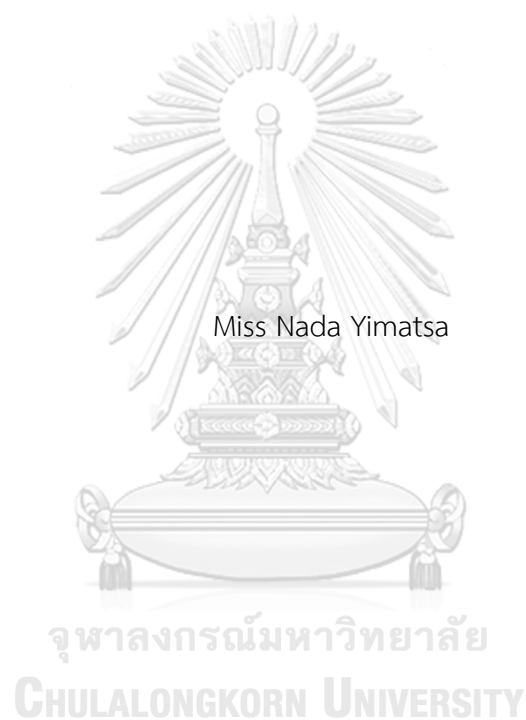


ความผันแปรตามฤดูกาลของการย่อยสลายรากฝอยของแสมขาว *Avicennia alba* ในป่าชายเลน  
ปากแม่น้ำ จังหวัดตราด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาพฤกษศาสตร์ ภาควิชาพฤกษศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SEASONAL VARIATION OF DECOMPOSITION OF *Avicennia alba* FINE ROOTS IN AN  
ESTUARINE MANGROVE FOREST, TRAT PROVINCE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Botany

Department of Botany

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความผันแปรตามฤดูกาลของการย่อยสลายรากฝอยของ แสมขาว <i>Avicennia alba</i> ในป่าชายเลนปากแม่น้ำ จังหวัด ตราด
โดย	น.ส.นดา ยิ้มัสชา
สาขาวิชา	พฤกษศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ฉัตรทิพย์ รอดทัศนาศนา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร พ่วงปาน

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ฉัตรทิพย์ รอดทัศนาศนา)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร พ่วงปาน)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี ใจดี)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.วิลาณี สุชีวรพันธ์)	

นดา ยิมัสซา : ความผันแปรตามฤดูกาลของการย่อยสลายรากฝอยของแสมขาว *Avicennia alba* ในป่าชายเลนปากแม่น้ำ จังหวัดตราด. ( SEASONAL VARIATION OF DECOMPOSITION OF *Avicennia alba* FINE ROOTS IN AN ESTUARINE MANGROVE FOREST, TRAT PROVINCE ) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.ฉัตรทิพย์ รอดทัศนากา, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.ศศิธร พ่วงปาน

การศึกษาการย่อยสลายของรากสำคัญต่อการประมาณปริมาณคาร์บอนที่ส่งต่อและกักเก็บในระบบนิเวศป่าชายเลน ในขณะที่กระบวนการย่อยสลายในป่าชายเลนภายใต้สภาพภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อนได้รับผลกระทบจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ผันแปรตามฤดูกาล การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการย่อยสลายรากฝอย (เส้นผ่านศูนย์กลาง < 2 มม.) ของแสมขาว (*Avicennia alba* Blume) ด้วยวิธีถุงย่อยสลาย ในฤดูแล้งและฤดูฝน (12 สัปดาห์) และเปรียบเทียบกับอัตราการย่อยสลายในรอบปี (52 สัปดาห์) รวมถึงศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายของรากฝอยที่ผันแปรตามฤดูกาล ในเขตพันธุ์ไม้แสม บริเวณป่าชายเลนปากแม่น้ำตราด จังหวัดตราด ผลการศึกษาพบว่า อัตราการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวในฤดูแล้งมีค่าน้อยกว่าฤดูฝน (0.003 และ 0.005 ต่อวัน ตามลำดับ) เป็นผลจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ผันแปรตามฤดูกาลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยปริมาณน้ำฝนที่ต่ำในฤดูแล้งส่งผลให้ความเค็มในดินสูง รวมถึงในฤดูแล้งพื้นที่ศึกษาถูกน้ำท่วมเป็นระยะเวลาอันยาวนานกว่าฤดูฝน ที่อาจไปยับยั้งกิจกรรมของจุลชีพในดินที่มีบทบาทในการย่อยสลาย นอกจากนี้ปัจจัยทางชีวภาพเกี่ยวกับลักษณะของรากฝอยทั้งองค์ประกอบทางเคมีตั้งต้น (ไนโตรเจน) และลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ที่ต่างกัน ในฤดูแล้งและฤดูฝน ล้วนส่งผลต่อการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวด้วย ส่วนอัตราการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวในรอบปีมีค่าเท่ากับ 0.001 ต่อวัน ซึ่งน้อยกว่าอัตราการย่อยสลายในฤดูแล้งและฤดูฝน เนื่องจากมีรากใหม่เจริญเข้าไปในถุงย่อยสลายหลังจากเวลาผ่านไป 12 สัปดาห์และไม่สามารถแยกจากรากที่ติดต้นได้ การคำนวณอัตราการย่อยสลายของรากฝอยจากการทดลองที่ใช้ระยะเวลาอันยาวนานจึงมีค่าต่ำกว่าที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นจึงเสนอว่าการศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยในช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม (12 สัปดาห์) แยกตามฤดูกาล จะสะท้อนอัตราการย่อยสลายที่เกิดขึ้นจริงและสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายของรากที่ผันแปรตามฤดูกาลกับการย่อยสลายของรากฝอยที่เกิดขึ้นในป่าชายเลนได้ ซึ่งจะนำไปสู่การประมาณอัตราการย่อยสลายของรากฝอยที่แม่นยำเพื่อการประมาณปริมาณคาร์บอนที่ส่งต่อและกักเก็บในองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบนิเวศป่าชายเลนต่อไป

สาขาวิชา พฤษศาสตร์  
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6370070423 : MAJOR BOTANY

KEYWORD:

Nada Yimatsa : SEASONAL VARIATION OF DECOMPOSITION OF *Avicennia alba* FINE ROOTS IN AN ESTUARINE MANGROVE FOREST, TRAT PROVINCE . Advisor: Dr. CHADTIP RODTASSANA Co-advisor: Assoc. Prof. Dr. SASITORN POUNGPARN

Root decomposition study is crucial to estimate carbon stock and exchange in mangrove ecosystems. The decomposition processes in mangrove forests are influenced by the seasonal variation of environmental factors in a tropical monsoon climate. This study aims to investigate the decomposition of fine roots (diameter < 2 mm) of *Avicennia alba* Blume in a mangrove forest at the Trat River mouth in Trat Province using the litterbag method in the dry and wet seasons (12 weeks), compared to an annual decomposition rate (52 weeks), and examine the effects of seasonal variation of environmental factors on root decomposition. The results showed that the rates of fine root decomposition in the dry season were lower than that of the wet season (0.003 and 0.005 per day, respectively). There was a significant seasonal variation of environmental factors, with lower rainfall during the dry season causing higher soil salinity, and the prolonged inundation period during the dry season perhaps inhibiting soil microbial activities involved in the decomposition process. Additionally, the biological factors of *A. alba* fine roots, such as their initial chemical composition (nitrogen) and anatomical characteristics, differed between the dry and wet seasons and influenced fine root decomposition. The annual decomposition rate (0.001 per day) was lower than that of the dry and wet seasons due to the new fine roots growing into the litterbags after 12 weeks being indistinguishable from the initial fine roots. A long-term setup would result in an underestimated rate of fine root decomposition. Therefore, this study suggested that a suitable period (about 12 weeks) to study fine root decomposition seasonally would reflect the actual decomposition rates and allow us to link the seasonal variation of related factors with fine root decomposition in mangrove forests. Finally, it can contribute to an accurate estimation of the fine root decomposition rate that is essential for estimating the amount of carbon that is transferred and accumulated in each component of mangrove ecosystems.

Field of Study: Botany

Academic Year: 2022

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากความช่วยเหลือและความเอาใจใส่อย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ดร.ฉัตรทิพย์ รอดทัศนาก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร พ่วงปาน อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความรู้ ให้คำแนะนำต่าง ๆ ตลอดจนอบรมชี้แนะให้มีพื้นฐานของการเป็นนักวิจัยที่ดีและเป็นกำลังใจในการทำ วิทยานิพนธ์เสมอมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี ใจดี และ ดร.วิลานี สุชีวะบริพันธ์ ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการทั้งการสอบโครงร่าง วิทยานิพนธ์และการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) สำหรับทุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาโท) และทุนอุดหนุนการทำวิจัย

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนพัฒนา นักวิจัย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ของ รองศาสตราจารย์ ดร.ศศิธร พ่วงปาน ทุนวิจัยภายใต้ โครงการโตโยต้าปลูกป่าชายเลน จากบริษัท โตโยต้า มอเตอร์ ประเทศไทย จำกัด สำหรับเงินทุนสนับสนุนการวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาทรัพยากรป่าชายเลนที่ 1 (ตราด) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอำนวยความสะดวก ในภาคสนาม คุณธมนัย ประวิณวงศ์วุฒิ (ผู้อำนวยการฯ) คุณอนุชิต ใจแก้ว และคุณวิจิต รววมงษ์ (เจ้าหน้าที่) ที่ให้ความ ช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลภาคสนามเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ เสรีภาพ เลขานุการหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา พฤกษศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ธุรการทุกท่าน สำหรับการดำเนินงานด้านเอกสารต่าง ๆ อย่างราบรื่น

ขอขอบคุณหน่วยปฏิบัติการพฤกษนิเวศวิทยา ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงความช่วยเหลือจาก อาจารย์ ดร.สุธาทิพย์ อำนวยสิน (ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร) และสมาชิกหน่วยปฏิบัติการฯ ในการออกภาคสนาม ตลอดจนให้คำแนะนำในการดำเนินงานมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้อง ภาควิชาชีววิทยาและภาควิชาพฤกษศาสตร์ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และคำแนะนำต่าง ๆ ให้ก้าวผ่านอุปสรรคต่าง ๆ มาได้อย่างไม่โดดเดี่ยว

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกคนในครอบครัว ที่คอยสนับสนุนในทุกด้านและเป็นกำลังใจอันดีมาโดยตลอด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 สมมติฐาน.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.1 ป่าชายเลนและบทบาททางนิเวศวิทยาของป่าชายเลน.....	4
2.1.1 ลักษณะของป่าชายเลน.....	4
2.1.2 บทบาททางนิเวศวิทยาของป่าชายเลน.....	15
2.2 การย่อยสลายซากพืชในป่าชายเลน.....	17
2.2.1 กระบวนการย่อยสลายในป่าชายเลน.....	17
2.2.2 การย่อยสลายของรากพืชชายเลน.....	18
2.2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายรากพืชในป่าชายเลน.....	19
2.3 วิธีการศึกษาการย่อยสลายของรากพืชในป่าชายเลน.....	21

2.3.1	วิธีการถลุงย่อยสลาย.....	21
2.3.2	ดัชนีถลุงชา.....	23
2.3.3	มินิไรโซทรอน.....	24
2.3.4	การติดตามด้วยไอโซโทป (isotope).....	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการศึกษา.....		26
3.1	พื้นที่ศึกษา.....	26
3.1.1	ที่ตั้งของพื้นที่ศึกษา.....	26
3.1.2	ลักษณะภูมิอากาศ.....	27
3.2	ศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาว.....	28
3.2.1	กำหนดจุดศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาว.....	28
3.2.2	เตรียมตัวอย่างรากฝอยแสมขาวสำหรับศึกษาการย่อยสลาย.....	29
3.2.3	ติดตั้งถลุงย่อยสลายในพื้นที่ศึกษา.....	30
3.2.4	เก็บถลุงย่อยสลายและคำนวณอัตราการย่อยสลาย.....	31
3.3	วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนในรากฝอย.....	32
3.4	ศึกษาลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของรากฝอย.....	32
3.5	ศึกษาปัจจัยสิ่งแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศ.....	33
3.5.1	อุณหภูมิดิน.....	33
3.5.2	อุณหภูมิและความเค็มของน้ำที่เข้าท่วม.....	33
3.5.3	อุณหภูมิอากาศและปริมาณน้ำฝน.....	33
3.5.4	ความสูงสัมพัทธ์ของพื้นที่ (relative elevation).....	33
3.5.5	ระยะเวลาที่น้ำท่วมพื้นที่ศึกษา (inundation period).....	33
3.5.6	คุณสมบัติทางเคมีของดิน.....	34
3.6	วิเคราะห์ทางสถิติ.....	34
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....		35



4.1 การย่อยสลายของรากฝอยในฤดูแล้งและฤดูฝน .....	35
4.2 การย่อยสลายของรากฝอยในรอบ 1 ปี .....	37
4.3 ปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนในรากฝอย .....	39
4.3.1 การย่อยสลายของรากฝอยในฤดูแล้งและฤดูฝน (12 สัปดาห์).....	39
4.3.2 การย่อยสลายของรากฝอยในรอบหนึ่งปี (52 สัปดาห์).....	42
4.4 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมและปัจจัยทางชีวภาพของรากที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลาย .....	45
4.4.1 ปัจจัยทางภูมิอากาศ .....	45
4.4.2 ความเค็มของน้ำและดิน .....	47
4.4.3 คุณสมบัติทางเคมีของดิน.....	51
4.4.4 ภูมิลักษณะและระยะเวลาที่น้ำท่วม .....	54
4.4.5 ปัจจัยทางชีวภาพ: ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของรากฝอยแสมขาว .....	55
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายในป่าชายเลน .....	56
บทที่ 5 อภิปรายผลการศึกษา .....	58
5.1 ความผันแปรของปัจจัยสิ่งแวดล้อมระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝนในป่าชายเลน .....	58
5.2 อัตราการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวและใบชา .....	60
5.2.1 การย่อยสลายของรากฝอยในฤดูแล้งและฤดูฝน .....	60
5.2.2 รูปแบบการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาว.....	64
5.2.3 การย่อยสลายของรากฝอยในรอบปี .....	65
5.2.4 การย่อยสลายของใบชาที่ใช้เป็นชุดควบคุม .....	68
5.3. การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนระหว่างการย่อยสลายราก .....	69
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา .....	71
บรรณานุกรม.....	74
ประวัติผู้เขียน .....	87

## สารบัญตาราง

หน้า

<p><b>ตารางที่ 4.1</b> สมการการย่อยสลาย อัตราการย่อยสลาย (k) และค่าครึ่งชีวิต (<math>t_{0.5}</math>) ของรากฝอยของ                  แสมขาวและใบชาในฤดูแล้งและฤดูฝน .....</p>	37
<p><b>ตารางที่ 4.2</b> ปริมาณคาร์บอน (%C) ไนโตรเจน (%N) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) ใน                  เนื้อเยื่อรากฝอยของแสมขาว และร้อยละคาร์บอนที่สูญเสีย (%C loss) (ค่าเฉลี่ย±SD) ในแต่ละเวลา                  ของการย่อยสลายในฤดูแล้งและฤดูฝน .....</p>	40
<p><b>ตารางที่ 4.3</b> ปริมาณคาร์บอน (%C) ไนโตรเจน (%N) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) ใน                  เนื้อเยื่อรากฝอย และร้อยละคาร์บอนที่สูญเสีย (%C loss) (ค่าเฉลี่ย±SD) ในแต่ละเวลาของการย่อย                  สลายในรอบปี .....</p>	43
<p><b>ตารางที่ 4.4</b> ข้อมูลอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิดินในช่วงเวลาที่ศึกษาตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565                  ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566 โดยช่องสี่เหลี่ยมคือฤดูแล้ง และช่องสี่เหลี่ยมคี่คือฤดูฝน .....</p>	46
<p><b>ตารางที่ 4.5</b> ความเค็มของน้ำในแม่น้ำ น้ำที่เข้าท่วมแปลง และน้ำในดิน (ค่าเฉลี่ย±SD) ในแต่ละ                  ระยะเวลาของการศึกษา.....</p>	49
<p><b>ตารางที่ 4.6</b> ปริมาณคาร์บอน (%C) ไนโตรเจน (%N) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) ของดิน                  (ค่าเฉลี่ย±SD).....</p>	53
<p><b>ตารางที่ 4.7</b> พื้นที่หน้าตัดรวม พื้นที่ชั้นสดีล พื้นที่ชั้นคอร์เทกซ์ของรากฝอยแสมขาว และอัตราส่วน                  ของพื้นที่ (ค่าเฉลี่ย±SD) ในฤดูแล้งและฤดูฝน .....</p>	56

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 แผนที่การกระจายตัวของป่าชายเลนทั่วโลก.....	4
ภาพที่ 2.2 ลักษณะของป่าชายเลนประเภทต่าง ๆ .....	6
ภาพที่ 2.3 การกระจายตัวของป่าชายเลนในประเทศไทย.....	7
ภาพที่ 2.4 การแบ่งเขตพันธุ์ไม้ในระบบนิเวศป่าชายเลน .....	8
ภาพที่ 2.5 ระบบรากเหนือดินของพันธุ์ไม้ในป่าชายเลน .....	12
ภาพที่ 2.6 ภาพตัดขวางรากฝอยของแสมทะเล ( <i>A. marina</i> ).....	14
ภาพที่ 2.7 ภาพตัดขวางของรากตะบูนขาว ( <i>X. granatum</i> ) .....	14
ภาพที่ 2.8 แผนภาพการหมุนเวียนคาร์บอนและการย่อยสลายของซากพืชส่วนใต้ดินในระบบนิเวศป่าชายเลน.....	18
ภาพที่ 3.1 ที่ตั้งของพื้นที่ศึกษา (ก) และแปลงศึกษาถาวรบริเวณปากแม่น้ำตราด จังหวัดตราด (ข) และเขตพันธุ์ไม้ในแปลงศึกษาถาวร.....	27
ภาพที่ 3.2 ปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายเดือน ( $\pm$ SD) ในช่วงปี พ.ศ. 2553–2563 จากสถานีตรวจอากาศคลองใหญ่ จังหวัดตราด (กรมอุตุนิยมวิทยา ประเทศไทย) .....	28
ภาพที่ 3.3 แนว line transect เพื่อกำหนดจุดศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาว .....	28
ภาพที่ 3.4 ถูย่อยสลายรากฝอยที่ทำจากตาข่ายไนลอน (ก) และ ถูย่อยสลายที่บรรจุในแผ่นตาข่ายพลาสติกที่ประกบติดกันสำหรับติดตั้งในดินป่าชายเลน (ข).....	30
ภาพที่ 4.1 ร้อยละของน้ำหนักรากฝอย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD) ที่เหลือในถูย่อยสลายในฤดูแล้งและฤดูฝน โดยตัวอักษรที่แตกต่างกันหมายถึงต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างแต่ละเวลาของการย่อยสลาย จากการทดสอบ Post hoc ด้วยวิธี Bonferroni (ก) และร้อยละของน้ำหนักใบชาเขียวที่เหลือในถูย่อยสลายในฤดูแล้งและฤดูฝน (ข).....	35
ภาพที่ 4.2 ร้อยละน้ำหนักรากฝอยที่เหลือในถูย่อยสลาย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD) และร้อยละน้ำหนักของใบชาที่คงเหลือในถูย่อยสลายในรอบปี .....	37

ภาพที่ 4.3 ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (C) ไนโตรเจนทั้งหมด (N) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) ในเนื้อเยื่อรากฝอยของแสมขาว และ คาร์บอนที่สูญเสีย (C loss) จากรากฝอยแสมขาว (ค่าเฉลี่ย±SD)..... 41

ภาพที่ 4.4 ปริมาณคาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) และคาร์บอนที่สูญเสีย (C loss) ของเนื้อเยื่อรากฝอย (ค่าเฉลี่ย±SD) ..... 44

ภาพที่ 4.5 อุณหภูมิอากาศ (ก) และ อุณหภูมิดินรายเดือน (ข) (ค่าเฉลี่ย±SD) ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566 ในบริเวณเขตพันธุ์ไม้แสม ป่าชายเลนปากแม่น้ำตราด ..... 45

ภาพที่ 4.6 ปริมาณน้ำฝนรายเดือนจากสถานีตรวจวัดสภาพภูมิอากาศที่ติดตั้งอยู่บริเวณศูนย์วิจัยและพัฒนาทรัพยากรป่าชายเลนที่ 1 (ตราด) ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566 .... 47

ภาพที่ 4.7 ความเค็ม (ค่าเฉลี่ย±SD) ของน้ำในแม่น้ำ (ก) และ น้ำที่เข้าท่วมแปลงศึกษา (ข)..... 48

ภาพที่ 4.8 ความเค็มของน้ำในดิน (ค่าเฉลี่ย±SD) ในแต่ละครั้งที่เก็บถ่วงย่อยสลายที่เก็บด้วยวิธี porous cup (ก) วิธีเจาะหลุมลึก 20 ซม. (ข) และข้อมูลจาก data logger (ค)..... 50

ภาพที่ 4.9 ความเค็มของน้ำในดิน (ค่าเฉลี่ย±SD) บันทึกจาก data logger ที่ติดตั้งในพื้นที่ศึกษา บริเวณเขตพันธุ์ไม้แสม..... 51

ภาพที่ 4.10 ศักย์รีดอกซ์ (Eh) ของดิน (ค่าเฉลี่ย±SD) ระหว่างการศึกษาการย่อยสลายราก ..... 52

ภาพที่ 4.11 แผนที่ภูมิลักษณะของพื้นที่ศึกษาในฤดูแล้ง (ซ้าย) และฤดูฝน (ขวา) ..... 54

ภาพที่ 4.12 ระยะเวลาที่น้ำท่วมในพื้นที่ศึกษา (ค่าเฉลี่ย±SD) ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566 ..... 55

ภาพที่ 4.13 ลักษณะภาพตัดขวางของรากฝอยแสมขาวในฤดูแล้งและฤดูฝน ..... 56

ภาพที่ 4.14 สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อม ..... 57

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบนิเวศป่าชายเลนครอบคลุมพื้นที่บริเวณปากแม่น้ำและชายฝั่งในเขตร้อน (tropics) และเขตกึ่งร้อน (subtropics) (Giri et al., 2011) จึงได้รับอิทธิพลจากน้ำทะเลและการท่วมถึงของน้ำจากปรากฏการณ์น้ำขึ้นน้ำลง ทำให้ดินอยู่ในสภาพขาดออกซิเจน (anoxia) อีกทั้งมีสภาพดินเป็นเลนนุ่มเนื่องจากการทับถมของตะกอน ต้นไม้ในป่าชายเลนจึงมีการปรับตัวเชิงกลของการกระจายมวลชีวภาพ โดยมีรูปทรงต้นไม้แบบ bottom-heavy (Ong et al., 2004) มวลชีวภาพมากกว่าร้อยละ 50 ของต้นไม้ชายเลนสะสมอยู่ในราก (Huxham et al., 2010) ระบบนิเวศป่าชายเลนนั้นมีบทบาทในการเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนที่สำคัญอย่างยิ่งทางทะเลและชายฝั่งในระยะยาวของโลก (Macreadie et al., 2019; Spivak et al., 2019) จึงจัดเป็น “vegetated blue carbon” ที่สำคัญ (Mcleod et al., 2011) เนื่องจากเป็นระบบนิเวศที่มีผลผลิตขั้นปฐมภูมิสุทธิสูง (net primary production, NPP) (Kamruzzaman et al., 2017; Komiyama et al., 2008; Pongpam et al., 2020) แต่กระบวนการย่อยสลายซากพืชเกิดขึ้นได้ซ้ำภายใต้สภาวะที่ดินมีน้ำท่วมขังและขาดออกซิเจน (MacKenzie et al., 2021)

