0 โดยมวล

บรรจุดินและถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดน้ำหนักรวม 5 กิโลกรัม ในกระถางพลาสติก ขนาด 9 นิ้ว ในแต่ละซ้ำ (กระถาง) ของแต่ละสิ่งทดลองถูกวางในสภาพโรงเรือนโดยสุ่ม ตั้งภาพประกอบที่ 5 และ 6 บันทึกความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุดทุก ๆ วัน ระหว่างดำเนินการทดลอง



ภาพประกอบ 5 แผนผังการจัดวางตำแหน่งกระถางต้นพริกของแต่ละสิ่งทดลองในสภาพโรงเรือน



ภาพประกอบ 6 การศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากขี้วัวโพดต่อความสามารถในการใช้แสง และการเจริญเติบโตทางลำต้นของกล้าพริกในสภาพโรงเรือน

5.2 การเจริญเติบโตและประสิทธิภาพในการใช้แสงของต้นพริก

5.2.1 การเจริญเติบโตของลำต้นส่วนเหนือดิน โดยบันทึกความยาวต้นตั้งแต่โคนต้นถึงบริเวณข้อสุดท้ายนับจากปลายยอดและพื้นที่ใบตั้งแต่เริ่มย้ายปลูกลง (กล้าพริกอายุ 60 วัน)

ไปจนถึงวันที่ดอกแรกของต้นพริกจำนวนร้อยละ 50 จากจำนวนต้นพริกทั้งหมดเริ่มบาน โดยพื้นที่ใบวัดจากใบลำดับที่ 3 และ 4 นับจากปลายยอด บันทึกน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นในวันสุดท้ายที่บันทึกผลการทดลอง นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) และตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's multiple-range test (DMRT) ด้วยโปรแกรม SPSS version 24 (Statistics package for the social sciences)

5.2.2 ค่าตรวจความเขียวและปริมาณรงควัตถุของใบ โดยวัดค่าตรวจความเขียวจากใบลำดับที่ 3 และ 4 นับจากปลายยอด จำนวน 10 ซ้ำ ซ้ำละ 2 ใบ ใบละ 4 ตำแหน่ง บันทึกค่าเฉลี่ยต่อใบ และตัดเนื้อเยื่อใบน้ำหนัก 0.1 กรัม บริเวณที่วัดค่า SPAD มาสกัดรงควัตถุ (pigment) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Makinde และ Akande โดยตัดเนื้อเยื่อใบให้มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร แช่ในไดเมทิลซัลฟอกไซด์ปริมาตร 10 มิลลิตร ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) ในที่มืดเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และบ่มสารสกัดที่ได้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที (Makinde & Akande, 2012) วิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ ตามวิธีของ Sumanta และคณะ โดยนำสารสกัดที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer รุ่น Unico S1200 Visible Spectrophotometer ของบริษัท United Products & Instruments, Inc. ที่ความยาวคลื่น 480 649 และ 665 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มาวิเคราะห์หาปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ (Sumanta et al., 2014) จากสมการที่ (1) ถึง (3) วิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับข้อ 5.2.1

$$\text{chlorophyll a content (mg/g leaf F.W.)} = 12.47(A665) - 3.62(A649) \quad (1)$$

$$\text{chlorophyll b content (mg/g leaf F.W.)} = 25.06(A649) - 6.5(A665) \quad (2)$$

$$\text{carotenoids content (mg/g leaf F.W.)} = 1000(A480) - 1.29(Ca) - 53.78(Cb)/220 \quad (3)$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance)

5.2.3 ความสามารถในการใช้แสงของใบ โดยวัดค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ของใบ ด้วยเครื่องคลอโรฟิลล์ฟลูออโรมิเตอร์ (FMS 2; Hansatech Instruments, King's Lynn, UK) จากใบเดียวกับที่ใช้วัดค่าตรวจความเขียว โดยเตรียมใบในที่มืด เป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อให้ electron acceptor ใน photosystem II (PSII) อยู่ในสถานะ ground state ซึ่งสามารถเปิดรับพลังงานแสงได้สูงที่สุด ค่าที่วัดได้จากตำแหน่งนี้ เรียกว่า minimum fluorescence

yield (F_0) และทันทีที่พืชได้รับแสงที่มีความเข้มแสง $3,500 \mu\text{mol Photon}/(\text{m}^2\text{s})$ เป็นระยะเวลา 0.8 วินาที ตัวรับอิเล็กทรอนิกส์จะเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะ excited state ค่าที่วัดได้จากตำแหน่งนี้ เรียกว่า maximum fluorescence yield (F_M) ความแตกต่างของค่า F_0 และ F_M เรียกว่า variable fluorescence (F_V) อัตราส่วนของค่า F_V/F_M เรียกว่า Maximum quantum yield บันทึกการทดลอง ทุก ๆ 7 วัน วิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับข้อ 5.2.1

5.2.4 วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ ดำเนินการโดยสุ่มตัวอย่างใบ น้ำหนัก 0.5 กรัม ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก จากใบลำดับที่ 3 ถึง 5 นับจากปลายยอด จำนวน 5 ซ้ำ ๆ ละ 2 ต้น ลดอุณหภูมิใบอย่างรวดเร็วในไนโตรเจนเหลวและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อนำมาสกัดน้ำตาล โดยวิธีดัดแปลงตามวิธีของ Robbins และ Pharr โดยบดตัวอย่างใบให้ละเอียดด้วยไนโตรเจนเหลว เติมหาทานอลความเข้มข้นร้อยละ 80 (v/v) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร บ่มในหลอดทดลองที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 นาที ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 1000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที เก็บสารละลายใสด้านบน ใส่ในหลอดทดลองใหม่ ทำซ้ำ 2 ครั้ง (Robbins & Pharr, 1987) วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้จากสารสกัดตัวอย่างด้วยการทำปฏิกิริยากับสารละลาย anthrone ซึ่งดัดแปลงเล็กน้อยตามวิธีของ Nohong และ Nompo โดยนำสารละลายตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองและรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 0 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมสารละลาย anthrone (ประกอบด้วย anthrone น้ำหนัก 1 กรัม ละลายในกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 72 (v/v) ปริมาตร 500 มิลลิลิตร) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร (vortex mixer) และบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาที หยุดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วในน้ำที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส นำสารละลายที่ได้วัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงของสีน้ำเงินแกมเขียวที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร (Nohong & Nompo, 2015) เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของน้ำตาลซูโครส วิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับข้อ 5.2.1

5.3 การวิเคราะห์ปริมาณอนุมูลอิสระบางชนิดที่สะสมในใบพริก

5.3.1 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen hydroxide; H_2O_2) ด้วยวิธีดัดแปลงของ Velikova และคณะ ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก โดยสุ่มใบน้ำหนัก 0.5 กรัม จากใบลำดับที่ 3 ถึง 5 จากปลายยอด จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 2 ต้น บดตัวอย่างด้วยไนโตรเจนเหลว

เติมสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติก (trichloroacetic acid, TCA) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 (w/v) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 15 นาที นำสารละลายใส่ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายบัฟเฟอร์โพแทสเซียมฟอสเฟต ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ (pH 7.0) ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร และสารละลายโพแทสเซียมไฮโอไดด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ใส่ในหลอดทดลองใหม่ วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 390 นาโนเมตร (Velikova et al., 2000) สร้างกราฟมาตรฐานจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน เพื่อหาปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างที่วัดได้และค่าที่ได้จากกราฟมาตรฐาน วิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับข้อ 5.2.1

5.3.2 วิเคราะห์ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ (Malondialdehyde; MDA) ดำเนินการในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก โดยสุ่มตัวอย่างใบลำดับที่ 3 ถึง 5 จากปลายยอดน้ำหนัก 0.5 กรัม จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำ ละ 2 ต้น เช่นเดียวกับวิธีของ Velikova และคณะ โดยบดตัวอย่างใบด้วยไนโตรเจนเหลว เติมสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติก (Trichloroacetic acid, TCA) ความเข้มข้นร้อยละ 1 (w/v) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 15 นาที นำสารละลายส่วนใสที่ได้ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร เติมสารผสมระหว่างกรดไธโอบาร์บิทริก (Thiobarbituric acid, TBA) ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 (w/v) และ TCA ความเข้มข้นร้อยละ 20 (w/v) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ปั่นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 10 นาที และหยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 10,000 รอบ เป็นระยะเวลา 5 นาที นำสารละลายส่วนใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 532 และ 600 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาใช้คำนวณหาความเข้มข้นของ MDA (Velikova et al., 2000) โดยใช้ค่า extinction coefficient คือ $155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ วิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับข้อ 4.2.1

6. การทดลองที่ 3 การศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพริกในสภาพแปลงทดลอง

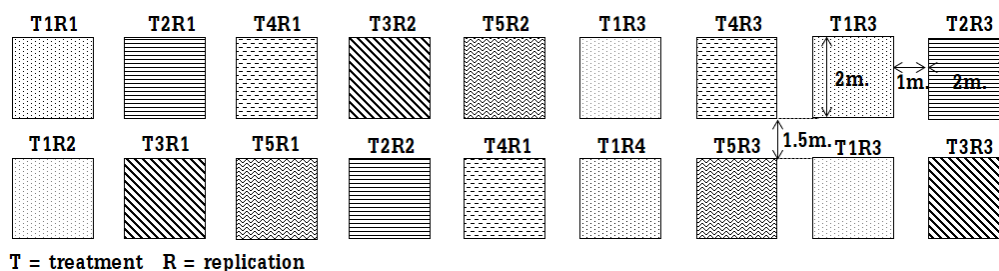
6.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชีวภาพที่นำมาใช้สำหรับการศึกษาในการทดลองที่ 3 เป็นถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดชุดเดียวกับถ่านชีวภาพที่ใช้ในการทดลองที่ 1 และ 2

6.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินเปรี้ยวจัด สำหรับการศึกษาในสภาพแปลงทดลอง ดำเนินการ ณ แปลงทดลอง 2 คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขตองครักษ์ (100.976447E, 14.104970N) ซึ่งเป็นดินเปรี้ยวจัดชุดเดียวกับการทดลองที่ 1 ทำการสำรวจและเก็บตัวอย่างดินภาคสนามที่ระดับความลึก 15 เซนติเมตร จำนวน 5 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งห่างกัน 2 เมตร ตรวจสอบค่า pH ของดินโดยอบดินให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน ชั่งดินที่แห้งสนิทน้ำหนัก 20 กรัม ผสมกับน้ำปริมาตร 100 มิลลิลิตร บ่มทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 30 นาที วัดค่า pH และด้วยเครื่อง pH meter

6.3 การไถพรวนหน้าดิน เตรียมแปลงปลูก และการดูแลรักษาแปลงปลูก ดำเนินการโดยวางแผนการทดลองแบบ RCBD ทั้งหมด 6 สิ่งทดลอง สิ่งทดลองละ 3 แปลงย่อย (ขนาด 4 ตารางเมตรต่อแปลง) กำหนดให้แปลงย่อยของแต่ละสิ่งทดลองมีการกระจายแบบสุ่ม ในแต่ละแปลงย่อยปลูกกล้าพริกจำนวน 25 ต้น กำหนดให้ในแต่ละสิ่งทดลองได้รับการปรับปรุงดินด้วยวัสดุปรับปรุงดินที่แตกต่างกันดังนี้

- สิ่งทดลองที่ 1 ดินเปรี้ยวที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดิน (ชุดควบคุม)
- สิ่งทดลองที่ 2 ปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนมาร์ล 1.5 ตันต่อไร่
- สิ่งทดลองที่ 3 ปรับปรุงคุณภาพดินด้วยถ่านชีวภาพ 1.0 ตันต่อไร่
- สิ่งทดลองที่ 4 ปรับปรุงคุณภาพดินด้วยถ่านชีวภาพ 1.5 ตันต่อไร่
- สิ่งทดลองที่ 5 ปรับปรุงคุณภาพดินด้วยถ่านชีวภาพ 2.0 ตันต่อไร่

ภายหลังการผสมดินด้วยวัสดุปรับปรุงดินชนิดต่าง ๆ บ่มทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ จึงรดน้ำให้ชุ่มและย้ายปลูกต้นกล้าภายใต้สภาพแปลงปลูกที่มีการพรางแสง ให้น้ำวันละ 2 ครั้ง จนกระทั่งสิ้นสุดอายุการเก็บเกี่ยว ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุดในแต่ละรอบวัน รวมทั้งปริมาณน้ำฝนถูกบันทึกโดยสถานีอุตุนิยมวิทยา จังหวัดปทุมธานี (100.371062E, 14.065847N) (ภาพประกอบ 7)



ภาพประกอบ 7 แผนผังการจัดวางแปลงย่อยในแต่ละสิ่งทดลองในสภาพแปลงทดลอง

6.4 ประสิทธิภาพในการใช้แสงของต้นพริก

6.4.1 ค่าตรวจวัดความเขียวและปริมาณรงควัตถุของใบ

วัดค่าตรวจวัดความเขียว (SPAD value) จากใบของต้นพริกจำนวน 3 ซ้ำ โดยสุ่มซ้ำละ 4 ต้น ต้นละ 2 ใบ ใช้ใบลำดับที่ 3 และ 4 นับจากปลายยอด ในแต่ละใบวัดค่าตรวจวัดความเขียวทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ด้วยเครื่องคลอโรฟิลล์มิเตอร์ (SPAD-502 Minolta Co., Ltd., Japan) และตัดเนื้อเยื่อใบน้ำหนัก 0.1 กรัม บริเวณที่วัดค่า SPAD มาสกัดรงควัตถุของใบ เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 บันทึกผลทุก ๆ 7 วันหลังการย้ายปลูก นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) และตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's multiple-range test (DMRT) ด้วยโปรแกรม SPSS version 24 (Statistics package for the social sciences)

6.4.2 ความสามารถในการใช้แสงของใบ

สุ่มเก็บตัวอย่างใบ ที่ใช้สำหรับวัดค่าตรวจวัดความเขียวของแผ่นใบจำนวน 3 ซ้ำ ซ้ำละ 4 ต้น ต้นละ 2 ใบ โดยใช้ใบลำดับที่ 3 และ 4 นับจากปลายยอด เตรียมใบให้อยู่ในที่มืดเป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อใช้ในการตรวจสอบความสามารถในการใช้แสงของใบโดยวัดค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนส์ ด้วยเครื่องคลอโรฟิลล์ฟลูออโรมิเตอร์ (FMS 2; Hansatech Instruments, King's Lynn, UK) บันทึกผลการทดลองทุก ๆ 7 วัน วิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความแตกต่างเช่นเดียวกับข้อ 6.4.1

6.4.3 วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ (total soluble sugar)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบสดน้ำหนัก 0.5 กรัม จากใบลำดับที่ 3 ถึง 5 จากปลายยอดจำนวน 3 ซ้ำ ๆ ละ 4 ต้น ทุก ๆ 7 วัน หลังจากการย้ายปลูกเป็นระยะเวลา 28 วัน นำตัวอย่างใบมา

สกัดและวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้ในใบพริกโดยวิธีดัดแปลงตามวิธีของ Robbins และ Pharr และตรวจสอบปริมาณน้ำตาลรวมที่ละลายน้ำได้จากสารสกัดตัวอย่างด้วยการทำปฏิกิริยากับสารละลาย anthrone ซึ่งดัดแปลงเล็กน้อยตามวิธีของ Nohong และ Nompอ เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 และวิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับข้อ 6.4.1

6.5 ปริมาณอนุมูลอิสระบางชนิดที่สะสมในใบพริก

6.5.1 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen hydroxide; H_2O_2)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบสดน้ำหนัก 0.5 กรัม จากใบลำดับที่ 3 ถึง 5 จากปลายยอด จำนวน 3 ซ้ำ ๆ ละ 4 ต้น วัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 วิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับข้อ 6.4.1

6.5.2 ปริมาณซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล (superoxide radicle; $O_2^{\cdot-}$)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบสดน้ำหนัก 0.5 กรัม จากใบลำดับที่ 3 ถึง 5 จากปลายยอด จำนวน 3 ซ้ำ ๆ ละ 4 ต้น วัดปริมาณซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัล โดยสุ่มใบน้ำหนัก 0.5 กรัม จากใบลำดับที่ 3 ถึง 5 จากปลายยอด จำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 2 ต้น วัดปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แรดิคัลตามวิธีของ Elstner และ Heupel โดยบดตัวอย่างใบพริกด้วยไนโตรเจนเหลว และเติมบัฟเฟอร์โพแทสเซียมฟอสเฟตความเข้มข้น 65 มิลลิโมลาร์ (pH 7.8) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร บั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 15 นาที นำสารละลายส่วนใสที่ได้ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองใหม่ เติมสารผสมระหว่างบัฟเฟอร์โพแทสเซียมฟอสเฟตความเข้มข้น 65 มิลลิโมลาร์ (pH 7.8) ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ที่เติมไฮดรอกซิลแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที เติมสารผสมระหว่างกรดซัลฟานิลิกความเข้มข้น 58 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และแอลฟาแนพทิลเอมีนความเข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที จากนั้นผสมสารละลายที่ได้กับคลอโรฟอร์มในอัตราส่วนที่เท่ากัน และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร (Elstner & Heupel, 1976) วิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับข้อ 6.4.1

6.5.3 ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ (malondialdehyde; MDA)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบสดลำดับที่ 3 ถึง 5 จากปลายยอดน้ำหนัก 0.5 กรัม จำนวน 3 ซ้ำ ๆ ละ 4 ต้น วิเคราะห์ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 วิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับข้อ 6.4.1

6.6 ปริมาณโพรลีน (Proline)

สุ่มเก็บตัวอย่างใบสดลำดับที่ 3 ถึง 5 จากปลายยอดน้ำหนัก 0.5 กรัม จำนวน 3 ซ้ำ ๆ ละ 4 ต้น วิเคราะห์หาปริมาณโพรลีนตามวิธีของ Bates และคณะ โดยบดใบให้ละเอียดด้วยไนโตรเจนเหลวและเติมสารละลาย 3% (w/v) sulfosalicylic acid บ่มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 15 นาที ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 6,000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 15 นาที นำสารละลายส่วนใสปริมาตร 2 มิลลิลิตร ไปทำปฏิกิริยากับ glacial acetic acid ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และ acid ninhydrin ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าผสมสารและบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง หยุดปฏิกิริยาโดยแช่หลอดที่ผ่านการต้มแล้วในน้ำแข็งทันที แล้วเติม toluene ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองที่หยุดปฏิกิริยาแล้ว เขย่าให้เข้ากันโดยเครื่องเขย่าผสมสาร เป็นเวลาอย่างน้อย 20 วินาที ดูดสารละลาย toluene ชั้นบนที่มี chromophore สีชมพูหรือสีแดง มาวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร (Bates, Waldren, & Teare, 1973) นำค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้ของสารละลายโพรลีนมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโพรลีนกับค่าการดูดกลืนแสง คำนวณค่าความเข้มข้นของโพรลีนในสารสกัดจากพืชโดยเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้กับกราฟมาตรฐานของโพรลีนในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัมของน้ำหนักสด วิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับข้อ 6.4.1

6.7 กิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดอนุมูลอิสระในเซลล์พืช

6.7.1 การเตรียมสารสกัดเอนไซม์ ดำเนินการโดยเตรียมสารสกัดเอนไซม์จากตัวอย่างใบพืช โดยดัดแปลงจากวิธีของ Velikova และคณะ โดยบดใบพืชน้ำหนัก 0.5 กรัม ในโถงที่เย็นร่วมกับสารละลาย I (solution I) ที่ประกอบด้วยสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (potassium phosphate buffer) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ (pH 7.0) และสารโพลีไวนิล-โพลีไพร์โรลิดอเม (polyvinyl-polypyrrolidome, PVP) ความเข้มข้นร้อยละ 4 (w/v) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 6,000 rpm ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

เป็นระยะเวลา 15 นาที เก็บรักษาสารสกัดเอนไซม์ (enzyme extract) จากสารละลายส่วนบนในหลอดแช่แข็ง (cyotube) ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เมื่อต้องการวัดกิจกรรมของเอนไซม์ ควรวางหลอดแช่แข็งในกล่องควบคุมอุณหภูมิ จนกระทั่งสารสกัดเอนไซม์เริ่มละลายจึงนำมาใช้วัดกิจกรรมของเอนไซม์ (Velikova et al., 2000) และบันทึกผลการทดลอง

6.7.2 การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (superoxide dismutase, SOD) ดำเนินการโดยผสมสารละลายของปฏิกิริยา (reaction mixture) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วย โฟสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ (pH 7.0) เมไทโอบีโนนความเข้มข้น 13 มิลลิโมลาร์ ไนโตรบลูเตตราโซเลียม (nitroblue tetrazolium, NBT) ความเข้มข้น 75 ไมโครโมลาร์ กรดเอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซิติก หรืออีดีทีเอ (ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA) ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ สารสกัดเอนไซม์ 50 ไมโครลิตร และเติมสารสารไรโบฟลาวินความเข้มข้น 2 ไมโครโมลาร์ เป็นลำดับสุดท้าย ผสมสารให้เข้ากันแล้ววางหลอดสารละลายผสมภายใต้แสงฟลูออเรสเซนซ์ขนาด 18 W ระยะห่าง 5 เซนติเมตร เป็นระยะเวลา 10 นาที หยุดปฏิกิริยาโดยเก็บหลอดปฏิกิริยาในที่มืด วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร โดยหลอดควบคุมปฏิกิริยา คือ หลอดที่ไม่ได้ใส่สารละลายเอนไซม์สกัด ส่วนหลอดผสมสารละลายของปฏิกิริยาร่วมกับเอนไซม์ที่ไม่ถูกแสงเป็นหลอดที่ไม่เกิดปฏิกิริยา (blank) โดยกำหนดให้ 1 หน่วยเอนไซม์ (unit enzyme) เท่ากับร้อยละ 50 ของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ของหลอดควบคุม และบันทึกผลการทดลอง วิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับข้อ 6.4.1

6.7.3 การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์คะตะเลส (catalase, CAT) ดำเนินการโดยนำสารสกัดเอนไซม์จากข้อ 5.8.1 มาใช้สำหรับวัดกิจกรรมของเอนไซม์ CAT ตามวิธีการของ Nakano และ Asada โดยนำสารละลายผสมระหว่างฟอสเฟตบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ (pH 7.0) ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตร กับ สารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 15 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับสารสกัดเอนไซม์หยาบปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหากิจกรรมของเอนไซม์ CAT กำหนดให้ 1 หน่วยเอนไซม์ (unit enzyme) คือ ปริมาณเอนไซม์ที่ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายลดลง 0.01 ที่ความยาวคลื่น 240 นาโนเมตร

ต่อนาที (Nakano & Asada, 1981) และบันทึกผลการทดลอง วิเคราะห์ความแปรปรวนและ
ตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับข้อ 6.4.1



บทที่ 4

ผลการศึกษา

ผลการทดลองที่ 1

การศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ต่อการงอกของเมล็ดพริกชี้หนุสสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตในสภาพหลอดทดลอง

ผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล ต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อนพริกชี้หนุสสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตในสภาพหลอดทดลอง ซึ่งพิจารณาจากความยาวต้น ความยาวราก น้ำหนักสดของต้นอ่อนและน้ำหนักแห้งของต้นอ่อน หลังการเพาะเมล็ดเป็นระยะเวลา 14 วัน ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

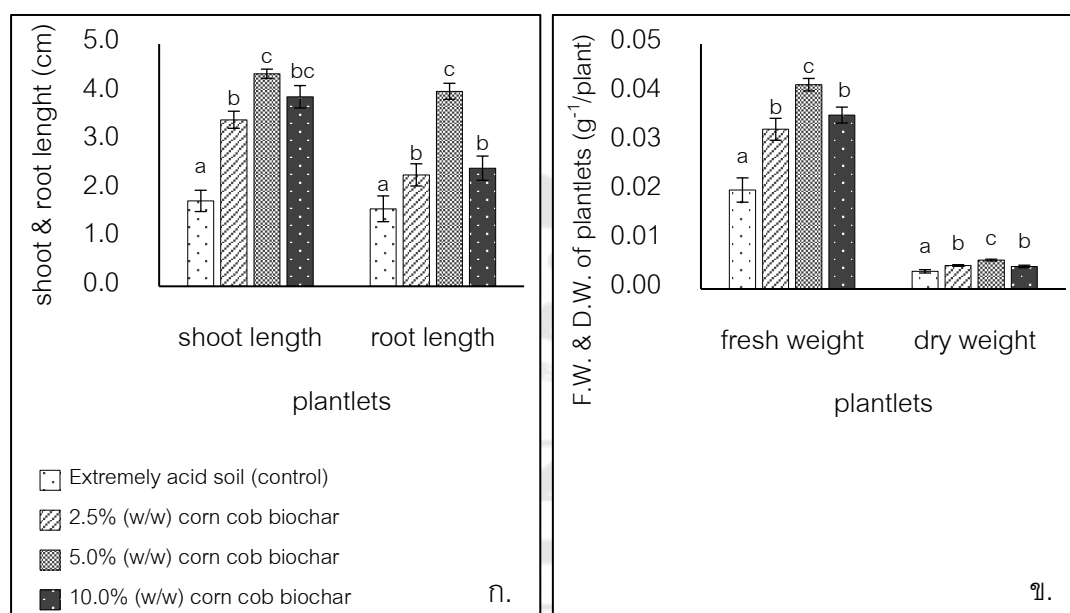
1. ความยาวต้นและความยาวราก

จากการเพาะเมล็ดพริกชี้หนุสสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตในดินเปรี้ยวจัดที่ได้รับการปรับปรุงดิน โดยผสมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล เปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดินและบันทึกความยาวต้นและราก พบว่า ต้นอ่อนของพริกในดินชุดควบคุมมีความยาวต้น ($1.76 \pm 0.22a$ เซนติเมตร) และความยาวราก ($1.60 \pm 0.26a$ เซนติเมตร) ต่ำกว่าต้นอ่อนของพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวล ทำให้ต้นอ่อนของพริกมีความยาวต้น ($4.39 \pm 0.10c$ เซนติเมตร) และความยาวราก ($4.02 \pm 0.17c$ เซนติเมตร) สูงที่สุด และสูงกว่าชุดควบคุมถึง 2.5 เท่า ในขณะที่การปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 และ 10 โดยมวล ส่งผลให้ต้นอ่อนของพริกมีความยาวรากไม่แตกต่างกัน (ภาพประกอบ 8ก)

2. น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นอ่อน

จากการเพาะเมล็ดพริกชี้หนุสสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตในดินเปรี้ยวจัดที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล เปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ พบว่า พริกชี้หนุสชุดควบคุมมีน้ำหนักสด ($0.020 \pm 0.003a$ กรัมต่อต้น) และน้ำหนักแห้ง ($0.004 \pm 0.0003a$ กรัมต่อต้น) ต่ำกว่าต้นอ่อนของพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม

การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวล ทำให้ต้นอ่อนของพริกมีน้ำหนักสด ($0.040 \pm 0.001c$ กรัมต่อต้น) และน้ำหนักแห้ง ($0.005 \pm 0.0002c$ กรัมต่อต้น) สูงที่สุด ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 และ 10 โดยมวล ส่งผลให้ต้นอ่อนของพริกมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกัน (ภาพประกอบที่ 8ข)



ภาพประกอบ 8 การเจริญเติบโตของต้นอ่อนพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตในดินเปรี้ยวจัดที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุม
 ก. ความยาวต้นและความยาวราก ข. น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง

หมายเหตุ (\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลการทดลองที่ 2

การศึกษาผลของการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดต่อการเจริญเติบโตของพริกชี้ฟ้าหนุสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในสภาพโรงเรือนทดลอง

1. คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของดินเปรี้ยวจัดและถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) พบว่า เนื้อดินประกอบด้วยทรายร้อยละ 26 ทรายแป้งร้อยละ 14 และดินเหนียวร้อยละ 60 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินอยู่ในระดับปานกลาง (ร้อยละ 3.53) ความต้องการปูน (CaCO_3) ของดินเท่ากับ 1,882 กิโลกรัมต่อไร่ มีค่า pH เท่ากับ 4.1 และจากการวิเคราะห์แร่ธาตุต่าง ๆ ที่พบในชุดดินองครักษ์ (ภาพประกอบที่ 9ก) พบว่า มีปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมในระดับสูง มีฟอสฟอรัสอยู่ในระดับปานกลาง ในขณะที่ถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด (ภาพประกอบที่ 9ข) มีค่า pH สูงถึง 10.43 ซึ่งมีค่า pH สูงกว่าดินในชุดดินองครักษ์ถึง 2.4 เท่า และมีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่าดินในชุดดินองครักษ์ถึง 3.6 เท่า ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของถ่านชีวภาพและดินเปรี้ยวจัดแสดงในตารางที่ 1



ภาพประกอบ 9 ก. ลักษณะของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร จากผิวดิน ข. ลักษณะถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ที่ใช้ในการทดลอง

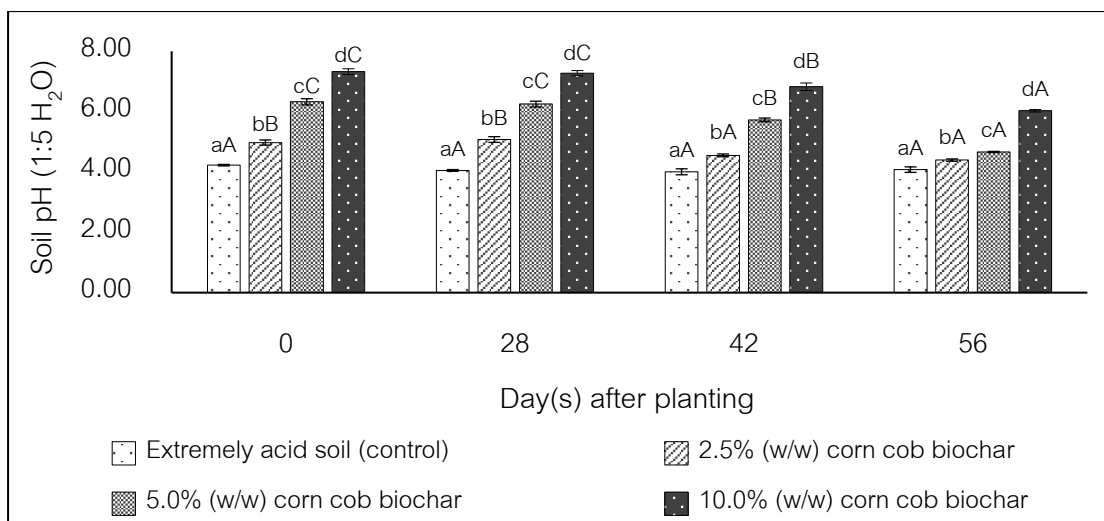
ตาราง 1 คุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) และถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด

Property	Extremely acid soil	Corn cob biochar	Method
pH (1:5 H ₂ O)	4.1	10.43	pH meter
CEC (cmol _c kg ⁻¹)	34.20	43.33	NH ₄ OAc pH 7.0
Total N (%)	0.17	0.61	KCl extraction, Distillation
Total P (%)	0.03	nd	
Total K (%)	0.73	nd	
Total Ca (g kg ⁻¹)	1.61	1.00	Atomic
Total Mg (g kg ⁻¹)	2.61	1.30	absorption/flame
Total Fe (g kg ⁻¹)	28.54	0.37	spectrophotometry
Total Al (g kg ⁻¹)	89.10	0.19	

nd refer to not determination

2. ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของดิน

ภายหลังการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล เปรียบเทียบค่า pH กับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ และวัดค่า pH ของดิน ในวันที่ 0 18 42 และ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า ค่า pH ของดินที่ได้รับการปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นสูงขึ้น ทำให้ดินมีค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยหลังการผสมดินเปรี้ยวจัดกับถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล ในวันที่ 0 หลังการย้ายปลูก พบว่า ค่า pH ของดินหลังการผสมกับถ่านชีวภาพมีค่า pH เท่ากับ $4.98 \pm 0.09b$ $6.33 \pm 0.10c$ และ $7.33 \pm 0.09d$ ตามลำดับ ในขณะที่ดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมมีค่า pH เท่ากับ $4.23 \pm 0.03a$ ซึ่งการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ทำให้ดินมีค่า pH สูงกว่าชุดควบคุมถึง 1.7 เท่า อย่างไรก็ตาม ภายหลังการปรับปรุงดินและปลูกต้นกล้าพริกเป็นระยะเวลา 42 วัน หลังการย้ายปลูก พบว่า ดินในแต่ละสิ่งทดลองมีค่า pH ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมมีค่า pH ไม่แตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) ตลอดระยะเวลา 56 วัน หลังการย้ายปลูก



ภาพประกอบ 10 ค่า pH ของดินเปรี้ยวจัดที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมในสภาพโรงเรือน

หมายเหตุ (ค่าเฉลี่ย±standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ของแท่งกราฟในวันเดียวกันหลังการย้ายปลูก ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ของแท่งกราฟในสิ่งทดลองเดียวกันตลอดระยะเวลาหลังการย้ายปลูก

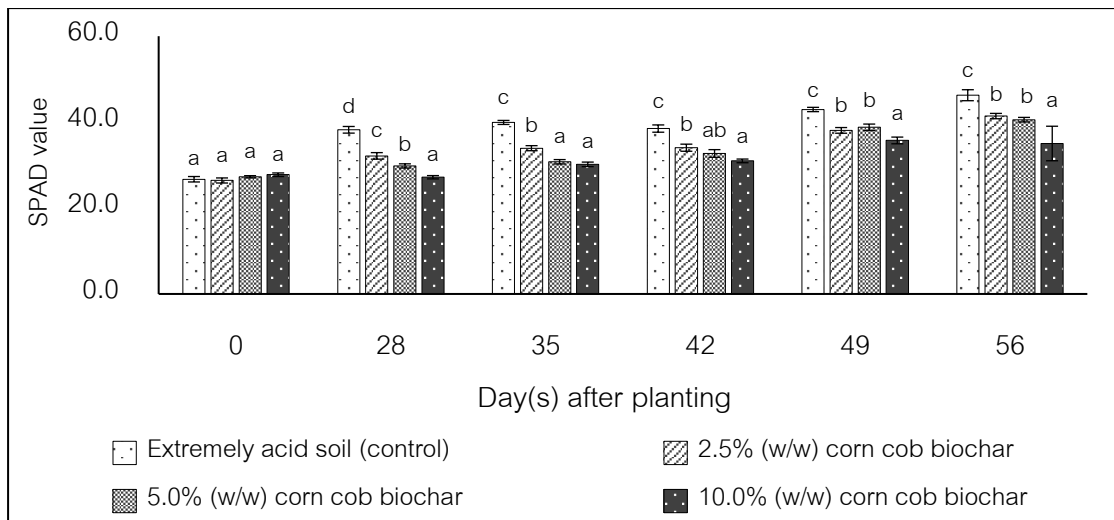
3. ปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง

การศึกษารวมของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล ต่อปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตในสภาพโรงเรือน ซึ่งพิจารณาจากค่าดัชนีความเขียวของใบ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม และปริมาณแคโรทีนอยด์ที่สะสมในใบ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

3.1 ค่าดัชนีความเขียวของใบ

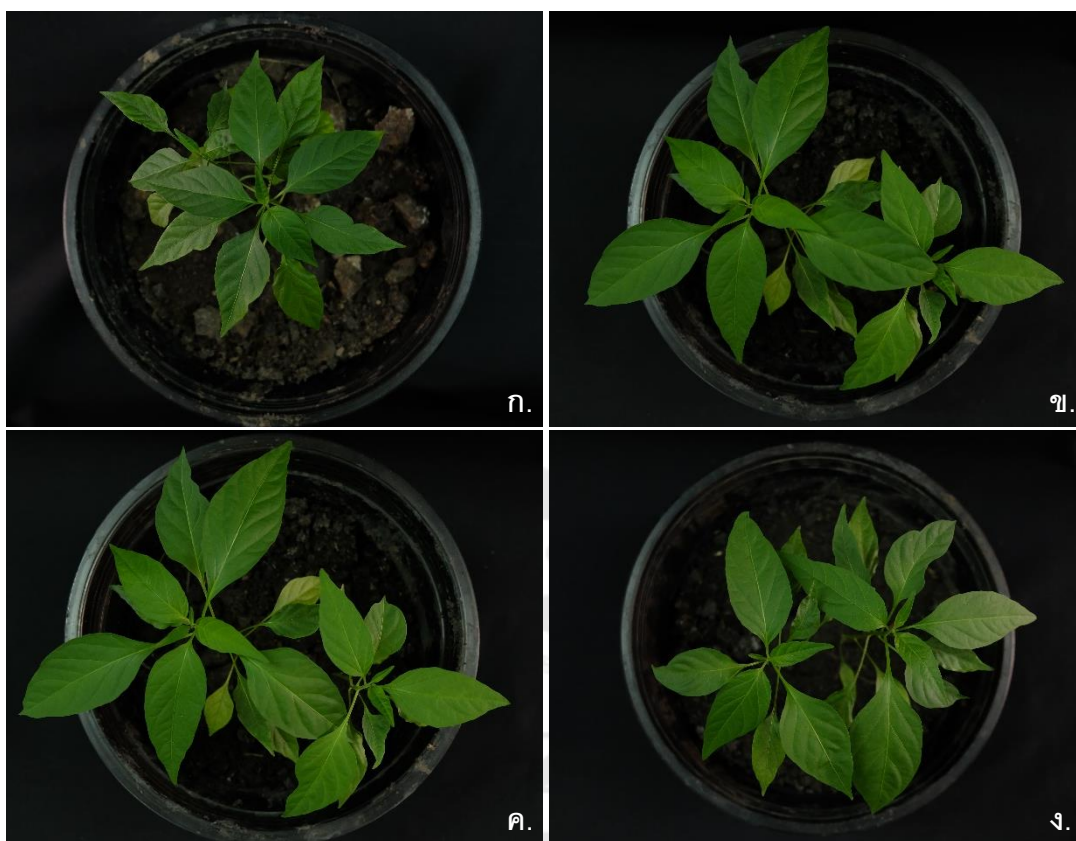
จากการปลูกต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตที่มีอายุ 30 วัน ในดินเปรี้ยวจัดที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล เปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดินและบันทึกค่าดัชนีความเขียวของใบ (SPAD value) (ภาพประกอบที่ 11) ทุก 7 วัน พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมที่ไม่ได้

รับการปรับปรุงดินมีค่าดัชนีความเขียวสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ตั้งแต่วันที่ 28 ถึง 56 หลังการย้ายปลูก เมื่อเปรียบเทียบกับต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ในขณะที่ การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดที่ความเข้มข้น 2.5 5 และ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่าดัชนีความเขียวเท่ากับ $32.14 \pm 0.76c$ $29.80 \pm 0.49b$ และ $27.17 \pm 0.38a$ ตามลำดับ หลังการย้ายปลูกเป็นเวลา 28 วัน เมื่อวัดค่าดัชนีความเขียวของใบในวันที่ 35 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีค่าดัชนีความเขียว ($39.92 \pm 0.47c$) สูงที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล ซึ่งมีค่าดัชนีความเขียวเท่ากับ $33.93 \pm 0.59b$ $30.77 \pm 0.51a$ และ $30.17 \pm 0.52a$ ตามลำดับ ในวันที่ 42 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในดินเปรี้ยวชุดควบคุม ยังคงมีค่าดัชนีความเขียวสูงที่สุด ($38.49 \pm 0.85c$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ และในวันที่ 49 และ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 และ 5 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่าดัชนีความเขียวไม่แตกต่างกัน และการปรับปรุงคุณภาพดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่าดัชนีความเขียวน้อยที่สุด ($35.0 \pm 24.02a$) โดยในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่าดัชนีความเขียวน้อยที่สุดเท่ากับ $35.02 \pm 4.01a$ ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุม (ค่าดัชนีความเขียว $46.26 \pm 4.04c$) ถึงร้อยละ 24.3 (ภาพประกอบ 11-12)



ภาพประกอบ 11 ค่าดัชนีความเขียวของใบต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต
 ภายหลังการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุม
 ในสภาพโรงเรือน

หมายเหตุ (\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความ
 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



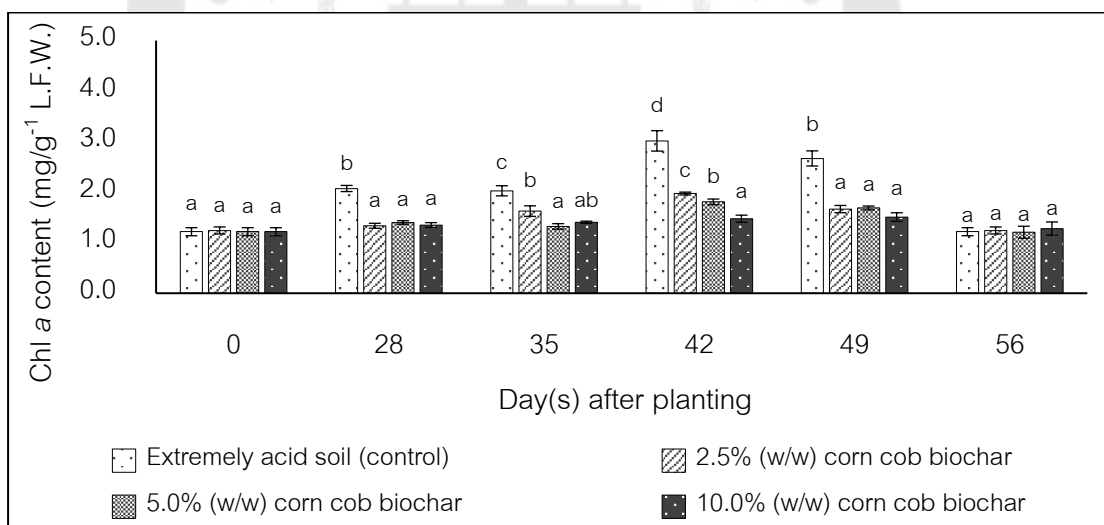
ภาพประกอบ 12 ลักษณะต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต อายุ 28 วัน หลังการย้ายปลูก
ในสภาพโรงเรือน

หมายเหตุ ก. ต้นกล้าพริกในดินเปรี้ยวจัดที่ไม่ได้รับถ่านชีวภาพ (ชุดควบคุม) ข.-ง. ต้นกล้าพริกในดินเปรี้ยวจัดที่ได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวลตามลำดับ

3.2 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ

จากการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ พบว่า ในวันที่ 28 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เท่ากับ $2.07 \pm 0.06b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2.5 5 และ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เท่ากับ $1.34 \pm 0.05a$ $1.40 \pm 0.03a$ และ $1.35 \pm 0.05a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ตามลำดับ ในวันที่ 35 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดเท่ากับ $2.03 \pm 0.10c$

ในขณะที่การปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้ต้นกล้าพริก มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยต้นกล้าพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ต่ำที่สุด ($1.32 \pm 0.05a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึงร้อยละ 34.97 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในวันที่ 42 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุด เท่ากับ $3.01 \pm 0.20a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นสูงขึ้นไปเป็นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมีผลทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ลดลงเหลือ $1.97 \pm 0.03c$ $1.80 \pm 0.06b$ และ $1.47 \pm 0.07a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ตามลำดับ ในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมยังคงมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดเท่ากับ $2.66 \pm 0.15b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพในทุกๆ ความเข้มข้นทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ไม่แตกต่างกัน และปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นกล้าพริกในทุก ๆ สิ่งทดลอง ไม่มีความแตกต่างกันในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก (ภาพประกอบ 13)

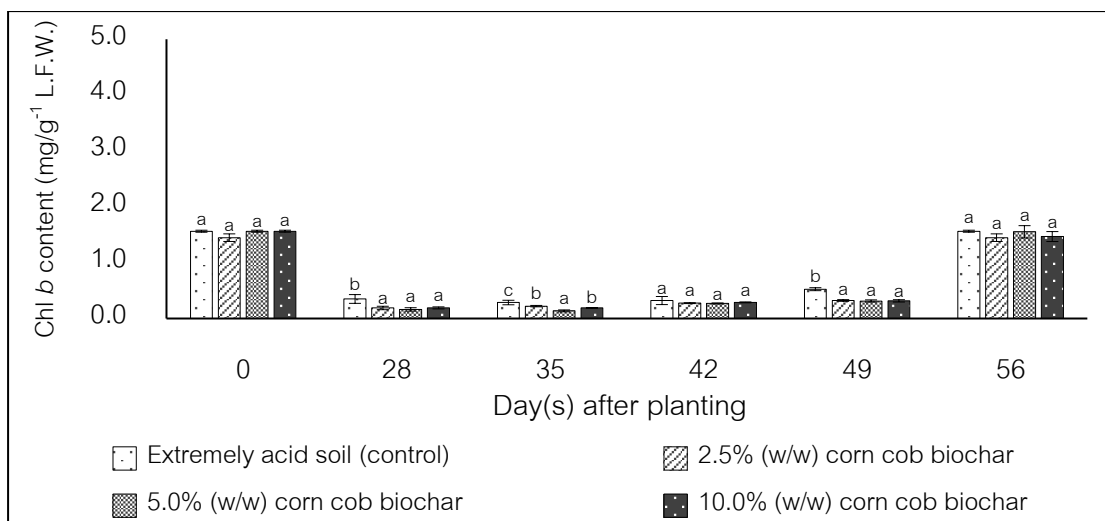


ภาพประกอบ 13 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดเปรียบเทียบกับชุดควบคุมในสภาพโรงเรือน

หมายเหตุ (\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.3 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี

จากการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี พบว่า ในวันที่ 28 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เท่ากับ $0.35 \pm 0.08b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2.5 5 และ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ไม่แตกต่างกัน ($0.19 \pm 0.03a$ $0.16 \pm 0.03a$ และ $0.19 \pm 0.02a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ตามลำดับ) ในวันที่ 35 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี สูงที่สุดเท่ากับ $0.29 \pm 0.04c$ ในขณะที่การปรับปรุงดินเปรียบจัดด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยต้นกล้าพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวล มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ต่ำที่สุด ($0.13 \pm 0.03a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึง 2 เท่า เมื่อวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ในวันที่ 42 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในทุกสิ่งทดลองมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ในต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ต่ำที่สุดเท่ากับ $0.26 \pm 0.01a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี สูงที่สุดเท่ากับ $0.52 \pm 0.03b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพในทุกๆ ความเข้มข้นทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ไม่แตกต่างกัน และปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของต้นกล้าพริกในทุก ๆ สิ่งทดลอง ไม่มีความแตกต่างกันในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก (ภาพประกอบ 14)



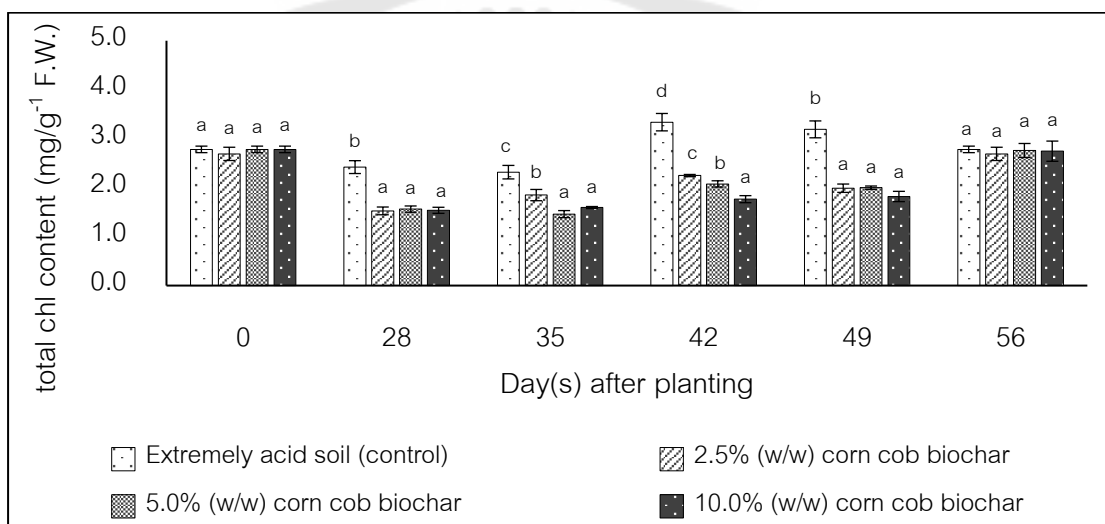
ภาพประกอบ 14 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ในต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต
 ที่ได้รับการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดเปรียบเทียบกับชุดควบคุม
 ในสภาพโรงเรือน

หมายเหตุ (\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกัน
 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.4 ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม

จากการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม พบว่า ในวันที่ 28 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เท่ากับ $2.42 \pm 0.13b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ ความเข้มข้น 2.5 5 และ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมไม่แตกต่างกัน ในวันที่ 35 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมสูงที่สุด เท่ากับ $2.32 \pm 0.14c$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมต่ำกว่าชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยต้นกล้าพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวล มีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมต่ำที่สุด ($1.45 \pm 0.07a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึงร้อยละ 37.50 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม ในวันที่ 42 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมสูงที่สุด เท่ากับ $3.34 \pm 0.18b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นสูงขึ้นไป

ร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมลดลงเหลือ $2.25 \pm 0.04c$ $2.08 \pm 0.13b$ และ $1.76 \pm 0.14a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ตามลำดับ ในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมยังคงมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมสูงที่สุดเท่ากับ $3.19 \pm 0.17b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพในทุกๆ ความเข้มข้นทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 10.0 ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมต่ำที่สุดเท่ากับ $1.81 \pm 0.10a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมไม่แตกต่างกันในทุกสิ่งทดลอง (ภาพประกอบ 15)

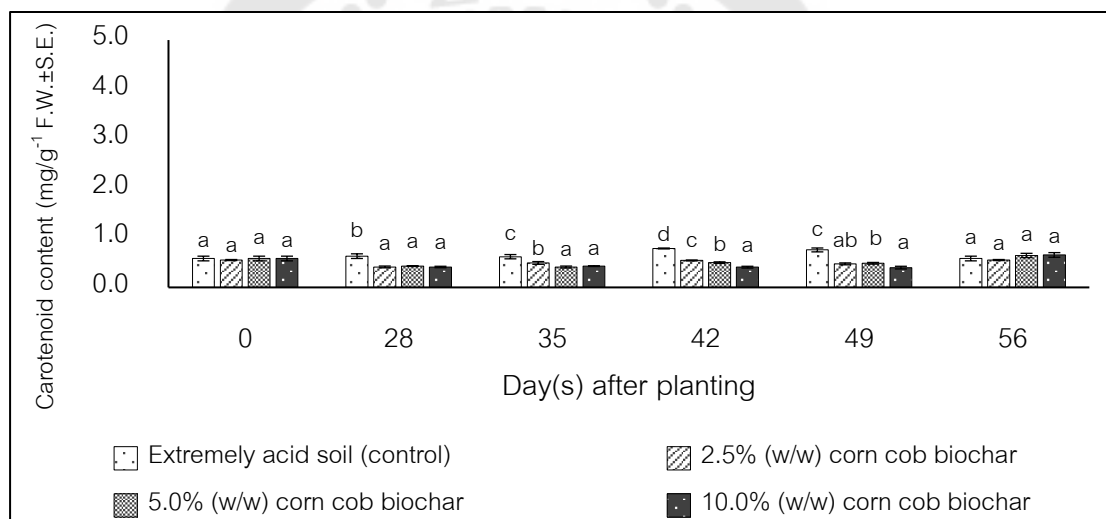


ภาพประกอบ 15 ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม ในต้นกล้าพริกขี้นุสสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต ที่ได้รับการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในสภาพโรงเรือน

หมายเหตุ (\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.5 ปริมาณแคโรทีนอยด์

จากการวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ พบว่า ในวันที่ 28 ถึง 49 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงกว่าต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในวันที่ 28 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกที่ปลูกในดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยถ่านชีวภาพในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน มีปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) ปริมาณแคโรทีนอยด์ ในวันที่ 42 และ 49 หลังการย้ายปลูก ใบของต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรียบจัดด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมีปริมาณแคโรทีนอยด์ต่ำที่สุด และในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกันในทุกสิ่งทดลอง (ภาพประกอบ 16)



ภาพประกอบ 16 ปริมาณแคโรทีนอยด์ในต้นกล้าพริกขี้นหนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต
ที่ได้รับการปรับปรุงดินเปรียบจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดเปรียบเทียบกับชุดควบคุม
ในสภาพโรงเรือน

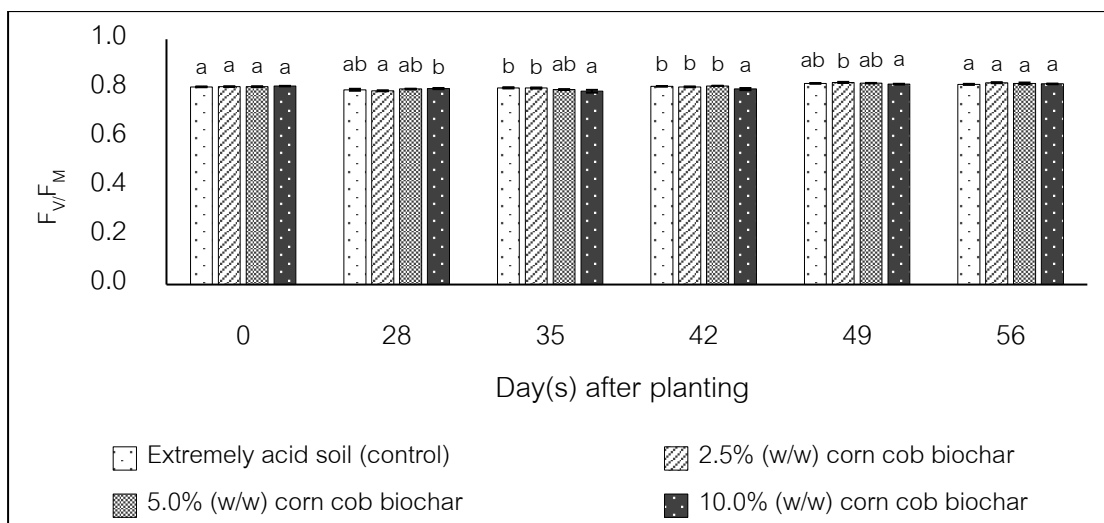
หมายเหตุ (\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4. ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง

การศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรียบจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพด ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล ต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตในสภาพโรงเรือน ซึ่งพิจารณาจากค่า maximum quantum efficiency of PSII photochemistry หรือค่า F_v/F_m และค่า performance index หรือค่า Pi ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (F_v/F_m)

ภายหลังการปลูกต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต ในดินเปรียบจัดที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล เปรียบเทียบกับดินเปรียบจัดชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพดินและวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของใบในวันที่ 28 ถึง 56 ภายหลังย้ายปลูก พบว่า ในวันที่ 28 ภายหลังย้ายปลูก ต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยถ่านชีวภาพร้อยละ 2.5 โดยมวล มีค่า F_v/F_m ต่ำที่สุด ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพร้อยละ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่า F_v/F_m สูงที่สุด นอกจากนี้ ระดับค่า F_v/F_m ของต้นกล้าพริกในดินที่ได้รับถ่านชีวภาพร้อยละ 5 โดยมวล และชุดควบคุม ไม่มีความแตกต่างกัน ในวันที่ 35 และ 49 ภายหลังย้ายปลูก ต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยถ่านชีวภาพร้อยละ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่า F_v/F_m ต่ำที่สุด ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพร้อยละ 2.5 และ 10 โดยมวล และในชุดควบคุม ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่า F_v/F_m ไม่แตกต่างกัน ซึ่งค่า F_v/F_m ของต้นกล้าพริกในทุก ๆ สิ่งทดลอง ไม่แตกต่างกันตั้งแต่วันที่ 56 ภายหลังย้ายปลูก (ภาพประกอบที่ 17)

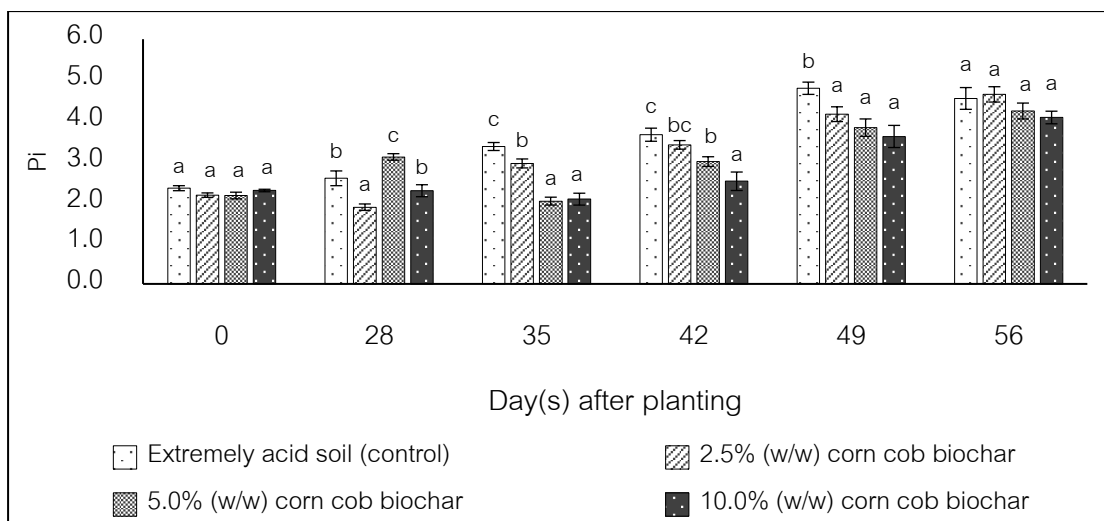


ภาพประกอบ 17 ค่า F_v/F_m ของต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต ที่ได้รับการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในสภาพโรงเรือน

หมายเหตุ (\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2 ค่า Performance index (Pi)

จากการทดลองผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง เช่นเดียวกับข้อ 4.1 โดยสุ่มวัดค่า Pi ของในต้นกล้าพริกในลำดับที่ 4 และ 5 นับจากปลายยอด พบว่า ในวันที่ 28 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 โดยมีผล มีค่า Pi ต่ำที่สุด ($1.88 \pm 0.08a$) ในขณะที่การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมีผล ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่า Pi สูงที่สุด ($3.11 \pm 0.08c$) ในวันที่ 35 ถึง 49 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกที่ในชุดควบคุมมีค่า Pi สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยถ่านชีวภาพร้อยละ 10 โดยมีผล ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่า Pi ต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งการเพิ่มอัตราส่วนของถ่านชีวภาพที่ใช้ในการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดส่งผลให้ค่า Pi ของต้นกล้าพริกมีแนวโน้มลดลงในวันที่ 35 ถึง 56 หลังการย้ายปลูก (ภาพประกอบ 18)



ภาพประกอบ 18 ค่า Pi ของต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต ที่ได้รับการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในสภาพโรงเรือน

หมายเหตุ (\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

5. การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการของต้นกล้าพริกขี้หนูชูเปอร์ฮอต

การศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล ต่อการเปลี่ยนแปลงของสรีรวิทยาบางประการของต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตในสภาพโรงเรือน ซึ่งพิจารณาจากปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (total soluble sugar) ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) และปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ (malondialdehyde) ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

5.1 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

จากการวัดปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ในใบของต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต ที่มีอายุ 56 วันหลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้สูงที่สุด (59.13 ± 1.26 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ในขณะที่การปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพ ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลาย

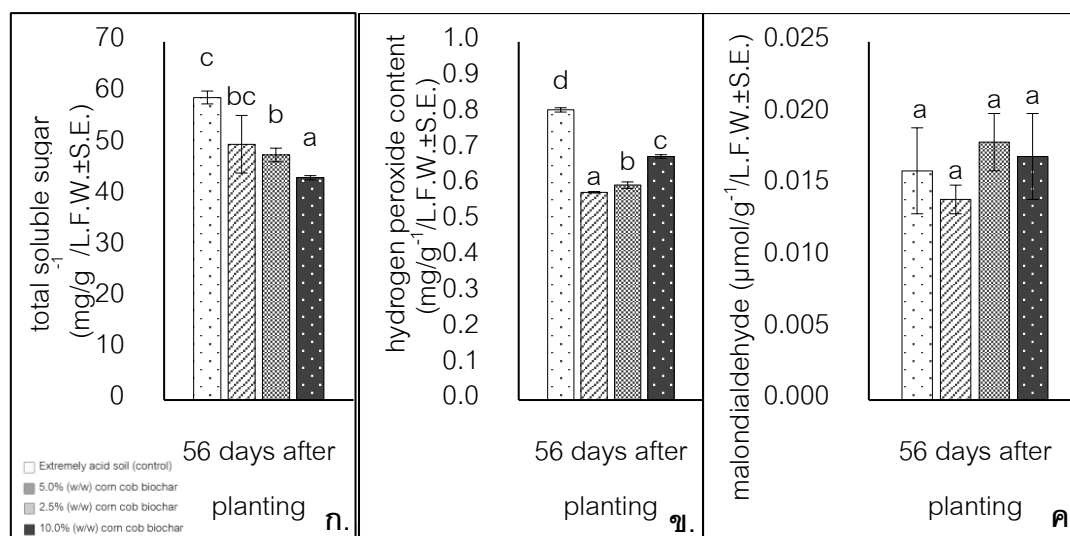
น้ำได้ต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 และ 5 โดยมวล ทำให้ต้นพริกมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ไม่แตกต่างกัน การปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ต่ำที่สุด ($43.45 \pm 0.41a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) (ภาพประกอบ 19ก)

5.2 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากการวัดปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในใบของต้นกล้าพริกชี้หนุสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต ที่มีอายุ 56 วันหลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงที่สุด ($0.81 \pm 0.006d$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ในขณะที่การปรับปรุงดินเรียบร้อยแล้วด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 และ 5 โดยมวล ทำให้ต้นพริกมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ำที่สุด การปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงกว่าการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 และ 5 โดยมวล อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ภาพประกอบ 19ข)

5.3 ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์

จากการวัดปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ในใบของต้นกล้าพริกชี้หนุสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต ที่มีอายุ 56 วันหลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและการปรับปรุงดินเรียบร้อยแล้วด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 (%w/w) ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์มีแนวโน้มต่ำที่สุด (ภาพประกอบ 19ค)



ภาพประกอบ 19 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตในสภาพโรงเรือน ก. ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ข. ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ ค. ปริมาณสารมาลอน-ไดอัลดีไฮด์

หมายเหตุ (\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

6. การเจริญเติบโตทางลำต้นของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต

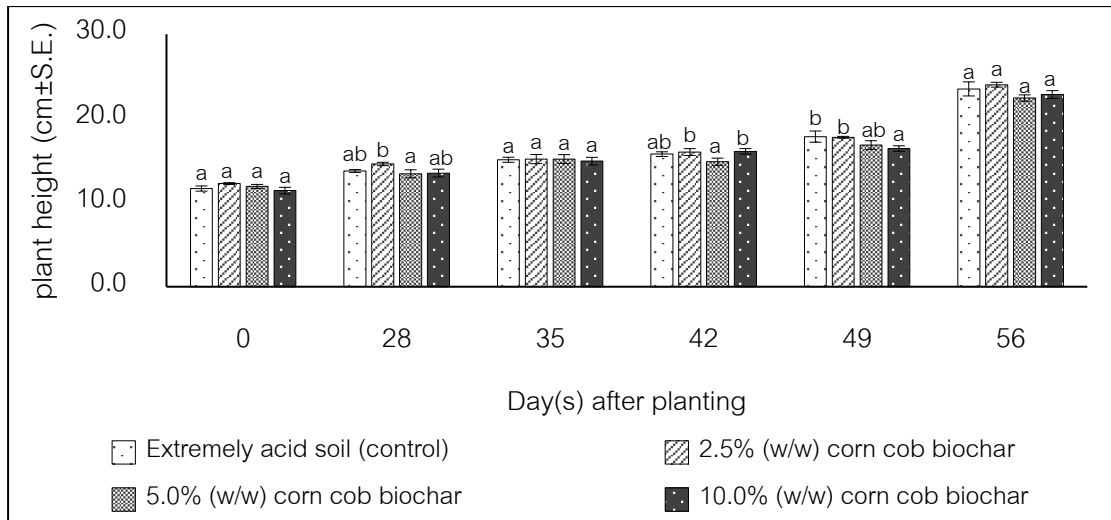
การศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล ต่อการเจริญเติบโตทางลำต้นของต้นกล้าพริกชี้หนูชูเปอร์ฮอตในสภาพโรงเรือน ซึ่งพิจารณาจากความสูงของต้นและพื้นที่ใบ ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

6.1 ความสูงของลำต้น

จากการวัดความสูงของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตที่ปลูกในดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยถ่านชีวภาพร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล เปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดิน (ชุดควบคุม) พบว่า ในวันที่ 28 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพร้อยละ 2.5 โดยมวล มีความสูงของต้นสูงที่สุด ($14.58 \pm 0.2b$ เซนติเมตร) ในขณะที่ความสูงของต้นกล้าพริกในทุก ๆ สิ่งทดลอง ไม่มีความ

แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในวันที่ 35 หลังการย้ายปลูก ส่วนในวันที่ 42 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 มีความสูงของต้นสูงที่สุดเท่ากับ $16.00 \pm 0.41b$ เซนติเมตร ในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีความสูงของต้นสูงที่สุดเท่ากับ $17.83 \pm 0.67b$ เซนติเมตร ซึ่งไม่แตกต่างจากการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 โดยมวล อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5.0 และ 10.0 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีความสูงต่ำกว่าชุดควบคุม และในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกในแต่ละสิ่งทดลองมีความสูงไม่แตกต่างกัน (ภาพประกอบ 20)



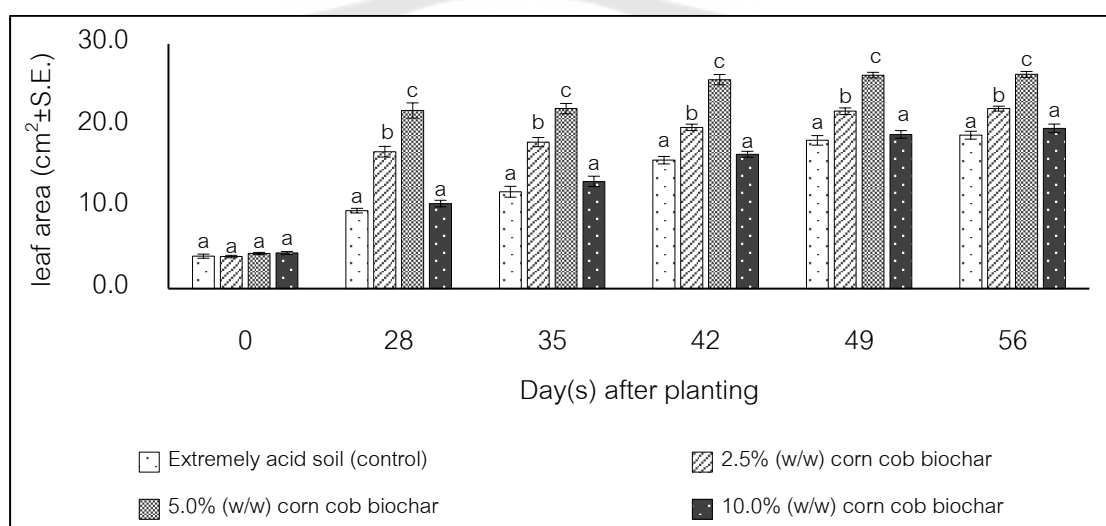


ภาพประกอบ 20 ความสูงของลำต้นของต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต
 ภายหลังการปรับสภาพดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพด
 ในสภาพโรงเรือน

หมายเหตุ (±standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความ
 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

6.2 พื้นที่ใบ

จากการวัดพื้นที่ใบของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ปลูกในดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินด้วยถ่านชีวภาพร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล เปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพดิน (ชุดควบคุม) พบว่า หลังการย้ายปลูกต้นกล้าพริกในดินที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพร้อยละ 5 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีพื้นที่ใบสูงที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพร้อยละ 10 โดยมวล และต้นกล้าพริกในชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับดินด้วยถ่านชีวภาพมีพื้นที่ใบไม่แตกต่างกัน (ภาพประกอบ 21)



ภาพประกอบ 21 พื้นที่ใบของลำต้นของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตภายหลังการปรับสภาพดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดในสภาพโรงเรือน

หมายเหตุ (\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

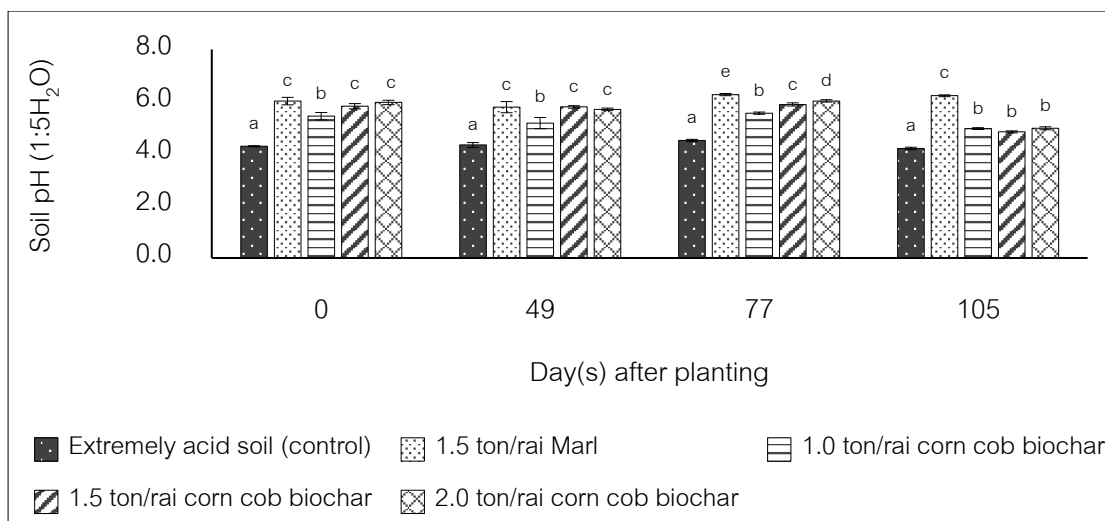
ผลการทดลองที่ 3

การศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดหรือปุ๋ยมาร์ลต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพริกชี้หูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในสภาพแปลงปลูก

1. ค่า pH ของดิน

จากการทดลองการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ หรือการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 1.5 หรือ 2 ตันต่อไร่ เปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดิน เมื่อวิเคราะห์ค่า pH ของดินภายหลังการผสมดินกับวัสดุปรับปรุงดินเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ (วันที่ 0 ของการย้ายปลูก) พบว่า ดินเปรี้ยวจัดที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดิน (ชุดควบคุม) มีค่า pH เท่ากับ $4.29 \pm 0.02a$ ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ หรือการได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 1.5 หรือ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ดินมีค่า pH สูงขึ้น (ค่า pH เท่ากับ $6.02 \pm 0.04c$ $5.44 \pm 0.14b$ $5.82 \pm 0.10c$ และ $5.97 \pm 0.08c$ ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ดินมีค่า pH สูงที่สุด และสูงกว่าดินเปรี้ยวชุดควบคุมถึง 1.4 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่า pH ของดินในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก

เมื่อวิเคราะห์ค่า pH ของดิน ในวันที่ 77 หลังการย้ายปลูก พบว่า การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ดินมีค่า pH สูงที่สุด (ค่า pH $6.27 \pm 0.03e$) ซึ่งสูงกว่าดินเปรี้ยวชุดควบคุม (pH $4.51 \pm 0.04a$) ถึง 1.4 เท่า ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 1.5 หรือ 2 ตันต่อไร่ (ค่า pH $5.56 \pm 0.04b$ $5.89 \pm 0.06c$ และ $6.03 \pm 0.05d$ ตามลำดับ) ทำให้ดินมีค่า pH สูงกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และมีค่า pH สูงกว่าดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุม ถึง 1.2 1.3 และ 1.3 เท่า ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ค่า pH ของดินในวันที่ 105 หลังการย้ายปลูก พบว่า การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ดินมีค่า pH สูงที่สุด (ค่า pH $6.22 \pm 0.06c$) โดยเพิ่มสูงกว่าดินในชุดควบคุม (ค่า pH $4.20 \pm 0.05a$) ถึง 1.5 เท่า ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้น 1 1.5 หรือ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ดินมีค่า pH ไม่แตกต่างกัน (ค่า pH $4.96 \pm 0.03b$ $4.84 \pm 0.04b$ และ $4.98 \pm 0.06b$ ตามลำดับ) ซึ่งมีค่า pH สูงกว่าดินเปรี้ยวชุดควบคุมประมาณ 1.2 เท่า (ภาพประกอบ 22)



ภาพประกอบ 22 ค่า pH ของดินเปรี้ยวจัดหลังจากการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และปูนมาร์ลเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมในสภาพแปลงทดลอง

(\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2. ปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง

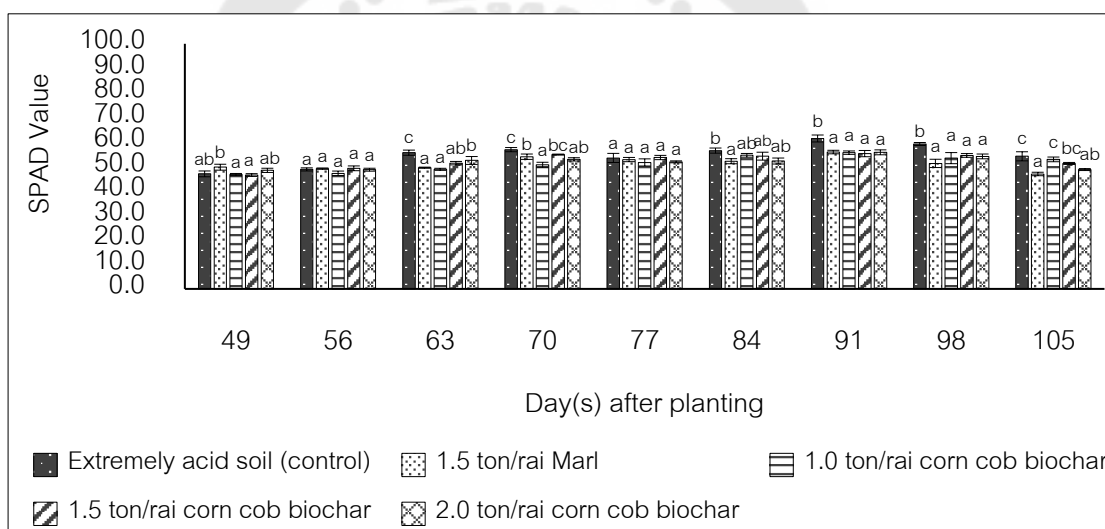
การศึกษารวมของการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและปูนมาร์ลต่อปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยปลูกต้นพริกที่มีอายุ 60 วัน ในดินเปรี้ยวจัดที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดปริมาณ 1 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ เปรียบเทียบกับการปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ และดินชุดควบคุมที่ไม่ได้รับวัสดุปรับปรุงดิน โดยปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสงพิจารณาจากค่าดัชนีความเขียวของใบ (SPAD value) ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม และปริมาณแคโรทีนอยด์ในใบ ได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

2.1 ค่าดัชนีความเขียวของใบ

จากผลการทดลองวัดค่าดัชนีความเขียวของใบต้นกล้าพริกในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก พบว่า ใบของต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลมีค่าดัชนีความเขียวสูงที่สุด (ค่าดัชนีความเขียว $49.65 \pm 1.21b$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (ค่าดัชนีความเขียว $46.92 \pm 1.19ab$) ถึงร้อยละ 5.8 เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความเขียวของใบต้นพริก

ที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 1.5 หรือ 2 ตันต่อไร่ พบว่า ไบของต้นพริก มีค่าดัชนีความเขียวเท่ากับ $46.65 \pm 0.44a$ $46.45 \pm 0.56a$ และ $48.37 \pm 0.86ab$ ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างจากค่าดัชนีความเขียวของชุดควบคุม อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ปริมาณ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ค่าดัชนีความเขียวของไบมีแนวโน้มเพิ่มสูงกว่าชุดควบคุม ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า ค่าดัชนีความเขียวของไบต้นพริกในทุกสิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีค่าดัชนีความเขียวสูงสุด (ค่าดัชนีความเขียว $49.20 \pm 0.98ab$) เมื่อบันทึกผลการทดลองในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก จึงเปิดตาข่ายพรางแสงที่ใช้อุบลต้นพริกในช่วงแรกของการทดลอง เพื่อให้ต้นพริกสามารถรับแสงได้อย่างเต็มที่ตามสภาพธรรมชาติ และหลังจากที่ให้ต้นพริกได้รับแสงในสภาพธรรมชาติเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จึงบันทึกค่าดัชนีความเขียวอีกครั้งในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก พบว่า ไบของต้นพริกชุดควบคุมมีค่าดัชนีความเขียวสูงสุด (ค่าดัชนีความเขียว $55.57 \pm 1.06c$) เมื่อพิจารณากลุ่มของต้นพริกที่ได้รับวัสดุปรับปรุงดินในแต่ละสิ่งทดลอง พบว่าการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2 ตันต่อไร่ ทำให้ค่าดัชนีความเขียวของไบพริกสูงสุด (ค่าดัชนีความเขียว $52.4 \pm 1.60b$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปุยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ไบของต้นพริกมีค่าดัชนีความเขียวเท่ากับ $49.45 \pm 0.22a$ และการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 หรือ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีค่าดัชนีความเขียวไม่แตกต่างกัน (ค่าดัชนีความเขียว $48.78 \pm 0.42a$ และ $51.30 \pm 0.70ab$ ตามลำดับ) โดยการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ ทำให้ไบมีค่าดัชนีความเขียวต่ำที่สุดและต่ำกว่าชุดควบคุมถึงร้อยละ 12.21 ภายหลังจากวัดค่าดัชนีความเขียวในวันที่ 70 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกชุดควบคุมมีค่าดัชนีความเขียวสูงสุด (ค่าดัชนีความเขียว $56.81 \pm 0.85c$) ในขณะที่การได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ หรือถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1.5 หรือ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ไบพริกมีค่าดัชนีความเขียวไม่แตกต่างกัน (ค่าดัชนีความเขียว $53.93 \pm 1.09b$ $54.80 \pm 0.19bc$ และ $52.85 \pm 0.68ab$ ตามลำดับ) อย่างไรก็ตาม การได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 ตันต่อไร่ ทำให้ไบพริกมีค่าดัชนีความเขียวต่ำที่สุด (ค่าดัชนีความเขียว $50.65 \pm 1.01a$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งต่ำกว่าค่าดัชนีความเขียวของชุดควบคุมถึงร้อยละ 10.85 ในวันที่ 77 หลังการย้ายปลูก พบว่า ค่าดัชนีความเขียวไม่มีความแตกต่างกันในทุก ๆ สิ่งทดลอง เมื่อวัดค่าดัชนีความเขียวของไบพริกในวันที่ 84 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีค่าดัชนีความเขียวสูงสุดเท่ากับ $56.53 \pm 1.04b$ ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปุยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ หรือถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้ไบพริกมีค่าดัชนีความเขียว

ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ค่าดัชนีความเขียวของใบมีค่าต่ำที่สุด (ค่าดัชนีความเขียว $52.08 \pm 1.03a$) ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึงร้อยละ 7.71 และสอดคล้องกับผลการทดลองในวันที่ 91 และ 98 หลังการย้ายปลูก เมื่อพิจารณา ค่าดัชนีความเขียวในวันที่ 105 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีค่าดัชนีความเขียวสูงที่สุด (ค่าดัชนีความเขียว $54.10 \pm 1.85c$) เช่นเดียวกับการได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 ตันต่อไร่ (ค่าดัชนีความเขียว $52.83 \pm 0.96c$) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่หรือถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2 ตันต่อไร่ ทำให้ใบพริกมีค่าดัชนีความเขียวต่ำที่สุด (ค่าดัชนีความเขียว $46.88 \pm 0.71a$ และ $48.68 \pm 0.39ab$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึงร้อยละ 13.34 และ 10.01 ตามลำดับ (ภาพประกอบ 23)



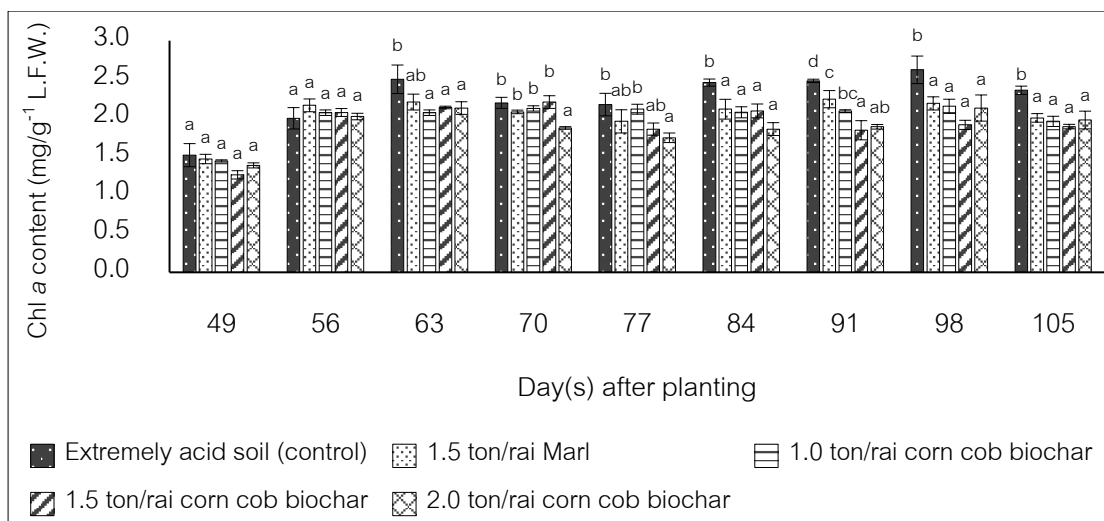
ภาพประกอบ 23 ค่าดัชนีความเขียวของใบต้นพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอต ที่ได้รับการปรับปรุงของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด และปูนมาร์ลเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมในสภาพแปลงทดลอง

(\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2.2 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ

จากผลการทดลองวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ พบว่า ในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกในทุกลองมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ไม่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นพริกในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของใบพริกในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ล ความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ใบพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุด ($2.16 \pm 0.08a$ มิลลิกรัมต่อใบสดน้ำหนัก 1 กรัม) ในขณะที่ใบพริกชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ต่ำที่สุด ($1.99 \pm 0.14a$ มิลลิกรัมต่อใบสดน้ำหนัก 1 กรัม) เมื่อบันทึกผลการทดลองในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก จึงเปิดตาข่ายพรางแสงที่ใช้อนุบาลต้นพริกในช่วงแรกของการทดลอง เพื่อให้ต้นพริกสามารถรับแสงได้อย่างเต็มที่ตามสภาพธรรมชาติ และหลังจากที่ให้ต้นพริกได้รับแสงในสภาพธรรมชาติเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จึงบันทึกปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ อีกครั้งในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุด (2.50 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) เมื่อพิจารณาปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในใบของพริกที่ได้รับวัสดุปรับปรุงดิน พบว่า การได้รับปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ หรือการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ไม่แตกต่างกัน ซึ่งปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ล (ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ $2.20 \pm 0.10ab$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) มีแนวโน้มเพิ่มสูงกว่าการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดที่ปริมาณ 1 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ ซึ่งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เท่ากับ $2.07 \pm 0.04a$ $2.13 \pm 0.02a$ และ $2.14 \pm 0.08a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ ทำให้ใบพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ต่ำที่สุด ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึงร้อยละ 17.6 เมื่อพิจารณาปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในวันที่ 70 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมและต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ หรือการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 หรือ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ใบพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ไม่แตกต่างกัน โดยต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในใบสูงที่สุดเท่ากับ $2.20 \pm 0.08b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ หรือถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ และใบพริกชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เท่ากับ $2.08 \pm 0.02b$ $2.12 \pm 0.03b$ และ $2.19 \pm 0.07b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม อย่างไรก็ตาม ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ตันต่อไร่ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ต่ำที่สุดเท่ากับ $1.87 \pm 0.02a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ซึ่งต่ำกว่า

ชุดควบคุมถึงร้อยละ 14.8 ในวันที่ 77 หลังการย้ายปลูก พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของต้นพริก ในชุดควบคุมมีปริมาณสูงที่สุดเท่ากับ $2.17 \pm 0.14b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม เมื่อพิจารณา ในกลุ่มของต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ หรือถ่าน ชีวภาพความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ มีปริมาณ คลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุดเท่ากับ $2.11 \pm 0.06b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ซึ่งไม่แตกต่างจากชุด ควบคุม ในขณะที่การได้รับปุ๋ยมาร์ลหรือถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมี ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ไม่แตกต่างกัน (ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ $1.95 \pm 0.05ab$ และ $1.85 \pm 0.16ab$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ตามลำดับ) อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ ความเข้มข้น 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ต่ำที่สุด (ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ $1.87 \pm 0.06a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งน้อยกว่า ชุดควบคุมถึงร้อยละ 19.8 ในวันที่ 84 หลังการย้ายปลูก พบว่า ใบพริกในชุดควบคุมมีปริมาณ คลอโรฟิลล์ เอ สูงที่สุด ($2.46 \pm 0.04b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ หรือถ่านชีวภาพความ เข้มข้น 1 หรือ 1.5 ตันต่อไร่ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดิน ด้วยถ่านชีวภาพปริมาณที่สูงขึ้นเป็น 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ต่ำที่สุด ($1.86 \pm 0.08a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งน้อยกว่า ชุดควบคุมถึงร้อยละ 24.51 สอดคล้องกับปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ในวันที่ 91 ถึง 105 หลังการย้าย ปลูก (ภาพประกอบ 24)



ภาพประกอบ 24 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ของใบต้นพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดและปุ๋ยมาร์ลเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมในสภาพแปลงทดลอง

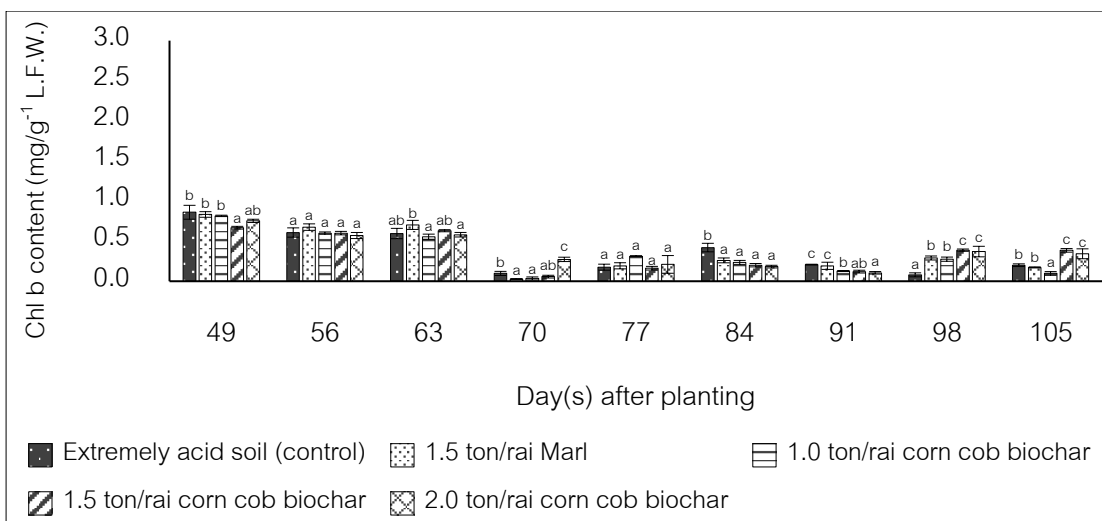
(±standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2.3 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี

จากผลการทดลองวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี พบว่า ในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี สูงที่สุดเท่ากับ $0.86 \pm 0.09b$ ในทุกสิ่งทดลองมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ซึ่งไม่แตกต่างจากการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ หรือปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ซึ่งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี เท่ากับ $0.82 \pm 0.01b$ $0.83 \pm 0.04b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ต่ำที่สุดเท่ากับ $0.67 \pm 0.02a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม เมื่อวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลหรือถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ต้นพริกที่ได้รับปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี สูงที่สุดเท่ากับ $0.67 \pm 0.04a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม เมื่อบันทึกผลการทดลองในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก จึงเปิดตาข่ายพรางแสงที่ใช้อุณหภูมิต้นพริกในช่วงแรกของการทดลอง เพื่อให้ต้นพริกสามารถรับแสงได้อย่างเต็มที่ตามสภาพธรรมชาติ และหลังจากที่ให้

ต้นพริกได้รับแสงในสภาพธรรมชาติเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จึงบันทึกปริมาณคลอโรฟิลล์ บี อีกครั้งในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก พบว่า การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี สูงที่สุดเท่ากับ $0.70 \pm 0.06b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมซึ่งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี เท่ากับ $0.59 \pm 0.06ab$ ถึงร้อยละ 18.60 ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพทุกความเข้มข้น ทำให้ต้นพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ไม่แตกต่างกัน (ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี $0.56 \pm 0.03a$ $0.63 \pm 0.01ab$ และ $0.58 \pm 0.03a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ตามลำดับ) ในวันที่ 70 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2 ตันต่อไร่ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี สูงที่สุด (ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี $0.27 \pm 0.03c$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมที่มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี เท่ากับ $0.10 \pm 0.02b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ถึง 2.7 เท่า ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ หรือถ่านชีวภาพปริมาณ 1 หรือ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ไม่แตกต่างกัน (ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี $0.03 \pm 0.00a$ $0.04 \pm 0.02a$ และ $0.06 \pm 0.02ab$) โดยการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ต่ำที่สุด ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึง 3 เท่า ในวันที่ 77 หลังการย้ายปลูก พบว่า การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี สูงที่สุดเท่ากับ $0.31 \pm 0.01a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ส่วนการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ หรือถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1.5 หรือ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี เท่ากับ $0.19 \pm 0.04a$ $0.26 \pm 0.02a$ และ $0.21 \pm 0.11a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างจากชุดควบคุมที่มีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี เท่ากับ $0.18 \pm 0.04a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในวันที่ 84 หลังการย้ายปลูกพบว่า ต้นพริกชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี สูงที่สุดเท่ากับ $0.42 \pm 0.05b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ หรือถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ไม่แตกต่างกัน ($0.26 \pm 0.03a$ และ $0.23 \pm 0.03a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ตามลำดับ) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้คลอโรฟิลล์ บี ของต้นพริกลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ใบพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ต่ำที่สุด เท่ากับ $0.18 \pm 0.02a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึง 2.3 เท่า

ในวันที่ 91 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* สูงที่สุดเท่ากับ $0.20 \pm 0.00c$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม เช่นเดียวกับการปรับปรุงดินด้วย ปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ซึ่งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* เท่ากับ $0.19 \pm 0.04c$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* ไม่แตกต่างกัน โดยการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้น 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* ลดลงต่ำที่สุดเท่ากับ $0.10 \pm 0.02a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึง 0.5 เท่า ในวันที่ 98 หลังการย้ายปลูก พบว่า ใบของต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* ต่ำที่สุดเท่ากับ $0.08 \pm 0.02a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การได้รับปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ หรือถ่านชีวภาพที่ปริมาณ 1 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* เท่ากับ $0.29 \pm 0.02b$ และ $0.28 \pm 0.03b$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมถึง 3.6 เท่า ส่วนการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 หรือ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ใบของต้นกล้าพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* ไม่แตกต่างกัน ซึ่งการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* สูงที่สุดเท่ากับ $0.39 \pm 0.01c$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมถึง 4.9 เท่า ในวันที่ 105 หลังการย้ายปลูก พบว่า การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 หรือ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* สูงที่สุดเท่ากับ $0.38 \pm 0.02c$ และ $0.34 \pm 0.06c$ ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* ต่ำที่สุด (ปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* $0.10 \pm 0.02a$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึง 1 เท่า (ภาพประกอบ 25)



ภาพประกอบ 25 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ของใบต้นพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดและปุ๋ยมาร์ล เปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมในสภาพแปลงทดลอง

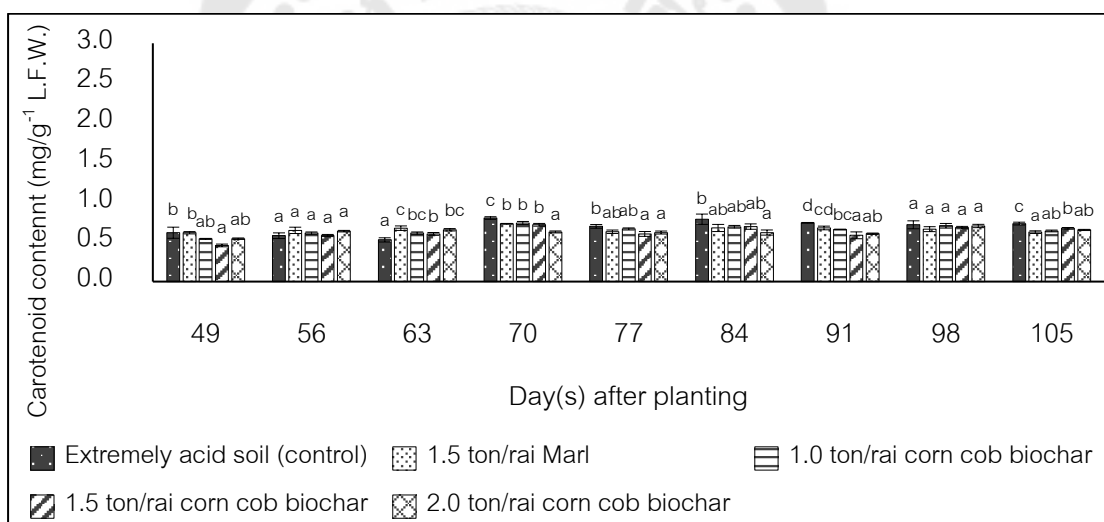
(±standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2.4 ปริมาณแคโรทีนอยด์

จากผลการทดลองวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ พบว่า ในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกในทุกสิ่งทดลองมีปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณแคโรทีนอยด์ต่ำที่สุดเท่ากับ $0.62 \pm 0.07a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ หรือได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2.0 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงที่สุดเท่ากับ $0.64 \pm 0.04a$ และ $0.64 \pm 0.01a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่ต้องกล้าพริกชุดควบคุมมีปริมาณแคโรทีนอยด์ต่ำที่สุด ($0.58 \pm 0.04a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) เมื่อบันทึกผลการทดลองแล้วจึงทำการเปิดตาข่ายพรางแสง เพื่อให้ต้นพริกสามารถรับแสงได้อย่างเต็มที่ตามสภาพธรรมชาติ หลังจากทำให้ต้นพริกได้รับแสงในสภาพธรรมชาติเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จึงบันทึกปริมาณแคโรทีนอยด์ ในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ มีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงที่สุดเท่ากับ $0.67 \pm 0.03c$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (ปริมาณแคโรทีนอยด์

0.52±0.03a มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) ถึงร้อยละ 22.38 ในขณะที่การได้รับถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกัน โดยการได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.60±0.02b มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมถึงร้อยละ 15.38 ในวันที่ 70 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงที่สุดเท่ากับ 0.80±0.02c มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ต้นต่อไร่ หรือถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 หรือ 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกัน โดยการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 ต้นต่อไร่ ทำให้ใบพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงที่สุดเท่ากับ 0.74±0.02b มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์ต่ำที่สุด 0.62±0.01a มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ต่ำกว่าชุดควบคุมถึงร้อยละ 22.50 ในวันที่ 77 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมและต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 ต้นต่อไร่ มีปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกัน (0.70±0.02b และ 0.66±0.02ab มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ตามลำดับ) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ต้นต่อไร่ หรือการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1.5 และ 2 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกัน การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.60±0.03a มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึงร้อยละ 13.04 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในวันที่ 84 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงที่สุดเท่ากับ 0.78±0.06b มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ต้นต่อไร่ หรือการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 หรือ 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกัน (ปริมาณแคโรทีนอยด์ 0.68±0.04ab 0.69±0.02ab และ 0.69±0.03ab มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์ในใบต่ำที่สุด (ปริมาณแคโรทีนอยด์ 0.62±0.03a มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึงร้อยละ 20.51 ในวันที่ 91 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงที่สุดเท่ากับ 0.74±0.00d มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์เท่ากับ 0.68±0.04a มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมร้อยละ 8.10 ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้ปริมาณแคโรทีนอยด์ลดลงต่ำกว่า

ชุดควบคุมหรือการปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์ต่ำที่สุดเท่ากับ $0.58 \pm 0.04a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมร้อยละ 21.62 ในวันที่ 98 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในทุกสิ่งทดลองมีปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกัน การปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ปริมาณแคโรทีนอยด์ในใบของต้นกล้าพริกมีแนวโน้มลดลงมากที่สุด (ปริมาณแคโรทีนอยด์ $0.67 \pm 0.03a$ มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม) ในวันที่ 105 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงที่สุดเท่ากับ 0.73 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม เมื่อพิจารณาจากกลุ่มของต้นกล้าพริกที่ได้รับวัสดุปรับปรุงดิน พบว่า ปริมาณแคโรทีนอยด์ของพริกที่ได้รับปูนมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงที่สุด (ภาพประกอบ 26)



ภาพประกอบ 26 ปริมาณแคโรทีนอยด์ของใบต้นพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินนครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดและปูนมาร์ลเปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมในสภาพแปลงทดลอง

(\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

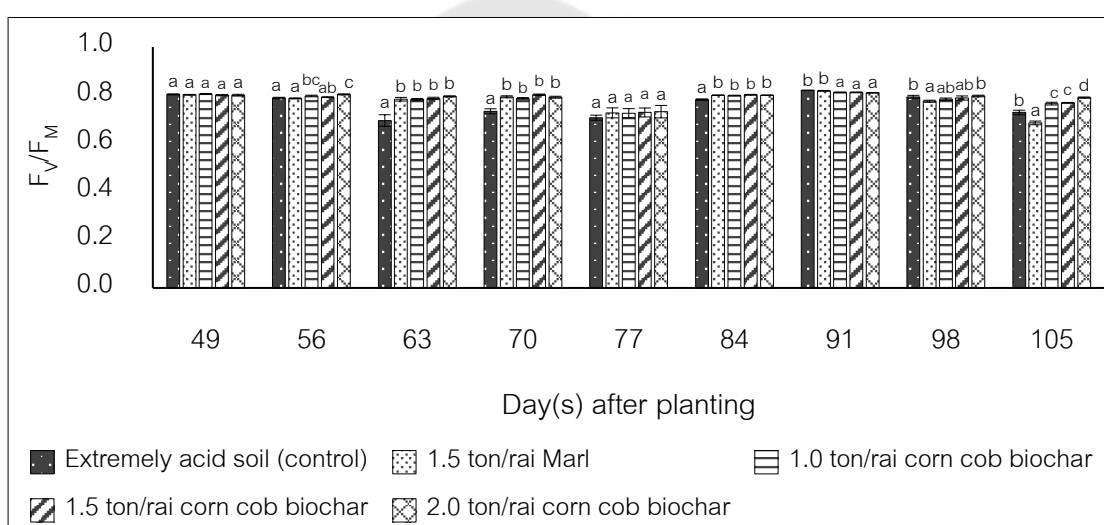
2.5 ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง

การศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดปริมาณ 1 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ เปรียบเทียบกับการปรับสภาพดินเปรี้ยวจัดด้วยปูนมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในสภาพแปลงปลูก ซึ่งพิจารณาจากค่า maximum quantum efficiency of PSII photochemistry หรือค่า F_v/F_m และค่า performance index หรือค่า Pi ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

2.5.1 ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (F_v/F_m)

จากผลการทดลอง พบว่า ในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกในทุกสิ่งทดลองมีค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ไม่แตกต่างกัน ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมที่ไม่ได้รับวัสดุปรับปรุงดิน และต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ หรือการได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1.0 ตันต่อไร่ มีค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ไม่แตกต่างกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.788 0.787 และ 0.791 ตามลำดับ ในขณะที่การได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1.5 หรือ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ของใบพริกเพิ่มสูงขึ้นกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ 0.797 และ 0.803 ตามลำดับ) เมื่อบันทึกผลการทดลองแล้วจึงทำการเปิดตาข่ายพรางแสง เพื่อให้ต้นพริกสามารถรับแสงได้อย่างเต็มที่ตามสภาพธรรมชาติ หลังจากทำให้ต้นพริกได้รับแสงในสภาพธรรมชาติเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จึงบันทึกค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ ในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (0.695) ต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ หรือถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้น 1 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ มีค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์เท่ากับ 0.783 0.781 0.786 และ 0.795 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในวันที่ 70 ถึง 84 หลังการย้ายปลูก ในวันที่ 91 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมหรือต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ มีค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ไม่แตกต่างกัน โดยต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์สูงสุดเท่ากับ 0.820 ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยพบว่า การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ต่ำที่สุด 0.810 ในวันที่ 98 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีค่า

คลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์สูงที่สุด (0.793) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ต่ำที่สุด (0.775) ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมร้อยละ 2.27 เมื่อพิจารณาต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ต้นกล้าพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2 ตันต่อไร่ มีค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์สูงที่สุด (0.797) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่การได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 หรือ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ไม่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในวันที่ 105 หลังการย้ายปลูก (ภาพประกอบ 27)



ภาพประกอบ 27 ค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (F_v/F_m) ของใบต้นกล้าพริกขี้นุสสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเบรียวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดและปูนมาร์ลในสภาพแปลงปลูก

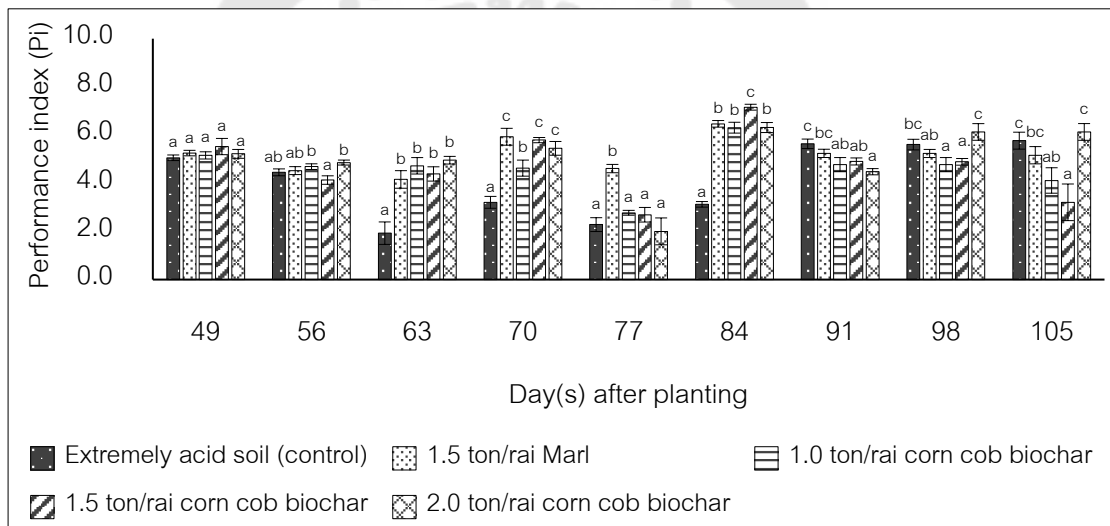
(\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2.5.2 ค่า Performance index (Pi)

จากการวิเคราะห์ค่า Pi พบว่า ในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกในทุกสิ่งทดลองมีค่า Pi ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ 2 ตันต่อไร่ มีค่า Pi สูงที่สุด (4.86 ± 0.10) ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (ค่า Pi 4.45 ± 0.14) ร้อยละ 9.13 อย่างไรก็ตาม การเติมถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตัน

ต่อไร่ (ค่า Pi 4.69 ± 0.12) ทำให้ค่า Pi ไม่แตกต่างจากการเติมถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ตันต่อไร่ อย่างไรก็ตาม การเติมถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ค่า Pi ลดลงต่ำที่สุด ($4.13 \pm 0.18a$) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ (ค่า Pi 4.52 ± 0.16) ทำให้ค่า Pi ไม่แตกต่างจากชุดควบคุม เมื่อบันทึกผลการทดลองแล้วจึงทำการเปิดตาข่ายพรางแสงเพื่อให้ต้นพริกสามารถรับแสงได้อย่างเต็มที่ตามสภาพธรรมชาติ หลังจากที่ให้ต้นพริกได้รับแสงในสภาพธรรมชาติเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จึงบันทึกค่า Pi ในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีค่า Pi ต่ำที่สุด (1.92 ± 0.47) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นกล้าพริกที่ปลูกในดินที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพหรือปุ๋ยมาร์ล อย่างไรก็ตาม ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดหรือปุ๋ยมาร์ลมีค่า Pi ไม่แตกต่างกัน โดยต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2.0 ตันต่อไร่ มีค่า Pi สูงที่สุด (4.96 ± 0.12) ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมกว่า 2.9 เท่า ในวันที่ 70 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีค่า Pi ต่ำที่สุด (3.21 ± 0.25) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาค่า Pi ของต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดหรือปุ๋ยมาร์ล พบว่า ต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ (ค่า Pi 5.93 ± 0.35) หรือได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1.5 (ค่า Pi 5.79 ± 0.11) และ 2.0 ตันต่อไร่ (ค่า Pi 5.45 ± 0.29) มีค่า Pi ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีค่า Pi เท่ากับ 4.63 ± 0.33 ซึ่งต่ำกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินกลุ่มอื่น ๆ ในวันที่ 77 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ มีค่า Pi สูงที่สุด (ค่า Pi 4.61 ± 0.17) ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุม (ค่า Pi 2.28 ± 0.28) ถึง 2 เท่า อย่างไรก็ตาม ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้ต้นพริกมีค่า Pi ไม่แตกต่างจากชุดควบคุม ในวันที่ 84 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดินมีค่า Pi ต่ำที่สุด (ค่า Pi 3.12 ± 0.12) เมื่อพิจารณาต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดหรือปุ๋ยมาร์ล พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ มีค่า Pi สูงที่สุด (ค่า Pi 7.16 ± 0.12) ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมถึง 2.3 เท่า ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 หรือ 2 ตันต่อไร่ (ค่า Pi 6.30 ± 0.23 และ 6.31 ± 0.21) หรือการใช้ปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ (ค่า Pi 6.46 ± 0.14) ทำให้ต้นพริกมีค่า Pi ไม่แตกต่างกัน ในวันที่ 91 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกชุดควบคุมมีค่า Pi สูงที่สุด (ค่า Pi 5.64 ± 0.20) เมื่อพิจารณากลุ่มของต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพหรือปุ๋ยมาร์ล พบว่า ต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2 ตันต่อไร่ มีค่า

Pi ต่ำที่สุด (ค่า Pi 4.47 ± 0.13) ในขณะที่การได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1 หรือ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีค่า Pi ไม่แตกต่างกัน (ค่า Pi 4.78 ± 0.29 และ 4.90 ± 0.15 ตามลำดับ) ในต้นพริกที่ได้รับปุณมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีค่า Pi เท่ากับ 5.14 ± 0.17 ในวันที่ 98 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ตันต่อไร่ มีค่า Pi สูงที่สุด (6.13 ± 0.35) อย่างไรก็ตาม การได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 หรือ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีค่า Pi ต่ำที่สุด (ค่า Pi 4.78 ± 0.29 และ 4.88 ± 0.14 ตามลำดับ) ในวันที่ 105 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ตันต่อไร่ มีค่า Pi สูงที่สุด (ค่า Pi 6.13 ± 0.35) ซึ่งไม่แตกต่างจากต้นพริกชุดควบคุมที่มีค่า Pi เท่ากับ 5.70 ± 0.35 อย่างไรก็ตาม ต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ มีค่า Pi ต่ำที่สุด (ค่า Pi 3.21 ± 0.76) ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึง 1.8 เท่า (ภาพประกอบ 28)



ภาพประกอบ 28 ค่า Performance index (Pi) ของใบต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและปุณมาร์ลในสภาพแปลงปลูก

(\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3. การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาบางประการของต้นกล้าพริกชี้หนูชูเปอร์ฮอต

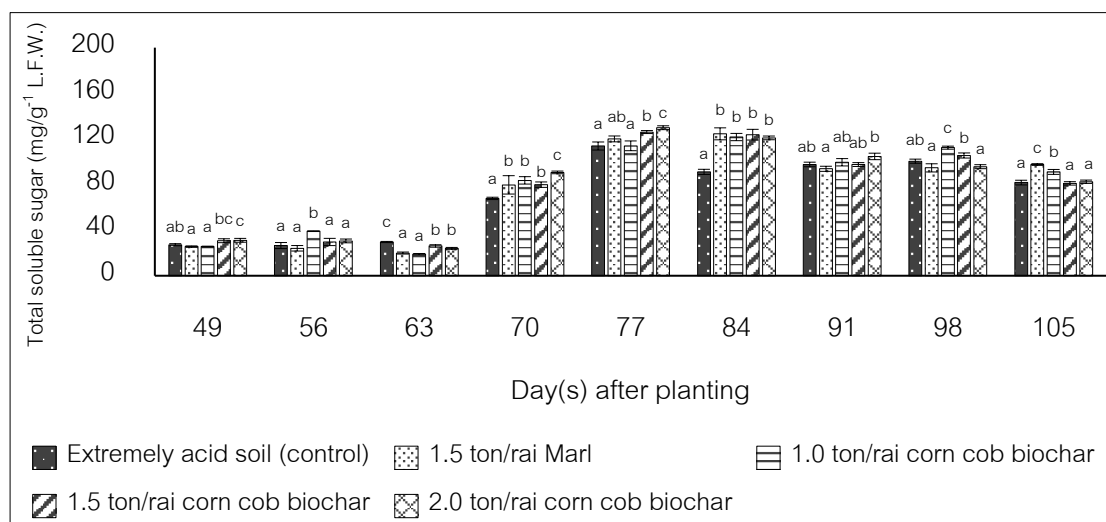
การศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรียบจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพด ปริมาณ 1 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ เปรียบเทียบกับการปรับสภาพดินเปรียบจัดด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ต่อการเปลี่ยนแปลงของสรีรวิทยาบางประการของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตในสภาพแปลงปลูก ซึ่งพิจารณาจากปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (total soluble sugar) ปริมาณโพรลีน (proline) ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) ปริมาณซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (superoxide anion) ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ (malondialdehyde) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) ปริมาณฟลาโวนอยด์ (flavonoid) ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