คาร์บอนที่ถูกกักเก็บในระบบนิเวศป่าชายเลนอยู่ในรูปของมวลชีวภาพ (biomass) และคาร์บอนในดิน (soil carbon) โดยคาร์บอนสะสมในดินสูงถึงประมาณร้อยละ 70 ของคาร์บอนทั้งหมด (Alongi, 2014) เนื่องจากมีรากใต้ดินปริมาณมากสะสมอยู่ในดินทั้งในรูปมวลชีวภาพราก (root biomass) และซากราก (root necromass) ที่จะถูกย่อยสลายอย่างช้า ๆ ต่อไป รากพืชชายเลนจึงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการกักเก็บคาร์บอนโดยเฉพาะการกักเก็บคาร์บอนในรูปมวลชีวภาพราก ซากราก และคาร์บอนในดิน มวลชีวภาพของรากใต้ดินประมาณร้อยละ 66 คือรากฝอย (fine root) (Komiyama et al., 1987) ที่กระจายตัวในชั้นดินตื้น ๆ ในช่วงความลึก 0-30 เซนติเมตร (Muhammad-Nor et al., 2019; Pongpam et al., 2016) รากฝอยเป็นรากขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร (Middleton and McKee, 2001) มีหน้าที่ดูดซึมน้ำและสารอาหารให้พืชนำไปใช้ในการเจริญเติบโต โดยพืชสามารถสร้างรากฝอยได้ในระยะเวลาสั้น อย่างไรก็ตามรากฝอยมักมีอายุขัยสั้น (Torres et al., 2019) เมื่อรากฝอยเกิดการเสื่อมสภาพและผุพังจึงทำให้เกิดการส่งผ่านสารอาหารจากพืชไปสู่ดินได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการส่งผ่านคาร์บอนจากรูปมวลชีวภาพรากสู่คาร์บอนในดินที่มีความสำคัญต่อการสะสมคาร์บอนในดินเป็นอย่างมาก (Xiong et al., 2017) นอกจากนี้ยังมีการปลดปล่อยคาร์บอนสู่บรรยากาศผ่านกระบวนการย่อยสลายอีกด้วย

กระบวนการย่อยสลายของซากพืชเป็นกลไกสำคัญในการหมุนเวียนคาร์บอนในระบบนิเวศ (Liu et al., 2017) โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายซากพืชในป่าชายเลน ได้แก่ ลักษณะของซากพืชที่ขึ้นกับชนิดพืช อันประกอบด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากและองค์ประกอบทางเคมีตั้งต้นของราก (Huxham et al., 2010; Ola and Lovelock, 2021) และปัจจัยสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ดิน (บัณฑูรย์ เฉลิมฉัตรวิไล, 2553; Ouyang et al., 2017) ความชื้นในดิน (Smith et al., 2014) ความเค็มของน้ำในดิน (Ouyang et al., 2017) ช่วงเวลาที่ถูกน้ำท่วมและปริมาณสารอาหารในดิน (Poret et al., 2007) ซึ่งปัจจัยสิ่งแวดล้อมในป่าชายเลนนั้นมีความผันแปรตามฤดูกาลโดยเฉพาะอย่างยิ่งป่าชายเลนที่อยู่ภายใต้สภาพภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อนอย่างประเทศไทย

ปัจจัยสิ่งแวดล้อมในป่าชายเลนภายใต้สภาพภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อนมีความผันแปรตามฤดูกาล โดยเฉพาะปัจจัยทางสภาพภูมิอากาศ (climatic factor) ได้แก่ อุณหภูมิอากาศและปริมาณน้ำฝน ที่ส่งผลให้เกิดการผันแปรตามฤดูกาลของปัจจัยทางดิน (edaphic factor) ได้แก่ อุณหภูมิดินและความเค็มของน้ำในดิน ความผันแปรตามฤดูกาลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมนี้มีอิทธิพลต่อการเติบโตของพืชและผลผลิตทางนิเวศวิทยาในป่าชายเลน โดยมีรายงานว่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในช่วงฤดูแล้งมีผลอย่างยิ่งต่อผลผลิตทางนิเวศวิทยาของป่าชายเลน (Poungparn et al., 2020) และความเค็มของน้ำในดินที่ผันแปรตามฤดูกาลส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นไม้ในป่าชายเลนบริเวณปากแม่น้ำตราด โดยมีรายงานว่าแสมขาว (*Avicennia alba* Blume) มีอัตราการเติบโตมากในช่วงฤดูฝนภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเค็มต่ำ (Kankong et al., 2021; Komiyama et al., 2019) เนื่องจากน้ำที่เข้าท่วมมีความเค็มต่ำจากการถูกเจือจางโดยน้ำฝนและน้ำจืดปริมาณมากจากแม่น้ำในช่วงฤดูฝน (Komiyama et al., 2019) ความเค็มของน้ำในดินที่มีความผันแปรตามฤดูกาลจึงอาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการย่อยสลายในป่าชายเลนภายใต้สภาพภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อน

แสมขาว (*A. alba*) เป็นพืชในวงศ์ Acanthaceae มีบทบาทเป็นไม้เบิกนำ (pioneer species) ในระบบนิเวศป่าชายเลนที่สามารถเจริญเติบโตได้เป็นกลุ่มแรกในพื้นที่โล่งและสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพพื้นที่และเจริญได้ดี พบได้ตามธรรมชาติบริเวณแนวชายฝั่งทะเล มักเจริญบริเวณด้านนอกสุดของป่าชายเลนที่ติดกับทะเลหรือริมแม่น้ำ (Santisuk et al., 1982) ผลผลิตรากฝอยในเขตพื้นที่ไม้แสม (*Avicennia* zone) ที่ป่าชายเลนปากแม่น้ำตราด จังหวัดตราด ในช่วงหนึ่งเดือนสูงถึง 57.1 กรัมต่อตารางเมตร (ธัญลักษณ์ เจริญพรภักดี, 2557) อีกทั้งมีแนวโน้มเกิดการย่อยสลายของรากฝอยได้มากเมื่อเทียบกับเขตพื้นที่ไม้ที่อยู่ลึกด้านในแผ่นดิน (บัณฑูรย์ เฉลิมฉัตรวิไล, 2553) แสดงให้เห็นว่ารากฝอยของแสมขาวมีพลวัตที่เร็ว ทำให้เกิดการส่งผ่านคาร์บอนจากพืชไปสู่องค์ประกอบอื่นของวัฏจักรคาร์บอนในระบบนิเวศป่าชายเลนได้ในเวลาอันสั้น

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการย่อยสลายรากฝอยของแสมขาวโดยเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายที่เกิดขึ้นในฤดูแล้งและฤดูฝน และศึกษาการย่อยสลายรากฝอย

ของแสมขาวในรอบปี รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายรากฝอยกับ ปัจจัยสิ่งแวดล้อม ในป่าชายเลนปากแม่น้ำตราด จังหวัดตราด บริเวณแปลงศึกษาถาวรขนาด 1 เฮกตาร์ ลักษณะสังคมพืชในแปลงศึกษาถาวรมีการแบ่งเขตพันธุ์ไม้ (zonation) ตามพันธุ์ไม้เด่น ออกเป็น 3 เขตอย่างชัดเจนตั้งแต่บริเวณริมแม่น้ำเข้าไปยังแผ่นดิน ได้แก่ เขตพันธุ์ไม้แสม โกงกาง และตะบูน ตามลำดับ (Umnouysin et al., 2017) การศึกษาครั้งนี้เลือกศึกษาภายในเขตพันธุ์ไม้แสม (*Avicennia* zone) ที่มีแสมขาว (*A. alba*) เป็นพืชเด่น

## 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยและความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายของรากฝอย ของแสมขาวกับปัจจัยสิ่งแวดล้อมในฤดูแล้งและฤดูฝนในป่าชายเลนปากแม่น้ำ จังหวัดตราด

## 1.3 สมมติฐาน

อัตราการย่อยสลายรากฝอยของแสมขาวจะมีความผันแปรตามฤดูกาลภายใต้อิทธิพลของ ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ผันแปรตามฤดูกาล โดยอัตราการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวในฤดูแล้งต่ำกว่าในฤดูฝนเนื่องจากอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเค็มของน้ำสูงกว่า

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ศึกษาการย่อยสลายรากฝอยของแสมขาว (*A. alba*) ประกอบกับการศึกษาปัจจัยสภาพ ภูมิอากาศ ปัจจัยสิ่งแวดล้อมทางน้ำและดิน เป็นระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 ถึง เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 ในแปลงศึกษาถาวร ในป่าชายเลนที่ตั้งอยู่บริเวณปากแม่น้ำตราด จังหวัด ตราด ทางภาคตะวันออกของประเทศไทย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เป็นข้อมูลเชิงปริมาณที่นำไปใช้ประเมินอัตราส่วนคาร์บอนในวัฏจักรคาร์บอนของระบบนิเวศ ป่าชายเลนให้มีความแม่นยำมากขึ้น เพื่อนำไปใช้ประกอบการวางแผนจัดการระบบนิเวศป่าชายเลน ภายใต้ความผันแปรตามฤดูกาลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงมากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะ ภูมิอากาศโลก

## บทที่ 2

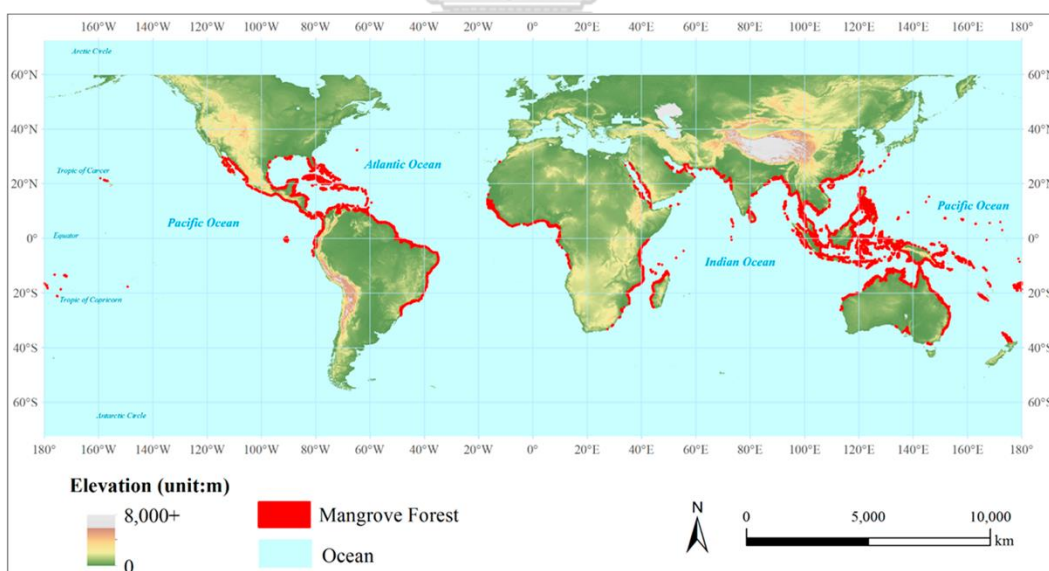
### บททวนวรรณกรรม

#### 2.1 ป่าชายเลนและบทบาททางนิเวศวิทยาของป่าชายเลน

##### 2.1.1 ลักษณะของป่าชายเลน

##### ที่ตั้งและลักษณะของป่าชายเลน

ระบบนิเวศป่าชายเลน (mangrove ecosystems) เป็นระบบนิเวศที่เชื่อมต่อระหว่างระบบนิเวศบก (terrestrial ecosystems) และระบบนิเวศน้ำ (aquatic ecosystems) ที่พบได้ในบริเวณพื้นที่ชายฝั่งและปากแม่น้ำในเขตร้อน (tropics) และเขตกึ่งร้อน (subtropics) (Duke et al., 2007) ป่าชายเลนครอบคลุมพื้นที่ในเขตน้ำขึ้น-น้ำลง (intertidal zone) ทั่วโลกประมาณ 137,760 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 0.5 ของพื้นที่ชายฝั่งทั้งหมดบนโลก (Alongi, 2014; Giri et al., 2011) ดังภาพที่ 2.1 ในแต่ละพื้นที่ที่มีความแตกต่างด้านลักษณะทางภูมิศาสตร์ ธรณีวิทยา และการไหลของน้ำเข้าสู่ป่าชายเลน ส่งผลให้ปัจจัยสิ่งแวดล้อมในแต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกัน และมีอิทธิพลต่อลักษณะของป่าชายเลนและลักษณะของพืชชายเลนที่พบในบริเวณนั้น



ภาพที่ 2.1 แผนที่การกระจายตัวของป่าชายเลนทั่วโลก ดัดแปลงจาก Tang และคณะ (2018)

ลักษณะของสังคมพืชชายเลนโดยทั่วไปประกอบด้วยไม้ต้น (tree) และไม้พุ่ม (shrub) ที่ไม่ผลัดใบเป็นหลัก พืชชายเลนมีความพิเศษต่างจากพืชบกอื่น โดยสามารถเจริญได้ในบริเวณที่ถูกน้ำท่วมเป็นประจำ ดินมีสภาพขาดออกซิเจน น้ำในดินมีความเค็มมาก และได้รับอิทธิพลของคลื่นลม



อยู่เป็นประจำ (Srikanth et al., 2016) พืชที่พบในระบบนิเวศป่าชายเลนมีรายงานประมาณ 80 ชนิด 32 สกุล 17 วงศ์ (Tomlinson, 2016) เมื่อจัดจำแนกป่าชายเลนตามลักษณะของพื้นที่ การท่วมถึงของน้ำ และลักษณะของพืชชายเลนสามารถแบ่งได้เป็น 6 ประเภท (Ewel et al., 1998; Lugo and Snedaker, 1974; Odum et al., 1982) ได้แก่

1) **Overwash forest** เป็นป่าชายเลนขนาดเล็กที่อยู่บนเกาะ ได้รับอิทธิพลจากคลื่นเป็นอย่างมาก มีกระแสน้ำพัดผ่านและมักพัดพาอินทรีย์วัตถุออกจากป่าชายเลนทำให้มีธาตุอาหารในดินต่ำ พืชชายเลนจึงมีลักษณะต้นเตี้ย มีความสูงไม่เกิน 7 เมตร (ภาพที่ 2.2ก)

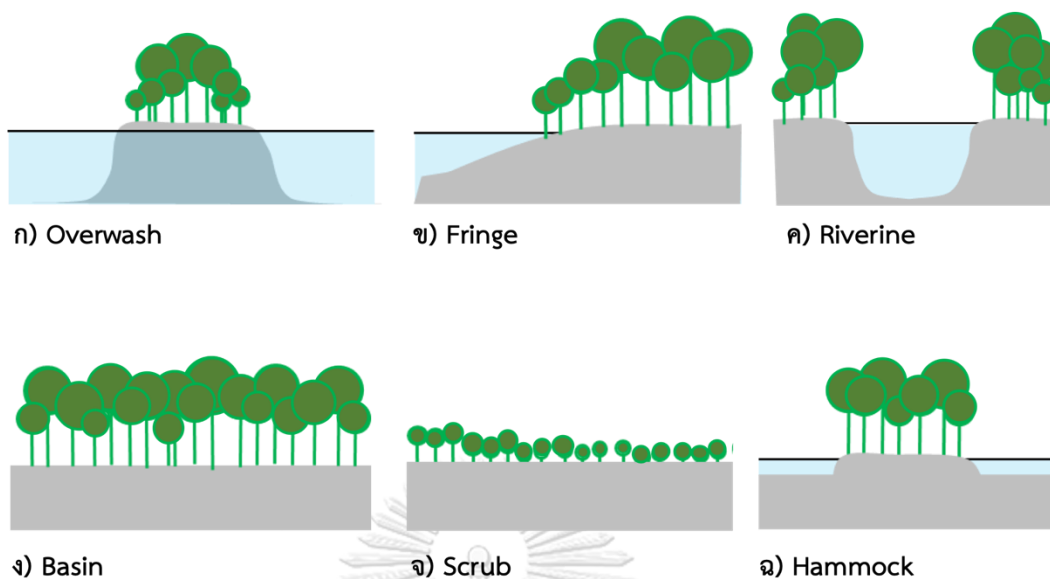
2) **Fringe forest** เป็นป่าชายเลนที่พบตามแนวชายฝั่งบนแผ่นดินใหญ่ มีการท่วมถึงของน้ำอย่างสม่ำเสมอและมีความอ่อนไหวต่อการกัดเซาะของชายฝั่ง พืชชายเลนที่พบมักมีความสูงไม่เกิน 10 เมตร (ภาพที่ 2.2ข)

3) **Riverine forest** เป็นป่าชายเลนบริเวณริมฝั่งแม่น้ำ คลอง ลำห้วย (creek) รวมถึงบริเวณอ่าวหรือปากแม่น้ำ ที่ได้รับการท่วมถึงของน้ำเมื่อน้ำขึ้นอย่างสม่ำเสมอและได้รับน้ำจืดและธาตุอาหารจากแม่น้ำในช่วงฤดูฝน ทำให้พันธุ์ไม้ที่พบมีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างดี มีความสูงได้ถึง 20 เมตร (ภาพที่ 2.2ค)

4) **Basin forest** เป็นป่าชายเลนที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ต่ำบนแผ่นดินบริเวณที่มีน้ำท่วมขังมักพบอยู่บนฝั่งบริเวณติดกับปากบ่ มีน้ำท่วมเป็นบางครั้งในช่วงฤดูแล้งและน้ำท่วมค่อนข้างสม่ำเสมอในฤดูฝน โดยได้รับน้ำจืดที่ไหลมาจากบนบก พืชมีความสูงได้ถึง 15 เมตร (ภาพที่ 2.2ง)

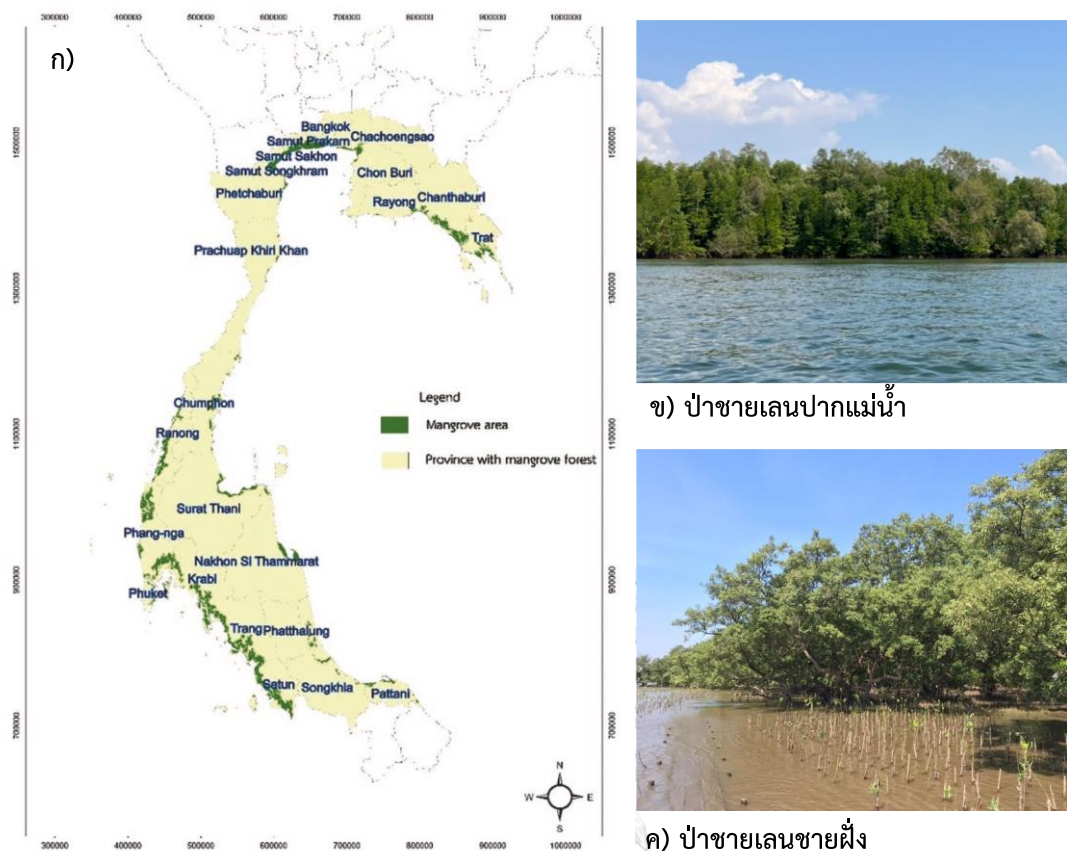
5) **Scrub forest** หรือ **Dwarf forest** เป็นป่าชายเลนที่พบบริเวณชายฝั่งที่มีปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่จำกัด เช่น ในเขตหนาว มีช่วงวันสั้น พื้นที่มีธาตุอาหารต่ำ ทำให้พืชชายเลนมีลักษณะพุ่มเตี้ย มีความสูงไม่เกิน 1.5 เมตร (ภาพที่ 2.2จ)

6) **Hammock forest** เป็นป่าชายเลนที่มีลักษณะคล้าย basin forest แต่มีระดับความสูงของพื้นที่มากกว่าบริเวณรอบข้าง ส่งผลให้มีความเค็มสูงและมีธาตุอาหารต่ำ พืชชายเลนที่พบมักมีความสูงไม่เกิน 5 เมตร (ภาพที่ 2.2ฉ)



ภาพที่ 2.2 ลักษณะของป่าชายเลนประเภทต่าง ๆ ดัดแปลงจาก Odum และคณะ (1982)

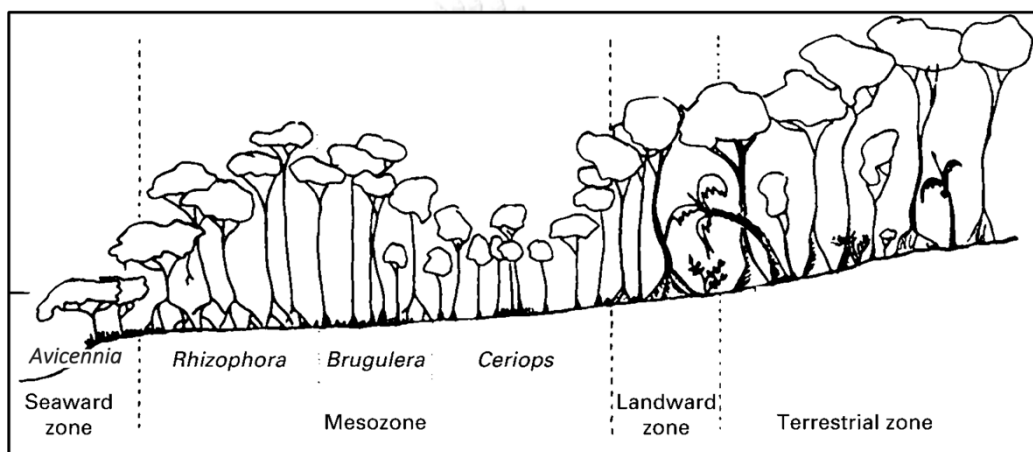
ในประเทศไทยพบป่าชายเลนกระจายตัวทั้งบริเวณชายฝั่งทะเลอ่าวไทยในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง ภาคใต้ฝั่งตะวันออก และบริเวณชายฝั่งทะเลอันดามันภาคใต้ฝั่งตะวันตก ครอบคลุมพื้นที่รวม 24 จังหวัด ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นป่าชายเลนปากแม่น้ำและป่าชายเลนชายฝั่ง (ภาพที่ 2.3) พบพันธุ์ไม้ประมาณ 74 ชนิด จัดอยู่ใน 35 วงศ์ (Santisuk, 1983) โดยพืชชายเลนที่สามารถพบได้ทั่วไปในป่าชายเลนประเทศไทย เช่น สกุล *Avicennia*, *Sonneratia*, *Rhizophora*, *Bruguiera*, *Ceriops*, *Nypa*, และ *Xylocarpus* (Pumijumnong, 2014)



ภาพที่ 2.3 การกระจายตัวของป่าชายเลนในประเทศไทย (Wanthongchai and Pongruktham, 2019) (ก) ลักษณะป่าชายเลนปากแม่น้ำตราด จังหวัดตราด (ข) และลักษณะป่าชายเลนชายฝั่งบางปู จังหวัดสมุทรปราการ (ค)

ป่าชายเลนมีการแบ่งเขตพันธุ์ไม้ (zonation) ที่เป็นผลจากการพัฒนาของสังคมพืชเป็นเขตพื้นที่ตามกลุ่มพันธุ์ไม้เด่น (Tomlinson, 2016) เนื่องจากพืชชายเลนแต่ละชนิดปรับตัวให้สามารถดำรงชีวิตในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน อีกทั้งในแต่ละบริเวณของป่าชายเลนมีความแตกต่างเชิงพื้นที่ส่งผลให้ปัจจัยสิ่งแวดล้อมมีความแตกต่างกัน ได้แก่ ความถี่ของการท่วมของน้ำ ความเค็มของน้ำในดิน ตลอดจนลักษณะทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ ของดินที่มีอิทธิพลต่อการตั้งตัวและเจริญเติบโตของพันธุ์ไม้ชายเลนชนิดต่าง ๆ (เทียมใจ คมกฤต, 2536) ทั้งนี้ความเค็มและความสามารถในการตอบสนองต่อความเค็มของพืชชายเลนนับเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของพันธุ์ไม้ในเขตพันธุ์ไม้ต่าง ๆ (Snedaker, 1982) โดยการแบ่งเขตพันธุ์ไม้ในป่าชายเลนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เขตตามระยะห่างจากแม่น้ำหรือทะเล คือ เขตริมฝั่งแม่น้ำหรือทะเล (seaward zone) เขตถัดเข้ามาด้านในแผ่นดิน (mesozone) และเขตที่ติดกับป่าบก (landward zone) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (Tomlinson, 2016) ทั้งนี้สังคมพืชชายเลนในระยะแรกเริ่มจะมีพันธุ์ไม้เบิกนำ (pioneer species)

เข้ามาตั้งตัวและเจริญเติบโตบริเวณริมฝั่งแม่น้ำหรือหาดเลนที่ติดกับทะเล (seaward zone) ที่มีความเค็มสูง มักมีเรือนยอดชั้นเดียว พันธุ์ไม้เบิกนำสำคัญในป่าชายเลน เช่น สกกุลแสม (*Avicennia*) และ ลำพู (*Sonneratia*) ในบริเวณถัดเข้ามาด้านในแผ่นดิน (mesozone) มักพบพืชสกุลโกงกาง (*Rhizophora*) และพันธุ์ไม้ทนมอื่น ๆ และเขตตอนในแผ่นดิน (landward zone) ที่เป็นบริเวณรอยต่อกับเขตป่าบก (terrestrial zone) เป็นเขตที่น้ำกร่อยที่มีน้ำค่อนข้างจืด สังคมพืชมีเรือนยอดสองชั้น พบพันธุ์ไม้ในสกุลหลุมพอ (*Intsia*) และหงอนไก่ทะเล (*Heritiera*) และอาจพบไม้พื้นล่าง (undergrowth) เจริญกระจายอยู่อย่างไม่หนาแน่น ซึ่งพันธุ์ไม้ในเขตตอนในแผ่นดินเป็นพันธุ์ไม้ที่ทนร่มและเจริญเติบโตในดินที่มีความเค็มต่ำ (สรายุทธ บุญยะเวชชีวิน และรุ่งสุริยา บัวสาตี, 2554)



ภาพที่ 2.4 การแบ่งเขตพันธุ์ไม้ในระบบนิเวศป่าชายเลน ดัดแปลงจาก Tomlinson (2016)

### สิ่งแวดล้อมในป่าชายเลนและความผันแปรตามฤดูกาล

ระบบนิเวศป่าชายเลนกระจายตัวในบริเวณชายฝั่งและปากแม่น้ำได้รับอิทธิพลจากการท่วมถึงของน้ำทะเลจากปรากฏการณ์น้ำขึ้นน้ำลง ทำให้มีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างจากป่าบก โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวกับดินและธาตุอาหารที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต การกระจายตัวของพืชชายเลน และลักษณะของป่าชายเลนเป็นอย่างมาก อีกทั้งส่งผลต่อการเกิดกระบวนการทางชีวภาพต่าง ๆ ในป่าชายเลนด้วย

ดินในป่าชายเลนมีลักษณะเป็นดินเลนที่อ่อนนุ่มเกิดจากการทับถมของอนุภาคดินขนาดเล็ก (Augustinus, 1995) การสะสมของตะกอนดินภายในป่าชายเลนได้รับอิทธิพลจากการพัดพาของกระแสน้ำจากคลื่นในทะเลและน้ำในแม่น้ำ (Norris et al., 2017) เมื่อพิจารณาลักษณะเนื้อดิน (soil texture) จากอัตราส่วนอนุภาคดินเหนียว (clay) ทรายแป้ง (silt) และทราย (sand) พบว่าดินในป่าชายเลนส่วนใหญ่มีอัตราส่วนอนุภาคทรายน้อยและมีอัตราส่วนอนุภาคดินเหนียวและทรายแป้งสูงจัดเป็นดินร่วนเหนียวปนตะกอน (silty clay loam) (Hossain and Nuruddin, 2016) นอกจากนี้

ดินในป่าชายเลนมีลักษณะเป็น sulfidic soil (Alongi, 2005) และอยู่ในสภาพไร้ออกซิเจน (anoxia) เนื่องจากการถูกน้ำท่วมขัง ส่งผลให้มีค่าศักย์การนำไฟฟ้า (redox potential, Eh) ของดินที่ต่ำ โดยได้รับอิทธิพลจากความถี่และระยะเวลาการท่วมของน้ำ (McKee, 1993) ซึ่งศักย์การนำไฟฟ้าของดิน แสดงถึงความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของดิน และสามารถบ่งชี้สภาพการมีออกซิเจนในดิน (Reddy and DeLaune, 2008) ค่าศักย์การนำไฟฟ้าของดินในป่าชายเลนมีค่าต่ำได้ถึง -200 มิลลิโวลต์ (Hogarth, 1999) โดยค่าศักย์การนำไฟฟ้าของดินที่มีค่าติดลบนี้แสดงถึงสภาพไร้ออกซิเจนของดิน (Brzezinska, 2004) ความเป็นกรดต่างของดินในป่าชายเลนในเขตร้อนมีค่าในช่วง 2.87–6.40 (Hossain and Nuruddin, 2016) แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (physicochemical properties) ของดินในป่าชายเลนนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ทั้งสภาพทางภูมิศาสตร์ ธรณีลักษณะ กระจกน้ำ ปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำจืดที่ได้รับจากแม่น้ำ แหล่งกำเนิดชั้นหิน รวมถึงการปรากฏหรือการกระจายตัวของพืชและรากในพื้นที่นั้นด้วย (Alongi, 2005) ซึ่งส่งผลให้ดินในป่าชายเลนมีความแตกต่างในเชิงพื้นที่ถึงแม้จะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน

การขึ้นลงของน้ำทะเลส่งผลต่อความเค็มในป่าชายเลน (Krauss and Ball, 2013) โดยเมื่อน้ำจากทะเลหรือน้ำในแม่น้ำเข้าท่วมบริเวณชั้นผิวดิน (surface soil layer) จะซึมลงสู่ชั้นดินด้านล่าง (aquifer layer) และพบว่าความเค็มของน้ำในดินมีความผันแปรตามฤดูกาลตามปริมาณน้ำจืดที่ได้รับจากน้ำฝนและแม่น้ำ ซึ่งมีความเค็มต่ำในช่วงที่ได้รับน้ำจืดปริมาณมากในฤดูฝนแต่มีความเค็มที่เพิ่มขึ้นในช่วงฤดูแล้ง (Kankong et al., 2021; Komiyama et al., 2020; Komiyama et al., 2019; Wakushima et al., 1994) นอกจากนี้ความเค็มของน้ำในดินยังขึ้นกับระยะห่างจากแม่น้ำหรือทะเล และลักษณะภูมิลักษณะของพื้นที่ โดยในเขตพันธุ์ไม้แสมซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้ทะเลและมีระดับความสูงของพื้นที่ต่ำจะมีความผันแปรของความเค็มสูงในฤดูแล้งและฤดูฝนเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากการท่วมของน้ำจากแม่น้ำมากกว่าเขตพันธุ์ไม้ที่อยู่ลึกเข้าไปในแผ่นดินที่มีระดับความสูงของพื้นที่มากกว่า (Komiyama et al., 2019) ในป่าชายเลนเขตร้อนมีความเค็มของน้ำในดินผันแปรตั้งแต่ร้อยละ 1.5–3.5 (Hossain and Nuruddin, 2016) ความเค็มของน้ำในดินเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการอยู่รอดของพืชชายเลน โดยต้นกล้าของตะบูนขาว (*Xylocarpus granatum*) สามารถเจริญเติบโตและอยู่รอดในช่วงความเค็มต่ำในช่วงร้อยละ 0–0.5 (0–5 PSU) (Siddique et al., 2017) ในขณะที่ต้นกล้าของแสมทะเล (*A. marina*) มีอัตราการรอดต่ำเมื่อเจริญในช่วงความเค็มต่ำกว่าร้อยละ 0.2 แต่เจริญเติบโตได้มากในช่วงความเค็มร้อยละ 1.7–2.6 (Nguyen et al., 2015)

ระยะห่างจากทะเลหรือแม่น้ำเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อปัจจัยสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ภายในป่าชายเลน โดยเฉพาะระยะเวลาที่น้ำเข้าท่วม (inundation period) โดยพื้นที่บริเวณใกล้ทะเลหรือแม่น้ำในป่าชายเลนปากแม่น้ำหรือป่าชายเลนชายฝั่งมีระดับความสูงของพื้นที่ต่ำบริเวณด้านในป่าที่อยู่ติดแผ่นดิน ทำให้บริเวณติดกับแม่น้ำหรือทะเลมีระยะเวลาที่น้ำท่วมนานกว่าด้านในแผ่นดิน

ตัวอย่างเช่นการศึกษาของ Watson และคณะ (1928) Umnouysin และคณะ (2017) และ Hongwiset และคณะ (2021) ซึ่งระยะของการท่วมถึงของน้ำที่ต่างกันในแต่ละบริเวณส่งผลต่ออุณหภูมิดินในแต่ละบริเวณของป่าชายเลน เนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำที่เข้าท่วมกับดิน จากการศึกษาของ Pongparn และคณะ (2009) ในป่าชายเลนปากแม่น้ำตราด จังหวัดตราด พบว่าดินในบริเวณด้านในของป่าชายเลนที่น้ำท่วมเป็นระยะเวลาสั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณริมแม่น้ำที่มีน้ำท่วมเป็นเวลานานกว่า โดยบริเวณเขตพืชน้ำลำพู (*Sonneratia*) ที่อยู่ริมแม่น้ำมีระยะเวลาที่น้ำท่วมยาวนานกว่าในเขตพืชน้ำตะบูน ส่งผลให้อุณหภูมิดินเฉลี่ยในเขตพืชน้ำลำพูมีค่าสูงกว่าในเขตพืชน้ำตะบูน (30.1 และ 27.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) และ Chambers และคณะ (2014) ศึกษาในป่าชายเลนชายฝั่ง รัฐฟลอริดา พบว่าดินในป่าชายเลนที่ถูกน้ำท่วมเป็นเวลานานจะมีอุณหภูมิสูงกว่า นอกจากนี้ระยะห่างจากทะเลยังมีอิทธิพลต่อการสะสมของตะกอนบนพื้นผิวดินและการสะสมของอินทรีย์วัตถุในดิน รวมถึงระดับความสูงของพื้นที่ด้วย (Lovelock et al., 2015)

ป่าชายเลนมีธาตุอาหารในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ไนปริมาณต่ำ (Reef et al., 2010) โดยธาตุอาหารส่วนใหญ่อยู่ในดินมากกว่าในเนื้อเยื่อพืช (Alongi, 2013) ธาตุอาหารถูกพัดพามากับกระแสน้ำและตะกอนเข้ามายังป่าชายเลน (allochthonous sources) (Lugo and Snedaker, 1974) ในรูปสารอนินทรีย์ (inorganic nutrient) เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ที่มากับน้ำฝน น้ำท่า (runoff) น้ำในแม่น้ำ น้ำทะเล และจากการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุในดิน (Hogarth, 1999) และธาตุอาหารบางส่วน เช่น คาร์บอนอินทรีย์ ฟอสฟอรัสอินทรีย์ เกิดจากการผุพังของสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาซากพืช รวมถึงแบคทีเรีย แพลงก์ตอน และสาหร่าย ในป่าชายเลน (autochthonous sources) แต่ธาตุอาหารในดินป่าชายเลนสามารถละลายน้ำและถูกชะล้างออกจากระบบนิเวศได้ ส่งผลให้ธาตุอาหารที่อยู่ในรูปที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับระบบนิเวศปาก (Reef et al., 2010) โดยเฉพาะอย่างยิ่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เป็นปัจจัยจำกัดสำหรับการเจริญเติบโตของพืชชายเลน (Feller et al., 2003; Lovelock et al., 2006; Reef et al., 2010)

ปัจจัยสิ่งแวดล้อมในป่าชายเลนมีความผันแปรตามฤดูกาล โดยป่าชายเลนที่อยู่ภายใต้สภาพภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อน (tropical monsoon climate) ซึ่งมีอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยสูงกว่า 18 องศาเซลเซียสตลอดปี มีช่วงฤดูแล้งและฤดูฝนที่ชัดเจน (Peel et al., 2007) ปัจจัยทางสภาพภูมิอากาศ (climatic factor) ได้แก่ อุณหภูมิอากาศและปริมาณน้ำฝน จึงมีความผันแปรตามฤดูกาล โดยมีปริมาณน้ำฝนมากในช่วงฤดูฝน ส่งผลให้ปัจจัยสิ่งแวดล้อมอื่นในป่าชายเลนผันแปรตามฤดูกาลด้วย เช่น อุณหภูมิดินและความเค็มของน้ำในดิน โดยเฉพาะความเค็มของน้ำในดินในป่าชายเลนปากแม่น้ำที่ผันแปรตามฤดูกาลอย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น การศึกษาในป่าชายเลนปากแม่น้ำตราด จังหวัดตราด พบว่าความเค็มของน้ำที่เข้าท่วม (inundated water) ป่าชายเลนในฤดูฝนต่ำกว่าฤดู

แล้ง โดยมีค่าร้อยละ  $0.13 \pm 0.19$  และ  $2.50 \pm 0.46$  ตามลำดับ เป็นผลจากปริมาณน้ำฝนในช่วงฤดูฝนที่สูงถึง 2677 มิลลิเมตร คิดเป็นร้อยละ 89.5 ของปริมาณน้ำฝนทั้งปี (Kankong et al., 2021) และการศึกษาของ Komiyama และคณะ (2019) ในพื้นที่เดียวกันพบว่าความเค็มของน้ำในดินในฤดูฝน (เดือนสิงหาคม) มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.00–0.80 ขณะที่ในฤดูแล้ง (เดือนมีนาคม) มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1.18–3.12 เนื่องจากป่าชายเลนปากแม่น้ำได้รับน้ำจืดปริมาณมากกว่าน้ำฝนและน้ำในแม่น้ำช่วยเจือจางความเค็มของน้ำที่เข้าท่วมและน้ำในดิน ขณะที่ในฤดูแล้งมีอุณหภูมิอากาศสูง มีปริมาณน้ำฝนน้อย และเกิดการระเหยของน้ำมาก ทำให้น้ำในดินมีความเค็มสูง อุณหภูมิดินได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศโดยอุณหภูมิของดินมีความผันแปรเล็กน้อยตามฤดูกาล ตัวอย่างการศึกษาในป่าชายเลนบริเวณปากแม่น้ำตราด พบว่าในฤดูฝน (เดือนพฤษภาคม–ตุลาคม) มีอุณหภูมิดินเฉลี่ยเท่ากับ 27.2 องศาเซลเซียส และในฤดูแล้ง (เดือนพฤศจิกายน–เมษายน) มีอุณหภูมิดินเฉลี่ยเท่ากับ 28.2 องศาเซลเซียส (Poungparn et al., 2009)

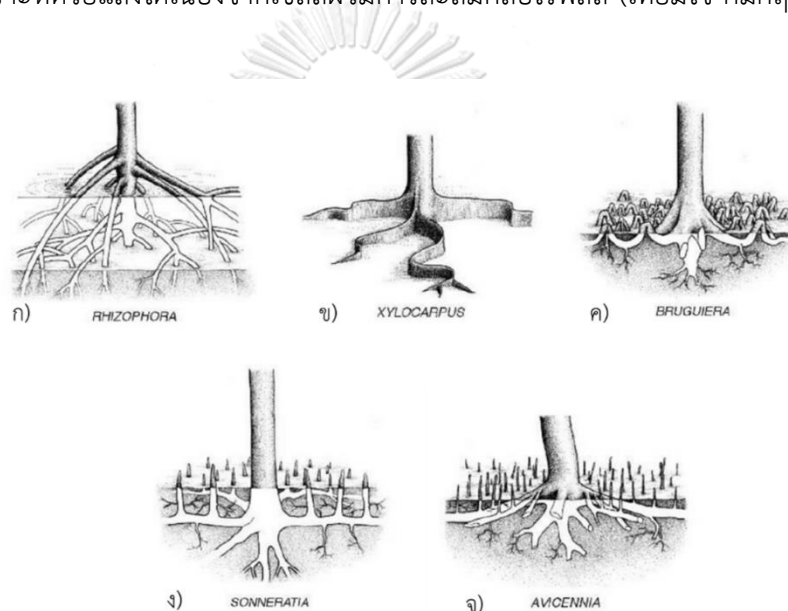
ปัจจัยสิ่งแวดล้อมในป่าชายเลนที่ต่างจากป่าบกทำให้พืชชายเลนมีลักษณะพิเศษแตกต่างจากพืชในป่าบก โดยมีการปรับตัวทั้งลักษณะทางสัณฐานวิทยา กายวิภาคศาสตร์ และสรีรวิทยาให้สามารถเจริญเติบโตและอยู่รอดได้ในสภาพแวดล้อมดังกล่าว นอกจากนี้ความผันแปรของสิ่งแวดล้อมในป่าชายเลนทั้งเชิงพื้นที่และตามฤดูกาลยังมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของพืชชายเลน อีกทั้งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการแบ่งเขตพันธุ์ไม้ (zonation) ภายในป่าชายเลนด้วย

### ลักษณะพิเศษและการปรับตัวของพืชชายเลน

พืชชายเลนเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพแวดล้อมที่มีทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม เรียกว่า facultative halophytes (Krauss and Ball, 2013) โดยพืชชายเลนมีลักษณะทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับความเค็ม ได้แก่ ลักษณะการมีใบแบบอวบน้ำ (succulent) มีคิวตินเคลือบผิวใบ มีขนใบปกคลุมช่วยกักไอน้ำระเหยจากใบเพื่อลดอัตราการสูญเสียน้ำจากการคายน้ำ (Lovelock et al., 2016) นอกจากนี้พืชชายเลนยังมีกลไกทางสรีรวิทยาที่ปรับตัวให้อยู่ในบริเวณที่มีความเค็มสูงได้ดี โดย 1) การป้องกันไม่ให้ความเค็มเข้ามาภายในต้น (salt exclusion) เช่น การสะสมซูเบอร์รินในชั้น endodermis 2) การขับเกลือออก (salt secretion) ทางต่อมขับเกลือบนผิวใบ และ 3) การสะสมเกลือ (salt accumulation) ในรูปของ osmolytes ไว้ในแวคิวโอลเพื่อลดความเสียหายของเซลล์ ทั้งนี้พืชชายเลนแต่ละชนิดมีกลไกที่ปรับตัวต่อความเค็มที่แตกต่างกัน (Parida and Jha, 2010)

พืชชายเลนปรับตัวให้สามารถเจริญเติบโตในสภาพดินเลนที่มีน้ำท่วมขังได้ ด้วยการมีระบบรากที่มีเอกลักษณ์ที่ประกอบด้วยรากเหนือดินและรากใต้ดิน โดยมีมวลชีวภาพมากกว่าร้อยละ 50 สะสมอยู่ในราก (Huxham et al., 2010) ไม้ต้นในป่าชายเลนจึงมีรูปทรงลำต้นแบบ heavy-bottom (Ong et al., 2004) รากเหนือดินมีหน้าที่พิเศษที่มีลักษณะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดพืชดังแสดงในภาพ

ที่ 2.5 เพื่อให้พืชสามารถเจริญเติบโตในสภาพแวดล้อมที่เป็นดินอ่อนนุ่มและมีน้ำท่วมถึง (Srikanth et al., 2016) ได้แก่ รากค้ำจุนหรือรากค้ำยัน (prop root) เป็นรากที่แตกมาจากลำต้นแล้วโค้งลงสู่ดินช่วยให้พืชสามารถทรงตัวอยู่ในดินเลนได้ (ภาพที่ 2.5ก) รากพูกอน (buttress root) เจริญมาจากรากแขนงแบบเคเบิลใต้ดินโผล่ขึ้นมาเหนือดินในแนวตั้งมีลักษณะเป็นแผ่นคดเคี้ยวที่ช่วยพยุงลำต้น (ภาพที่ 2.5ข) (Srikanth et al., 2016) รากหัวเข่า (knee root) เป็นรากที่โผล่ขึ้นมาเหนือดินแล้วโค้งกลับลงไปในดินคล้ายหัวเข่า ช่วยในการแลกเปลี่ยนแก๊ส (ภาพที่ 2.5ค) และรากหายใจแบบดินสอด (pneumatophore) เจริญตั้งฉากขึ้นมาจากรากแขนงแบบเคเบิลใต้ดินมีลักษณะเป็นแท่งปลายเรียวแหลม (ภาพที่ 2.5ง และ 2.5จ) ทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนแก๊สเนื่องจากมีช่องว่าง (lenticel) และสามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้เนื่องจากเซลล์ผิวมีการสะสมคลอโรฟิลล์ (เทียมใจ คมกฤษ, 2536)