3.1 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

จากการวัดปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ในใบของต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต ที่มีอายุ 49 วันหลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดปริมาณ 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้สูงที่สุด (30.70 ± 1.72 และ 31.09 ± 1.68 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ในขณะที่การปรับปรุงดินเปรียบจัดด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ และปุ๋ยมาร์ล 1.5 ตันต่อไร่ ต้นกล้าพริกมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ไม่แตกต่างกัน (25.53 ± 0.64 และ 25.41 ± 0.37 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูกต้นกล้าพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 4 ตันต่อไร่ มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้สูงที่สุด (39.02 ± 0.26 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) เมื่อบันทึกผลการทดลองแล้วจึงทำการเปิดตาข่ายพรางแสง เพื่อให้ต้นพริกสามารถรับแสงได้อย่างเต็มที่ตามสภาพธรรมชาติ หลังจากทำให้ต้นพริกได้รับแสงในสภาพธรรมชาติเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จึงบันทึกปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้สูงที่สุด (29.59 ± 0.50 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ในขณะที่การได้รับถ่านชีวภาพปริมาตร 1 ตันต่อไร่ หรือปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ต่ำที่สุด (19.89 ± 0.88 และ 18.89 ± 0.61 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ) ในขณะที่การได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 26.11 ± 1.08 และ 24.00 ± 0.83 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ในวันที่ 70 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ตันต่อไร่ มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้สูงที่สุด (90.60 ± 1.16 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมที่มีปริมาณน้ำตาล

ทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 67.80 ± 1.02 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม อย่างไรก็ตาม ในเดิม ถ่านชีวภาพปริมาณ 1 1.5 หรือการใส่ปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณ น้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ไม่แตกต่างกัน ในวันที่ 77 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกใน ชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดินและต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ต้นต่อไร่ มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ต่ำที่สุดเท่ากับ 113.76 ± 3.53 และ 113.92 ± 4.28 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ ปริมาณ 2 ต้นต่อไร่ มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้สูงที่สุด 129.79 ± 1.69 มิลลิกรัมต่อ น้ำหนักสด 1 กรัม ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมร้อยละ 14.09 ส่วนการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ หรือปุ๋ยมาร์ล 1.5 ต้นต่อไร่ มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 119.97 ± 2.57 และ 125.97 ± 1.31 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ในวันที่ 84 หลังการ ย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกชุดควบคุมมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ต่ำที่สุด (67.83 ± 1.01 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ ปริมาณ 1 1.5 และ 2 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 121.61 ± 3.18 123.68 ± 4.69 และ 120.88 ± 1.62 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ และ การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลาย น้ำได้เท่ากับ 124.42 ± 5.25 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 91 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ต้นต่อไร่ มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ ละลายน้ำได้สูงที่สุดเท่ากับ 104.62 ± 2.85 ในขณะที่ต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1 หรือ 1.5 มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 99.49 ± 3.20 และ 97.50 ± 1.68 มิลลิกรัมต่อน้ำหนัก สด 1 กรัม ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างจากชุดควบคุมที่มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ เท่ากับ 97.58 ± 2.00 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วย ปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ต่ำที่สุดเท่ากับ 93.77 ± 2.24 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 98 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกที่ ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ต้นต่อไร่ มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้สูงที่สุดเท่ากับ 112.31 ± 1.33 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ส่วนการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 2 หรือ ปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ต่ำที่สุดเท่ากับ 95.62 ± 3.58 และ 94.58 ± 1.75 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ในวันที่ 105 หลังการ ย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ มีปริมาณน้ำ ตาบทั้งหมดที่ละลายน้ำได้สูงที่สุดเท่ากับ 97.50 ± 0.74 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม อย่างไรก็ตาม

ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ต่ำที่สุด ไม่แตกต่างจากชุดควบคุม (ภาพประกอบ 29)



ภาพประกอบ 29 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของใบต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดและปูนมาร์ลในสภาพแปลงปลูก

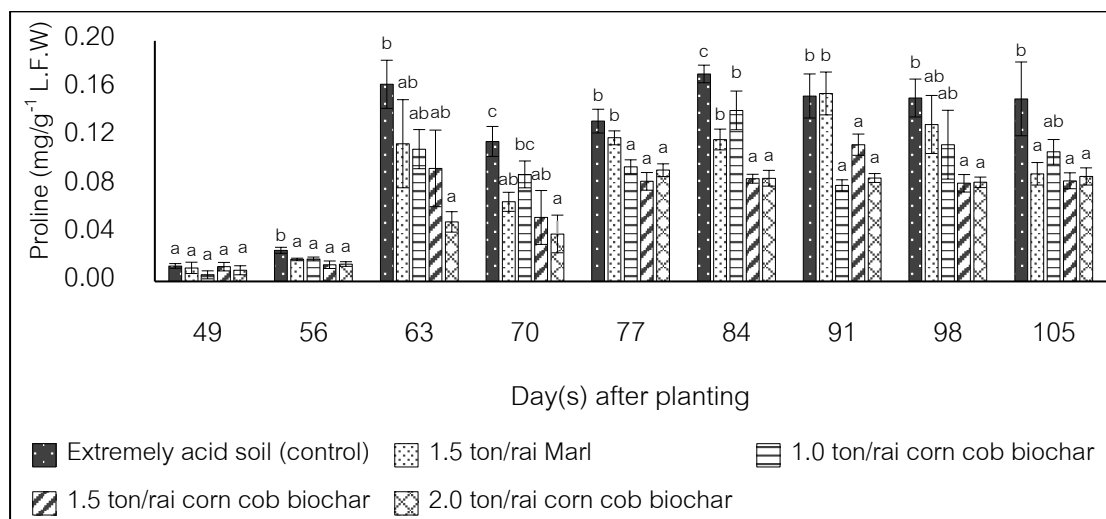
(±standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.2 ปริมาณโพรลิน

จากการวัดปริมาณโพรลินในใบของต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอต ที่มีอายุ 49 วันหลังการย้ายปลูก พบว่า ปริมาณโพรลินในต้นพริกทุกสิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณโพรลินสูงที่สุดเท่ากับ 0.0259 ± 0.0025 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปูนมาร์ลมีปริมาณโพรลินต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อบันทึกผลการทดลองแล้วจึงทำการเปิดตาข่ายพรางแสง เพื่อให้ต้นพริกสามารถรับแสงได้อย่างเต็มที่ตามสภาพธรรมชาติ หลังจากที่ได้ให้ต้นพริกได้รับแสงในสภาพธรรมชาติเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จึงบันทึกปริมาณโพรลิน ในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก พบว่า ปริมาณโพรลินในต้นพริกชุดควบคุมมีปริมาณโพรลินสูงที่สุดเท่ากับ 0.16 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม

ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณโพรลินต่ำที่สุดเท่ากับ 0.05 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึง 4 เท่า ในวันที่ 70 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมยังคงมีปริมาณโพรลินสูงที่สุดเท่ากับ 0.12 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณโพรลินต่ำที่สุดเท่ากับ 0.04 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึง 3 เท่า อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 หรือ 1.5 หรือปุณมาร์ล 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณโพรลินไม่แตกต่างกัน ในวันที่ 77 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมยังคงมีปริมาณโพรลินสูงที่สุดเท่ากับ 0.13 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณโพรลินไม่แตกต่างกัน โดยต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ มีปริมาณโพรลินน้อยที่สุดเท่ากับ 0.08 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม และการปรับปรุงดินด้วยปุณมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณโพรลินเท่ากับ 0.12 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 84 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมยังคงมีปริมาณโพรลินสูงที่สุดเท่ากับ 0.17 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณโพรลินไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในกลุ่มของต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพหรือปุณมาร์ล พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ มีปริมาณโพรลินสูงที่สุดเท่ากับ 0.14 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 91 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมและต้นพริกที่ได้รับปุณมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ มีปริมาณโพรลินสูงที่สุดเท่ากับ 0.15 ± 0.02 และ 0.16 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณโพรลินไม่แตกต่างกัน โดยต้นพริกที่ได้รับโพรลินปริมาณ 1 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณโพรลินต่ำที่สุดเท่ากับ 0.08 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 98 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมปริมาณโพรลินที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.15 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่การได้รับปุณมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ หรือได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณโพรลินต่ำลงเหลือ 0.13 ± 0.02 0.11 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น ต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 หรือ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณโพรลินต่ำที่สุดเท่ากับ 0.08 ± 0.01 และ 0.08 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ในวันที่ 105 หลังการย้ายปลูก พบว่า ปริมาณโพรลินในต้นพริกชุดควบคุม มีปริมาณโพรลินสูงที่สุดเท่ากับ 0.15 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปุณมาร์ลที่ความเข้มข้นต่างๆ ทำให้ต้นพริกที่ปริมาณโพรลินไม่แตกต่างกัน โดยต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพ

ปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ มีปริมาณโพรลีนต่ำที่สุดเท่ากับ 0.08 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม (ภาพประกอบ 30)



ภาพประกอบ 30 ปริมาณโพรลีนของใบต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดและปูนมาร์ลในสภาพแปลงปลูก

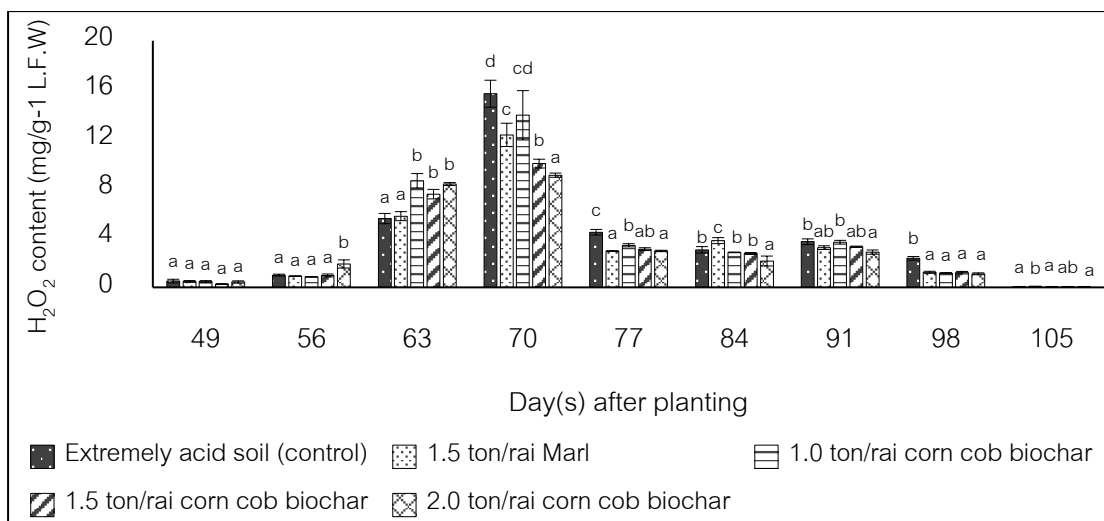
(\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.3 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากการวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในใบของต้นพริกหลังการปลูกพบว่า ในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก ต้นพริกในแต่ละสิ่งทดลองมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่แตกต่างกัน ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ตันต่อไร่ มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงที่สุด (1.90 ± 0.33 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 หรือ 1.5 ตันต่อไร่ หรือการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.85 ± 0.02 0.97 ± 0.11 และ 0.91 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างจากต้นพริกในชุดควบคุม (1.90 ± 0.33 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) เมื่อบันทึกผลการทดลองแล้วจึงทำการเปิดตาข่ายพรางแสง เพื่อให้ต้นพริก

สามารถรับแสงได้อย่างเต็มที่ตามสภาพธรรมชาติ หลังจากที่ให้ต้นพริกได้รับแสงในสภาพธรรมชาติเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จึงบันทึกปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่แตกต่างกัน ซึ่งการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงที่สุดเท่ากับ 8.64 ± 0.58 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ส่วนการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 5.77 ± 0.36 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ไม่แตกต่างจากต้นพริกในชุดควบคุมที่มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 0.54 ± 0.42 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 77 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงที่สุดเท่ากับ 15.70 ± 0.19 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม เมื่อพิจารณาในกลุ่มของต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปุ๋ยมาร์ล พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ต้นต่อไร่ มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงที่สุด (13.95 ± 1.99 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ซึ่งไม่แตกต่างจากต้นพริกในชุดควบคุม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพในปริมาณ 1.5 และ 2 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ำลงเหลือเท่ากับ 10.03 ± 0.36 และ 9.10 ± 0.17 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ซึ่งการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากปุ๋ยมาร์ลทำให้ต้นพริกมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 12.36 ± 0.94 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 77 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงที่สุด (4.47 ± 0.23 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ต้นต่อไร่ หรือปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นกล้าพริกมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ำที่สุดเท่ากับ 2.94 ± 0.02 และ 2.95 ± 0.06 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ส่วนการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 และ 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 3.41 ± 0.13 และ 3.10 ± 0.12 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 84 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงที่สุด (3.79 ± 0.24 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ต้นต่อไร่ ทำให้ดินมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ำที่สุดเท่ากับ 2.14 ± 0.40 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 และ 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 2.84 ± 0.24 และ 2.75 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ซึ่งไม่แตกต่างจากดินเปรี้ยวชุด

ควบคุมที่มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 3.04 ± 0.26 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 91 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ต้นต่อไร่ มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ำที่สุดเท่ากับ 2.86 ± 0.17 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณเพียง 1 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงที่สุดเท่ากับ 3.66 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ซึ่งไม่แตกต่างจากต้นพริกชุดควบคุม (3.70 ± 0.23 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 3.29 ± 0.05 และ 3.22 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ในวันที่ 98 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงที่สุด (2.35 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพหรือปุ๋ยมาร์ลที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ มีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่แตกต่างกัน ในวันที่ 105 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในทุกสิ่งทดลองมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ำกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม (ภาพประกอบ 31)



ภาพประกอบ 31 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของใบต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ชูเปอร์ฮอตที่
ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพ
จากขี้ข้าวโพดและปูนมาร์ลในสภาพแปลงปลูก

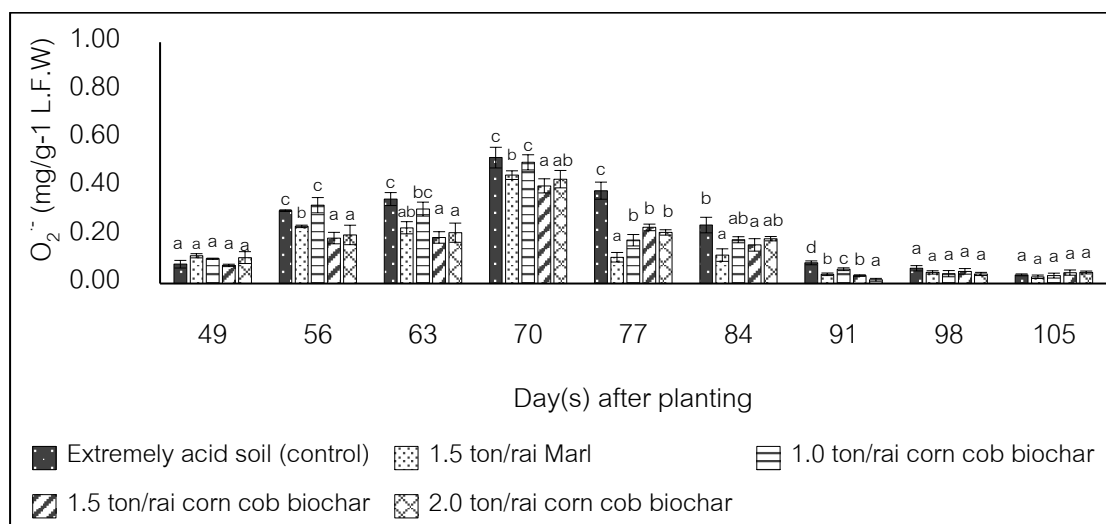
(±standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกัน มีความ
แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3.4 ปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน พบว่า ในวันที่ 49 หลังการ
ย้ายปลูก ต้นพริกในแต่ละสิ่งทดลองมีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนไม่แตกต่างกัน ใน
วันที่ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ต้นต่อ
ไร่ มีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนสูงที่สุดเท่ากับ 0.32 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด
1 กรัม ซึ่งไม่แตกต่างจากต้นพริกชุดควบคุมที่มีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเท่ากับ
 0.30 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความ
เข้มข้น 1.5 และ 2 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนไม่แตกต่างกัน
โดยต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ มีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนต่ำ
ที่สุดเท่ากับ 0.18 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลปริ
มาณ 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเท่ากับ 0.24 ± 0.00
มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม เมื่อบันทึกผลการทดลองแล้วจึงทำการเปิดตาข่ายพรางแสง เพื่อให้
ต้นพริกสามารถรับแสงได้อย่างเต็มที่ตามสภาพธรรมชาติ หลังจากทำให้ต้นพริกได้รับแสงในสภาพ

ธรรมชาติเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จึงบันทึกปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออน ในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นต้นพริกชุดควบคุมมีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนสูงที่สุด (0.35 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1.5 และ 2 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนไม่แตกต่างกัน โดยต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ มีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนต่ำที่สุดเท่ากับ (0.19 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลปริมาณ 2 ต้นต่อไร่ ทำให้ดินมีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเท่ากับ 0.21 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 70 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกชุดควบคุม (0.52 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) และต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ต้นต่อไร่ (0.50 ± 0.03 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) มีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนสูงที่สุดไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพหรือปูนมาร์ลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 หรือ 2 ต้นต่อไร่ มีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนไม่แตกต่างกัน โดยต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ มีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนต่ำที่สุด (0.23 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลปริมาณ 1 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนเท่ากับ 0.45 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 77 และ 84 หลังการย้ายปลูก ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนมีความสอดคล้องกัน โดยพบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนสูงที่สุด (0.38 ± 0.02) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณากลุ่มของต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดิน พบว่า ต้นพริกที่ได้รับปูนมาร์ลปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ มีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนต่ำที่สุดเท่ากับ 0.11 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนไม่แตกต่างกัน ในวันที่ 91 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนสูงที่สุด (0.08 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดิน พบว่า ต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ต้นต่อไร่ มีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนต่ำที่สุด (0.02 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปูนมาร์ลปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ เท่ากัน ทำให้ต้นพริกมีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนไม่แตกต่างกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.03 ± 0.00 และ 0.04 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ในวันที่ 98 และ 105 วัน หลังการย้ายปลูก

พบว่า ต้นพริกในทุกลิ่งทดลองมีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ภาพประกอบ 32)



ภาพประกอบ 32 ปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนของใบต้นกล้าพริกขี้นหนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเบรียวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดและปูนมาร์ลในสภาพแปลงปลูก

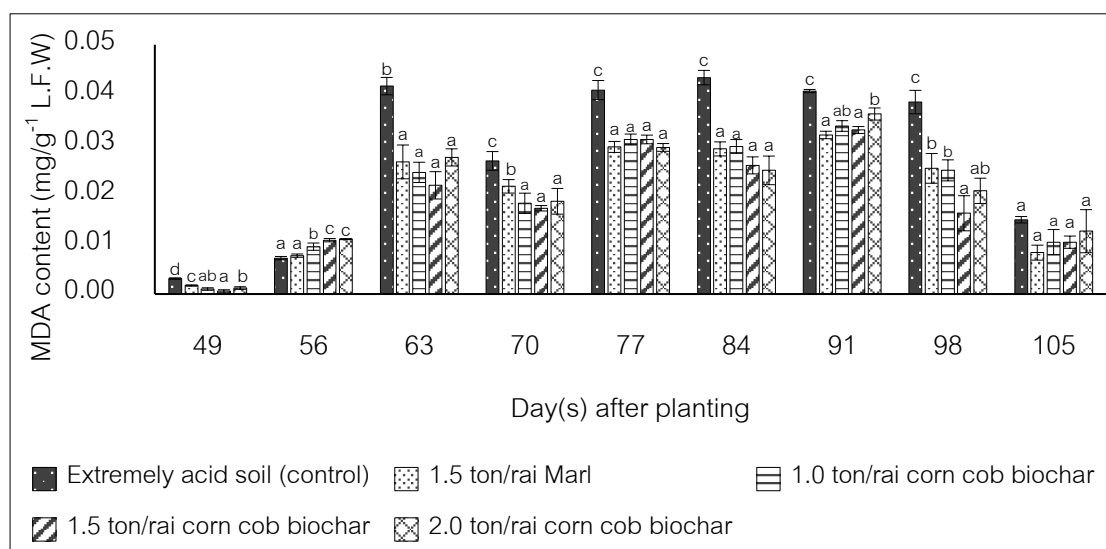
(\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.5 ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ พบว่า ในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก ต้นพริกชุดควบคุมมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์สูงที่สุด (0.0031 ± 0.0001 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ส่งผลให้ต้นพริกมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ต่ำที่สุด (0.0006 ± 0.0003 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 หรือ 2 ตันต่อไร่ หรือปูนมาร์ล 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์เท่ากับ 0.0010 ± 0.0007 0.0012 ± 0.0003 และ 0.0017 ± 0.0003 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมและต้นพริกที่ได้รับปูนมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ มีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ไม่แตกต่างกัน โดยต้นพริกชุดควบคุมมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ต่ำที่สุดเท่ากับ

0.0072±0.0003 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม อย่างไรก็ตาม ในต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพ ปริมาณ 1 1.5 และ 2 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์เพิ่มสูงขึ้นเป็น 0.0095±0.0007 0.0108±0.0007 และ 0.0110±0.0001 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ เมื่อบันทึกผลการทดลองแล้วจึงทำการเปิดตาข่ายพรางแสง เพื่อให้ต้นพริกสามารถรับ แสงได้อย่างเต็มที่ตามสภาพธรรมชาติ หลังจากที่ให้ต้นพริกได้รับแสงในสภาพธรรมชาติเป็น ระยะเวลา 1 สัปดาห์ โดยในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณ สารมาลอนไดอัลดีไฮด์สูงสุด (0.0417±0.0017 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพหรือปุ๋ยมาร์ล มีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วย ถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ มีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.0218±0.0027 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ซึ่งต่ำกว่าชุดควบคุมถึง 2 เท่า ซึ่งผลการวิเคราะห์ปริมาณสารมา ลอนไดอัลดีไฮด์ในวันที่ 77 ถึง 84 วัน หลังการย้ายปลูก ให้ผลการวิเคราะห์ที่คล้ายคลึงกัน ในวันที่ 91 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมยังคงมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์สูงสุด (0.0407±0.0003 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อ พิจารณาจากต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดิน พบว่า ต้นพริกที่ได้รับปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ มีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ต่ำที่สุด (0.0319±0.0008 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่การได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1 1.5 และ 2 ต้นต่อไร่ ต้นพริกมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์เท่ากับ 0.0337±0.0011 0.0329±0.0007 และ 0.0361±0.0012 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ในวันที่ 98 หลัง การย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมยังคงมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์สูงสุด (0.00385±0.0024 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อ พิจารณาจากต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดิน พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ ปริมาณ 1.5 ต้นต่อไร่ มีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ต่ำที่สุด (0.0162±0.0035 มิลลิกรัมต่อ น้ำหนักสด 1 กรัม) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ต้นต่อไร่ หรือปุ๋ยมาร์ล 1.5 ต้นต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ไม่แตกต่างกัน ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 0.0248±0.0021 0.0252±0.0021 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 105 หลังการย้าย ต้น พริกในทุกสิ่งทดลองมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารมา ลอนไดอัลดีไฮด์ในต้นพริกชุดควบคุมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 0.0149±0.0006 มิลลิกรัม ต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลหรือถ่านชีวภาพ

ปริมาณ 1 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ ทำให้มีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์เท่ากับ 0.0083 ± 0.0006 0.0104 ± 0.0025 0.0104 ± 0.0012 และ 0.0126 ± 0.0043 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ (ภาพประกอบ 33)



ภาพประกอบ 33 ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ของใบต้นกล้าพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับ การปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพ จากขี้ข้าวโพดและปูนมาร์ลในสภาพแปลงปลูก

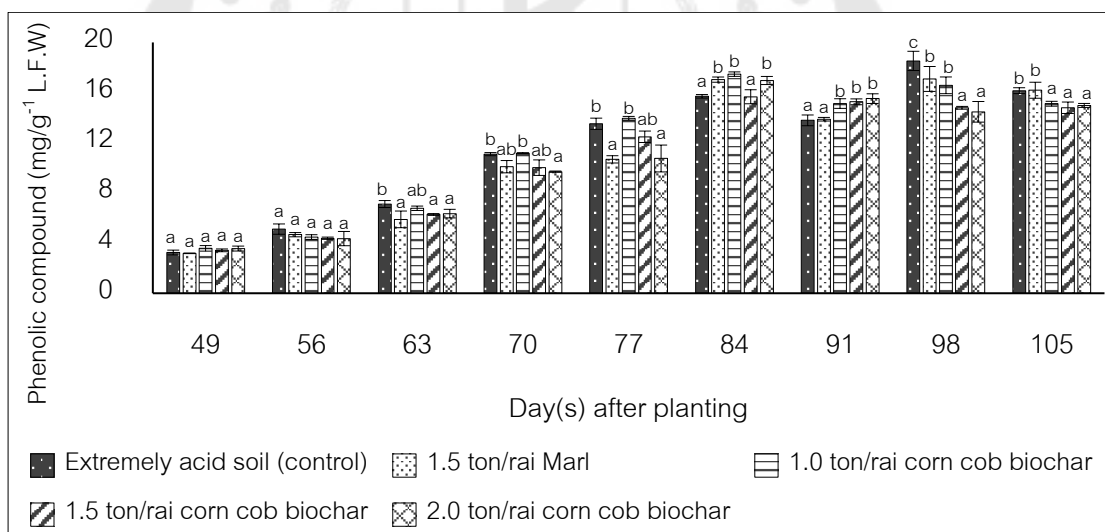
(\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.6 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก พบว่า ในวันที่ 49 และ 56 หลังการย้ายปลูก ต้นพริกในทุกสิ่งทดลองมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในต้นพริกชุดควบคุม (5.12 ± 0.41 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) มีแนวโน้มเพิ่มสูงกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปูนมาร์ล เมื่อบันทึกผลการทดลองแล้วจึงทำการเปิดตาข่ายพรางแสง เพื่อให้ต้นพริกสามารถรับแสงได้อย่างเต็มที่ตามสภาพธรรมชาติ หลังจากที่ได้ให้ต้นพริกได้รับแสงในสภาพธรรมชาติเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ โดยในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมี

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงสุด (7.12 ± 0.28 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนที่ต้นพริกได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกลดลงต่ำที่สุดเท่ากับ 5.89 ± 0.66 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 6.78 ± 0.17 6.28 ± 0.07 และ 6.35 ± 0.34 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 70 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมและต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกไม่แตกต่างกัน โดยต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ 1 ตันต่อไร่ มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงสุดเท่ากับ 11.16 ± 0.04 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม อย่างไรก็ตาม การเติมถ่านชีวภาพในปริมาณ 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกลดลงเหลือ 10.02 ± 0.62 และ 9.70 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกไม่แตกต่างจากการใช้ถ่านชีวภาพที่ปริมาณ 2 ตันต่อไร่ ในวันที่ 77 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกชุดควบคุม (3.51 ± 0.45 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) และต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ (13.95 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ยังคงมีสารประกอบฟีนอลิกสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ ต้นพริกที่ได้รับปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ หรือได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ตันต่อไร่ มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกไม่แตกต่างกัน ในวันที่ 84 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 หรือ 2 ตันต่อไร่ หรือได้รับปุ๋ยมาร์ล 1.5 ตันต่อไร่ มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกไม่แตกต่างกัน โดยต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงสุดเท่ากับ 17.47 ± 0.18 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกไม่แตกต่างจากต้นพริกในชุดควบคุม ในวันที่ 91 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมและต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกไม่แตกต่างกันเท่ากับ 13.79 ± 0.43 และ 13.89 ± 0.14 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ พบสารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 15.13 ± 0.38 15.26 ± 0.23 และ 15.52 ± 0.38 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ซึ่งปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่พบ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในวันที่ 98 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกชุดควบคุมมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงที่สุดเท่ากับ 18.52 ± 0.77 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของต้นพริกมีแนวโน้มลดลงเป็น 16.58 ± 0.67 14.79 ± 0.11 และ 14.46 ± 0.82 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (17.09 ± 0.99 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ไม่แตกต่างจากการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ ในวันที่ 105 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมและต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกไม่แตกต่างกัน (16.15 ± 0.23 และ 16.17 ± 0.64 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ) เมื่อพิจารณาในกลุ่มของพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกไม่แตกต่างกัน (15.11 ± 0.19 14.79 ± 0.46 และ 14.98 ± 0.16 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ) (ภาพประกอบ 34)