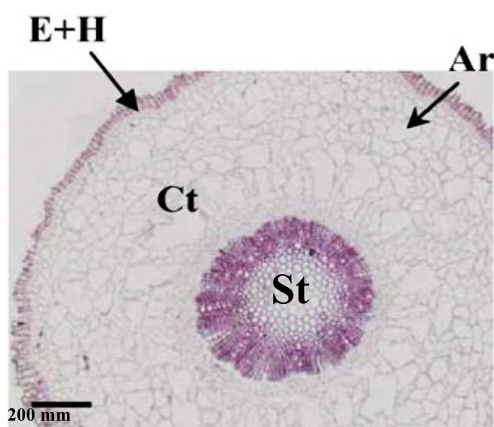
ภาพที่ 2.5 ระบบรากเหนือดินของพันธุ์ไม้ในป่าชายเลน ได้แก่ รากค้ำยันในพืชสกุลโกงกาง (*Rhizophora*) (ก) รากพูกอนในพืชสกุลตะบูน (*Xylocarpus*) (ข) รากหัวเข่า ในพืชสกุลประสัก (*Bruguiera*) (ค) รากหายใจในพืชสกุลลำพู (*Sonneratia*) (ง) และรากหายใจในพืชสกุลแสม (*Avicennia*) (จ) ดัดแปลงจาก Göldenboth และ Schoppe (2006)

สำหรับระบบรากใต้ดินของพืชชายเลนมีบทบาทในการดูดซึมน้ำและธาตุอาหารเช่นเดียวกับรากพืชทั่วไป ประกอบด้วยรากขนาดใหญ่ที่เป็นรากแขนง หรือ รากเคเบิล (cable root) แตกออกจากลำต้นแผ่ในแนวราบใต้ดินทำหน้าที่ช่วยยึดตรึงลำต้นให้ตั้งตรง และรากขนาดเล็กที่ทำหน้าที่ในการดูดซึมน้ำและธาตุอาหาร โดยเฉพาะรากที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร เรียกว่า “รากฝอย” (fine root) (Middleton and McKee, 2001) ที่มีส่วนสำคัญในการดูดซึมน้ำและ

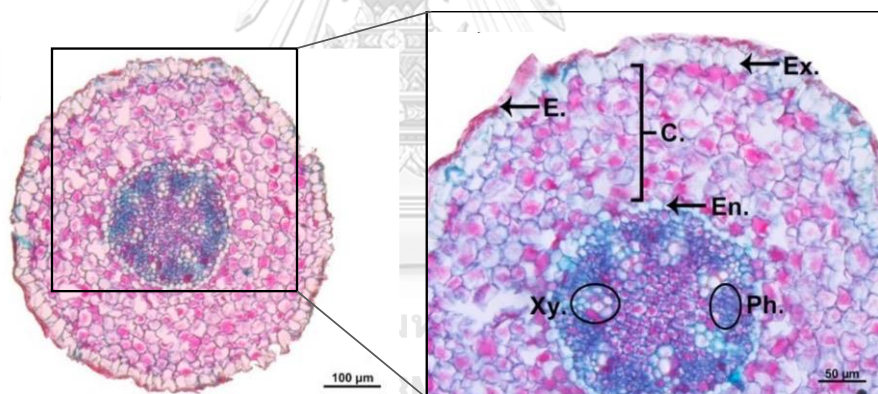


สารอาหารให้พืชนำไปใช้ในการเจริญเติบโต จากการศึกษาของ Komiyama และคณะ (1987) รากฝอยมีมวลชีวภาพสูงถึงร้อยละ 66 ของมวลชีวภาพรากใต้ดินในป่าชายเลน ในระบบนิเวศป่าชายเลน รากฝอยกระจายตัวในชั้นดินตื้น ๆ ในช่วงความลึก 0–30 เซนติเมตร (Muhammad-Nor et al., 2019) อีกทั้งมีความสำคัญในพลวัตของคาร์บอนในดินในระบบนิเวศป่าชายเลน เนื่องจากพืชชายเลนมีผลผลิตรากฝอย (fine root production) สูง (Poungpam et al., 2016) รากฝอยมีอายุขัยสั้น (Torres et al., 2019) และมีอัตราเวียนกลับสูง (Gill and Jackson, 2000) เมื่อรากฝอยเหล่านี้ตาย จะกลายเป็นซากราก (root litter หรือ necromass) และสะสมอยู่ในชั้นดินของป่าชายเลนเป็นปริมาณมาก เนื่องจากดินในป่าชายเลนอยู่ในสภาพไร้ออกซิเจนจึงเกิดการฟุ้งและย่อยสลายต่ำ (Chalermchatwilai et al., 2011) ดังนั้นรากพืชชายเลนโดยเฉพาะรากฝอยมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการกักเก็บคาร์บอนโดยเฉพาะการกักเก็บคาร์บอนในรูปมวลชีวภาพรากและซากราก ที่จะส่งผลต่อการสะสมคาร์บอนในดิน

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของรากของพืชชายเลนพบว่า รากฝอยของพืชชายเลนมีลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ที่เอื้อให้สามารถเจริญในดินที่มีน้ำท่วมขังได้ จากการศึกษา รากฝอยของแสมทะเล (ภาพที่ 2.6) ซึ่งแสมทะเลพบได้ในบริเวณที่ถูกน้ำท่วมบ่อย จากภาพตัดตามขวางของรากฝอยที่ตำแหน่งเหนือปลายราก 8 เซนติเมตร พบชั้นเซลล์รอบนอก คือชั้น epidermis และพบชั้น hypodermis ที่อยู่ถัดเข้ามา ช่วยป้องกันการสูญเสียออกซิเจนจากเนื้อเยื่อราก นอกจากนี้ ในชั้นคอร์เทกซ์ (cortex) ยังมีเนื้อเยื่อ aerenchyma ที่ประกอบด้วยโพรงอากาศ (air space) และเซลล์พาราเอนไคมา เพื่อช่วยในการส่งผ่านออกซิเจนภายในรากให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Pi et al., 2009) นอกจากนี้เซลล์รากของแสมทะเลมีความเข้มข้นของเกลือภายในแควคิวโอลมากเพื่อรักษาสมดุลศักย์ของน้ำ (water potential) ให้เหมาะสมต่อการดูดซึมน้ำจืดจากดิน (Lovelock et al., 2016) ขณะที่รากฝอยของตะบูนขาวที่พบในบริเวณตื้นแผ่นดินและถูกน้ำท่วมบ่อยกว่า มีลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ต่างจากรากฝอยของแสมทะเล จากภาพตัดตามขวางของรากฝอยที่ตำแหน่งเหนือปลายราก 1 เซนติเมตร พบชั้นเซลล์รอบนอก คือชั้น epidermis และชั้น exodermis ซึ่งคือ hypodermis ที่มีแถบ casparian อยู่ถัดเข้ามาเพื่อช่วยควบคุมการเคลื่อนที่ของน้ำและตัวถูกละลายที่เข้าสู่เนื้อเยื่อราก แต่ไม่พบเนื้อเยื่อ aerenchyma ในชั้นคอร์เทกซ์ (ภาพที่ 2.7) (Chorchuhirun et al., 2020)



ภาพที่ 2.6 ภาพตัดขวางรากฝอยของแสมทะเล (*A. marina*) โดย E+H คือ epidermis และ hypodermis, Ar คือ aerenchyma, Ct คือ cortex, St คือ stele และ SW คือ suberized walls ดัดแปลงจาก Pi และคณะ (2009)



ภาพที่ 2.7 ภาพตัดขวางของรากตะบูนขาว (*X. granatum*) โดย E. คือ epidermis Ex. คือ exodermis C. คือ cortex En. คือ endodermis Xy. คือ xylem และ Ph. คือ phloem ดัดแปลงจาก Chorchuhirun และคณะ (2020)

พืชชายเลนตอบสนองต่อปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ผันแปรตามฤดูกาล โดยความเค็มของน้ำในดินที่ผันแปรตามฤดูกาลส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นไม้ในป่าชายเลน ต้นไม้ชายเลนมีอัตราการเติบโตของลำต้นมากในช่วงฤดูฝนภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเค็มต่ำ (Chowdhury et al., 2016; Kankong et al., 2021; Komiyama et al., 2019; Rahman et al., 2020) มีอัตราการผลิใบในช่วงฤดูฝนมากกว่า

ในฤดูแล้ง (Comley and McGuinness, 2005; Kankong et al., 2021; Ochieng and Erfteimeijer, 2002) เนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่มากในฤดูฝนส่งผลให้ความเค็มของน้ำในป่าชายเลนลดลง (Kankong et al., 2021; Komiyama et al., 2019) และในช่วงฤดูฝนพืชชายเลนสามารถดึงน้ำจืดไปใช้ได้ปริมาณที่มากกว่าในฤดูแล้ง (Hayes et al., 2019) นอกจากนี้พบว่ารากฝอยก็มีการตอบสนองต่อปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ผันแปรตามฤดูกาลเช่นเดียวกัน โดยมีผลผลิตสูงในฤดูฝน ซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณน้ำจืดและปริมาณธาตุอาหารที่มาก (Hongwiset et al., 2021; Pongpam et al., 2016)

### 2.1.2 บทบาททางนิเวศวิทยาของป่าชายเลน

#### แหล่งรวบรวมความหลากหลายทางชีวภาพ

ระบบนิเวศป่าชายเลนประกอบด้วยพืชหลายลักษณะวิสัยทั้ง ไม้ยืนต้น เถาวัลย์ พืชอิงอาศัย (epiphytes) ที่เจริญบนลำต้นหรือกิ่งของไม้ยืนต้น สาหร่ายที่อาศัยอยู่ตามระบบรากเหนือดินของพืช สกุลโกงกางและแสม และสาหร่ายที่เจริญอยู่ตามพื้นโคลน (สนธิ อักษรแก้ว, 2542; สรายุทธ บุญยะเวชชีวิน และ รุ่งสุริยา บัวสาลี, 2554) ประกอบกับป่าชายเลนกระจายตัวตามแนวชายฝั่งและปากแม่น้ำเป็นแนวเชื่อมต่อระหว่างระบบนิเวศทางทะเลและระบบนิเวศบก ป่าชายเลนจึงมีถิ่นที่อยู่ (habitat) หลากหลายรูปแบบ ทั้งบริเวณลำต้น ระบบราก และเรือนยอดของพืชชายเลน รวมถึงตามร่องน้ำ ผิวดิน และใต้ดิน และมีบทบาทเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์หลากหลายชนิดจากทั้งสองระบบนิเวศสามารถพบได้ทั้งสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง เช่น ไส้เดือนทะเล ปลิงทะเล หอยแครง หอยขี้กิ้ง เพรียงหิน กุ้ง แม่หอบ ปูแสม แมลง หิ่งห้อย (สนธิ อักษรแก้ว, 2542) กลุ่มสัตว์มีกระดูกสันหลัง ได้แก่ ปลาที่อาศัยอยู่ประจำ ปลาที่อาศัยอยู่ชั่วคราว ปลาที่มากับกระแสน้ำ และปลาที่พบในบางฤดูกาล (Monkolprasit, 1983) สัตว์เลื้อยคลาน เช่น งู กิ้งก่า ตัวเงินตัวทอง และจระเข้ สัตว์ปีก ทั้งนกอพยพ และนกท้องถิ่น สัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนม ได้แก่ ลิง นาก แมวป่า และค่างคาว (สนธิ อักษรแก้ว, 2542)

#### การหมุนเวียนธาตุอาหาร

แหล่งของธาตุอาหารในป่าชายเลนที่สำคัญคือธาตุอาหารภายนอกที่ถูกพัดพาเข้ามาทั้ง กระแสน้ำและซากพืชชายเลนโดยเฉพาะซากรากใต้ดิน เนื่องจากซากใบไม้ที่อยู่ตามผิวดินจะถูก กระแสน้ำพัดพาออกไปจากระบบนิเวศมากโดยเฉพาะในเขตพันธุ์ไม้ที่ใกล้แหล่งน้ำ (วิลานี สุชีวะบริพนธ์, 2553) ดังนั้นธาตุอาหารไม่ได้หมุนเวียนอยู่เฉพาะในระบบนิเวศป่าชายเลน แต่ธาตุอาหารถูกนำเข้าสู่ป่าชายเลนและส่งออกจากป่าชายเลนไปยังระบบนิเวศข้างเคียงได้ (สรายุทธ บุญยะเวชชีวิน และ รุ่งสุริยา บัวสาลี, 2554)

Odum และ Heald (1972) เสนอแบบจำลองที่บ่งบอกว่าป่าชายเลนเป็นส่วนหนึ่งของแหล่งอาหารที่สำคัญของสัตว์ทะเลในพื้นที่ใกล้ชายฝั่ง โดยเฉพาะซากพืชที่ร่วงหล่นในส่วนของใบที่ถูกกระแสน้ำพัดพาออกจากระบบนิเวศป่าชายเลน ส่วนซากพืชที่ยังคงอยู่ในระบบนิเวศตามพื้นป่าจะถูกกัดกินโดยสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่บนพื้นดินและใต้ดิน เช่น หอยฝาเดียว ปู หรือถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ จุลชีพและสัตว์ขนาดเล็กจะถูกกินโดยสัตว์ที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยเฉพาะสัตว์น้ำกลุ่มปลาที่เข้ามาใช้พื้นที่ในระบบนิเวศป่าชายเลน เกิดการส่งธาตุอาหารในระบบนิเวศป่าชายเลน

การปลดปล่อยและการสะสมธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เกิดขึ้นควบคู่ไปกับการสะสมมวลชีวภาพของพืช (คาร์บอนอินทรีย์) การย่อยสลายของซากพืชและสัตว์ กิจกรรมของจุลินทรีย์ การบริโภคซากของสัตว์หน้าดิน การขึ้นลงของน้ำทะเล และกระบวนการชะล้าง โดยการหมุนเวียนไนโตรเจนจะเกิดผ่านวัฏจักรไนโตรเจนผ่านกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะมีทั้งไนโตรเจนรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้และไนโตรเจนรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้ที่สะสมอยู่ในดิน ส่วนฟอสฟอรัสมีการสะสมผ่านกระบวนการตกตะกอนและถูกพืชดูดซึมไปใช้ได้เมื่อฟอสฟอรัสถูกเปลี่ยนเป็นฟอสเฟตโดยจุลินทรีย์ นอกจากนั้นแล้วไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และคาร์บอนบางส่วนจะถูกชะล้างและนำออกจากป่าชายเลนผ่านการขึ้นลงของน้ำทะเล ดังนั้นสารอาหารบางส่วนสามารถถูกนำออกจากระบบนิเวศป่าชายเลนได้โดยกระแสน้ำ ส่งผลให้ธาตุอาหารที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ได้มีปริมาณน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งไนโตรเจนกับฟอสฟอรัสที่มีรายงานว่ามีเป็นปัจจัยจำกัดการเจริญเติบโตของพืชชายเลน (Alongi, 2018; Reef et al., 2010)

### แหล่งกักเก็บคาร์บอนสำคัญของโลก

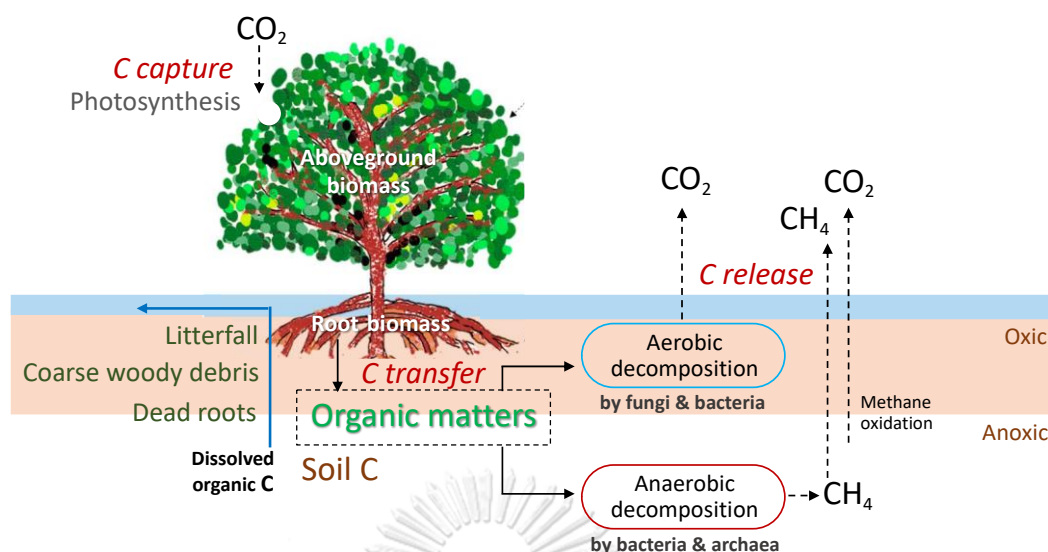
การสังเคราะห์ด้วยแสงและผลผลิตปฐมภูมิ (primary production) เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของการไหลเวียนคาร์บอนในระบบนิเวศป่าชายเลน โดยมีพืชในป่าชายเลนเป็นผู้ผลิต (producer) เมื่อพืชชายเลนตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง คาร์บอนจะถูกสะสมในมวลชีวภาพพืช (plant biomass) (สรายุธ บุณยะเวชชีวิน และรุ่งสุริยา บัวสาลี, 2554) ระบบนิเวศป่าชายเลนมีผลผลิตขั้นปฐมภูมิสุทธิสูง (NPP) (Kamruzzaman et al., 2017; Komiyama et al., 2008; Pongparn et al., 2020) ประกอบกับกระบวนการย่อยสลายซากพืชในระบบนิเวศป่าชายเลนเกิดขึ้นได้ช้าภายใต้สภาวะที่ดินมีน้ำท่วมขัง (MacKenzie et al., 2021) ทำให้ระบบนิเวศป่าชายเลนจัดเป็น “vegetated blue carbon” ที่สำคัญของโลก (Mcleod et al., 2011) ซึ่งมีบทบาทในการเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนที่สำคัญอย่างยิ่งทางทะเลและชายฝั่งในระยะยาว (Macreadie et al., 2019; Spivak et al., 2019)

## 2.2 การย่อยสลายซากพืชในป่าชายเลน

การย่อยสลายซากพืช (plant litter decomposition) เป็นกระบวนการที่ซากพืชทั้งส่วนเหนือดินและรากใต้ดินหรืออินทรีย์วัตถุ (organic matter) ถูกทำให้เป็นอนุภาคขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ อาจเป็นโมเลกุลพื้นฐานของสารอินทรีย์ เช่น น้ำ ( $H_2O$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งสารประกอบอินทรีย์จากการย่อยสลายจะคงอยู่ในดินหรืออาจละลายไปกับน้ำ การย่อยสลายซากพืชประกอบด้วย 3 กระบวนการหลัก คือ การชะล้าง (leaching) ทำให้สารประกอบที่ละลายน้ำได้จากซากพืชไหลสู่ดิน การแตกหักเป็นชิ้นเล็ก ๆ (fragmentation) ของซากพืช และการเกิดกระบวนการย่อยทางเคมี (catabolism) โดยจุลินทรีย์ที่เป็นผู้ย่อยสลาย (decomposer) (Cotrufo et al., 2010) และมีปัจจัยหลักที่ควบคุมกระบวนการย่อยสลายของซากพืชเมื่อเวลาผ่านไป ได้แก่ คุณภาพของซากพืช (litter quality) ผู้ย่อยสลาย (decomposer) และปัจจัยสิ่งแวดล้อมทางกายภาพและทางเคมี (Swift et al., 1979)

### 2.2.1 กระบวนการย่อยสลายในป่าชายเลน

กระบวนการย่อยสลายของซากพืชเป็นกลไกสำคัญในการหมุนเวียนคาร์บอนในระบบนิเวศ (Liu et al., 2017) ซึ่งวัฏจักรคาร์บอนในระบบนิเวศป่าชายเลนดังแสดงในภาพที่ 2.8 เริ่มจากพืชชายเลนตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง คาร์บอนอินทรีย์เปลี่ยนเป็นคาร์บอนอินทรีย์ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของมวลชีวภาพพืช (plant biomass) เมื่อส่วนต่าง ๆ ของพืชตายลงจะกลายเป็นซากพืชร่วงหล่นลงบนผิวดิน ส่วนใหญ่ซากใบไม้และกิ่งขนาดเล็กมักถูกพัดพาออกจากป่าชายเลน โดยคาร์บอนอินทรีย์ในส่วนเหนือดิน ได้แก่ ใบไม้ กิ่ง ก้าน ลำต้น จะถูกส่งผ่านไปยังดินและนำออกจากระบบนิเวศ ขณะที่ซากพืชส่วนใต้ดิน คือ ซากรากใต้ดินของพืชชายเลนจะสะสมอยู่ในดิน คาร์บอนอินทรีย์ในส่วนนี้จะส่งผ่านไปยังดินและเป็นส่วนหนึ่งของคาร์บอนในดิน เมื่อเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ผู้ย่อยสลายจะเกิดการปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อีกส่วนหนึ่งสะสมในดินและบางส่วนถูกนำออกจากป่าชายเลนโดยการละลายไปกับน้ำทะเลที่เข้าท่วม (สรายุทธ บุญยะเวชชีวิน และ รุ่งสุริยา บัวสาลี, 2554; Ouyang et al., 2017) อย่างไรก็ตามในป่าชายเลนมักพบว่าการย่อยสลายซากพืชส่วนใต้ดินเกิดขึ้นช้ากว่าซากพืชส่วนเหนือดิน (Middleton and McKee, 2001; Van der Valk and Attiwill, 1984) แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของระบบนิเวศป่าชายเลนในการเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนโดยเฉพาะคาร์บอนส่วนใต้ดิน



ภาพที่ 2.8 แผนภาพการหมุนเวียนคาร์บอนและการย่อยสลายของซากพืชส่วนใต้ดินในระบบนิเวศป่าชายเลน ดัดแปลงจาก Shiau และ Chiu (2020)

### 2.2.2 การย่อยสลายของซากพืชชายเลน

การย่อยสลายของซากพืชชายเลนเป็นกระบวนการสำคัญที่ส่งผ่านคาร์บอนจากพืชสู่ดิน อีกทั้งปลดปล่อยคาร์บอนอินทรีย์ในดินให้เป็นคาร์บอนอินทรีย์สู่บรรยากาศดังแสดงในภาพที่ 2.8 เมื่อซากพืชตายลงจะสะสมอยู่ในดินเป็นซากรากและฟุ้งเกิดเป็นอินทรีย์วัตถุ (organic matter) โดยซากรากในชั้นดินระดับตื้นที่มีออกซิเจนจะเกิดกระบวนการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจน (aerobic decomposition) โดยสิ่งมีชีวิตกลุ่มแบคทีเรียและเห็ดรา ปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ ส่วนซากรากที่อยู่ในดินระดับลึกที่ไม่มีออกซิเจนจะเกิดกระบวนการย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic decomposition) โดยสิ่งมีชีวิตกลุ่มแบคทีเรียและแบคทีเรียโบราณเกิดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนสู่บรรยากาศดังภาพที่ 2.8 (Shiau and Chiu, 2020)