ภาพประกอบ 34 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของใบต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเบรียวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดและปูนมาร์ลในสภาพแปลงปลูก

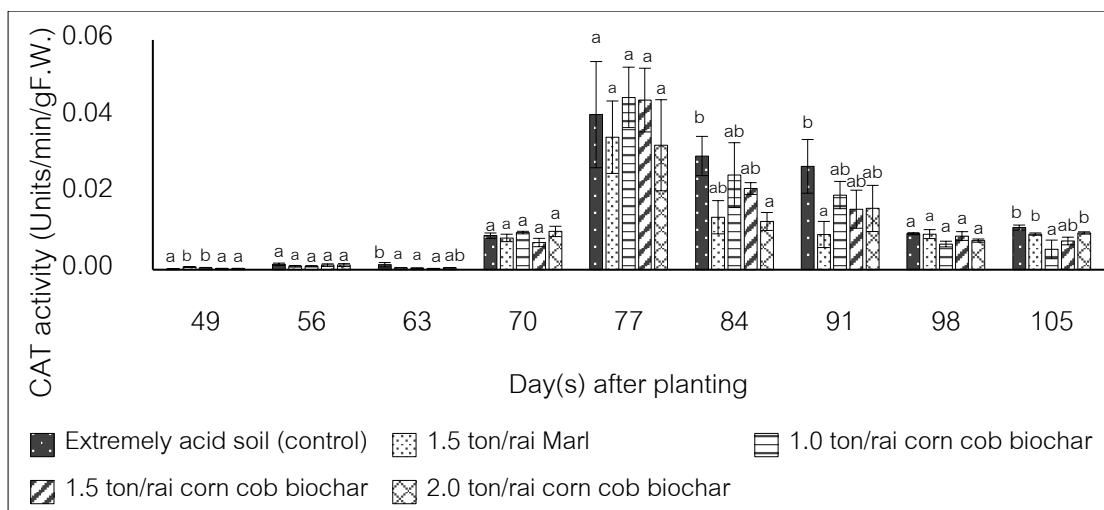
(\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4. การศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาผลิตเปอร์ออกซิเดชัน

การศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพด ปริมาณ 1 1.5 และ 2 ตันต่อไร่ หรือปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ เปรียบเทียบกับต้นพริกที่ปลูกในดินเปรี้ยวชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินต่อความสามารถของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาผลิตเปอร์ออกซิเดชันของต้นกล้าพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในสภาพแปลงปลูก ซึ่งพิจารณาจากเอนไซม์คะตะเลส (catalase, CAT) และเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (superoxide dismutase, SOD) ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์คะตะเลส

จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์คะตะเลส พบว่า ในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์คะตะเลสในพริกชุดควบคุมมีปริมาณต่ำที่สุด ในขณะที่การปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพในทุกสิ่งทดลอง ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์คะตะเลสไม่แตกต่างกัน ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์คะตะเลสในพริกทุกสิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกับวันที่ 70 และ 77 วัน หลังการย้ายปลูก อย่างไรก็ตาม ในวันที่ 84 หลังการย้ายปลูก ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากขังข้าวโพดปริมาณ 2.0 ตันต่อไร่ มีประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์คะตะเลสต่ำที่สุด เช่นเดียวกับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลในปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ และในวันที่ 91 หลังการย้ายปลูก ต้นพริกที่ได้รับปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์คะตะเลสต่ำที่สุด ในวันที่ 98 หลังการย้ายปลูก ต้นพริกในทุกสิ่งทดลองมีประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์คะตะเลสไม่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 35 กิจกรรมของเอนไซม์อะซีเตสในใบของต้นพริกขี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดและปูนมาร์ลในสภาพแปลงปลูก

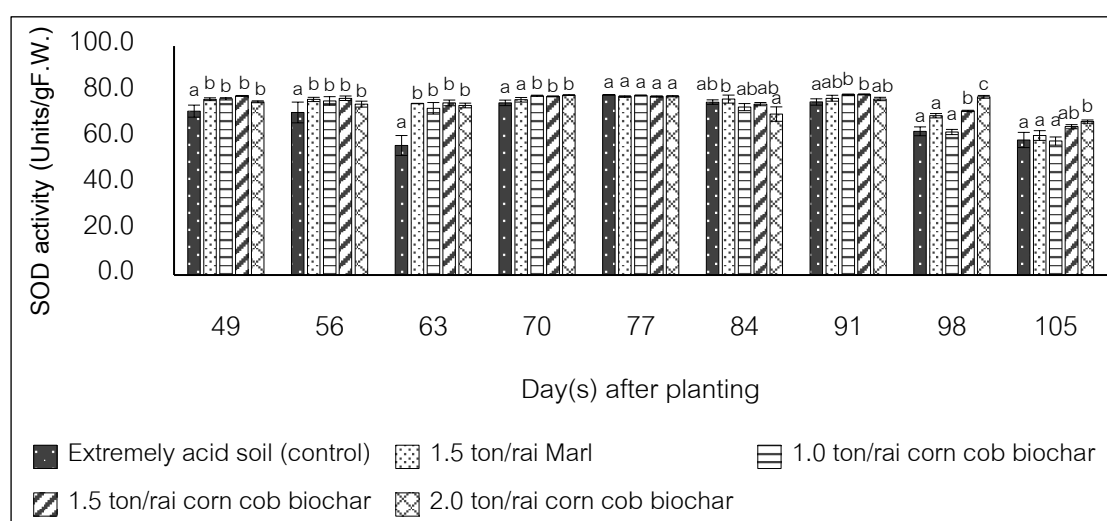
(\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2 ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส

จากการวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส พบว่า ในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก ต้นพริกในชุดควบคุมมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสต่ำที่สุดเท่ากับ 71.57 ± 2.63 หน่วยต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 1.5 หรือ 2 ตันต่อไร่ หรือปูนมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสเท่ากับ 76.96 ± 0.49 78.22 ± 0.18 75.66 ± 0.41 และ 76.78 ± 0.62 หน่วยต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมยังคงมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสต่ำที่สุด (70.99 ± 4.53 หน่วยต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปูนมาร์ล อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยปูนมาร์ลหรือถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้ต้นพริกมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสไม่แตกต่างกัน ซึ่งการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสสูงที่สุดเท่ากับ 77.20 ± 0.98 หน่วยต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก

พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีกิจกรรมของเอนไซม์เอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสต่ำที่สุด (56.57 ± 4.34) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลหรือถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มีกิจกรรมของเอนไซม์เอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสไม่แตกต่างกัน ในวันที่ 70 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีกิจกรรมของเอนไซม์เอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสไม่แตกต่างต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ อย่างไรก็ตาม กิจกรรมของเอนไซม์เอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสในต้นพริกชุดควบคุมมีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 75.19 ± 4.34 ยูนิตต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นต่าง ๆ ทำให้ต้นพริกมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสไม่แตกต่างกัน ในวันที่ 77 หลังการย้ายปลูกพบว่า ต้นพริกในทุกสิ่งทดลองมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสไม่แตกต่างกัน ในวันที่ 84 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสต่ำที่สุด $70.28 \pm 3.15a$ ยูนิตต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่ต้นพริกชุดควบคุมและต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 และ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสเท่ากับ $75.53 \pm 0.99ab$ $73.33 \pm 1.55ab$ และ $74.64 \pm 0.70ab$ ยูนิตต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ ซึ่งการปรับปรุงดินด้วยปุ๋ยมาร์ลปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสสูงที่สุด (76.84 ± 1.75) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในวันที่ 91 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสต่ำที่สุดเท่ากับ 75.57 ± 0.99 ยูนิตต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสไม่แตกต่างกัน โดยการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสสูงที่สุดเท่ากับ 78.86 ± 0.22 ยูนิตต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ในวันที่ 98 หลังการย้ายปลูก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมและต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ มีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสต่ำที่สุดไม่แตกต่างกัน ($62.76 \pm 1.93a$ และ $62.46 \pm 1.12a$ ยูนิตต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสสูงที่สุด ($77.82 \pm 0.61c$ ยูนิตต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับต้นพริกในชุดควบคุมเช่นเดียวกับในวันที่ 105 หลังการย้ายปลูก ซึ่งพบว่า การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 2 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสสูงที่สุด ($67.01 \pm 0.71c$

ยูนิตต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ) ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพปริมาณ 1 หรือ 1.5 ตันต่อไร่ ทำให้ต้นพริกมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสต่ำกว่า ($58.51 \pm 1.79a$ และ $64.77 \pm 0.90ab$ ยูนิตต่อน้ำหนักสด 1 กรัม ตามลำดับ) อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วย ถ่านชีวภาพปริมาณ 1 ตันต่อไร่ หรือปูนมาร์ล 1.5 ตันต่อไร่ ($60.93 \pm 2.12a$ ยูนิตต่อน้ำหนักสด 1 กรัม) ทำให้ต้นพริกมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสไม่แตกต่างกับชุดควบคุม ($58.97 \pm 3.31a$ ยูนิตต่อน้ำหนักสด 1 กรัม)



ภาพประกอบ 36 กิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสในใบของต้นพริกชี้หูสายพันธุ์ ซูเปอร์ฮอตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ด้วยถ่านชีวภาพ จากขี้ข้าวโพดและปูนมาร์ลในสภาพแปลงปลูก

(\pm standard error หรือ S.E.) ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

อภิปรายผลการวิจัย

ดินเปรี้ยวเป็นดินที่มีค่า pH ต่ำกว่า 7 ในขณะที่ดินเปรี้ยวจัดจะมีค่า pH ต่ำกว่า 4.0 โดยปัญหาดินเปรี้ยวสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ ผลกระทบจากฝนกรด วัตถุต้นกำเนิดดินที่มีธาตุกำมะถันเป็นองค์ประกอบหรือการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ซึ่งค่า pH ของดินเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะปัญหาดินเปรี้ยวที่เกิดขึ้นในเขตร้อนชื้น ซึ่งมักมีอะลูมิเนียมไอออน ไฮโดรเจนไอออน และแมงกานีสไอออนละลายอยู่มากในสารละลายดินจนส่งผลกระทบต่ออาการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืช นอกจากนี้ ค่า pH ของดินยังมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงรูปของธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เช่น ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และแคลเซียม เป็นต้น เนื่องจากธาตุอาหารเหล่านี้สามารถละลายน้ำได้ดีที่ค่า pH ระหว่าง 5.8 ถึง 6.3 เมื่อพืชได้รับไอออนต่าง ๆ มากเกินไปจนก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ โดยเฉพาะบริเวณรากพืชจะทำให้รากพืชมีลักษณะของชั้นเซลล์หนากว่าปกติ รากสั้น เจริญเติบโตช้า ปลายรากไม่แข็งแรง เป็นต้น (Baquy et al., 2017; Hecht-Buchholz & Foy, 1981; Tasnee & Sorasith, 1986) และมักแสดงอาการอย่างชัดเจนในรากของต้นกล้าที่มีอายุน้อย อย่างไรก็ตาม พืชที่ต่างชนิดกันย่อมสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีค่า pH แตกต่างกันได้ เช่น กลุ่มของพืชตระกูลถั่วมักจะเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีค่า pH เป็นกลางหรือเบสอ่อน ในขณะที่มันฝรั่งหรือมันเทศมักเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีค่า pH เป็นกรด ส่วนในพืชส่วนใหญ่มักเจริญเติบโตได้ดี ในดินที่มีค่า pH อยู่ระหว่าง 6 ถึง 7 ถึงแม้ว่าจะมีรายงานจำนวนมากแสดงให้เห็นว่าพืชหลายชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในดินที่มีค่า pH ต่ำจัดจัดอยู่ในกลุ่มดินเปรี้ยว แต่การให้ผลผลิตของพืชเหล่านี้ยังอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องลดความเป็นกรดของดินโดยอาศัยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ กระบวนการจัดการน้ำอย่างเหมาะสม โดยการขังและการระบายน้ำในพื้นที่ดินเปรี้ยวเป็นระยะเวลาต่อเนื่องติดต่อกันตั้งแต่ 3 ถึง 10 ปี ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความลึกของชั้นดินที่มีแร่ไฟโรต์สะสมอยู่ ซึ่งที่เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดปัญหาดินเปรี้ยว อย่างไรก็ตาม การลดความเป็นกรดของดินเปรี้ยวโดยอาศัยวิธีการจัดการน้ำอาจไม่ใช่วิธีการที่เหมาะสมนักสำหรับบางพื้นที่ที่มักประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำในช่วงฤดูแล้งและส่งผลให้ค่า pH ของดินลดลง ดังนั้น การจัดการดินโดยการใช้วัสดุที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ซึ่งสามารถใช้ในการปรับลดค่า pH ของดิน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และโดโลไมท์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) เป็นต้น

จะถูกนำมาช่วยแก้ไขปัญหาดินเปรี้ยวได้ อย่างไรก็ตาม วัสดุปรับปรุงดินเหล่านี้มักมีราคาสูงและอาจเป็นอันตรายต่อผิวหนังของผู้ปฏิบัติงาน (Inostroza-Blancheteau et al., 2012) ซึ่งการใส่ปูนติดต่อกันเป็นระยะเวลาและมีการใส่ปูนในปริมาณมากเพื่อวัตถุประสงค์ในการแก้ปัญหาดินเปรี้ยวอาจนำไปสู่การเกิดปัญหาปูนตกค้างในดินได้ รวมทั้งในสภาพดินเปรี้ยวจัด อิทธิพลของปูนจะแสดงเฉพาะในช่วงฤดูปลูกนั้น ๆ เมื่อดินแห้งค่า pH ของดินจะลดลงอีกครั้ง (Brinkman et al., 1993) ดังนั้นเกษตรกรจะต้องใส่ปูนอย่างต่อเนื่องเพื่อปรับค่า pH ของดิน จึงเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตผลผลิตทางการเกษตร โดยการใส่ปูนขาว 1 ตันต่อเฮกตาร์ ในดินเปรี้ยวจัดที่มีค่า pH ระหว่าง 2.97 ถึง 3.36 จะช่วยให้ดินมีอัตราการดูดซับฟอสฟอรัสลดลงร้อยละ 3.1 ถึง 13.1 (Ogunwale & Shamshuddin, 1999) ดังนั้น การใส่ปูนเพื่อปรับค่า pH ของดินในระยะเวลาต่อเนื่องยาวนานจึงอาจส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซับธาตุฟอสฟอรัสของดินได้ในอนาคต

สำหรับในภาคการเกษตร มักมีปัญหากับการจัดการวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น การเผาตอซังข้าวของชาวนาภายหลังฤดูการเก็บเกี่ยว หรือเศษซากต้นและซังของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น ซึ่งมีจำนวนมากและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหากมีการจัดการที่ไม่ถูกวิธี ได้แก่ การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และฝุ่นละอองขนาดเล็กซึ่งเกิดจากการเผาทำลายหรือการปลดปล่อยแก๊สมีเทนจากการเนาเปื้อนมูลของเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ซึ่งล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมโลกและสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ จากการสำรวจวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเฉพาะบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย พบว่าปริมาณชีวมวลที่เกิดจากการปลูกมันสำปะหลังและข้าวที่ไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์มีสูงถึงร้อยละ 42 และ 54 ตามลำดับ โดยเฉพาะข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่มีปริมาณชีวมวลเหลือใช้มากถึงร้อยละ 87 ซึ่งเกษตรกรส่วนใหญ่กำจัดสารชีวมวลเหล่านี้โดยการเผาทำลาย ซึ่งการนำมวลชีวภาพที่เหลือใช้ทางการเกษตรมาผ่านกระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อนหรือกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อนโดยปราศจากอากาศ (Basu, 2013; Brunner & Sperisen, 2013; Mohan et al., 2006) ส่งผลให้ถ่านชีวภาพมีลักษณะเป็นรูพรุนเนื่องจากการระเหยของสารอินทรีย์เมื่อได้รับความร้อนสูงในระหว่างการผลิต ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการอุ้มน้ำและการระบายน้ำของดินภายหลังการผสมถ่านชีวภาพ และยังช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการจับธาตุอาหารในดินไม่ให้ถูกชะล้างไปก่อนที่พืชจะดูดซึมนำไปใช้ได้ จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ยและช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Rajkovich et al., 2012; M. Yamato, Y. Okimori, I. F. Wibowo, S. Anshori, & M. Ogawa, 2006) นอกจากนี้ ในระหว่างการให้ความร้อนในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ หมู่ฟังก์ชันที่มีฤทธิ์เป็นกรดต่าง ๆ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล ฟอสเฟต และ

คาร์บอกซิล เป็นต้น จะถูกกำจัดออก ทำให้ถ่านชีวภาพจึงมีฤทธิ์เป็นเบสและสามารถนำมาใช้ปรับค่า pH ของดินเปรี้ยวให้สูงขึ้น เพื่อลดปัญหาความเป็นพิษของแร่ธาตุต่าง ๆ ที่มีความเข้มข้นสูงเกินไปในสภาพดินเปรี้ยวและสามารถนำดินที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงดินไปใช้ในการปลูกพืชชนิดต่าง ๆ ต่อไป (Webera & Quickerb, 2018) โดยพริกเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อวิถีชีวิตคนไทย รวมทั้งยังเป็นพืชทนแล้งกลุ่มหนึ่งที่ใช้ใช้น้ำน้อยในระยะเก็บเกี่ยว สามารถปลูกได้ทุกฤดูกาลทั่วทุกภาคของประเทศไทย และสามารถเจริญเติบโตและให้ผลผลิตได้ดีในดินเกือบทุกชนิด อย่างไรก็ตาม การปลูกพริกให้มีการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตสูง ควรปลูกดินที่มีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.0 ถึง 6.5 ดังนั้นในสภาพดินเปรี้ยวที่มีค่า pH ต่ำกว่า 6.0 จึงต้องมีการปรับค่า pH ของดินให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและความเป็นประโยชน์ต่อธาตุอาหารในดินของพริกก่อนการเพาะปลูก

การทดลองที่ 1 การศึกษาผลของการปรับค่า pH ของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ต่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อนพริกขี้นุสสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในสภาพหลอดทดลอง

ซึ่งจากการศึกษาการปรับค่า pH ของดินเปรี้ยวจัด (ชุดดินองครักษ์) ในสภาพหลอดทดลอง โดยผสมถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดกับดินเปรี้ยวจัดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล และเพาะเมล็ดพริกขี้นุสสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ บันทึกความยาวต้น ความยาวราก น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นอ่อน พบว่า ต้นพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวล มีความยาวต้นและความยาวราก รวมทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งที่สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมหรือการได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 หรือ 10.0 โดยมวล ในขณะที่ต้นอ่อนของพริกในชุดควบคุม (control) ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพมีความยาวต้น ความยาวราก น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าการปรับค่า pH ของดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้ต้นอ่อนพริกมีการเจริญเติบโตสูงขึ้น ในขณะที่การปรับค่า pH ด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นสูงเกินไปจะทำให้การเจริญเติบโตของต้นอ่อนพริกลดลง สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bu และคณะ ในปี ค.ศ. 2019 ซึ่งศึกษาการงอกของเมล็ด *Robinia pseudoacacia* L. ในถ่านชีวภาพจากแกลบที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 5 โดยมวล ซึ่งพบว่า การเพาะเมล็ด *R. pseudoacacia* ในถ่านชีวภาพทุก ๆ ความเข้มข้นทำให้ต้นกล้าของ *R. pseudoacacia* มีความยาวต้นและความยาวรากสูงกว่าชุดควบคุม อย่างไรก็ตาม การปลูกในวัสดุที่มีส่วนผสมของถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นสูงส่งผลให้ความยาวต้นและรากลดลง (Bu, Xue, Wu, & Ma, 2020) เนื่องจากค่า pH ของดินมี

บทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงรูปของธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ซึ่งอาจส่งผลให้พืชแสดงอาการขาดธาตุฟอสฟอรัส เนื่องจากธาตุฟอสฟอรัสสามารถละลายน้ำได้ดีที่ค่า pH ระหว่าง 5.8 ถึง 6.3 นอกจากนี้ ในดินที่มีเนื้อละเอียดยังส่งผลต่อการดูดซึมธาตุฟอสฟอรัส เนื่องจากธาตุฟอสฟอรัสจะถูกตรึงในอนุภาคของดินที่มีเนื้อละเอียดได้ดีกว่าดินที่มีเนื้อหยาบ (Uchida, 2000) ซึ่งชุดดินองครักษ์เป็นดินที่มีลักษณะเนื้อดินส่วนใหญ่เป็นทรายแป้งและดินเหนียวอยู่สูงถึงร้อยละ 74 จึงอาจส่งผลให้การดูดซึมธาตุฟอสฟอรัสของรากพืชลดลง ซึ่งในสภาวะที่พืชขาดธาตุฟอสฟอรัสการเจริญเติบโตของราก รวมทั้งการสร้างรากแขนงและรากฝอยจะลดลง (Uchida, 2000) ในขณะที่ค่า pH ของดินลดลง อะลูมิเนียมจะแสดงความเป็นพิษต่อพืชเมื่อดินมีค่า pH น้อยกว่า 5.0 โดยในดินที่มีสารประกอบอะลูมิเนียมสะสมมากกว่า 10 ถึง 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะก่อให้เกิดความเป็นพิษที่รุนแรงต่อระบบรากพืช (Kawano et al., 2003; Kochian et al., 2004; Kochian et al., 2005) ซึ่งดินเปรี้ยวจัดชุดดินองครักษ์มีปริมาณอะลูมิเนียมสะสมสูงถึง 89.1 กรัมต่อกิโลกรัม จึงทำให้ระบบรากของต้นอ่อนพริกในชุดควบคุมมีความยาวต่ำกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ในขณะที่พืชได้รับความเป็นพิษของอะลูมิเนียม พืชมักแสดงอาการรุนแรงในส่วนของรากมากกว่าส่วนยอด โดยทำให้ระบบรากแคระแกร็น เนื่องจากอะลูมิเนียมไปยับยั้งการยืดยาวของราก ประสิทธิภาพในการดูดน้ำและธาตุอาหารลดลง (Chang et al., 1999; Matsumoto, 2000) ซึ่งพืชที่อยู่ในระยะที่เป็นต้นกล้าจะได้รับผลกระทบมากกว่าพืชที่มีอายุมาก (Thornton et al., 1986) นอกจากนี้ กิจกรรมของแบคทีเรียต่าง ๆ ที่อยู่ในดิน ยังมีความเกี่ยวข้องกับค่า pH ของดินอีกด้วย กล่าวคือ เมื่อดินมีค่า pH ลดลงจนส่งผลเชิงลบต่อกิจกรรมของแบคทีเรียในดินจะทำให้อัตราการย่อยสลายปุ๋ยอินทรีย์ รวมทั้งการหมุนเวียนของแร่ธาตุต่าง ๆ ในดินเกิดขึ้นได้ยากกว่าดินปกติ (Baquy et al., 2017; Hecht-Buchholz & Foy, 1981; Tasnee & Sorasith, 1986) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจะช่วยทำให้ค่า pH ของดินสูงขึ้น และลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียมลง ส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตสูงขึ้น แต่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพในความเข้มข้นสูงเกินไป สารบางชนิดที่เกิดจากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพก็อาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้ ส่งผลให้รากพืชอ่อนแอและโดนแบคทีเรียทำลายรากได้ง่าย (Solaiman, Murphy, & Abbott, 2012) เช่น สารในกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Kloss et al., 2012) ดังนั้นการใช้ถ่านชีวภาพเพื่อเป็นวัสดุปรับปรุงดินควรพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ผลิตเป็นถ่านชีวภาพก่อน เพื่อให้เหมาะสมต่อชนิดของพืชที่ต้องการปลูก

การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดต่อความสามารถในการใช้แสงและการเจริญเติบโตทางลำต้นของกล้าพริกในสภาพโรงเรือน

การศึกษาค้นคว้าของการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดต่อการเจริญเติบโตของพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในสภาพโรงเรือน โดยวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของดินเปรี้ยวจัดและถ่านชีวภาพ พบว่า เนื้อดินประกอบด้วยทรายร้อยละ 26 ทรายแป้งร้อยละ 14 และดินเหนียวร้อยละ 60 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินร้อยละ 3.53 ซึ่งจัดอยู่ในระดับปานกลาง มีค่า pH เท่ากับ 4.1 และพบว่ามีปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมในระดับสูง มีฟอสฟอรัสอยู่ในระดับปานกลาง เมื่อวิเคราะห์ระดับความต้องการปุ๋ยในรูป CaCO_3 ของดิน พบว่า ดินเปรี้ยวจัดในชุดดินของครักษ์มีความต้องการปุ๋ยเท่ากับ 1,882 กิโลกรัมต่อไร่ ในขณะที่ถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดมีค่า pH สูงถึง 10.43 ซึ่งมีค่า pH สูงกว่าดินเปรี้ยวจัดในชุดดินของครักษ์ถึง 2.4 เท่า และมีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่าดินในชุดดินของครักษ์ถึง 3.6 เท่า สอดคล้องกับผลการทดลองของ Yeboah และคณะ ในปี ค.ศ. 2020 ซึ่งพบว่า การผลิตถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดในกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดที่มีค่า pH เท่ากับ 10.18 (Yeboah, Asamoah, Ofori, Amoah, & Agyema, 2020) ในขณะที่ Chintala และคณะ ในปี ค.ศ. 2013 พบว่า การผลิตถ่านชีวภาพจากข้าวโพด (*Zea mays* L.) ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ถ่านชีวภาพที่มีค่า pH เท่ากับ 11.42 (Chintala, Schumacher, Mollinedo, Malo, & Julson, 2013) อย่างไรก็ตาม ค่า pH ของถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต โดย Rafiq และคณะ ในปี ค.ศ. 2016 พบว่า การผลิตถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 องศาเซลเซียส ทำให้ถ่านชีวภาพมีค่า pH เท่ากับ 7.7 8.8 และ 9.8 ตามลำดับ (Rafiq et al., 2016)

ภายหลังการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดที่ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 5 และ 10 โดยมวล โดยเปรียบเทียบค่า pH กับดินชุดควบคุมในระหว่างการปลูกต้นกล้าพริกในสภาพโรงเรือน พบว่า การปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นสูงส่งผลให้ดินมีค่า pH เพิ่มขึ้นสูงกว่าชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดิน สอดคล้องกับผลการทดลองของ Chintala และคณะ ในปี ค.ศ. 2013 ซึ่งพบว่า การผสมถ่านชีวภาพจากข้าวโพดที่ความเข้มข้นที่สูงขึ้น ช่วยให้ค่า pH ของดินเปรี้ยวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Chintala et al., 2013) ในขณะที่ Apori และคณะ ในปี ค.ศ. 2021 พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดในดินเขตร้อนช่วยให้ค่า pH ของดินเพิ่มขึ้นสูงกว่าชุดควบคุมที่ไม่ได้ใส่ถ่านชีวภาพ (Apori, Byalebeka, Murongo, Ssekandi, & Noel, 2021) อย่างไรก็ตาม ภายหลังการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ

และปลูกต้นกล้าพริกเป็นระยะเวลา 56 วัน หลังการย้ายปลูกในสภาพโรงเรือน พบว่า ค่า pH ของดินในทุกๆ สิ่งทดสอบลดลงต่ำกว่าการปรับค่า pH ของดินในช่วงแรกของการปลูก

เมื่อพืชได้รับความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพ พืชจะมีการปรับตัวเพื่อให้สามารถรอดชีวิตจากสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่าง ๆ เหล่านั้นได้ โดยพืชจะมีกลไกการปรับตัวเพื่อป้องกันตัวเองไม่ให้ได้รับความเสียหายจากความเครียดที่ได้รับหรือให้เกิดความเสียหายในระดับที่น้อยที่สุด นอกจากนี้ พืชยังต้องซ่อมแซมระบบหรือโครงสร้างที่ได้รับผลกระทบจากภาวะเครียดเหล่านั้นให้กลับมาอยู่ในสภาวะปกติในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งการรักษาระดับคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์เป็นหนึ่งในกลไกที่พืชใช้ปรับตัวเพื่อให้อยู่รอดได้ในสภาวะเครียด อย่างไรก็ตาม ความเครียดที่พืชได้รับอาจส่งผลกระทบต่อการสร้างและสลายของรงควัตถุในใบ โดยเฉพาะคลอโรฟิลล์ ซึ่งสามารถสลายตัวได้ง่าย (Iturbe-Ormaetxe et al., 1998) ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุหรือการวัดค่าตรวจความเขียวของแผ่นใบ (SPAD value) ด้วยเครื่องคลอโรฟิลล์มิเตอร์จึงสามารถบ่งบอกถึงปริมาณของรงควัตถุชนิดต่าง ๆ ในใบพืชและใช้ประเมินผลกระทบที่พืชได้รับจากความเครียดทางกายภาพได้ (Makinde & Akande, 2012; Sumanta et al., 2014) เมื่อวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสงในใบของต้นกล้าพริกพบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมที่ไม่ได้รับถ่านชีวภาพมีค่าดัชนีความเขียว ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์ สูงกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นต่าง ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม ในพืชที่มีอายุมากขึ้น เมื่อได้รับความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพ โดยเฉพาะความเครียดจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นในสภาพดินเปรี้ยว พืชจะสร้างกรดอินทรีย์ เช่น มาเลต (malate) ซิเตรท (citrate) และออกซาเลต (oxalate) เป็นต้น ออกมาบริเวณรอบ ๆ รากที่ได้รับบาดเจ็บ ซึ่งกรดจะช่วยลดความเป็นพิษของ Al^{3+} บริเวณรากพืชลง (Yang et al., 2015) อะลูมิเนียมไม่ได้มีผลเสียต่อพืชเฉพาะบริเวณรากเท่านั้น แต่ยังส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช ในกลุ่มของพืชที่ไวต่อความเป็นพิษของ Al^{3+} จะพบว่า Al^{3+} มีผลต่อการแพร่ของไอน้ำผ่านปากใบ (stomatal conductance) (Mukhopadhyay et al., 2012) ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง (Mahalovic et al., 2008; Mukhopadhyay et al., 2012) สัดส่วนของคลอโรฟิลล์ เอ และ บี ผิดปกติ (Mmayi et al., 2015) ส่งผลให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและประสิทธิภาพการใช้แสง (quantum yield efficiency) ของพืชลดลง (Mahalovic et al., 2008; Mmayi et al., 2015) การถ่ายทอดอิเล็กตรอนถูกยับยั้ง (Xin-Yan et al., 2015) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้อาจไม่มีความแตกต่าง

อย่างมีนัยสำคัญในพืชที่มีกลไกการต้านทานต่อ Al^{3+} (S. Ali et al., 2011; Peixoto et al., 2002; Xin-Yan et al., 2015)

ดังนั้นเพื่อประเมินผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ต้นกล้าพริกที่ได้รับภายหลังจากปลูกในดินเปรี้ยวที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพเปรียบเทียบกับชุดควบคุม จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งสามารถประเมินได้โดยค่า F_v/F_m และค่า Pi ด้วยเครื่องคลอโรฟิลล์ฟลูออโรมิเตอร์ ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่า ต้นกล้าพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 2.5 และ 5 โดยมวล มีค่า F_v/F_m ไม่แตกต่างจากต้นกล้าพริกในชุดควบคุม อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ส่งผลให้ต้นกล้าพริกมีค่า F_v/F_m ลดลงต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีความเขียวของใบที่พบว่า ต้นกล้าพริกที่ได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล มีค่าดัชนีความเขียวต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาค่า Pi พบว่า ในวันที่ 35 ถึง 49 หลังการย้ายปลูก ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีค่า Pi สูงที่สุด ในขณะที่การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นสูงขึ้นไปทำให้ต้นกล้าพริกมีค่า Pi ลดลงต่ำกว่าชุดควบคุม ซึ่งการได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 10.0 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีค่า Pi ลดลงต่ำที่สุดตั้งแต่วันที่ 35 ถึง 56 หลังการย้ายปลูก จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่าต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ จะมีปริมาณคลอโรฟิลล์ต่ำกว่าชุดควบคุม แต่ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้นกล้าพริกไม่แตกต่างกัน ดังนั้นค่าดัชนีความเขียวและปริมาณคลอโรฟิลล์ที่เพิ่มขึ้นในชุดควบคุมจึงอาจเป็นการรักษาระดับรงควัตถุ ซึ่งเป็นหนึ่งในกลไกที่พืชใช้เพื่อปรับตัวให้อยู่รอดได้ภายใต้สภาวะเครียด (Iturbe-Ormaetxe et al., 1998) จากปัจจัยทางกายภาพต่าง ๆ ที่พืชได้รับ

อย่างไรก็ตาม เพื่อประเมินสภาวะเครียดที่เกิดขึ้นกับเซลล์พืช เมื่อพืชได้รับความเครียดทางกายภาพจนนำไปสู่การเกิดและสะสมอนุมูลอิสระ (free radicals) ภายในเซลล์พืช ซึ่งอนุมูลอิสระเป็นสารที่มีอิเล็กตรอนอิสระอย่างน้อย 1 อิเล็กตรอน อยู่ในรูปที่ไม่เสถียรและไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารข้างเคียง เรียกสารในกลุ่มนี้ว่า รีแอกทีฟสปีชีส์ (reactive species หรือ RS) (Cornelli, 2009) โดยระดับความเป็นพิษของอนุมูลอิสระขึ้นอยู่กับความสามารถในการ oxidized สารชีวโมเลกุล ดังนั้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาลิพิดเปอร์ออกซิเดชันจากความเครียดออกซิเดทีฟ (oxidative stress) ภายในเซลล์พืช เมื่อพืชได้รับความเครียดทางกายภาพ การวิเคราะห์ระดับความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารในกลุ่มรีแอกทีฟสปีชีส์ชนิดหนึ่งที่สามารถเกิดขึ้นได้จากกิจกรรมต่าง ๆ ของเซลล์พืช (C.H. Foyer & Shigeoka, 2011; Junglee, Urban, Sallanon, & Lopez-Lauri, 2014) จึงถูกวิเคราะห์อย่างแพร่หลายใน

งานวิจัยด้านสรีรวิทยาของพืช จากการวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในใบของต้นกล้าพริกภายหลังการปลูกในดินเปรี้ยวจัดที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชุดควบคุมในสภาพโรงเรือน พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงกว่าต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับผลการทดลองของ Hsieh และคณะ ซึ่งพบว่า ต้นมะเขือเทศที่ได้รับความเครียดจากความแล้งจะมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงกว่าต้นมะเขือเทศที่ได้รับน้ำปกติถึง 7 เท่า (Hsieh et al., 2002) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Chitarra et al., 2016 ซึ่งพบว่าเมื่อมะเขือเทศได้รับความเครียดจากการขาดน้ำปริมาณ H_2O_2 และโพรงลิ้นเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับต้นมะเขือเทศที่ได้รับน้ำปกติ (Chitarra et al., 2016) อย่างไรก็ตาม ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่วิเคราะห์ได้จากใบของต้นกล้าพริกอาจยังไม่เพียงพอที่จะบ่งชี้ถึงระดับความรุนแรงของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในพืชยังมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการส่งสัญญาณภายในเซลล์ (cell signaling) และยังทำหน้าที่ควบคุมการเจริญเติบโต การพัฒนา การตอบสนองต่อความเครียดทางกายภาพและทางชีวภาพและโปรแกรมการตายของเซลล์ (Bailey-Serres & Mittler, 2006; Christine H. Foyer et al., 1994) นอกจากนี้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นสารชนิดอื่นที่ไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาได้อีกด้วย ดังนั้นการประเมินความรุนแรงของปฏิกิริยาออกซิเดชันยังจำเป็นต้องศึกษาจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ (malondialdehyde หรือ MDA) เป็นผลิตภัณฑ์ที่พบมากที่สุดและเป็นผลผลิตสุดท้ายของปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Ayala et al., 2014; Esterbauer et al., 1990; Janero, 1990) ดังนั้น ในการศึกษาการตอบสนองต่อความเครียดและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในเซลล์พืช จึงมักนิยมวิเคราะห์ปริมาณสารโดยสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ที่สะสมอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของพืช (Esterbauer et al., 1990; Pryor, 1989; Velikova et al., 2000) นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของสารโดยสารมาลอนไดอัลดีไฮด์มักสอดคล้องกับปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน (Behnamnia et al., 2009; Chitarra et al., 2016) จากการศึกษาปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ที่สะสมภายในต้น Indian mustard (*Brassica juncea* L.) ที่ได้รับความเครียดจากความเค็ม พบว่า ต้น Indian mustard ที่ได้รับความเครียดจากความเค็มมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์สูงกว่าชุดควบคุมถึง 3.5 เท่า และจากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในต้นอ่อนของข้าว (*Oryza sativa* L.) สายพันธุ์ที่ไวต่อความเครียดเป็นพิษของอะลูมิเนียมภายใต้ความเครียดจากอะลูมิเนียม พบว่า การได้รับสารละลายธาตุอาหาร

ที่มีอะลูมิเนียมความเข้มข้นสูงส่งผลให้มีการสะสมสารมาลอนไดอัลดีไฮด์มากกว่าต้นข้าวในชุดควบคุมถึงร้อยละ 90 (Meriga et al., 2004) หรือการศึกษาของ Shahnaz และคณะ ในปี ค.ศ. 2011 ที่พบว่า การปลูกต้นโบราโก (*Borago officinalis* L.) ในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland's ที่มีอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ความเข้มข้นสูงส่งผลให้ต้นโบราโกมีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์สูงกว่าชุดควบคุมถึง 2.78 เท่า (Shahnaz et al., 2011)

อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ในต้นกล้าพริกที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดที่ได้รับถ่านชีวภาพความเข้มข้นต่าง ๆ เปรียบเทียบกับชุดควบคุม พบว่า ปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ในใบของต้นกล้าพริกไม่มีความแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นยังไม่ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาฟิสิกส์เคมีในต้นกล้าพริก และเมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตทางลำต้นของต้นกล้าพริก พบว่า ต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวล มีพื้นที่ใบสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวล ทำให้ต้นกล้าพริกมีพื้นที่ใบไม่แตกต่างจากชุดควบคุม

การทดลองที่ 3 การศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดหรือปูนมาร์ลต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพริกชี้หนูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอตในสภาพแปลงปลูก

จากการศึกษาการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพจากขี้ข้าวโพดและปูนมาร์ล เปรียบเทียบกับดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมในสภาพแปลงทดลอง พบว่า การปรับปรุงดินด้วยวัสดุปรับปรุงดินทำให้ดินมีค่า pH เพิ่มขึ้นกว่าดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตลอดช่วงเวลาของการปลูก (105 วัน หลังการปลูก หรือ 119 วัน หลังการปรับปรุงดิน) ซึ่งการปลูกต้นพริกในสภาพแปลงทดลอง มีการพลางแสงลง 70% ในช่วง 56 วัน หลังการย้ายปลูก เพื่อให้ต้นพริกสามารถปรับตัวกับสภาพแวดล้อมได้ เมื่อถึงระยะออกดอก โดยนับจากต้นที่มีดอกแรกบานเต็มที่จำนวนร้อยละ 50 ของต้นพริกทั้งหมดของการทดลอง จึงงดการพลางแสงในวันที่ 56 หลังการย้ายปลูก ซึ่งผลจากการศึกษา พบว่า ค่าดัชนีความเขียวของต้นพริกภายหลังการงดการพลางแสงของต้นพริกในดินเปรี้ยวจัดชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดินมีค่าสูงกว่าต้นกล้าพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินทั้งในกลุ่มที่ได้รับปูนมาร์ลหรือถ่านชีวภาพ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดด้วยถ่านชีวภาพในสภาพโรงเรือน (การทดลองที่ 2) เมื่อวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ พบว่า ต้นกล้าพริกในชุดควบคุมมีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับการ

ปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพหรือปุ๋ยมาร์ลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* พบว่า ในวันที่ 49 ถึง 63 หลังการย้ายปลูก ในทุกสิ่งทดลองมีปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* สูงกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักใบสด 1 กรัม ภายหลังจากการงดการให้แสงเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* ในใบลดลงอย่างมากในทุก ๆ สิ่งทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Muhidin และคณะ ซึ่งศึกษาการพลางแสงในข้าว 4 สายพันธุ์ พบว่า เมื่อความเข้มแสงลดลงปริมาณคลอโรฟิลล์ *บี* ในใบของข้าวจะเพิ่มสูงขึ้น (Muhidin et al., 2018)

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณของแคโรทีนอยด์ พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณแคโรทีนอยด์สูงกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปุ๋ยมาร์ลภายหลังจากการงดการพลางแสง ซึ่งแคโรทีนอยด์เป็นอนุพันธ์ของไขมันที่ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายไขมัน โดยมีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยหน่วยไอโซพรี 8 หน่วย ที่ทำให้แคโรทีนอยด์สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงสีขาวยได้ นอกจากนี้ แคโรทีนอยด์ยังมีสีและมีคุณสมบัติต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Simpson, Tsou, & Chichester, 1989) ดังนั้นในสภาวะที่พืชได้รับความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพ พืชจะยังคงรักษาปริมาณแคโรทีนอยด์ไว้ เพื่อเป็นกลไกในการป้องกันการเปิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าต้นพริกในชุดควบคุมจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์ *เอ* และแคโรทีนอยด์สูงกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ แต่เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสงโดยวัดค่า F_v/F_m ของใบ พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีค่า F_v/F_m ลดลงต่ำกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพหรือปุ๋ยมาร์ล โดยเฉพาะในช่วงระยะแรกของการงดการพลางแสงตั้งแต่วันที่ 63 ถึง 84 หลังการย้ายปลูก ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่า P_i ของต้นพริก ที่พบว่า ภายหลังจากการงดการพลางแสงต้นพริกชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดินมีค่า P_i ต่ำกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพหรือปุ๋ยมาร์ล อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม ตั้งแต่วันที่ 91 ถึง 105 หลังการย้ายปลูก เป็นช่วงระยะเวลาที่มีฝนตกต่อเนื่อง ต้นพริกในแต่ละสิ่งทดลองเริ่มมีใบเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและตาย

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ พบว่า ในช่วงที่ต้นพริกได้รับการพลางแสงตั้งแต่วันที่ 49 ถึง 56 หลังการย้ายปลูก ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในต้นพริกกลุ่มที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นกว่าต้นพริกในชุดควบคุม อย่างไรก็ตาม ในช่วงสัปดาห์แรกของการงดการพลางแสง ต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้สูงกว่าต้นพริกกลุ่มที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ

จากซังข้าวโพดและปุ๋ยมาร์ล ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในต้นพริกชุดควบคุมอาจเป็นกลไกหนึ่งที่พืชใช้ในการปรับตัวเพื่อให้อยู่รอดได้เมื่อต้นพริกได้รับความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพ อย่างไรก็ตาม ในช่วง 70 วันหลังการย้ายปลูก ต้นพริกกลุ่มที่ได้รับถ่านชีวภาพและปุ๋ยมาร์ลมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ละลายน้ำได้สูงกว่าชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงที่วิเคราะห์ได้จากค่า F_v/F_m และค่า Pi ซึ่งในพืชที่เจริญเติบโตภายใต้สภาวะดินเปรี้ยว รากของพืชมักได้รับผลกระทบจากความเป็นพิษของอลูมิเนียม ทำให้การเจริญเติบโตของรากลดลง ความสามารถในการดูดน้ำและธาตุอาหารของรากลดลง และทำให้พืชได้รับความเครียดจากความแล้งได้ ซึ่งการวิเคราะห์ปริมาณโพรลีนที่เป็นกรดอะมิโนชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับ อาร์จินีน (arginine) และกลูตามีน (glutamine) (Kishor et al., 2015; Sharma & Verslues, 2010) ในสภาวะปกติพืชมีการสังเคราะห์และสะสมโพรลีนอยู่ในระดับต่ำและถูกควบคุมโดยกระบวนการ feedback inhibition อย่างไรก็ตาม ในพืชหลายชนิดจะมีการสังเคราะห์และสะสมโพรลีนเพิ่มขึ้น เมื่อพืชได้รับความเครียดจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความหนาวเย็น ความร้อน (Lv, Lin, Zhang, & Hua, 2011) ความเค็ม ความสมบูรณ์ของธาตุอาหาร โลหะหนัก (Bassi & Sharma, 1993) รังสียูวี (Saradhi et al., 1995) และการขาดน้ำ (Choudhary et al., 2005) เป็นต้น เพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเซลล์และส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยการสังเคราะห์และสะสมโพรลีนซึ่งเป็นสารป้องกันแรงดันออสโมติก (osmoprotectant) เช่นเดียวกับน้ำตาล และไกลซีน (Borgo et al., 2015) อย่างไรก็ตาม โพรลีนเป็นสารที่พืชสังเคราะห์และสะสมมากที่สุดสาเหตุหนึ่งอาจเป็นเพราะโพรลีนเป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนให้กับพืชภายหลังจากกระบวนการสลายโพรลีนพืชจึงสามารถนำคาร์บอนและไนโตรเจนเหล่านี้ไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ (Hare & Cress, 1997) เมื่อพิจารณาปริมาณโพรลีนในต้นพริก พบว่า ปริมาณโพรลีนที่สะสมในใบของต้นพริกในทุกสิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันในวันที่ 49 หลังการย้ายปลูก อย่างไรก็ตาม ต้นพริกชุดควบคุมที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดมีปริมาณโพรลีนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับต้นพริกในกลุ่มที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพหรือปุ๋ยมาร์ล อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์และสะสมโพรลีนในใบของพืช ยังเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อพืชอยู่ในระยะสร้างดอก ซึ่งจากการศึกษาการสะสมของกรดอะมิโนหลายชนิดในส่วนต่าง ๆ ของต้นมะเขือเทศ (*Lycopersicon esculentum*) โดย Schwacke และคณะ พบว่า ดอกมะเขือเทศมีการสะสมโพรลีนสูงขึ้นไปถึง 60 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อเยื่อบริเวณใบ ราก และผล และยังพบว่าปริมาณกรดอะมิโนที่สะสมในดอกกว่าร้อยละ 70 เป็นโพรลีน (Schwacke et al., 1999) ดังนั้น เพื่อประเมินสภาวะเครียดของพืชจากปัจจัยทางกายภาพจึงต้องอาศัยการวิเคราะห์ความรุนแรงของการเกิดปรากฏการณ์ฟิสิกัลฟิตเพอร์

ออกซิเดชัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า ในวันที่ 63 หลังการย้ายปลูก ต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงกว่าชุดควบคุมถึง 1.5 เท่า อย่างไรก็ตาม ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในต้นพริกชุดควบคุมกลับเพิ่มสูงกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปุ๋ยมาร์ลตั้งแต่วันที่ 70 ถึง 98 หลังการย้ายปลูก ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนที่พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนสูงกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปุ๋ยมาร์ลตั้งแต่วันที่ 56 ถึง 98 หลังการย้ายปลูก ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์ในใบพริกชุดควบคุมที่มีปริมาณสารมาลอนไดอัลดีไฮด์สูงกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปุ๋ยมาร์ลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตั้งแต่วันที่ 63 ถึง 105 หลังการย้ายปลูก เมื่อวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณสารฟีนอลิกสูงกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปุ๋ยมาร์ลตั้งแต่วันที่ 56 ถึง 77 หลังการย้ายปลูก แต่ปริมาณสารฟีนอลิกในใบของพริกชุดควบคุมมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินในวันที่ 84 ถึง 91 หลังการย้ายปลูก

อย่างไรก็ตาม แม้ว่า ROS จะเป็นสาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและนำไปสู่การตายของเซลล์ แต่โมเลกุลของ ROS ยังทำหน้าที่เป็นสัญญาณโมเลกุลภายในเซลล์พืช (Christine H. Foyer, Lelandais, & Kunert, 1994) และยังทำหน้าที่ควบคุมการเจริญเติบโต การพัฒนา การตอบสนองต่อความเครียดทางกายภาพและทางชีวภาพและโปรแกรมการตายของเซลล์ (Bailey-Serres & Mittler, 2006) เมื่อพืชได้รับความเครียดจากปัจจัยทางกายภาพ กรดแอบไซซิก (abscisic acid, ABA) จะกระตุ้นให้เกิดการสังเคราะห์ ROS ภายในเซลล์ปากใบ โดย ROS ทำให้เกิดการปิดปากใบจากการกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนย้ายแคลเซียมไอออนผ่าน Ca^{2+} channels บริเวณเยื่อหุ้ม guard cell (Wang & Song, 2008) ดังนั้น การศึกษาปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นหรือกิจกรรมของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่กำจัด ROS ภายในเซลล์จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยยืนยันได้ว่า ปริมาณของ ROS ที่เพิ่มขึ้น เกิดจากการส่งสัญญาณภายในเซลล์พืช เพื่อกระตุ้นให้เกิดการเจริญเติบโตตามธรรมชาติ หรือเป็นการเกิด ROS จากปัจจัยภายนอกที่พืชได้รับ ดังนั้นการศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ที่มีคุณสมบัติในการกำจัด ROS ในพืช จึงสามารถใช้อธิบายสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของ ROS ในเซลล์พืชได้ ซึ่งการศึกษาเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกลไกการกำจัด ROS ได้แก่ เอนไซม์ superoxide dismutase (SOD) และเอนไซม์ catalase (CAT) พบว่า ในวันที่ 63 ถึง 105 หลังการย้ายปลูก กิจกรรมของเอนไซม์คะตะเลสในต้นพริกชุดควบคุมมีแนวโน้มเพิ่มสูงกว่าต้นพริกกลุ่มที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปุ๋ยมาร์ล ซึ่งเอนไซม์

คะตะเลสจะมีหน้าที่เปลี่ยนในการเปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้กลายเป็นน้ำ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับเซลล์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปุ๋ยมาร์ล อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณากิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส ซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่เปลี่ยนซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนให้กลายเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า ต้นพริกในชุดควบคุมมีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสต่ำกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณสารซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนในต้นพริกชุดควบคุมที่มีปริมาณซูเปอร์ออกไซด์แอนไอออนสูงกว่าต้นพริกที่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพและปุ๋ยมาร์ล

สรุปผลการวิจัย

ดินเปรี้ยวจัดชุดดินองครักษ์เป็นดินที่มีค่า pH อยู่ในช่วง 4.0 ถึง 4.3 มีความเป็นกรดสูง และมีการสะสมของอลูมิเนียมในสารละลายดินสูงจนก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช และส่งผลให้การเจริญเติบโตของรากและลำต้นลดลง ดังนั้น การปลูกต้นพริกในดินเปรี้ยวจัดชุดดินองครักษ์จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงดินด้วยวัตถุที่มีฤทธิ์เป็นด่างก่อน ซึ่งในทางภาคการเกษตรนั้น เกษตรกรอาจใช้ปุ๋ยมาร์ลที่ระดับความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ เพื่อปรับเพิ่มค่า pH ของดินให้สูงขึ้นจนอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการปลูกพริก ส่วนการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด ซึ่งเป็นการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาผ่านกระบวนการไพโรไลซิส เพื่อให้ได้ถ่านชีวภาพที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ซึ่งนอกจากจะช่วยปรับเพิ่มค่า pH ของดินให้เหมาะสมต่อการปลูกพริกแล้ว ถ่านชีวภาพที่มีความพรุนสูง สามารถดูดซับธาตุอาหารได้ดี ช่วยเพิ่มความพรุนให้กับดิน และยังเป็นการสะสมธาตุคาร์บอนเอาไว้ในดิน จึงช่วยการลดการปลดปล่อยธาตุคาร์บอนในรูปของแก๊สเรือนกระจก อันเป็นปัญหาของภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ความต้องการปุ๋ยของดินเปรี้ยวจัดชุดดินองครักษ์ พบว่า ชุดดินดังกล่าวมีค่าความต้องการปุ๋ยอยู่ที่ 1.5 ถึง 1.8 ตันต่อไร่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้น 1.5 ตันต่อไร่ ช่วยให้ต้นกล้าพริกที่ปลูกในดินเปรี้ยวจัดชุดดินองครักษ์มีประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงและการเจริญเติบโตสูงที่สูงกว่าต้นกล้าพริกในดินชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการปรับปรุงดินด้วยถ่านชีวภาพ

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองการนำถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดที่ได้จากปฏิกิริยาไพโรไลซิสมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในการปรับปรุงดินเปรี้ยวจัดชุดดินองครักษ์เพื่อการปลูกพริกในสภาพดิน

เปรี้ยวจัดชุดดินของครักซ์ ซึ่งเป็นดินที่มีเนื้อละเอียดมีการระบายน้ำไม่ได้ ซึ่งช่วยให้ต้นพริกชี้หูสายพันธุ์ซูเปอร์ฮอทมีประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงและการเจริญเติบโตที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่แตกต่างกัน ย่อมมีคุณสมบัติทั้งทางกายภาพ และทางเคมีที่แตกต่างกัน ดังนั้น การใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุที่แตกต่างกันเพื่อเป็นวัสดุ สำหรับการปรับปรุงดินเปรี้ยว หรือดินที่ประสบปัญหาหมอลภาวะในดินต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องมีการ ศึกษาวิจัยเพื่อให้สามารถเลือกใช้ถ่านชีวภาพได้อย่างเหมาะสมต่อพืชที่ปลูก รวมทั้งยังต้องมีการศึกษาผลกระทบเชิงลบจากถ่านชีวภาพต่อชนิดของพืชที่ต้องการปลูก เนื่องจากภายหลัง การศึกษาในครั้งนี้ พบว่า การใส่ถ่านชีวภาพที่ความเข้มข้นสูงเกินไป ทำให้อัตราการสังเคราะห์ ด้วยแสงและการเจริญเติบโตของต้นพริกลดลง



บรรณานุกรม

- Abreu, C. H., Muraoka, T., & Lavorante, A. F. (2003). Exchangeable aluminum evaluation in acid soils. *Scientia Agricola*, 60(3), 543-548.
- Abrishamkesh, S., Gorji, M., Asadi, H., Bagheri-Marandi, G., & Pourbabae, A. (2015). Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth. *Plant, Soil and Environment* 61(11), 475-482.
- Ahmad, P., Hashem, A., Abd-Allah, E. F., Alqarawi, A., John, R., Egamberdieva, D., & Gucel, S. (2015). Role of *Trichoderma harzianum* in mitigating NaCl stress in Indian mustard (*Brassica juncea* L) through antioxidative defense system. *Frontiers in plant science*, 6, 1-15.
- Ali, B., Hasan, S. A., Hayat, S., Hayat, Q., Yadav, S., Fariduddin, Q., & Ahmad, A. (2008). A role for brassinosteroids in the amelioration of aluminium stress through antioxidant system in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilczek) *Environmental and Experimental Botany*, 62, 153-159.
- Ali, S., Zeng, F., Qiu, L., & Zhang, G. (2011). The effect of chromium and aluminum on growth, root morphology, photosynthetic parameters and transpiration of the two barley cultivars. *Biologia Plantarum*, 55, 291-296.
- Apori, S. O., Byalebeka, J., Murongo, M., Ssekandi, J., & Noel, G. L. (2021). Effect of co-applied corncob biochar with farmyard manure and NPK fertilizer on tropical soil. *Resources, Environment and Sustainability*, 5, 1-8.
- Aroyehun, F. S., Makinde, A. M., & Isa, M. O. (2016). Comparative extraction of chlorophylls in selected forest and savanna mosses using dimethylsulphoxide and Acetone. *Not. Sci. Biol.*, 8(3), 347-353.
- Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D., & Hips, N. A. (2010). Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil*, 337, 1-18.
- Ayala, A., Munoz, M. F., & Arguelles, S. (2014). Lipid peroxidation: production, metabolism, and signaling mechanisms of malondialdehyde and 4-hydroxy-2-

- nonenal *Oxidative medicine and cellular longevity* (Vol. 2014, pp. 1-31): Hindawi Publishing Corporation.
- Bailey-Serres, J., & Mittler, R. (2006). The roles of reactive oxygen species in plant cells: *Am Soc Plant Biol. Plant Physiology*, 141, 311.
- Baqay, M. A.-A., Li, J.-Y., Xu, C.-Y., Mehmood, K., & Xu, R.-K. (2017). Determination of critical pH and Al concentration of acidic Ultisols for wheat and canola crops. *Solid Earth*, 8(1), 149-159.
- Bassi, R., & Sharma, S. S. (1993). Changes in proline content accompanying the uptake of zinc and copper by *Lemna minor*. *Annals of Botany*, 72(2), 151-154.
- Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction Practical Design and Theory*. Academic Press.
- Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.
- Batty, L., & Younger, P. (2003). Effects of external iron concentration upon seedling growth and uptake of Fe and phosphate by the common reed, *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex. Steudel. *Annals of Botany*, 92(6), 801-806.
- Behnamnia, M., Kalantari, K. M., & Ziaie, J. (2009). The effects of brassinosteroid on the induction of biochemical changes in *Lycopersicon esculentum* under drought stress. *Turkish Journal of Botany*, 33(6), 417-428.
- Borgo, L., Marur, C. J., & Vieira, L. G. E. (2015). Effects of high proline accumulation on chloroplast and mitochondrial ultrastructure and on osmotic adjustment in tobacco plants. *Acta Scientiarum Agronomy*, 37(2), 191-199.
- Brinkman, R., Ve, N. B., Tinh, T. K., Hau, D. P., & Mensvoort, M. E. F. v. (1993). Sulfidic materials in the western Mekong delta, Vietnam. *Catena*, 20(3), 317-331.
- Brunner, I., & Sperisen, C. (2013). Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. *Frontiers in plant science*, 4, 1-12.
- Bu, X., Xue, J., Wu, Y., & Ma, W. (2020). Effect of Biochar on Seed Germination and Seedling Growth of *Robinia pseudoacacia* L. In Karst Calcareous Soils. *Communication in soil science and plant analysis*, 1-13.