การย่อยสลายของซากพืชในป่าชายเลนเกิดขึ้นช้ากว่าการย่อยสลายของซากพืชในป่าบกในเขตละติจูดที่ใกล้เคียงกัน (Huxham et al., 2010) โดยพบว่าซากพืชชายเลนสูญเสียมวลผ่านการย่อยสลายประมาณร้อยละ 50 ต่อปี แสดงให้เห็นว่าซากรากพืชชายเลนอีกประมาณร้อยละ 50 ยังคงสะสมอยู่ในดิน บ่งบอกถึงการเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนในดินที่สำคัญ (Macreadie et al., 2019; Spivak et al., 2019)

### 2.2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายรากพืชในป่าชายเลน

ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการย่อยสลายของซากพืชที่เกิดขึ้นในป่าชายเลน ได้แก่ คุณภาพของซากพืช ผู้ย่อยสลาย และปัจจัยสิ่งแวดล้อม โดยจะส่งผลให้เกิดกระบวนการย่อยสลายที่มีรูปแบบแตกต่างกัน

#### คุณภาพของซากพืช

คุณภาพของซากพืชเป็นปัจจัยทางชีวภาพที่ถูกกำหนดโดยลักษณะเชิงปริมาณของรากพืชที่ส่งผลต่อการย่อยสลายของรากพืช เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก โดยรากพืชชายเลนที่มีขนาดเล็กกว่าจะเกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่ารากขนาดใหญ่ (Berg and McClaugherty, 2008; Huxham et al., 2010) ลักษณะการมีเนื้อไม้ของราก รากพืชที่ยังไม่มีการสร้างเนื้อไม้จะเกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่ารากที่มีการสร้างเนื้อไม้ (Berg and McClaugherty, 2008) ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของราก (root anatomical characters) อาจมีผลต่อการย่อยสลายของราก โดย Ola และคณะ (2019) พบว่ารากค้ำยันของ *Rhizophora stylosa* ที่เจริญในดินที่มีความหนาแน่นดินสูงจะมีพื้นที่เนื้อเยื่อ aerenchyma น้อยกว่ารากค้ำยันที่เจริญในดินที่หนาแน่นน้อยกว่า ซึ่งความผันแปรของพื้นที่เนื้อเยื่อ aerenchyma นี้ อาจส่งผลต่อการสร้างโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรง เช่น เส้นใย (fiber) ซึ่งอาจส่งผลต่อการย่อยสลายของเนื้อเยื่อรากได้

ชนิดของพืชมีอิทธิพลต่อคุณภาพของซากพืช โดยพืชชายเลนแต่ละชนิดมีการเรียงตัวของเนื้อเยื่อและชั้นเซลล์ที่มีสารประกอบเชิงโครงสร้างต่างกัน เช่น การปรากฏของเนื้อเยื่อ aerenchyma ชั้นเซลล์ที่มีสารซูเบอร์อินหรือลิกนิน ในชั้น endodermis (Pi et al., 2009) โดยลักษณะดังกล่าวนี้เองเกี่ยวข้องกับคุณภาพของซากรากพืช แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างของลักษณะเนื้อเยื่อของรากพืชชายเลนแต่ละชนิดกับการย่อยสลายของรากโดยตรง

ปริมาณธาตุอาหารและสารประกอบเชิงโครงสร้างในเนื้อเยื่อรากมีผลต่อการย่อยสลายของรากพืชชายเลน โดยเฉพาะไนโตรเจน ตัวอย่างเช่นการศึกษาของ Ola และ Lovelock (2021) ที่พบว่าเนื้อเยื่อรากฝอยของ *R. stylosa* มีปริมาณไนโตรเจนน้อยกว่าแสมทะเล (*A. marina*) อีกทั้งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) มากกว่าจึงถูกย่อยสลายได้ช้ากว่า ซึ่ง C:N ratio เป็นอัตราส่วนขององค์ประกอบทางเคมีในซากพืชที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตและปฏิกิริยาเมแทบอลิซึมของแบคทีเรีย (Brust, 2019; Salin and Vinh, 2023) ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการปลดปล่อย (mineralization) และตรึง (immobilization) ไนโตรเจน นอกจากนี้ปริมาณของสารประกอบเชิงโครงสร้างในเนื้อเยื่อราก เช่น ลิกนิน ซึ่งเป็นสารที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนก็ส่งผลต่อการย่อยสลายของราก โดยรากฝอยของ *R. stylosa* ที่มีอัตราส่วนลิกนินต่อเซลลูโลสสูงกว่าแสมทะเลถูกย่อยสลายได้ช้ากว่า (Ola and Lovelock, 2021)

### ผู้ย่อยสลาย

ผู้ย่อยสลายเป็นอีกหนึ่งปัจจัยทางชีวภาพที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายในป่าชายเลน ประกอบด้วยจุลชีพในกลุ่มแบคทีเรีย แบคทีเรียโบราณ และเห็ดรา โดยเฉพาะกลุ่มจุลชีพในดินมีบทบาทสำคัญต่อการย่อยสลายรากพืช และการหมุนเวียนคาร์บอนในป่าชายเลน (สรายุทธ บุญยะเวชชีวิน และ รุ่งสุริยา บัวสาลี, 2554; McKenzie et al., 2021) เนื่องจากจุลชีพต้องการสมดุลของคาร์บอนและไนโตรเจนที่เหมาะสมเพื่อการเจริญเติบโต ดังนั้นอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในซากพืชเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการย่อยสลายโดยจุลชีพ (Akratos et al., 2017) ซึ่งกิจกรรมของจุลชีพในดินที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายรากพืชในป่าชายเลนนั้นได้รับอิทธิพลจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมภายในป่าชายเลน

### ปัจจัยสิ่งแวดล้อม

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายรากพืชในป่าชายเลน โดยมีรายงานว่าซากรากถูกย่อยสลายได้เร็วในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิที่สูงกว่า (Ouyang et al., 2017; บัณชुरย์ เฉลิมฉัตรวิไล, 2553) อุณหภูมิมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอัตราการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการหายใจของดิน (soil respiration) (Poungparn et al., 2009) ที่เป็นกระบวนการที่สะท้อนถึงกิจกรรมของจุลชีพในดินที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายของราก อุณหภูมิของดินผันแปรตามฤดูกาลในสภาพภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อน โดยขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำที่เข้าท่วมในป่าชายเลน

ความเค็มก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อกิจกรรมของจุลชีพในดิน โดยความเค็มของน้ำในดินที่สูงจะยับยั้งกิจกรรมของจุลชีพในดิน ความเค็มของน้ำในดินจึงมีความสัมพันธ์เชิงลบต่อกระบวนการย่อยสลายของรากพืชชายเลน (MacKenzie et al., 2021; Ouyang et al., 2017) ความเค็มของน้ำในดินมีความผันแปรตามฤดูกาลเช่นเดียวกับอุณหภูมิ โดยได้รับอิทธิพลจากความเค็มของน้ำที่เข้าท่วมและปริมาณน้ำจืดที่ได้รับ

ช่วงเวลาที่น้ำท่วม (inundation period) ส่งผลต่อปริมาณ ออกซิเจนในดิน และค่าศักย์รีดอกซ์ (redox potential, Eh) ที่สามารถสะท้อนสภาพไร้ออกซิเจนของดิน โดยดินที่ถูกน้ำท่วมนานส่งผลให้การย่อยสลายของรากเกิดขึ้นได้ช้า (Poret et al., 2007) และค่าศักย์รีดอกซ์ของดินที่มีค่าติดลบมากแสดงถึงสภาพไร้ออกซิเจนของดินที่ไปยับยั้งกิจกรรมของจุลชีพและการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายรากพืช (Poret et al., 2007; Brzezinska, 2004)

ปริมาณน้ำฝนเป็นปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่สัมพันธ์กับความเค็มของน้ำในดินและสภาวะที่ดินถูกน้ำท่วม โดยปริมาณน้ำฝนที่มากสามารถส่งเสริมการย่อยสลายของรากภายใต้สภาวะความเค็มของ



น้ำในดินต่ำ แต่อย่างไรก็ตามดินที่ถูกน้ำท่วมขังนานเนื่องจากปริมาณน้ำฝนมากอาจทำให้การย่อยสลายซากเกิดขึ้นช้าได้ (MacKenzie et al., 2021)

ปริมาณธาตุอาหารในดิน โดยเฉพาะไนโตรเจนที่ส่งผลต่อการย่อยสลายของรากในป่าชายเลน การย่อยสลายของรากในดินที่มีความเข้มข้นไนโตรเจนสูงจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่า เนื่องจากไนโตรเจนช่วยกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ในดิน (Averill and Waring, 2018; Poret et al., 2007)

เนื่องจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมในป่าชายเลนนั้นมีความผันแปรตามฤดูกาล ซึ่งอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้กระบวนการย่อยสลายรากในป่าชายเลนมีความเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งป่าชายเลนที่อยู่ภายใต้สภาพภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อนที่มีความผันแปรของความเค็มและปริมาณน้ำฝนที่ชัดเจน

## 2.3 วิธีการศึกษาการย่อยสลายของรากพืชในป่าชายเลน

การศึกษาการย่อยสลายรากยังมีรายงานน้อยเมื่อเทียบกับการย่อยสลายของส่วนเหนือดิน เนื่องจากการย่อยสลายของรากที่อยู่ใต้ดินนั้นตรวจสอบได้ยากและการประมาณอัตราการย่อยสลายของรากนั้นอาจมีความแปรผันสูงเนื่องจากวิธีการที่อาจรบกวนกระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้นในดิน (Berg and McClaugherty, 2008) โดยวิธีการศึกษาการย่อยสลายของรากพืชในป่าชายเลนมีดังนี้

### 2.3.1 วิธีการถุงย่อยสลาย

วิธีการถุงย่อยสลาย (litterbag method) เป็นการฝังถุงตาข่ายที่บรรจุส่วนของพืชที่ทราบน้ำหนักเริ่มต้นและบันทึกน้ำหนักของพืชที่เหลืออยู่ในแต่ละระยะเวลาของการย่อยสลาย เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดซึ่งคิดเป็นร้อยละ 87 ของวิธีการศึกษาการย่อยสลายรากพืชทั้งหมด (Silver and Miya, 2001) ขนาดตาข่ายของถุงที่บรรจุมีตาถี่ตั้งแต่ 0.05 ถึง 5.0 มิลลิเมตร โดยขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากที่ศึกษา เช่น การศึกษาการย่อยสลายของรากฝอย (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง <2 มิลลิเมตร) บรรจุในถุงขนาดตาถี่ 0.05 มิลลิเมตร (Hobbie et al., 2010) หรือขนาดตาถี่ 1.0 มิลลิเมตร (Mun and Whitford, 1997) ส่วนรากขนาดใหญ่ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง >5 มิลลิเมตร) บรรจุในถุงขนาดตาถี่ 4.0 มิลลิเมตร (Scheu and Schauer mann, 1994) ซึ่งการบรรจุรากในถุงตาข่ายนี้จะขัดขวางไม่ให้สัตว์ที่อาศัยอยู่ในดิน เช่น ตัวอ่อนแมลง กิ้งกือ และปู เข้ามากัดกินรากภายในถุงได้ จึงสามารถสะท้อนการย่อยสลายของรากพืชที่เกิดโดยจุลินทรีย์ในดินและสามารถใช้วิธีนี้ในการเปรียบเทียบการย่อยสลายรากพืชภายใต้สภาพแวดล้อมทางดินที่แตกต่างกันได้ (Ashton et al., 1999) แต่อย่างไรก็ตามหากขนาดตาข่ายของถุงย่อยสลายมีขนาดเล็กเกินไปจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมในระดับจุลภาคภายในถุงย่อยสลาย ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจาก

สภาพแวดล้อมตามธรรมชาติได้ (Hutchinson and Robinson, 1990; Virzo De Santo et al., 2009)

ระยะเวลาของการฝังงูย้อยสลายเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญในการศึกษาการย่อยสลายรากในป่าชายเลนที่ควรพิจารณาเบื้องต้นก่อนวางแผนการทดลอง โดยอ้างอิงจากแนวโน้มของการย่อยสลายของรากและปัจจัยสิ่งแวดล้อมในป่าชายเลน เมื่อฝังงูย้อยสลายรากทิ้งไว้เป็นเวลานาน การย่อยสลายจะเกิดช้าลงเรื่อย ๆ เนื่องจากองค์ประกอบในรากส่วนที่จุลชีพสามารถใช้ประโยชน์ได้ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็ว และคงเหลือเฉพาะองค์ประกอบที่ย่อยสลายยากในราก เช่น ลิกนิน (Harmon et al., 2009) นอกจากนี้ยังพบรากฝอยที่เกิดขึ้นใหม่เจริญเข้าไปด้านในงูย้อยสลายได้ด้วย ซึ่งจะส่งผลให้น้ำหนักของพืชที่เหลืออยู่ในแต่ละระยะเวลาของการย่อยสลายนั้นเพิ่มขึ้นจากน้ำหนักตั้งต้น และทำให้การประมาณอัตราการย่อยสลายคลาดเคลื่อนได้

ดังนั้นการศึกษากการย่อยสลายรากพืชโดยใช้วิธีการงูย้อยสลาย จำเป็นต้องคำนึงถึงขนาดตาถ้ำของงูย้อยสลายที่สอดคล้องกับขนาดรากพืชที่ต้องการศึกษา และระยะเวลาของการศึกษากการย่อยสลายให้สอดคล้องกับแนวโน้มการย่อยสลายของรากนั้น ๆ ตามธรรมชาติ เพื่อให้สามารถนำข้อมูลมาคำนวณหาอัตราการย่อยสลายได้อย่างถูกต้องต่อไป

อัตราการย่อยสลาย (decomposition rate,  $k$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ negative exponential ที่เสนอโดย Olson (1963) ที่มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายและมีรูปแบบการที่ดัดแปลง (Twilley et al., 1997) ดังนี้

$$M_t = M_0 e^{-kt}$$

เมื่อ  $M_0$  คือ ร้อยละน้ำหนักเริ่มต้น  
 $M_t$  คือ ร้อยละน้ำหนักที่เหลือจากการย่อยสลายเมื่อเวลาผ่านไป  $t$   
 $t$  คือ ระยะเวลาในการย่อยสลาย  
 $k$  คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของอัตราการย่อยสลาย

สมการดังกล่าวถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษาการย่อยสลายซากพืชทั้งซากใบและซากรากพืชจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากสามารถแทนค่าในสมการได้จากผลการศึกษาด้วยวิธีการงูย้อยสลาย นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอสมการรูปแบบอื่น ๆ ที่ซับซ้อนขึ้น เพื่อคำนวณอัตราการย่อยสลายของซากพืช เช่น Weibull residence time model (Fréchet, 1927) และ two-stage (double exponential) model (McClaugherty et al., 1984)

การศึกษากการย่อยสลายรากพืชในป่าชายเลนนิยมใช้วิธีการงูย้อยสลาย (Huxham et al., 2010; Marley et al., 2019; Ola and Lovelock, 2021; Ouyang et al., 2017; Partain, 2019; Poret et al., 2007; บัณฑูรย์ เฉลิมฉัตรวิไล, 2553) โดยการศึกษาของบัณฑูรย์ เฉลิมฉัตรวิไล

(2553) ในป่าชายเลนปากแม่น้ำตราดได้ดัดแปลงวิธีการศึกษา โดยนำถุงย่อยสลาย ขนาดตาถี่ 1 มิลลิเมตร ที่บรรจุรากฝอย ประคบด้วยแผ่นตาข่ายพลาสติกขนาดตาถี่ 4 มิลลิเมตร และยึดกับ ตะเกียบพลาสติกทั้งสองข้างของตาข่ายเพื่อให้ถุงย่อยสลายสามารถคงอยู่ในดินเลนที่อ่อนนุ่มได้และ เพื่อตรึงให้ถุงย่อยสลายอยู่ในแนวตั้งฉากที่ระดับความลึกสอดคล้องกับการกระจายตัวของรากพืชชายเลนที่ต้องการศึกษา ถึงแม้ว่าการศึกษากการย่อยสลายโดยวิธีการถุงย่อยสลายนี้เป็นที่นิยมนำมาใช้ในการศึกษาการย่อยสลายของราก แต่มีข้อจำกัดคือต้องขุดรากปริมาณมากเพื่อเตรียมตัวอย่าง ซึ่งเป็นการรบกวนทั้งพืชและดิน และใช้เวลาในการเตรียมตัวอย่างมาก ต่อมาจึงมีการพัฒนาวิธีอื่นที่สามารถศึกษาการย่อยสลายของรากในระบบนิเวศทั่วโลกได้โดยพัฒนาให้เป็นมาตรฐานเดียวกันและใช้เวลาในการเตรียมตัวอย่างน้อยลง

### 2.3.2 ดชนีถุงชา

ดัชนีถุงชา หรือ Tea Bag Index (TBI) เป็นวิธีการมาตรฐานสำหรับการศึกษาอัตราการย่อยสลายของซากพืชที่ถูกเสนอโดย Keuskamp และคณะ (2013) โดยอาศัยหลักการที่เปรียบเทียบความแตกต่างของการย่อยสลายของใบชาแห้งที่มีจำหน่ายทั่วไป ได้แก่ ชาเขียว *Camellia sinensis* (Lipton green tea) ซึ่งสะท้อนถึงการย่อยสลายที่เกิดขึ้นรวดเร็ว และชาออยบอส *Aspalathus linearis* (Lipton rooibos tea) ซึ่งสะท้อนถึงการย่อยสลายที่เกิดอย่างช้า ๆ ในระยะเวลา 90 วัน ใบชาที่บรรจุอยู่ในถุงชาที่มีลักษณะเป็นถุงตาข่ายจะสะท้อนการย่อยสลายซากพืชที่เกิดจากจุลินทรีย์ในดิน ที่สามารถนำมาคำนวณอัตราการย่อยสลาย (k) ของใบชาได้จากสมการ negative exponential นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงคาร์บอนในการย่อยสลายของใบชาทั้งสองชนิดใน TBI ยังสามารถนำมาเทียบกับการย่อยสลายในซากพืชอื่น ๆ ได้ (Duddigan et al., 2020) ดังนั้นการย่อยสลายของใบชาในวิธีนี้จึงสามารถใช้เป็นตัวแทนของการย่อยสลายซากพืชอื่น ๆ ในระบบนิเวศตามธรรมชาติได้โดยไม่ต้องเตรียมตัวอย่างพืชตั้งต้นในปริมาณมาก

วิธีดัชนีถุงชาจึงเป็นที่นิยมใช้เพื่อศึกษาการย่อยสลายในพื้นที่กว่า 2,000 แห่งทั่วโลก (Duddigan et al., 2020) เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถทำได้ง่าย ราคาถูก โดยสามารถใช้ถุงชาที่มีจำหน่ายทั่วไปเป็นถุงชาศึกษามาตรฐาน นอกจากนี้วิธีดัชนีถุงชาสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทดลองภาคสนามสำหรับเป็นชุดอ้างอิง โดยใช้เปรียบเทียบการย่อยสลายในระบบนิเวศต่าง ๆ หรือในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน เนื่องจากมีซากพืชตั้งต้น (ใบชา) ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน (Keuskamp et al., 2013) อีกทั้งในปัจจุบันมีการใช้ศึกษาการย่อยสลายในพื้นที่ชุ่มน้ำและระบบนิเวศป่าชายเลนเพิ่มขึ้น (Marley et al., 2019; Partain, 2019; Simpson et al., 2021) นอกจากนี้อัตราการย่อยสลายของรากฝอยสามารถประมาณได้จากรูปแบบการย่อยสลายของใบชาเขียวที่มีการย่อยสลายอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป (Kriiska et al., 2021)

### 2.3.3 มินิไรโซทรอน

มินิไรโซทรอน (minirhizotron) เป็นวิธีการศึกษารากพืชโดยการติดตั้งท่ออะคริลิกใสในแนวตั้งฉากหรือทำมุมองศาต่าง ๆ กับผิวดิน แล้วใช้กล้องหรือสแกนเนอร์บันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงของรากในดินเพื่อการศึกษาพลวัตของราก วิธีมินิไรโซทรอนนี้ส่งผลกระทบต่อรากพืชน้อย สามารถทำซ้ำและติดตามการเปลี่ยนแปลงได้เป็นระยะเวลาสั้น โดยสามารถนำมาใช้เพื่อศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยได้โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงความยาวและการหายไปของรากฝอยจากภาพที่บันทึกได้ในแต่ละเวลา (Brown and Upchurch, 1987; Majdi, 1996) แต่อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อจำกัดในการติดตั้งในพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีสภาพดินมีน้ำท่วมขังและสังคมพืชที่มีลักษณะเฉพาะ Iversen และคณะ (2012) จึงได้เสนอแนวทางและความเป็นไปได้ในการติดตั้งมินิไรโซทรอนและการวิเคราะห์พลวัตของรากพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าสามารถใช้มินิไรโซทรอนสำหรับศึกษาพลวัตของรากพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำได้และยังเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพอีกด้วย เมื่อไม่นานมานี้เริ่มมีการนำมินิไรโซทรอนมาใช้ศึกษาพลวัตของรากพืชในระบบนิเวศป่าชายเลน ในประเทศเวียดนาม (Arnaud et al., 2021) แต่ค่าที่ได้จากมินิไรโซทรอนอาจไม่สามารถสะท้อนอัตราการย่อยสลายของรากพืชชายเลนได้โดยตรงเนื่องจากเป็นการบันทึกภาพของรากที่สูญหายไปทั้งหมดและไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าเกิดจากการถูกกัดกินหรือการย่อยสลาย

### 2.3.4 การติดตามด้วยไอโซโทป (isotope)

การย่อยสลายของรากฝอยสามารถตรวจสอบผ่านการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนไอโซโทป  $^{13}\text{C}$  และไนโตรเจนไอโซโทป  $^{15}\text{N}$  ซึ่งเป็นไอโซโทปที่มีความเสถียรในธรรมชาติ โดยการติดตาม  $^{13}\text{C}$  และ  $^{15}\text{N}$  ในภาคสนาม ร่วมกับการวิเคราะห์ทางโอมิกส์และเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรีเพื่อติดตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายซากพืชโดยจุลินทรีย์ที่อยู่บริเวณรอบ ๆ ราก (rhizosphere) (Beidler and Pritchard, 2017) การติดตามไอโซโทปของคาร์บอนและไนโตรเจนถูกนำไปใช้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารอาหารในกระบวนการย่อยสลายของซากใบไม้ในระบบนิเวศหญ้าทะเลและป่าชายเลนบริเวณอ่าวฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา (Fourqurean and Schrlau, 2003) อย่างไรก็ตามการนำเทคนิคการติดตามไอโซโทปเพื่อศึกษาการย่อยสลายของรากในป่าชายเลนนั้นยังมีอยู่จำกัด