- Carvalho, C. D., & Helena, M. (2008). Drought stress and reactive oxygen species. *Plant Signaling & Behavior*, 3(3), 156-165.
- Chang, Y. C., Yamamoto, Y., & Matsumoto, H. (1999). Accumulation of aluminium in the cell wall pectin in cultured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) cells treated with a combination of aluminium and iron. *Plant, cell & environment*, 22(8), 1009-1017.
- Chen, L.-S., Qi, Y.-P., Smith, B. R., & Liu, X.-H. (2005). Aluminum-induced decrease in CO₂ assimilation in citrus seedlings is unaccompanied by decreased activities of key enzymes involved in CO₂ assimilation. *Tree Physiology*, 25(3), 317-324.
- Chintala, R., Schumacher, T. E., Mollinedo, J., Malo, D. D., & Julson, J. L. (2013). Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2013, 1-12.
- Chitarra, W., Pagliarani, C., Maserti, B., Lumini, E., Siciliano, I., Cascone, P., & Guerrieri, E. (2016). Insights on the impact of arbuscular mycorrhizal symbiosis on tomato tolerance to water stress. *Plant Physiology*, 171(1), 1009-1023
- Choudhary, N., Sairam, R., & Tyagi, A. (2005). Expression of delta1-pyrroline-5-carboxylate synthetase gene during drought in rice (*Oryza sativa* L.). *Indian J Biochem Biophys*, 42(6), 366-370.
- Clements, R. L., & Leland, H. V. (1962). An Ion-Exchange Study of the Free Amino Acids in the Juices of Six Varieties of *Citrus*. *Journal of Food Science*, 27(1), 20-25.
- Connolly, E. L., & Gueriot, M. L. (2002). Iron stress in plants. *Genome biology*, 3(8), 1-4
- Cornelli, U. (2009). Antioxidant uses in nutraceuticals. *Clinics in Dermatology*, 27, 175-194.
- Delhaize, E., & Ryan, P. R. (1995). Aluminum toxicity and tolerance in Plants. *Plant Physiol.*, 107, 315-321.
- Dingkuhn, M., Datta, S. K. D., Javellana, C., Pamplona, R., & Schnier, H. F. (1992). Effect of late-season N fertilization on photosynthesis and yield of transplanted and direct-seeded tropical flooded rice. I. growth dynamics. . *Field Crops Research*, 28, 223-234.
- Doherty, C. J., Buskirk, H. A. V., Myers, S. J., & Thomashow, M. F. (2009). Roles for Arabidopsis CAMTA transcription factors in cold-regulated gene expression and

- freezing tolerance. *The Plant Cell*, 21(3), 972-984.
- Du, L., & Poovaiah, B. (2005). Ca^{2+} /calmodulin is critical for brassinosteroid biosynthesis and plant growth. *Nature*, 437, 741.
- Ejraei, A. (2013). Determination optimum concentration of iron in hydroponic medium of Tometo (*Lycopersicom esculentum*). *Journal of Novel Applied Sciences*, 2, 856-860.
- Elstner, E. F., & Heupel, A. (1976). Formation of hydrogen peroxide by isolated cell walls from horseradish (*Armoracia lapathifolia* Gilib.). *Planta (Berl.)*, 130, 175-180.
- Esterbauer, H., Eckl, P., & Ortner, A. (1990). Possible mutagens derived from lipids and lipid precursors. *Mutation Research/Reviews in Genetic Toxicology*, 238(3), 223-233.
- Fang, W. C., Wang, J. W., Lin, C. C., & Kao, C. H. (2001). Iron induction of lipid peroxidation and effects on antioxidative enzyme activities in rice leaves. *Plant Growth Regulation*, 35(1), 75-80.
- Foyer, C. H., Lelandais, M., & Kunert, K. J. (1994). Photooxidative stress in plants. *Physiologia Plantarum*, 92(4), 696-717.
- Foyer, C. H., & Noctor, G. (2005a). Oxidant and antioxidant signalling in plants: a re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context. *Plant, Cell and Environment*, 28, 1056-1071.
- Foyer, C. H., & Noctor, G. (2005b). Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 17(7), 1866-1875.
- Foyer, C. H., & Shigeoka, S. (2011). Understanding oxidative stress and antioxidant functions to enhance photosynthesis. *Plant Physiology*, 155(1), 93-100
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biology and fertility of soils*, 35(4), 219-230.
- Guo, W., Chen, S., Hussain, N., Cong, Y., Liang, Z., & Chen, K. (2015). Magnesium stress signaling in plant: Just a beginning. *Plant Signaling & Behavior*, 10(3), 1-5.

- Halliwell, B., & Gutteridge, J. (1984). Oxygen toxicity, oxygen radicals, transition metals and disease. *Biochemical Journal*, 219(1), 1-14.
- Han, W.-Y., Shi, Y.-Z., Ma, L.-F., Ruan, J.-Y., & Zhao, F.-J. (2007). Effect of liming and seasonal variation on lead concentration of tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze). *Chemosphere*, 66(1), 84-90.
- Hare, P., & Cress, W. (1997). Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. *Plant Growth Regulation*, 21(2), 79-102.
- Hecht-Buchholz, C., & Foy, C. D. (1981). Effect of aluminium toxicity on root morphology of barley. *Plant and Soil*, 61(1), 93-95.
- Hemavong, S. (2014). Effects of Bamboo and Rice Husk Biochars on Yield and Nitrogen use Efficiency of Chainat 1 Rice Variety. *Journal of Science & Technology, Ubon Ratchathani University*, 16(1), 69-75.
- Hsieh, T. H., Lee, J. t., Charng, Y. Y., & Chan, M. T. (2002). Tomato plants ectopically expressing Arabidopsis CBF1 show enhanced resistance to water deficit stress. *Plant Physiology*, 130(2), 618-626
- Inostroza-Blancheteau, C., Rengel, Z., M., A., Mora, M. d. I. L., Aquea, F., Arce-Johnson, P., & Reyes-Díaz, M. (2012). Molecular and physiological strategies to increase aluminum resistance in plants. *Molecular Biology Reports* 39(3), 2069-2079.
- Iturbe-Ormaetxe, I., Escuredo, P. R., Arrese-Igor, C., & Becana, M. (1998). Oxidative damage in pea plants exposed to water deficit or paraquat. *Plant Physiology*, 116(1), 173-181.
- Janero, D. R. (1990). Malondialdehyde and thiobarbituric acid-reactivity as diagnostic indices of lipid peroxidation and peroxidative tissue injury. *Free radical biology and medicine*, 9(6), 515-540.
- Junglee, S., Urban, L., Sallanon, H., & Lopez-Lauri, F. (2014). Optimized assay for hydrogen peroxide determination in plant tissue using potassium iodide. *American Journal of Analytical Chemistry*, 5(11), 730-736.
- Junglee, S., Urban, L., Sallanon, H., & Lopez-Lauri, F. (2014). Optimized assay for hydrogen peroxide determination in plant tissue using potassium iodide. *American*

Journal of Analytical Chemistry, 5, 730-736.

- Kanjanakesorn, J., Chatphuak, T., Tangsuwan, I., & Sangmanee, K. (2018). Effect of rice husk biochar and organic fertilizer on the growth and yield of sweet corn growing on acid soil *Agricultural Sci. J.*, 49(1), 194-184
- Karaosmanoglu, F., Isigigür-Ergüdenle, A., & Sever, A. (2000). Biochar from the straw-stalk of rapeseed plant. *Energy & Fuels*, 14(2), 336-339.
- Kawano, T., Kadono, T., Furichi, T., Muto, S., & Lapeyrie, F. (2003). Aluminum-induced distortion in calcium signaling involving oxidative bursts and channel regulation in tobacco BY-2 cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 308(1), 35-42.
- Kim, M. C., Chung, W. S., Yun, D.-J., & Cho, M. J. (2009). Calcium and calmodulin-mediated regulation of gene expression in plants. *Molecular plant*, 2(13-21).
- Kishor, K., Polavarapu, B., Kumari, P. H., Sunita, M., & Sreenivasulu, N. (2015). Role of proline in cell wall synthesis and plant development and its implications in plant ontogeny. *Frontiers in plant science*, 6(544), 1-17.
- Kitaya, Y., Hirai, H., Yanase, M., Mori, G., & Kiyota, M. (2000). Effect of volume of rice husk charcoal masses inside soil ridges on growth of sweetpotato in a wet lowland. *Journal of Agricultural Meteorology* 56(1), 1-9.
- Kloss, S., Zehetner, F., Dellantonio, A., Hamid, R., Ottner, F., Liedtke, V., . . . Soja, G. (2012). Characterization of slow pyrolysis biochars: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties. *Journal of Environmental Quality*, 41, 990-1000.
- Kochian, L. V., Hoekenga, O. A., & Pineros, M. A. (2004). How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 55, 459-493.
- Kochian, L. V., Pineros, M. A., & Hoekenga, O. A. (2005). The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity
- In *Root physiology: from gene to function* (pp. 175-195): Springer.
- Lazarevic, B., Horvat, T., & Poljak, M. (2014). Effect of acid aluminous soil on

- photosynthetic parameters of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Potato Research*, 57, 33-46.
- Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 11(2), 403-427.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management: An introduction *Biochar for Environmental Management*, 16(2), 1-12.
- Lehmann, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics. *Biological approaches to sustainable soil systems*, 113(517), e530.
- Li, G. L., Wu, H. X., Sun, Y. Q., & Zhang, S. Y. (2013). Response of chlorophyll fluorescence parameters to drought stress in sugar beet seedlings *Russian Journal of Plant Physiology*, 60(3), 337-342.
- Lv, W.-T., Lin, B., Zhang, M., & Hua, X.-J. (2011). Proline accumulation is inhibitory to *Arabidopsis* seedlings during heat stress. *Plant Physiology*, 156(4), 1921-1933.
- Ma, J. F. (2007). Syndrome of aluminum toxicity and diversity of aluminum resistance in higher plants. *International Review of Cytology*, 264, 225-252.
- Mafakheri, A., Siosemardeh, A., Bahramnejad, B., Struik, P., & Sohrabi, Y. (2010). Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. *Australian journal of crop science*, 4(8), 580-585.
- Mahalovic, N., Drazic, G., & Vucinic, Z. (2008). Effects of aluminium on photosynthetic performance in Al-sensitive and Al-tolerant maize inbred lines. *Photosynthetica*, 46(3), 476-480.
- Makinde, A., & Akande, F. (2012). Effects of lead and simulated acid rain on chlorophyll contents of selected tropical mosses. *Ife Journal of Science*, 14(2), 309-313
- Malavolta, E., Graner, E. A., Cury, T., Sobro, M. O. C. B., & Pacheco, J. A. C. (1995). Studies on the Mineral Nutrition of Cassava (*Manihot Utilissima* Pohl.). *Plant Physiology*, 30(1), 81-82.
- Manivannan, P., Jaleel, C. A., Sankar, B., Kishorekumar, A., Somasundaram, R.,

- Lakshmanan, G. A., & Panneerselvam, R. (2007). Growth, biochemical modifications and proline metabolism in *Helianthus annuus* L. as induced by drought stress. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 59(2), 141-149.
- Masulili, A., Utomo, W. H., & Syechfani, M. (2010). Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. *Journal of Agricultural Science*, 2(1), 39.
- Matsumoto, H. (2000). Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. *International Review of Cytology*, 200, 1-46.
- Mattioli, R., Marchese, D., D'Angeli, S., Altamura, M. M., Costantino, P., & Trovato, M. (2008). Modulation of intracellular proline levels affects flowering time and inflorescence architecture in *Arabidopsis*. *Plant molecular biology*, 66(3), 277-288.
- Meriga, B., Reddy, B. K., Rao, K. R., Reddy, L. A., & Kishor, P. K. (2004). Aluminium-induced production of oxygen radicals, lipid peroxidation and DNA damage in seedlings of rice (*Oryza sativa*). *Journal of plant physiology*, 161(1), 63-68.
- Mittler, R., Vanderauwera, S., Gollery, M., & Breusegem, F. V. (2004). Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in plant science*, 9(10), 490-498.
- Mmayi, M. P., Musyimi, D. M., Netondo, G. W., & Sikuku, P. A. (2015). Chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic pigments of four *Glycine max* varieties under Aluminium chloride stress. *Scientia Agriculturae*, 10(2), 84-94
- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848-889
- Moormann, F. R. (1963). Acid sulfate soils (cat-clays) of the tropics. *Soil Science*, 95(4), 271-275.
- Mossor-Pietraszewska, T. (2001). Effect of aluminium on plant growth and metabolism. *Acta Biochimica Polonica*, 48(3), 673-686.
- Muhidin, Syam'un, E., Kaimuddin, Musa, Y., Sadimantara, G. R., Usman, . . . Rakian, T. C. (2018). The effect of shade on chlorophyll and anthocyanin content of upland red rice. *Earth and Environmental Science*, 122, 1-5.

- Mukherjee, A., Zimmerman, A., & Harris, W. (2011). Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, 163, 247-255.
- Mukhopadhyay, M., Bantawa, P., Das, A., Sarkar, B., Bera, B., Ghosh, P., & Mondal, T. K. (2012). Changes of growth, photosynthesis and alteration of leaf antioxidative defence system of tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] seedlings under aluminum stress. *Biometals*, 2012(25), 1141–1154.
- Mullen, C. A., Boateng, A. A., Goldberg, N. M., Lima, I. M., Laird, D. A., & Hicks, K. B. (2010). Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and bioenergy*, 34(1), 67-74.
- Muneer, S., Kim, T. H., Choi, B. C., Lee, B. S., & Lee, J. H. (2014). Effect of CO, NO_x and SO₂ on ROS production, photosynthesis and ascorbate-glutathione pathway to induce *Fragaria annasa* as a hyperaccumulator. *Redox Biology*, 2, 91-98
- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology*, 22, 867-880.
- Nohong, B., & Nompo, S. (2015). Effect of water stress on growth, yield, proline and soluble sugars contents of signal grass and napier grass species. *American-Eueasian Journal of Sustainable Agriculture*, 9(15), 14-21.
- Nunes-Nesi, A., Brito, D. S., Inostroza-Blancheteau, C., Fernie, A. R., & Araújo, W. L. (2014). The complex role of mitochondrial metabolism in plant aluminum resistance. *Trends in plant science*, 19(6), 399-407.
- Ogunwale, J. A., & Shamsuddin, J. (1999). Phosphate sorption by active acid sulfate soils of Peninsular Malaysia. *Pertanika J. Trop. Agric. Sci.*, 22(1), 33-43.
- Ommen, O., Donnelly, A., Vanhoutvin, S., Oijen, M. V., & Manderscheid, R. (1999). Chlorophyll content of spring wheat flag leaves grown under elevated CO₂ concentrations and other environmental stresses within the 'ESPACE-wheat' project *European Journal of Agronomy*, 10, 197-203
- Pak, V. A., Nabipour, M., & Meskarbashee, M. (2009). Effect of salt stress on chlorophyll content, fluorescence, Na⁺ and K⁺ ions content in rape plants (*Brassica napus* L.). *Asian Journal of Agricultural Research*, 3(2), 28-37.

- Panda, S. K., Baluska, F., & Matsumoto, H. (2009). Aluminum stress signaling in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 4(7), 592-597.
- Pavlovkin, J., Pal'ove-Balang, P., Kolarovic, L., & Zelinová, V. (2009). Growth and functional responses of different cultivars of *Lotus corniculatus* to aluminum and low pH stress. *Journal of plant physiology*, 166(14), 1479-1487.
- Peixoto, P. H. P., Matta, F. M. D., & Cambraia, J. (2002). Responses of the photosynthetic apparatus to aluminum stress in two sorghum cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, 25, 821-832.
- Poutrain, P., Guirimand, G., Mahroug, S., Burlat, V., Melin, C., Ginis, O., & Courdavault, V. (2011). Molecular cloning and characterisation of two calmodulin isoforms of the Madagascar periwinkle *Catharanthus roseus*. *Plant Biology*, 13(1), 36-41.
- Pryor, W. A. (1989). On the detection of lipid hydroperoxides in biological samples. *Free radical biology & medicine*, 7(2), 177-178.
- Rafiq, M. K., Bachmann, R. T., Rafiq, M. T., Shang, Z., Joseph, S., & Long, R. (2016). Influence of Pyrolysis Temperature on Physico-Chemical Properties of Corn Stover (*Zea mays* L.) Biochar and Feasibility for Carbon Capture and Energy Balance. *PLoS One*, 11(6), 1-17.
- Rajkovich, S., Enders, A., Hanley, K., Hyland, C., Zimmerman, A. R., & Lehmann, J. (2012). Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and fertility of soils*, 48(3), 271-284.
- Rengel, Z. (2004). Aluminium cycling in the soil-plant-animal-human continuum. *Biometals*, 17(6), 669-689
- Robbins, N., & Pharr, D. M. (1987). Regulation of photosynthetic carbon metabolism in cucumber by light intensity and photosynthetic period. *Plant Physiol.*, 85(2), 592-597.
- Rungrat, T., Awlia, M., Brown, T., Chenga, R., Sirault, X., Fajkus, J., & Wilson, P. (2016). Using phenomic analysis of photosynthetic function for abiotic stress response gene discovery. *American Society of Plant Biologists*, 14(1), 12.
- Ryan, P., Tyerman, S., Sasaki, T., Furuichi, T., Yamamoto, Y., Zhang, W., & Delhaize, E.

- (2010). The identification of aluminium-resistance genes provides opportunities for enhancing crop production on acid soils. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 9-20.
- Saenjan, P., Thammasome, N., Phy, C., & Tulaphitak, D. (2015). Use of Eucalyptus biochar and rice straw for rice yields and carbon footprint reduction under environment-friendly condition. *Khon Haen AGR. J.*, 43, 373-379
- Samac, D. A., & Tesfaye, M. (2003). Plant improvement for tolerance to aluminum in acid soils—a review. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 75(3), 189-207.
- Saradhi, P. P., AliaArora, S., & Prasad, K. (1995). Proline accumulates in plants exposed to UV radiation and protects them against UV-induced peroxidation. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 209(1), 1-5.
- Schwacke, R., Grallath, S., Breitzkreuz, K. E., Stransky, E., Stransky, H., Frommer, W. B., & Rentsch, D. (1999). LeProT1, a transporter for proline, glycine betaine, and γ -amino butyric acid in tomato pollen. *The Plant Cell*, 11(3), 377-391.
- Shahnaz, G., Shekoofeh, E., Kourosh, D., & Moohamadbagher, B. (2011). Interactive effects of silicon and aluminum on the malondialdehyde (MDA), proline, protein and phenolic compounds in *Borago officinalis* L. . *Journal of Medicinal Plants Research*, 5(24), 5818-5827.
- Sharma, S., & Verslues, P. E. (2010). Mechanisms independent of abscisic acid (ABA) or proline feedback have a predominant role in transcriptional regulation of proline metabolism during low water potential and stress recovery. *Plant, cell & environment*, 33(11), 1838-1851.
- Shigeoka, S., Ishikawa, T., Tamoi, M., Miyagawa, Y., Takeda, T., Yabuta, Y., & Yoshimura, K. (2002). Regulation and function of ascorbate peroxidase isoenzymes. *Journal of Experimental Botany*, 53(372), 1305-1319.
- Simpson, K. L., Tsou, I. S. T. C., & Chichester, C. O. (1989). Biochemical methodology for the assessment of carotene. *The International Vitamin A Consultative Group (IVACG)*.
- Solaiman, Z., Murphy, D., & Abbott, L. (2012). Biochars influence seed germination and

- early growth of seedlings. *Plant and Soil*, 353, 273-287.
- Sugie, A., Naydenov, N., Mizuno, N., Nakamura, C., & Takumi, S. (2006). Overexpression of wheat alternative oxidase gene *Waox1a* alters respiration capacity and response to reactive oxygen species under low temperature in transgenic *Arabidopsis*. *Genes and Genetic Systems*, 81, 349-354.
- Sumanta, N., Haque, I. C., Nishika, J., & Suprakash, R. (2014). Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids from commonly grown fern species by using various extracting solvents. *Research Journal of Chemical Sciences*, 4(9), 63-69.
- T. Yang, & Poovaiah, B. (2003). Calcium/calmodulin-mediated signal network in plants. *Trends in plant science*, 8, 505-512.
- Taibi, K., Taibi, F., Abderrahim, L. A., Ennajah, A., Belkhodja, M., & Mulet, J. M. (2016). Effect of salt stress on growth, chlorophyll content, lipid peroxidation and antioxidant defence systems in *Phaseolus vulgaris* L. *South African Journal of Botany*, 105, 306-312.
- Tasnee, A., & Sorasith, V. (1986). Acid Sulfate Soil: Their Characteristics, Genesis, Amelioration and Utilization. *Southeast Asian Studies*, 24(2), 154-180.
- Thornton, F., Schaedle, M., & Raynal, D. (1986). Effect of aluminum on the growth of sugar maple in solution culture. *Canadian Journal of Forest Research*, 16(5), 892-896.
- Traore, A. S., Hatchikian, C. E., Gall, J. L., & Belaich, J.-P. (1982). Microcalorimetric studies of the growth of sulfate-reducing bacteria: comparison of the growth parameters of some *Desulfovibrio* species. *Journal of bacteriology*, 149(2), 606-611.
- Tupthai, N., Jintrawet, A., & Lordkaew, S. (2013). Feasibility of bio-char production for yield increment of lowland rice system. *J Sci Technol MSU*, 32, 184-193.
- Uchida, R. (2000). Essential nutrients for plant growth: nutrient functions and deficiency symptoms. *Plant nutrient management in Hawaii's soils*, 4, 31-55.
- Velikova, V., Yordanov, I., & Edreva, A. (2000). Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: protective role of exogenous polyamines.

Plant science, 151(1), 59-66

- Verbruggen, N., & Hermans, C. (2008). Proline accumulation in plants: a review. *Amino acids*, 35(4), 753-759.
- Verheijen, F. G., Jones, R. J., Rickson, R., & Smith, C. (2009). Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94, 23-38.
- Wang, P., & Song, C. P. (2008). Guard-cell signalling for hydrogen peroxide and abscisic acid. *New Phytologist*, 178(4), 703-718.
- Webera, K., & Quickerb, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240-261.
- White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487-511.
- Winsley, P. (2007). Biochar and bioenergy production for climate change mitigation. *New Zealand Science Review*, 64(1), 5-10
- Worasuwannarak, N., Potisri, P., & Tanthapanichakoon, W. (2006). Upgrading of biomass by carbonization in hot compressed water. *Songklanakar J Sci Technol*, 28(5), 1049-1057.
- Xin-Yan, L., Yang, L. T., Lu, Y., Ye, X., & Chen, L. (2015). Roles of rootstocks and scions in aluminum-tolerance of Citrus. *Acta Physiol Plant*, 37, 1-15.
- Yamamoto, Y., Kobayashi, Y., Devi, S. R., Rikiishi, S., & Matsumoto, H. (2002). Aluminum toxicity is associated with mitochondrial dysfunction and the production of reactive oxygen species in plant cells. *Plant Physiology*, 128(1), 63-72.
- Yamamoto, Y., Kobayashi, Y., Devi, S. R., Rikiishi, S., & Matsumoto, H. (2003). *Oxidative stress triggered by aluminum in plant roots*. The Dynamic Interface between Plants and the Earth: Springer.
- Yamato, M., Okimori, Y., Wibowo, I. F., Anshori, S., & Ogawa, M. (2006). Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra. *Indonesia. Soil science and plant nutrition*, 52(4), 489-495.
- Yamato, M., Okimori, Y., Wibowo, I. F., Anshori, S., & Ogawa, M. (2006). Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia *Soil science and*

plant nutrition, 52(4), 489-495.

- Yang, M., Tan, L., Xu, Y., Zhao, Y., Cheng, F., Ye, S., & Jiang, W. (2015). Effect of low pH and aluminum toxicity on the photosynthetic characteristics of different fast-growing Eucalyptus vegetatively propagated clones. *PLoS One*, 10(6), e0130963.
- Yeboah, E., Asamoah, G., Ofori, P., Amoah, B., & Agyema, K. O. A. (2020). Method of biochar application affects growth, yield and nutrient uptake of cowpea. *Open Agriculture*, 5, 352-360.
- Yin, H., Xu, L., & Porter, N. A. (2011). Free radical lipid peroxidation: mechanisms and analysis. *Chemical reviews*, 111(10), 5944-5972.
- Zaifnejad, M. C., & Sullivan, C. (1997). Aluminum and water stress effects on growth and proline of sorghum. *Journal of plant physiology*, 150(3), 338-344.
- Zhang, L., Bi-Feng, L., Liang, S., Jones, R. L., & Ying-Tang, L. (2002). Molecular and biochemical characterization of a calcium/calmodulin-binding protein kinase from rice. *Biochemical Journal*, 368(1), 145-157.
- Zhang, L., & Lu, Y.-T. (2003). Calmodulin-binding protein kinases in plants. *Trends in plant science*, 8(3), 123-127.

ประวัติผู้เขียน