สำหรับการศึกษาการย่อยสลายรากพืชชายเลนนิยมศึกษาในรากฝอยที่มีผลผลิตสูงและมีอัตราการเวียนกลับสูง (Joslin et al., 2006) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการส่งผ่านคาร์บอนในระบบนิเวศป่าชายเลน โดยการศึกษาของบัณฑูร์ย์ เกลิมฉัตรวิไล (2553) พบว่าอัตราการย่อยสลายของรากฝอยในป่าชายเลนปากแม่น้ำ จังหวัดตราด (0.003-0.004 ต่อวัน) มีค่าต่ำกว่าในป่าบก (dry tropical

bamboo savanna) ประเทศอินเดีย (0.005 ต่อวัน) ซึ่งอยู่ในเขตร้อนเหมือนกัน การย่อยสลายที่เกิดขึ้นเป็นเพราะกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายถูกยับยั้งภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในดินที่ถูกน้ำท่วมและขาดสารอาหารจากภายนอก (Middleton and McKee, 2001) นอกจากนี้มีรายงานว่า การย่อยสลายรากฝอยในแต่ละเขตพันธุ์ไม้ในป่าชายเลนแห่งเดียวกันมีความแตกต่างกัน จากการศึกษาในป่าชายเลนปากแม่น้ำ จังหวัดตราด ที่ประกอบด้วย 3 เขตพันธุ์ไม้ คือ เขตพันธุ์ไม้แสมบริเวณริมแม่น้ำ เขตพันธุ์ไม้โกงกาง และเขตพันธุ์ไม้ตะบูนบริเวณด้านในติดแผ่นดิน พบว่าการย่อยสลายของรากฝอยในเขตพันธุ์ไม้แสมเกิดเร็วกว่าในเขตพันธุ์ไม้โกงกางและเขตพันธุ์ไม้ตะบูน เนื่องจากแต่ละเขตพันธุ์ไม้มีปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายรากพืชที่แตกต่างกันทั้งปัจจัยทางชีวภาพและกายภาพ (บัณฑิตขุรักษ์ เฉลิมฉัตรวิไล, 2553) การศึกษาของ Ola และ Lovelock (2021) พบว่าเนื้อเยื่อรากฝอยของ *R. stylosa* มีค่า C:N ratio มากกว่าแสมทะเล (*A. marina*) โดยมีค่าประมาณ 50 และ 30 ตามลำดับ รากฝอยของแสมทะเลจึงถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าเนื่องจาก C:N ratio ต่ำกว่า เช่นเดียวกับการศึกษาของบัณฑิตขุรักษ์ เฉลิมฉัตรวิไล (2553) ในป่าชายเลนปากแม่น้ำตราด ที่พบว่าเนื้อเยื่อรากฝอยของ *Rhizophora* sp. มีค่า C:N ratio ประมาณ 67 ซึ่งมากกว่าของ *A. alba* ที่มีค่าประมาณ 50 สอดคล้องกับการย่อยสลายของรากฝอยของ *A. alba* ที่มีค่ามากกว่า *Rhizophora* sp. แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ผันแปรตามฤดูกาลที่อาจส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายของรากฝอยในระบบนิเวศป่าชายเลนซึ่งเป็นองค์ความรู้ส่วนสำคัญในการประเมินอัตราส่วนคาร์บอนในวัฏจักรคาร์บอนของระบบนิเวศป่าชายเลน

## บทที่ 3

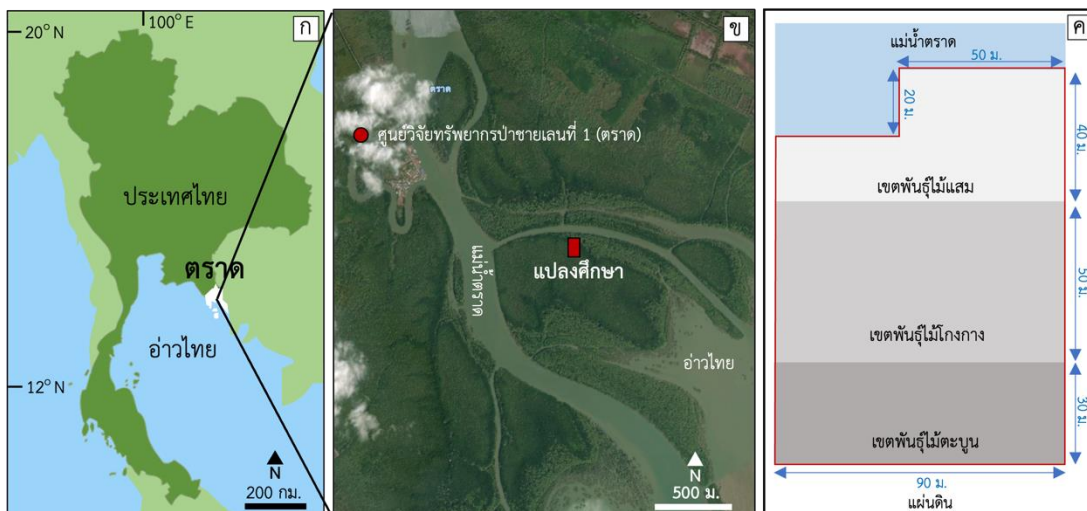
### วิธีการดำเนินการศึกษา

#### 3.1 พื้นที่ศึกษา

##### 3.1.1 ที่ตั้งของพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาเป็นป่าชายเลนตั้งอยู่บริเวณปากแม่น้ำตราด ตำบลวังกระแจะ อำเภอเมือง จังหวัดตราด (E102°33', N12°12') ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (ภาพที่ 3.1ก) จังหวัดตราดมีพื้นที่ 2,819 ตารางกิโลเมตร แบ่งออกเป็น 7 อำเภอ โดยมีป่าชายเลนอยู่ในพื้นที่ 6 อำเภอ คิดเป็นพื้นที่ 9,553.37 เฮกตาร์ (สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน, 2561) ในอดีตพื้นที่ป่าชายเลนส่วนใหญ่ในจังหวัดตราดถูกรบกวนโดยกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ไปทำการเกษตร ทำนาเกลือ ทำเหมืองแร่ ทำเทียบเรือ และการตัดไม้สำหรับใช้เป็นสิ่งปลูกสร้างและเชื้อเพลิง ก่อนที่จะได้รับการจัดการโดยกรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งของประเทศไทย โดยปล่อยให้มีการฟื้นฟูโดยธรรมชาติ (Pleeklam et al., 2016) ดังนั้นพื้นที่ป่าชายเลนส่วนใหญ่ในปัจจุบันจึงจัดเป็นป่าชายเลนรุ่นสอง (secondary mangrove forest)

การศึกษาครั้งนี้เก็บข้อมูลในพื้นที่แปลงศึกษาถาวรขนาด 1 เฮกตาร์ ตั้งอยู่ในป่าชายเลนปากแม่น้ำตราด (ภาพที่ 3.1ก) จัดตั้งตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2547 โดยหน่วยปฏิบัติการพฤกษนิเวศวิทยา ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใต้การดูแลของศูนย์วิจัยและพัฒนาทรัพยากรป่าชายเลนที่ 1 (ตราด) กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ลักษณะสังคมพืชในแปลงศึกษาถาวรนี้มีการแบ่งเขตพันธุ์ไม้ (zonation) ตามพันธุ์ไม้เด่นแบ่งเป็น 3 เขตตั้งแต่บริเวณริมแม่น้ำเข้าไปยังแผ่นดิน ได้แก่ เขตพันธุ์ไม้แสม (*Avicennia* zone) เป็นบริเวณตั้งแต่ริมแม่น้ำลึกเข้าไปในแผ่นดินเป็นระยะประมาณ 40 เมตร เขตพันธุ์ไม้โกงกาง (*Rhizophora* zone) ตั้งแต่ 50–90 เมตร และเขตพันธุ์ไม้ตะบูน (*Xylocarpus* zone) อยู่ด้านในแผ่นดินมากที่สุดที่ระยะ 90–120 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.1ข (Umnouysin et al., 2017) โดยการศึกษาครั้งนี้ศึกษาภายในเขตพันธุ์ไม้แสม ที่มีแสมขาว (*Avicennia alba* Blume) เป็นพืชเด่น

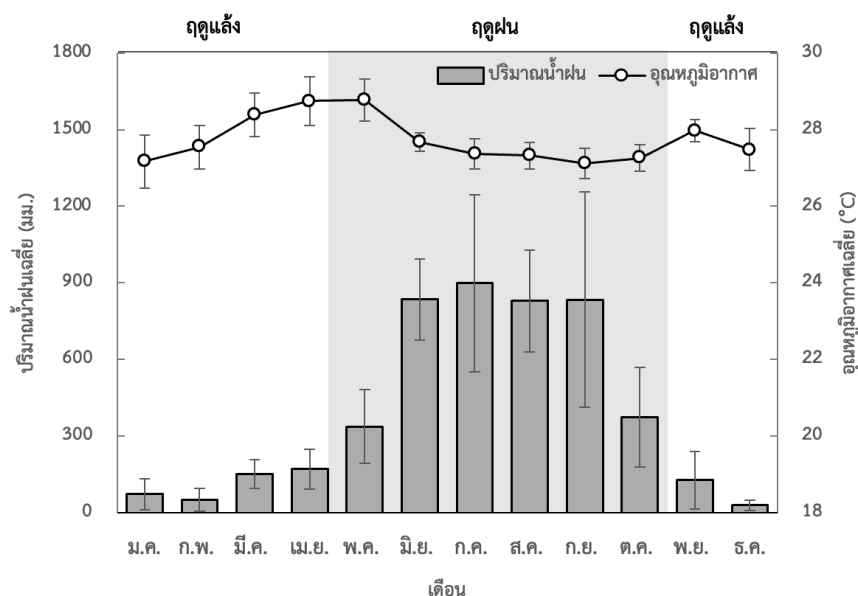


ภาพที่ 3.1 ที่ตั้งของพื้นที่ศึกษา (ก) และแปลงศึกษาถาวรบริเวณปากแม่น้ำตราด จังหวัดตราด (ข) และเขตพันธุ์ไม้ในแปลงศึกษาถาวร

### 3.1.2 ลักษณะภูมิอากาศ

จังหวัดตราดมีสภาพภูมิอากาศเป็นแบบมรสุมเขตร้อน (tropical monsoon climate) มีฝนตกชุกเกือบตลอดปีเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงตุลาคม และยังมีแนวเทือกเขาบรรทัดเป็นแนวปะทะกับลมพายุที่พัดมาจากทางทิศตะวันออกของประเทศ ฤดูกาลในจังหวัดตราดสามารถแบ่งเป็นสองฤดู ได้แก่ ฤดูแล้ง ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน และฤดูฝน ตั้งแต่พฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม

จากข้อมูลสภาพภูมิอากาศในช่วง 10 ปีตั้งแต่ พ.ศ. 2553–2563 ที่สถานีตรวจอากาศคลองใหญ่ จังหวัดตราด ซึ่งอยู่ใกล้กับแปลงศึกษาถาวรมากที่สุดเป็นระยะทาง 70 กิโลเมตร (กรมอุตุนิยมวิทยา ประเทศไทย) พบว่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 27.7 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 4,706 มิลลิเมตร โดยในช่วงฤดูแล้ง (เดือนพฤศจิกายน–เมษายน) มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 27.9 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำฝนคิดเป็นร้อยละ 13.8 ของปริมาณน้ำฝนรายปี ส่วนช่วงฤดูฝน (เดือนพฤษภาคม–ตุลาคม) มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 27.6 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำฝนสูงถึงร้อยละ 86.2 ของปริมาณน้ำฝนรายปี (ภาพที่ 3.2)

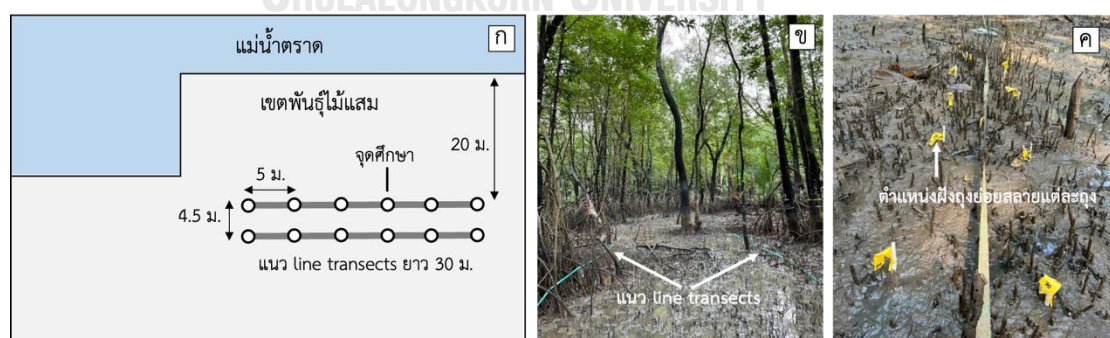


ภาพที่ 3.2 ปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายเดือน ( $\pm$ SD) ในช่วงปี พ.ศ. 2553–2563 จากสถานีตรวจอากาศคลองใหญ่ จังหวัดตราด (กรมอุตุนิยมวิทยา ประเทศไทย)

### 3.2 ศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาว

#### 3.2.1 กำหนดจุดศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาว

ศึกษาในเขตพันธุ์ไม้แสม (*Avicennia* zone) ของแปลงศึกษาถาวร โดยวางแนว line transect ยาว 30 เมตร จำนวนสองแนว ให้ขนานและห่างจากแนวริมฝั่งแม่น้ำเป็นระยะ 20 เมตร กำหนดจุดศึกษาบนแต่ละแนว line transect จำนวน 6 จุด แต่ละจุดห่างกัน 5 เมตร รวมทั้งสิ้น 12 จุด (ภาพที่ 3.3ก)



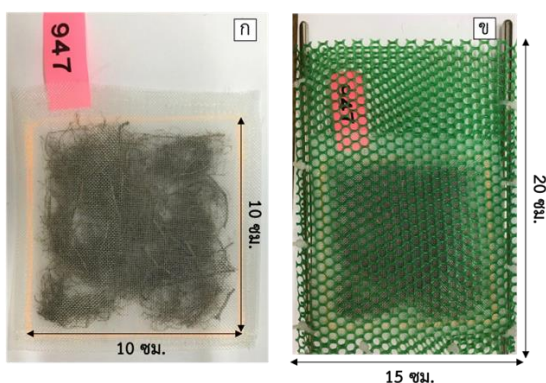
ภาพที่ 3.3 แนว line transect เพื่อกำหนดจุดศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาว (ก) แนว line transects ในเขตพันธุ์ไม้แสม (ข) และจุดศึกษาที่ทำสัญลักษณ์ด้วย pink tape เพื่อบอกตำแหน่งฝังถุงย่อยสลายรากฝอยและถุงชา (ค)



### 3.2.2 เตรียมตัวอย่างรากฝอยแสมขาวสำหรับศึกษาการย่อยสลาย

เก็บรากแสมขาวจากบริเวณเขตพันธุ์ไม้แสมใกล้กับแปลงศึกษาถาวร ห่างจากแปลงศึกษาประมาณ 170 เมตร โดยขุดรากที่ระดับความลึก 0–10 เซนติเมตร เพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยในแต่ละฤดูกาล โดยเก็บ 2 ครั้ง คือ ครั้งที่หนึ่งขุดรากในเดือนกุมภาพันธ์ 2565 เพื่อใช้ศึกษาการย่อยสลายในช่วงฤดูแล้ง (เดือนกุมภาพันธ์–พฤษภาคม 2565) และการย่อยสลายของรากฝอยในช่วงเวลา 1 ปี (เดือนกุมภาพันธ์ 2565–กุมภาพันธ์ 2566) และครั้งที่สองขุดรากในเดือนมิถุนายน 2565 เพื่อใช้ศึกษาการย่อยสลายในช่วงฤดูฝน (เดือนกรกฎาคม–กันยายน 2565) นำรากแสมขาวที่ขุดกลับมาที่ห้องปฏิบัติการเพื่อล้างและแยกเฉพาะรากฝอย (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร) ที่มีชีวิต โดยจำแนกจากลักษณะภายนอกที่มีลักษณะอวบ สีอ่อน มีความสมบูรณ์ และลอยน้ำ (Middleton and McKee, 2001) จากนั้นนำรากฝอยที่ได้มาผึ่งไว้ในที่ร่มที่อุณหภูมิห้อง (air dried) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แบ่งตัวอย่างรากที่ผึ่งแห้งเป็น 2 ส่วนประกอบด้วย

- 1) รากฝอยที่ผึ่งแห้งสำหรับศึกษาการย่อยสลายด้วยวิธีการถุงย่อยสลาย (litter bag) โดยบรรจุรากฝอยผึ่งแห้งปริมาณ  $1.00 \pm 0.01$  กรัม ในถุงตาข่ายไนลอน ขนาด  $10 \times 10$  ตารางเซนติเมตร ตาถี่ 1 มิลลิเมตร (Herzog et al., 2019) ดังภาพที่ 3.4ก จำนวน 20 ถุงสำหรับการศึกษาการย่อยสลายในแต่ละช่วงฤดู และ จำนวน 36 ถุงสำหรับการศึกษาในรอบหนึ่งปี
- 2) รากฝอยผึ่งแห้งสำหรับคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักรากผึ่งแห้งที่อุณหภูมิห้องต่อน้ำหนักรากแห้งที่ผ่านการอบ (conversion constant ratio) โดยชั่งน้ำหนักของรากฝอยผึ่งแห้งให้มีปริมาณ 1.00 กรัม จำนวน 10 ซ้ำ นำไปอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่แล้วบันทึกน้ำหนักแห้ง คำนวณค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนน้ำหนักผึ่งแห้งต่อน้ำหนักอบแห้งเพื่อนำมาใช้แปลงค่าน้ำหนักของรากฝอยที่เหลือจากการย่อยสลายแต่ละครั้งเป็นน้ำหนักรากผึ่งแห้ง



ภาพที่ 3.4 ถุงย่อยสลายรากฝอยที่ทำจากตาข่ายไนลอน (ก) และ ถุงย่อยสลายที่บรรจุในแผ่นตาข่ายพลาสติกที่ประกบติดกันสำหรับติดตั้งในดินป่าชายเลน (ข)

นอกจากนี้การศึกษานี้ใช้การย่อยสลายของใบชาเขียว (ต่อไปเรียกว่า ใบชา) เป็นชุดควบคุมตามวิธีการถุงชา (teabag method) (Keuskamp et al., 2013) โดยนำใบชาเขียว (Lipton, Unilever, Thailand) ที่ผึ่งให้แห้งปริมาณ  $1.00 \pm 0.01$  กรัม บรรจุในถุงตาข่ายไนลอนลักษณะเดียวกับที่ใช้ศึกษาการย่อยสลายรากฝอย ขนาด  $10 \times 10$  ตารางเซนติเมตร ตาถี่ 1 มิลลิเมตร จำนวน 4 ถุงสำหรับการศึกษาการย่อยสลายในแต่ละช่วงฤดู และใช้จำนวน 12 ถุงสำหรับการศึกษาในรอบหนึ่งปี

### 3.2.3 ติดตั้งถุงย่อยสลายในพื้นที่ศึกษา

ติดตั้งถุงย่อยสลายตามจุดศึกษาที่กำหนดบนแนว line transects (ภาพที่ 3.3) โดยฝังถุงย่อยสลายในแนวตั้งฉากกับผิวดิน ที่ระดับความลึก 10–20 เซนติเมตรจากผิวดิน โดยใส่ถุงย่อยสลายระหว่างแผ่นตาข่ายพลาสติก 2 แผ่น (ขนาดตาถี่ 4 มิลลิเมตร ขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร) ยึดแผ่นตาข่ายพลาสติกทั้งสองให้ประกบกันแน่นด้วย cable tie แล้วยึดตะเกียบพลาสติกทั้งสองข้างของตาข่ายเพื่อให้สามารถปักลงในดินได้ ดังภาพที่ 3.4ข (ดัดแปลงวิธีจาก บัณฑิตชัย เกลิมฉัตรวิไล, 2553)

สำหรับการศึกษาในแต่ละช่วงฤดู ฝังถุงย่อยสลายรากฝอยจำนวน 5 จุด ตามแนว line transect จุดละ 4 ถุง ติดตั้ง 2 ครั้งในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝน และสำหรับการศึกษาการย่อยสลายในรอบหนึ่งปีจะติดตั้งถุงย่อยสลาย จำนวน 3 จุด จุดละ 12 ถุง ส่วนถุงย่อยสลายใบชา (teabag) ที่เป็นชุดควบคุมฝังตามแนว line transect 1 จุด เป็นจำนวน 4 ถุง ติดตั้งพร้อมถุงย่อยสลายรากฝอย 2 ครั้งในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝน และสำหรับการศึกษาการย่อยสลายในรอบหนึ่งปีติดตั้ง 1 จุด จำนวน 12 ถุง โดยถุงย่อยสลายแต่ละถุงมีระยะห่างจากกันประมาณ 30 เซนติเมตร (ภาพที่ 3.3ค)

### 3.2.4 เก็บถุ่ยอยสลายและค่านวณอัตราการยอยสลาย

สำหรับการศีกษาการยอยสลายของรากฝอยแต่ละช่วงฤดู เก็บถุ่ยอยสลายรากฝอยและถุ่ยอยสลายใบชาที่ฝ่งไว้จุดละ 1 ถุ่ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 2, 4, 6 และ 12 สัปดาห์จากวันที่เริ่มศีกษา สำหรับการศีกษาการยอยสลายของรากฝอยในรอบหนึ่งปี เก็บถุ่ยอยสลายรากฝอยและถุ่ยอยสลายใบชาที่ฝ่งไว้จุดละ 1 ถุ่ เมื่อระยะเวลาผ่านไป 2, 4, 6, 12, 16, 20, 24, 28, 36, 44, 48 และ 52 สัปดาห์จากวันที่เริ่มศีกษา (ดัดแปลงจากบัณฑิตบูรย ฉลิมฉัตรวิไล, 2553) นำถุ่ยอยสลายที่เก็บมาล้างดินออกและนำรากฝอยหรือใบชาเขียวที่เหลืออยู่ในถุ่ยอยสลาย ล้างผ่านตะแกรงตาถี่ 0.2 มิลลิเมตร แล้วไปอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่แล้วชั่งน้ำหนักแห้งของรากฝอยหรือใบชาเขียวที่เหลืออยู่ ต่อมานำค่าคงที่ที่ได้จากการค่านวณข้อที่ 2.1 มาค่านวณร้อยละน้ำหนักฝ่งแห้งของรากที่เหลือจากการยอยสลายแต่ละครั้ง (%remaining weight) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %remaining weight และระยะเวลาที่ผ่านไปหลังการติดตั้งถุ่ยอยสลายในหน่วยวัน จากนั้นค่านวณอัตราการยอยสลายของรากฝอยด้วยสมการ negative exponential decay model ที่เสนอโดย Olson (1963) และมีรูปสมการที่ดัดแปลงโดย Twilley และคณะ (1997) ดังสมการที่ 1 สำหรับใบชาที่เหลือในถุ่ยอยสลายทำเช่นเดียวกับกับรากฝอย

$$M_t = M_0 e^{-kt} \quad (1)$$

เมื่อ	$M_0$	คือ ร้อยละของน้ำหนักฝ่งแห้งของรากฝอยก่อนเกิดการยอยสลาย
	$M_t$	คือ ร้อยละของน้ำหนักฝ่งแห้งของรากฝอยที่เหลือจากการยอยสลายเมื่อเวลาผ่านไป $t$
	$t$	คือ ระยะเวลาในการทดลอง (วัน)
	$k$	คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของการยอยสลายของรากฝอย หรือ อัตราการยอยสลายของรากฝอย (ต่อวัน)

ค่านวณค่าครึ่งชีวิต ( $t_{0.5}$ ) ของรากฝอยแซมขาว ตามสมการที่ 2 (ดัดแปลงจาก Jessen et al., 2021)

$$t_{0.5} = [\ln(0.5)] / k \quad (2)$$

เมื่อ	$t_{0.5}$	คือ ค่าครึ่งชีวิตของรากฝอย (วัน)
	$\ln$	คือ ลอการิทึมฐานธรรมชาติ
	$k$	คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของการยอยสลายของรากฝอย หรือ อัตราการยอยสลายของรากฝอย (ต่อวัน)

### 3.3 วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนในรากฝอย

นำตัวอย่างรากฝอยที่ยังไม่เกิดการย่อยสลาย (เมื่อเริ่มการทดลองในสัปดาห์ที่ 0) และรากฝอยที่เหลือในถุงย่อยสลายแต่ละครั้งของการย่อยสลายที่ผ่านการอบแห้งแล้ว มาบดให้ละเอียด วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (total C) และไนโตรเจนทั้งหมด (total N) ด้วยวิธี dry combustion method ด้วยเครื่อง CHNS/O analyzer นำปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนมา คำนวณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) ในซากรากฝอยเมื่อเกิดการย่อยสลายผ่านไปในแต่ละช่วงเวลา (Robertson and Alongi, 2016) และนำปริมาณคาร์บอนมาคำนวณร้อยละของคาร์บอนที่สูญเสียจากเนื้อเยื่อรากฝอย (%C loss) คัดแปลงจากสูตรคำนวณธาตุที่อาหารสูญเสียจากรากฝอยของ Chen และคณะ (2022)

$$\%C \text{ loss} = (W_0 \times C_0 - W_t \times C_t) / (W_0 \times C_0) \times 100\%$$

เมื่อ	%C loss	คือ ร้อยละคาร์บอนที่สูญเสียจากรากฝอยระหว่างการย่อยสลาย
	$W_0$	คือ น้ำหนักแห้งของรากฝอยตั้งต้นก่อนเกิดการย่อยสลาย (กรัม)
	$C_0$	คือ ความเข้มข้นของคาร์บอนทั้งหมดในรากฝอยก่อนย่อยสลาย (%)
	$W_t$	คือ น้ำหนักแห้งของรากฝอยเมื่อเวลาผ่านไป t วัน (กรัม)
	$C_t$	คือ ความเข้มข้นของคาร์บอนทั้งหมดในรากฝอยเมื่อเวลาผ่านไป t วัน (%)

### 3.4 ศึกษาลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของรากฝอย

เก็บตัวอย่างรากแสมขาวจากบริเวณใกล้กับแปลงศึกษาถาวรที่ระดับความลึก 0–10 เซนติเมตร ในเดือนมีนาคม 2565 (ฤดูแล้ง) และเดือนกรกฎาคม 2565 (ฤดูฝน) นำกลับมาয়ห้องปฏิบัติการเพื่อล้างและแยกเฉพาะรากฝอยที่มีชีวิต ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.5–2.0 มิลลิเมตร ศึกษาลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ (anatomical characters) ของรากฝอย โดยเตรียมสไลด์ตัวอย่างสด (wet mount) ด้วยการตัดรากฝอยตามขวาง (cross section) จำนวนอย่างน้อย 5 ราก ศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Olympus รุ่น BX51, Japan) บันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพ (Olympus รุ่น DP 71, Japan) พร้อมแสดงแถบมาตราส่วน (scale bar) แล้วนำภาพตัดตามขวางของรากฝอยที่ได้มาประมาณพื้นที่ชั้นสตีล (stele,  $A_{stele}$ ) ชั้นคอร์เทกซ์ (cortex,  $A_{cortex}$ ) และพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของรากฝอย (total area,  $A_{total}$ ) ด้วยโปรแกรม ImageJ (Fiji version 2.3.0) จะได้พื้นที่ในหน่วยตารางมิลลิเมตร และนำมาคำนวณอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ชั้นสตีลต่อพื้นที่พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด ( $A_{stele}:A_{total}$ ) และพื้นที่ชั้นคอร์เทกซ์ต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด ( $A_{cortex}:A_{total}$ ) ของรากฝอยทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝน

### 3.5 ศึกษาปัจจัยสิ่งแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศ

#### 3.5.1 อุณหภูมิดิน

บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดินด้วย temperature data logger (TidbiT v2 Temp logger, Onset Computer Corp., MA, USA) ติดตั้งบริเวณแนว line transect ที่ศึกษา ที่ระดับความลึกจากผิวดิน 15 เซนติเมตร เก็บข้อมูลต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 ปี

#### 3.5.2 อุณหภูมิและความเค็มของน้ำที่เข้าท่วม

วัดอุณหภูมิของน้ำที่เข้าท่วมพื้นที่ศึกษาด้วย digital thermometer (Niigata, Japan) และวัดความเค็มของน้ำที่เข้าท่วมพื้นที่ศึกษาด้วย salinometer (Kawasaki, Japan) ทุกครั้งที่ติดตั้งและเก็บถ่วงย่อยสลาย รวมถึงวัดความเค็มของน้ำในแม่น้ำสาขาบริเวณหน้าแปลงศึกษาที่ระดับความลึก 0–0.2 เมตรจากผิวน้ำ (ปิยะพล แก่นคง, 2564) และบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเค็มของน้ำที่เข้าท่วมแปลงศึกษาอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่อง conductivity/salinity data logger (HOBO U24-002-C Data Logger, Onset Computer Corp., MA, USA) ติดตั้งใกล้กับ temperature data logger ที่ระดับความลึกจากผิวดิน 15 เซนติเมตร เป็นระยะเวลา 1 ปี

#### 3.5.3 อุณหภูมิอากาศและปริมาณน้ำฝน

ขอความอนุเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิอากาศและปริมาณน้ำฝนในช่วงที่ทำการศึกษาจากสถานีตรวจวัดอากาศที่ติดตั้ง ณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาทรัพยากรป่าชายเลนที่ 1 (ตราด) ที่อยู่ห่างจากแปลงศึกษาประมาณ 1.5 กิโลเมตร

#### 3.5.4 ความสูงสัมพัทธ์ของพื้นที่ (relative elevation)

วัดความสูงสัมพัทธ์ของพื้นที่ในแต่ละจุดศึกษาโดยใช้ instrumental siteline builders level (SOKKIA B30A/B40A, Japan) ในฤดูแล้ง (วันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2565) และฤดูฝน (วันที่ 23 กันยายน พ.ศ. 2565) โดยวัดทุกระยะ 10 เมตร เริ่มจากจุดอ้างอิงริมแม่น้ำหน้าแปลงศึกษา

#### 3.5.5 ระยะเวลาที่น้ำท่วมพื้นที่ศึกษา (inundation period)

คำนวณระยะเวลาที่น้ำท่วมพื้นที่ โดยบันทึกเวลาเมื่อน้ำเข้าท่วมพื้นที่ศึกษาในช่วงน้ำขึ้นในแต่ละจุดศึกษาตามแนว line transect ในฤดูแล้ง (วันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2565) และฤดูฝน (วันที่ 23 กันยายน พ.ศ. 2565) เปรียบเทียบเวลาที่บันทึกได้กับความสูงสัมพัทธ์ของพื้นที่และข้อมูลตารางน้ำขึ้นน้ำลงรายวัน ณ แหลมงอบ (กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ) เพื่อคำนวณระยะเวลาที่แต่ละจุดศึกษาถูกน้ำท่วมในหน่วยชั่วโมงต่อวัน

### 3.5.6 คุณสมบัติทางเคมีของดิน

วัดความเค็มของน้ำในดินแต่ละจุดศึกษาทุกครั้งที่เก็บถ้ำย่อยสลาย โดยเก็บตัวอย่างน้ำในดินที่ระดับความลึก 0–20 เซนติเมตร ด้วยวิธี porous cup แล้ววัดความเค็มโดยใช้ salinometer (Kawasaki, Japan) ตามวิธีของ Komiyama และคณะ (2019) นอกจากนี้ยังใช้วิธีเจาะหลุมที่ความลึกประมาณ 20 เซนติเมตร แล้ววัดความเค็มของน้ำในหลุมด้วย salinometer (Kawasaki, Japan) วัดค่าศักย์รีดอกซ์ (redox potential, Eh) ของดิน ที่ระดับความลึก 0–20 เซนติเมตรโดยใช้หัววัด Oxidation Reduction Potential (ORP) และเครื่อง Eh meter (Mettler Toledo, Thailand)

นอกจากนี้เก็บตัวอย่างดินด้วยวิธี soil core ที่ความลึก 0–20 เซนติเมตรในบริเวณใกล้กับจุดศึกษาการย่อยสลายของรากทุกจุด โดยเก็บตัวอย่างดินทั้งหมด 2 ครั้งในแต่ละฤดู คือ เมื่อเริ่มศึกษาในสัปดาห์ที่ 0 และเมื่อสิ้นสุดการศึกษาในสัปดาห์ที่ 12 ของการศึกษากการย่อยสลายรากฝอย นำตัวอย่างดินกลับมาয়ห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างดินส่วนหนึ่งนำมาวัดความเป็นกรดต่าง ด้วย pH meter (Mettler Toledo, Thailand) ใช้สารละลายดินต่อน้ำในอัตราส่วน 1:1 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2553) และตัวอย่างดินส่วนที่เหลือนำมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดตาถี่ 0.5 มิลลิเมตร เพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดและไนโตรเจนทั้งหมด ด้วยวิธี dry combustion method ด้วยเครื่อง CHNS/O analyzer คำนวณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดินในแต่ละฤดู

### 3.6 วิเคราะห์ทางสถิติ

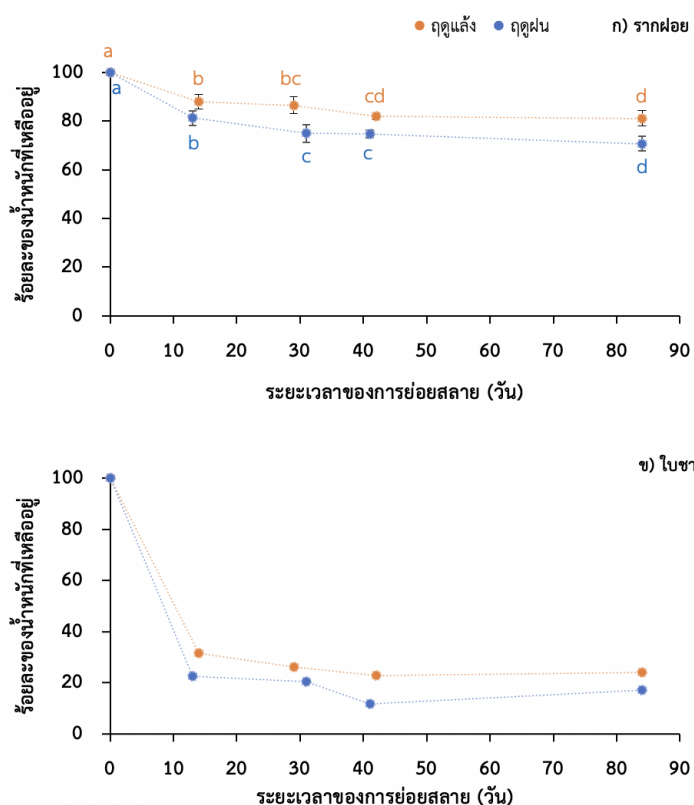
วิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 22 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) และรายงานผลการวิเคราะห์ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายของรากฝอย (k) ค่าปัจจัยสิ่งแวดล้อม และลักษณะทางกายวิภาคของรากฝอยในฤดูแล้งและฤดูฝนด้วยวิธี independent sample t-test เมื่อข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และ Mann-Whitney U test เมื่อข้อมูลมีการกระจายแบบไม่ปกติ เปรียบเทียบน้ำหนักของรากฝอยที่เหลืออยู่ในแต่ละเวลาของการย่อยสลาย ปริมาณคาร์บอน ปริมาณไนโตรเจน และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของรากฝอยในแต่ละเวลาของการย่อยสลายด้วย Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบ post hoc ด้วยวิธี Bonferroni เมื่อข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และ Kruskal-Wallis และเปรียบเทียบ post hoc ด้วยวิธี pairwise comparison เมื่อข้อมูลมีการกระจายแบบไม่ปกติ ศึกษาสหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมด้วย Pearson correlation เมื่อข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และ Spearman correlation เมื่อข้อมูลมีการกระจายแบบไม่ปกติ

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

#### 4.1 การย่อยสลายของรากฝอยในฤดูแล้งและฤดูฝน

จากการศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาวในช่วง 12 สัปดาห์ในฤดูแล้งและฤดูฝน พบว่าการย่อยสลายของรากฝอยแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเริ่มเกิดการย่อยสลาย (rapid phase) สังเกตได้จากน้ำหนักรากฝอยในถุงย่อยสลายลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 2 สัปดาห์แรกของการศึกษา ทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝน และช่วงที่เกิดการย่อยสลายอย่างช้า ๆ (slow phase) สังเกตได้จากน้ำหนักรากที่เหลืออยู่ในถุงย่อยสลายลดลงอย่างช้า ๆ จนถึงสัปดาห์ที่ 12 ของการศึกษา (ภาพที่ 4.1ก)



ภาพที่ 4.1 ร้อยละของน้ำหนักรากฝอย (ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD) ที่เหลือในถุงย่อยสลายในฤดูแล้งและฤดูฝน โดยตัวอักษรที่แตกต่างกันหมายถึงต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างแต่ละเวลาของการย่อยสลาย จากการทดสอบ Post hoc ด้วยวิธี Bonferroni (ก) และร้อยละของน้ำหนักใบชาเขียวที่เหลือในถุงย่อยสลายในฤดูแล้งและฤดูฝน (ข)

เมื่อเวลาผ่านไป 2 สัปดาห์พบว่าน้ำหนักรกฝอยในถุงย่อยสลายเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 90 ในฤดูแล้ง (12–26 กุมภาพันธ์ 2565) และร้อยละ 80 ในฤดูฝน (2–16 กรกฎาคม 2565) เมื่อสิ้นสุดการศึกษาในสัปดาห์ที่ 12 พบว่าน้ำหนักรกฝอยในถุงย่อยสลายเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 80 ทั้งในฤดูแล้ง (7 พฤษภาคม 2565) และฤดูฝน (24 กันยายน 2565) ซึ่งร้อยละของน้ำหนักรกฝอยที่เหลืออยู่ในแต่ละเวลาของการย่อยสลายมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝน (ANOVA,  $F=45.366$ ,  $p<0.001$  และ ANOVA,  $F=252.098$ ,  $p<0.001$  ตามลำดับ) โดยเมื่อเวลาผ่านไป รกฝอยที่เหลืออยู่ในถุงย่อยสลายมีน้ำหนักลดลงเรื่อย ๆ ดังภาพที่ 4.1ก

ในการศึกษานี้ใช้ใบชาเขียวเป็นชุดควบคุมเพื่อเป็นดัชนีชี้วัดว่าเกิดการย่อยสลายขึ้นจริงในภาคสนาม โดยการย่อยสลายของใบชาในถุงย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 2 สัปดาห์แรกของการศึกษาทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝนเช่นเดียวกับการย่อยสลายของรกฝอยผสมขาว แต่ใบชาเกิดการย่อยสลายมากกว่ารกฝอยของผสมขาว โดยเมื่อเวลาผ่านไป 2 สัปดาห์พบว่าน้ำหนักของใบชาในถุงย่อยสลายเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 30 และ 20 ในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ (ภาพที่ 4.1ข) และการย่อยสลายของใบชามีแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ จนสิ้นสุดการศึกษาในสัปดาห์ที่ 12 ที่เหลือน้ำหนักใบชาในถุงย่อยสลายประมาณร้อยละ 20 ในฤดูแล้งและร้อยละ 15 ในฤดูฝน ซึ่งมีน้ำหนักน้อยกว่ารกฝอยของผสมขาวเกือบ 4 เท่า แสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายของใบชาที่เกิดขึ้นมากกว่ารกฝอย (ภาพที่ 4.1ข)

เมื่อสร้างสมการถดถอยแบบ negative single exponential จากการแทนค่าตัวแปรน้ำหนักรกฝอยที่เหลือในถุงย่อยสลายในแต่ละชุดการทดลอง ( $M_t$ ) กับระยะเวลาของการย่อยสลาย ( $t$ ) ทั้งสองฤดูกาล พบว่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลาย หรือ อัตราการย่อยสลายของรกฝอย ( $k$ ) มีค่าเท่ากับ 0.003 และ 0.005 ต่อวัน ในฤดูแล้งและฤดูฝนตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) โดยรกฝอยของผสมขาวมีอัตราการย่อยสลายในฤดูแล้งน้อยกว่าฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (independent sample t-test,  $t=-5.774$ ,  $p<0.001$ ) และค่าครึ่งชีวิตของรกฝอยผสมขาว ( $t_{0.5}$ ) ในฤดูแล้งมีแนวโน้มมากกว่าฤดูฝน มีค่าเท่ากับ 231 และ 139 วัน ตามลำดับ สำหรับอัตราการย่อยสลายของใบชาจากการแทนค่าในสมการเช่นเดียวกับรกฝอยพบว่า ในฤดูแล้งมีค่าเท่ากับ 0.024 ต่อวันและในฤดูฝนมีค่าเท่ากับ 0.031 ต่อวัน ค่าครึ่งชีวิตของใบชามีค่าเท่ากับ 29 และ 21 วัน ในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1)



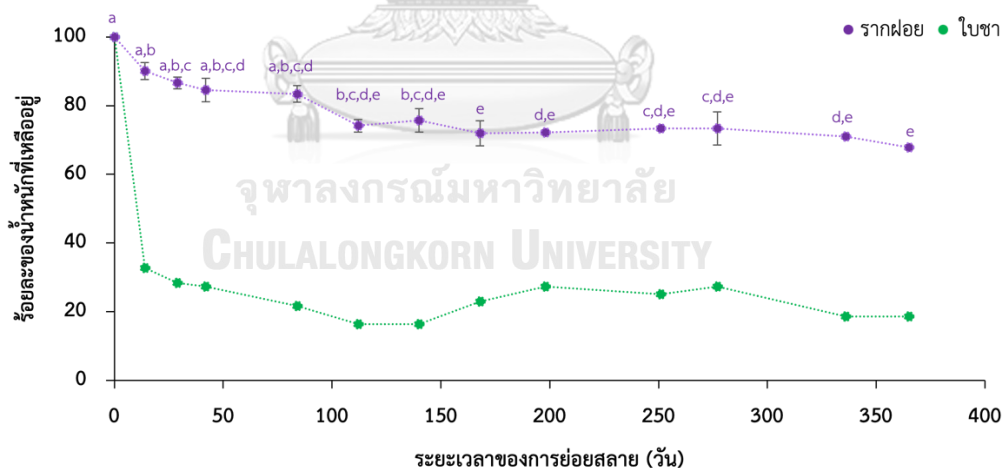
ตารางที่ 4.1 สมการการย่อยสลาย อัตราการย่อยสลาย (k) และค่าครึ่งชีวิต ( $t_{0.5}$ ) ของรากฝอยของ แสมขาวและใบชาในฤดูแล้งและฤดูฝน

ซากพืช	ฤดู	สมการการย่อยสลาย	k	R <sup>2</sup>	t <sub>0.5</sub> (วัน)
รากฝอย	แล้ง	$M_t = 100e^{-0.003t}$	0.003	0.702	231
	ฝน	$M_t = 100e^{-0.005t}$	0.005	0.697	139
ใบชา	แล้ง	$M_t = 100e^{-0.024t}$	0.024	0.677	29
	ฝน	$M_t = 100e^{-0.031t}$	0.031	0.710	22

หมายเหตุ R<sup>2</sup> คือ coefficient of determination

#### 4.2 การย่อยสลายของรากฝอยในรอบ 1 ปี

การย่อยสลายรากฝอยของแสมขาวในรอบปี (52 สัปดาห์) ที่ศึกษาตั้งแต่วันที่ 12 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 ถึงวันที่ 12 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 พบว่าร้อยละของน้ำหนักรากฝอยที่เหลืออยู่ในแต่ละเวลาของการย่อยสลายในรอบปีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Kruskal–Wallis,  $H=32.373$ ,  $p<0.001$ ) โดยมีน้ำหนักรากฝอยที่เหลืออยู่ในถ่วงย่อยสลายลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาที่ผ่านไป (ภาพที่ 4.2)



ภาพที่ 4.2 ร้อยละน้ำหนักรากฝอยที่เหลือในถ่วงย่อยสลาย (ค่าเฉลี่ย±SD) และร้อยละน้ำหนักของใบชาที่คงเหลือในถ่วงย่อยสลายในรอบปี โดยตัวอักษรที่แตกต่างกันของร้อยละน้ำหนักรากฝอยหมายถึงต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างแต่ละเวลาของการย่อยสลายของการทดสอบ Post hoc ด้วยวิธี pairwise comparison

รูปแบบการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวในรอบปีคล้ายกับการย่อยสลายในช่วง 12 สัปดาห์ในฤดูแล้งและฤดูฝน (ภาพที่ 4.1ก) โดยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 2 สัปดาห์แรกของการศึกษา (12–26 กุมภาพันธ์ 2565) ดังภาพที่ 4.2 พบว่ามีน้ำหนักรากฝอยเหลือในฤกษ์ย่อยสลายประมาณร้อยละ 90 หลังจากนั้นน้ำหนักรากฝอยมีแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ จนถึงสัปดาห์ที่ 12 (84 วัน) และลดลงอย่างมากในสัปดาห์ที่ 12–16 (84–112 วัน) โดยน้ำหนักรากฝอยเหลือประมาณร้อยละ 70 ของน้ำหนักตั้งต้น หลังจากนั้นพบว่าน้ำหนักของรากฝอยเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนถึงสัปดาห์ที่ 52 โดยน้ำหนักของรากฝอยเหลือในฤกษ์ย่อยสลายประมาณร้อยละ 70 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

การย่อยสลายของใบชาเขียวเป็นชุดควบคุมเช่นเดียวกับการศึกษาการย่อยสลายในแต่ละฤดูกาล พบว่าน้ำหนักใบชาลดลงอย่างมากในช่วง 2 สัปดาห์แรกของการศึกษาคือคล้ายกับรากฝอยของแสมขาว โดยน้ำหนักของใบชาเหลือประมาณร้อยละ 30 และมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จนถึงสัปดาห์ที่ 16 (112 วัน) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 20 (140 วัน) จนถึงสัปดาห์ที่ 28 (198 วัน) จากนั้นมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จนถึงสัปดาห์ที่ 52 เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีน้ำหนักของใบชาเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 19 (ภาพที่ 4.2)

เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรากฝอยที่เหลือในฤกษ์ย่อยสลายในรอบปี ( $M_t$ ) กับระยะเวลาที่เกิดการย่อยสลาย ( $t$ ) ในรูปแบบสมการถดถอยแบบ negative single exponential ได้ดังสมการ  $M_t=100e^{-0.001t}$  ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.774 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายรากฝอย หรืออัตราการย่อยสลาย ( $k$ ) เท่ากับ 0.001 ต่อวัน และค่าครึ่งชีวิตของรากฝอย ( $t_{0.5}$ ) เท่ากับ 693 วัน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายรากฝอยที่เกิดขึ้นในฤดูแล้ง ( $k_{dry}$ ) ในฤดูฝน ( $k_{wet}$ ) จากการศึกษา 12 สัปดาห์ และในรอบหนึ่งปี ( $k_{year}$ ) จากการศึกษา 52 สัปดาห์ พบว่าอัตราการย่อยสลายของรากฝอยทั้งสามค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ANOVA,  $F=76.41$ ,  $p<0.001$ ) โดยมีอัตราการย่อยสลายรากฝอยมากที่สุดในฤดูฝน ตามด้วยฤดูแล้ง และการย่อยสลายรากฝอยในรอบปีมีค่าน้อยที่สุด มีค่า  $0.005 > 0.003 > 0.001$  ต่อวัน ตามลำดับ

สำหรับการย่อยสลายของใบชาในรอบหนึ่งปีสามารถสร้างสมการถดถอยแบบ negative single exponential ได้ดังสมการ  $M_t=100e^{-0.006t}$  ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.342 โดยมีค่าอัตราการย่อยสลายเท่ากับ 0.006 ต่อวัน และค่าครึ่งชีวิตของใบชา ( $t_{0.5}$ ) เท่ากับ 116 วัน เมื่อเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายใบชาที่เกิดขึ้นในฤดูแล้งและในฤดูฝน (12 สัปดาห์) และในรอบหนึ่งปี (52 สัปดาห์) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับการศึกษาอัตราการย่อยสลายรากฝอย โดยอัตราการย่อยสลายใบชามากที่สุดในฤดูฝน ตามด้วยฤดูแล้ง และการย่อยสลายใบชาในรอบปีมีค่าน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ  $0.031 > 0.024 > 0.006$  ต่อวัน ตามลำดับ

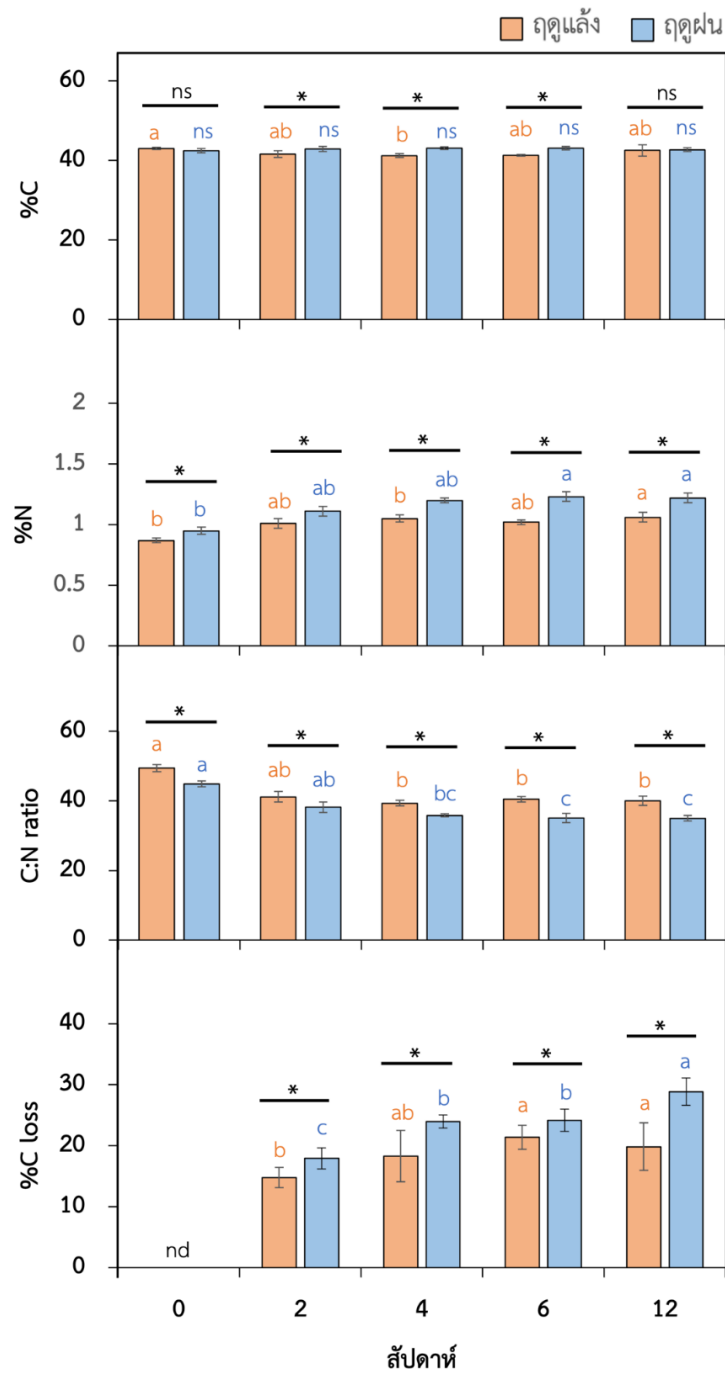
### 4.3 ปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนในรากฝอย

#### 4.3.1 การย่อยสลายของรากฝอยในฤดูแล้งและฤดูฝน (12 สัปดาห์)

จากการศึกษาในฤดูแล้งพบว่าปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยมีความผันแปรในช่วง 12 สัปดาห์ (Kruskal-Wallis,  $H=12.857$ ,  $p=0.012$ ) อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 41.21–42.99 ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยในฤดูฝนในแต่ละสัปดาห์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าในช่วงร้อยละ 42.43–43.08 (ตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.3) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยที่ผ่านการย่อยสลายเป็นระยะเวลาเท่ากันระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝน พบว่าปริมาณคาร์บอนก่อนเกิดการย่อยสลายในสัปดาห์ที่ 0 ของฤดูแล้งและฤดูฝนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ร้อยละ  $42.99 \pm 0.27$  ในฤดูแล้ง และร้อยละ  $42.43 \pm 0.51$  ในฤดูฝน) ขณะที่ในสัปดาห์ที่ 2, 4 และ 6 ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยในฤดูแล้งมีค่าน้อยกว่าในฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อสิ้นสุดการศึกษาในสัปดาห์ที่ 12 พบว่าปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยในฤดูแล้งและฤดูฝนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าร้อยละ  $42.50 \pm 1.43$  ในฤดูแล้ง และร้อยละ  $42.68 \pm 0.47$  ในฤดูฝน

ตารางที่ 4.2 ปริมาณคาร์บอน (%C) ไนโตรเจน (%N) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) ในเนื้อเยื่อรากฝอยของแสมขาว และร้อยละคาร์บอนที่สูญเสีย (%C loss) (ค่าเฉลี่ย±SD) ในแต่ละเวลาของการย่อยสลายในฤดูแล้งและฤดูฝน (n=5)

ตัวแปร	สัปดาห์	ฤดู		ค่าทางสถิติ
		แล้ง	ฝน	
%C	0	42.99±0.27 <sup>a</sup>	42.43±0.51 <sup>ns</sup>	t=2.168, p= 0.062
	2	41.55±0.85 <sup>ab</sup>	42.84±0.61 <sup>ns</sup>	t=-2.764, p=0.025
	4	41.21±0.52 <sup>b</sup>	43.08±0.33 <sup>ns</sup>	t=-6.799, p<0.001
	6	41.24±0.23 <sup>ab</sup>	43.05±0.43 <sup>ns</sup>	t=-7.502, p<0.001
	12	42.50±1.43 <sup>ab</sup>	42.68±0.47 <sup>ns</sup>	t=-0.270, p=0.794
	ค่าทางสถิติ	Kruskal-Wallis, H=12.857, p=0.012		ANOVA, F=1.585, p=0.217
%N	0	0.87±0.02 <sup>b</sup>	0.95±0.03 <sup>b</sup>	t=-4.846, p=0.001
	2	1.01±0.04 <sup>ab</sup>	1.11±0.04 <sup>ab</sup>	t=-3.777, p=0.005
	4	1.05±0.03 <sup>b</sup>	1.20±0.02 <sup>ab</sup>	t=-2.627, p=0.009
	6	1.02±0.02 <sup>ab</sup>	1.23±0.04 <sup>a</sup>	t=-2.619, p=0.009
	12	1.06±0.04 <sup>a</sup>	1.22±0.04 <sup>a</sup>	t=-6.178, p<0.001
	ค่าทางสถิติ	Kruskal-Wallis, H=15.571, p=0.004		Kruskal-Wallis, H=19.629, p<0.001
C:N	0	49.43±1.01 <sup>a</sup>	44.87±0.83 <sup>a</sup>	t=7.423, p<0.001
	2	41.18±1.48 <sup>ab</sup>	38.77±1.46 <sup>ab</sup>	t=2.536, p=0.035
	4	39.34±0.80 <sup>b</sup>	35.85±0.45 <sup>bc</sup>	t=8.567, p<0.001
	6	40.52±0.80 <sup>b</sup>	35.09±1.33 <sup>c</sup>	t=7.869, p=0.018
	12	40.05±1.33 <sup>b</sup>	35.00±0.78 <sup>c</sup>	t=2.627, p=0.009
	ค่าทางสถิติ	Kruskal-Wallis, H=15.522, p=0.004		Kruskal-Wallis, H=19.509, p<0.001
%C loss	2	14.76±1.64 <sup>b</sup>	17.93±1.73 <sup>c</sup>	t=-2.967, p= 0.018
	4	18.28±4.23 <sup>ab</sup>	23.96±1.07 <sup>b</sup>	t=-2.402, p= 0.016
	6	21.38±1.97 <sup>a</sup>	24.17±1.82 <sup>b</sup>	t=-2.329, p= 0.048
	12	19.82±3.90 <sup>a</sup>	28.86±2.25 <sup>a</sup>	t=-4.489, p= 0.002
	ค่าทางสถิติ	Kruskal-Wallis, H=8.326, p=0.04		ANOVA, F=32.011, p<0.001



ภาพที่ 4.3 ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (C) ไนโตรเจนทั้งหมด (N) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) ในเนื้อเยื่อรากฝอยของแสมขาว และ คาร์บอนที่สูญเสีย (C loss) จากรากฝอยแสมขาว (ค่าเฉลี่ย±SD) สัญลักษณ์ \* หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% ระหว่างฤดู ตัวอักษรที่แตกต่างกันหมายถึง ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างช่วงเวลาการย่อยสลายแต่ละสัปดาห์ในฤดูเดียวกัน และ ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% nd หมายถึงไม่มีข้อมูล

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่สัปดาห์ที่ 0 ถึง 12 ทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝน (ตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.3) โดยในฤดูแล้งปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยก่อนการย่อยสลายในสัปดาห์ที่ 0 มีค่าประมาณร้อยละ 0.87 และเพิ่มขึ้นมีค่าประมาณร้อยละ 1.06 ในสัปดาห์ที่ 12 ส่วนในฤดูฝนปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยก่อนการย่อยสลายในสัปดาห์ที่ 0 มีค่าประมาณร้อยละ 0.95 และเพิ่มขึ้นมีค่าประมาณร้อยละ 1.22 ในสัปดาห์ที่ 12 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝน ณ เวลาเดียวกัน พบว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยก่อนเกิดการย่อยสลายในสัปดาห์ที่ 0 และในช่วงสัปดาห์ที่ 2, 4, 6 และ 12 ในฤดูแล้งมีค่าน้อยกว่าในฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

C:N ratio ในเนื้อเยื่อรากฝอยมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่สัปดาห์ที่ 0 ถึง 12 ทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝน (ตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.3) โดยในฤดูแล้ง C:N ratio ในเนื้อเยื่อรากฝอยก่อนการย่อยสลายในสัปดาห์ที่ 0 มีค่าร้อยละ  $49.43 \pm 1.01$  และลดลงเหลือร้อยละ  $40.05 \pm 1.33$  ในสัปดาห์ที่ 12 ส่วนในฤดูฝน C:N ratio ในเนื้อเยื่อรากฝอยก่อนการย่อยสลายในสัปดาห์ที่ 0 มีค่าร้อยละ  $44.87 \pm 0.83$  และลดลงเหลือร้อยละ  $35.00 \pm 0.78$  ในสัปดาห์ที่ 12 เมื่อเปรียบเทียบ C:N ratio ทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยที่ผ่านการย่อยสลายเป็นระยะเวลาเท่ากันระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝน พบว่า C:N ratio ในเนื้อเยื่อรากฝอยก่อนเกิดการย่อยสลายในสัปดาห์ที่ 0 และเมื่อผ่านการย่อยสลายในสัปดาห์ที่ 2, 4, 6 และ 12 ในฤดูแล้งมีค่ามากกว่าในฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

คาร์บอนที่สูญเสียจากเนื้อเยื่อรากฝอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่สัปดาห์ที่ 2 ถึง 12 ทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝน (ตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.3) โดยคาร์บอนที่สูญเสียจากเนื้อเยื่อรากฝอยในฤดูแล้งในสัปดาห์แรกของการย่อยสลาย (สัปดาห์ที่ 2) มีค่าประมาณร้อยละ 14.76 และเพิ่มขึ้นจนมีค่าประมาณร้อยละ 19.82 ในสัปดาห์ที่ 12 ส่วนคาร์บอนที่สูญเสียจากเนื้อเยื่อรากฝอยในฤดูฝนในสัปดาห์แรกของการย่อยสลาย (สัปดาห์ที่ 2) มีค่าประมาณร้อยละ 17.93 และเพิ่มขึ้นจนมีค่าประมาณร้อยละ 28.86 ในสัปดาห์ที่ 12 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนที่สูญเสียจากเนื้อเยื่อรากฝอยที่ผ่านการย่อยสลายเป็นระยะเวลาเท่ากันระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝน พบว่าปริมาณคาร์บอนที่สูญเสียจากเนื้อเยื่อรากฝอยในสัปดาห์ที่ 2, 4, 6 และ 12 ในฤดูแล้งมีค่าน้อยกว่าในฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

#### 4.3.2 การย่อยสลายของรากฝอยในรอบหนึ่งปี (52 สัปดาห์)

ตลอดการศึกษาในช่วง 52 สัปดาห์พบว่าปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยผันแปรอยู่ในช่วงแคบ ร้อยละ 40.81–44.43 (ตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.4) โดยรากฝอยก่อนเกิดการย่อยสลายในสัปดาห์ที่ 0 มีปริมาณคาร์บอนทั้งหมดร้อยละ  $43.09 \pm 0.32$  และปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอย ณ สัปดาห์ที่ 52 มีค่าร้อยละ  $43.60 \pm 0.96$  ส่วนปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอย

ในสัปดาห์ที่ 0 ถึง 52 มีความผันแปรอยู่ในช่วงแคบ ร้อยละ 0.87–1.16 โดยปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยก่อนการย่อยสลายในสัปดาห์ที่ 0 มีค่าร้อยละ  $0.87 \pm 0.03$  และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงสัปดาห์ที่ 28 แล้วลดลงจนถึงสัปดาห์ที่ 52 โดยมีค่าร้อยละ  $0.96 \pm 1.04$

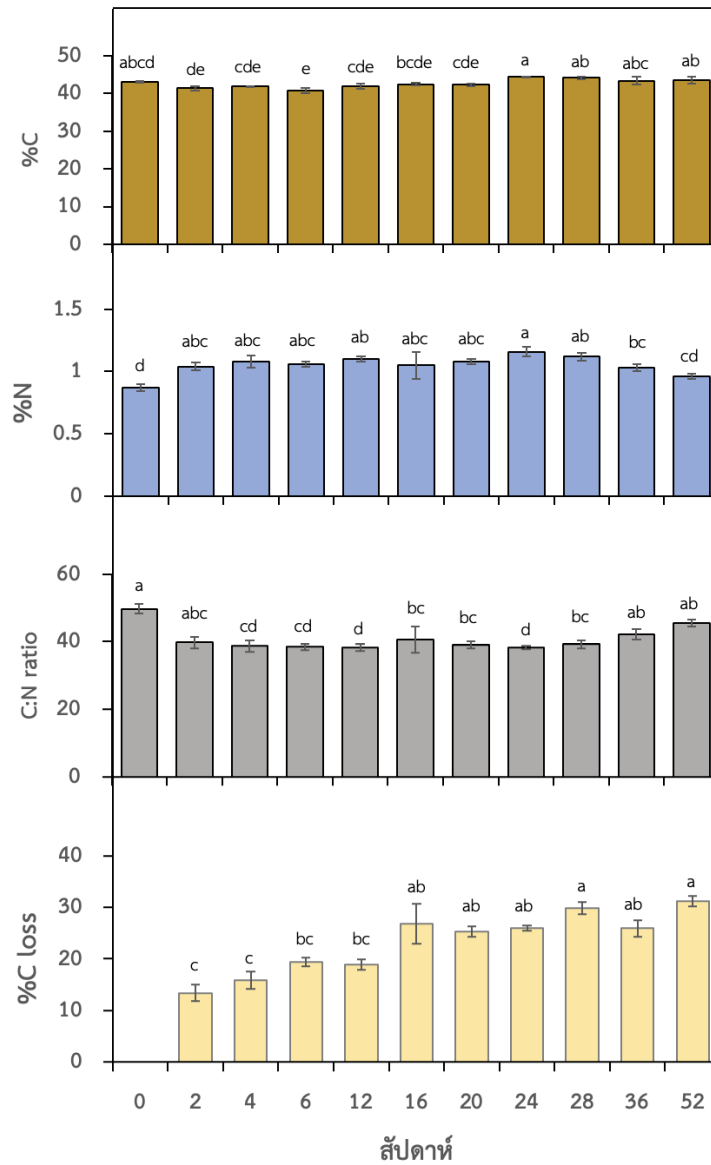
**ตารางที่ 4.3** ปริมาณคาร์บอน (%C) ไนโตรเจน (%N) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) ในเนื้อเยื่อรากฝอย และร้อยละคาร์บอนที่สูญเสีย (%C loss) (ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD) ในแต่ละเวลาของการย่อยสลายในรอบปี (n=3)

ระยะเวลาของการย่อยสลาย (สัปดาห์)	C (%)	N (%)	C:N	%C loss
0	43.09 $\pm$ 0.32 <sup>abcd</sup>	0.87 $\pm$ 0.03 <sup>d</sup>	49.76 $\pm$ 1.39 <sup>a</sup>	-
2	41.46 $\pm$ 0.58 <sup>de</sup>	1.04 $\pm$ 0.03 <sup>abc</sup>	39.77 $\pm$ 1.60 <sup>abc</sup>	13.36 $\pm$ 1.64 <sup>c</sup>
4	41.83 $\pm$ 0.10 <sup>cde</sup>	1.08 $\pm$ 0.05 <sup>abc</sup>	38.78 $\pm$ 1.66 <sup>cd</sup>	15.83 $\pm$ 1.95 <sup>c</sup>
6	40.81 $\pm$ 0.70 <sup>e</sup>	1.06 $\pm$ 0.02 <sup>abc</sup>	38.51 $\pm$ 0.85 <sup>cd</sup>	19.47 $\pm$ 4.47 <sup>bc</sup>
12	41.90 $\pm$ 0.62 <sup>cde</sup>	1.10 $\pm$ 0.02 <sup>ab</sup>	38.22 $\pm$ 1.02 <sup>d</sup>	18.90 $\pm$ 3.28 <sup>bc</sup>
16	42.45 $\pm$ 0.31 <sup>bcde</sup>	1.05 $\pm$ 0.11 <sup>abc</sup>	40.69 $\pm$ 3.86 <sup>bc</sup>	26.76 $\pm$ 2.04 <sup>ab</sup>
20	42.36 $\pm$ 0.34 <sup>cde</sup>	1.08 $\pm$ 0.02 <sup>abc</sup>	39.12 $\pm$ 1.08 <sup>bc</sup>	25.29 $\pm$ 3.34 <sup>ab</sup>
24	44.43 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	1.16 $\pm$ 0.04 <sup>a</sup>	38.32 $\pm$ 0.54 <sup>d</sup>	25.99 $\pm$ 4.13 <sup>ab</sup>
28	44.14 $\pm$ 0.33 <sup>ab</sup>	1.12 $\pm$ 0.03 <sup>ab</sup>	39.31 $\pm$ 1.15 <sup>bc</sup>	29.83 $\pm$ 0.57 <sup>a</sup>
36	43.33 $\pm$ 1.03 <sup>abc</sup>	1.03 $\pm$ 0.03 <sup>bc</sup>	42.23 $\pm$ 1.59 <sup>ab</sup>	25.92 $\pm$ 1.00 <sup>ab</sup>
52	43.60 $\pm$ 0.96 <sup>ab</sup>	0.96 $\pm$ 1.04 <sup>cd</sup>	45.43 $\pm$ 1.04 <sup>ab</sup>	31.22 $\pm$ 0.53 <sup>a</sup>
ค่าทางสถิติ	ANOVA, F=12.77, p<0.001	ANOVA, F=10.79, p<0.001	Kruskal-Wallis, H=21.383, p=0.019	ANOVA, F=15.157, p<0.001

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในคอลัมน์เดียวกันจากการทดสอบ Post hoc ด้วยวิธี Bonferroni (เมื่อข้อมูลกระจายแบบปกติ) และ pairwise comparison (เมื่อข้อมูลกระจายแบบไม่ปกติ)

การเปลี่ยนแปลงของ C:N ratio ในเนื้อเยื่อรากฝอยมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่สัปดาห์ที่ 2 ถึง 52 (ตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.4) โดยก่อนเกิดการย่อยสลายในสัปดาห์ที่ 0 มีค่าร้อยละ 49.76 และลดลงอย่างมากในสัปดาห์ที่ 2 มีค่าร้อยละ 39.77 เมื่อสิ้นสุดการศึกษาในสัปดาห์ที่ 52 C:N ratio มีค่าประมาณ 45.43 ส่วนคาร์บอนที่สูญเสียจากเนื้อเยื่อรากฝอยมีแนวโน้มมากขึ้นตั้งแต่สัปดาห์ที่ 2 ถึง 52 โดยคาร์บอนที่สูญเสียจากเนื้อเยื่อรากฝอยในช่วงแรกของการย่อยสลาย (สัปดาห์ที่ 2) มี

ค่าประมาณร้อยละ 13.36 และเมื่อสิ้นสุดการศึกษาในสัปดาห์ที่ 52 คาร์บอนที่สูญเสียจากเนื้อเยื่อ รากฝอยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 31.22



ภาพที่ 4.4 ปริมาณคาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) และคาร์บอนที่สูญเสีย (C loss) ของเนื้อเยื่อรากฝอย (ค่าเฉลี่ย±SD) โดยตัวอักษรที่ต่างกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการทดสอบ Post hoc ด้วยวิธี Bonferroni (เมื่อข้อมูลกระจายแบบปกติ) และ pairwise comparison (เมื่อข้อมูลกระจายแบบไม่ปกติ)

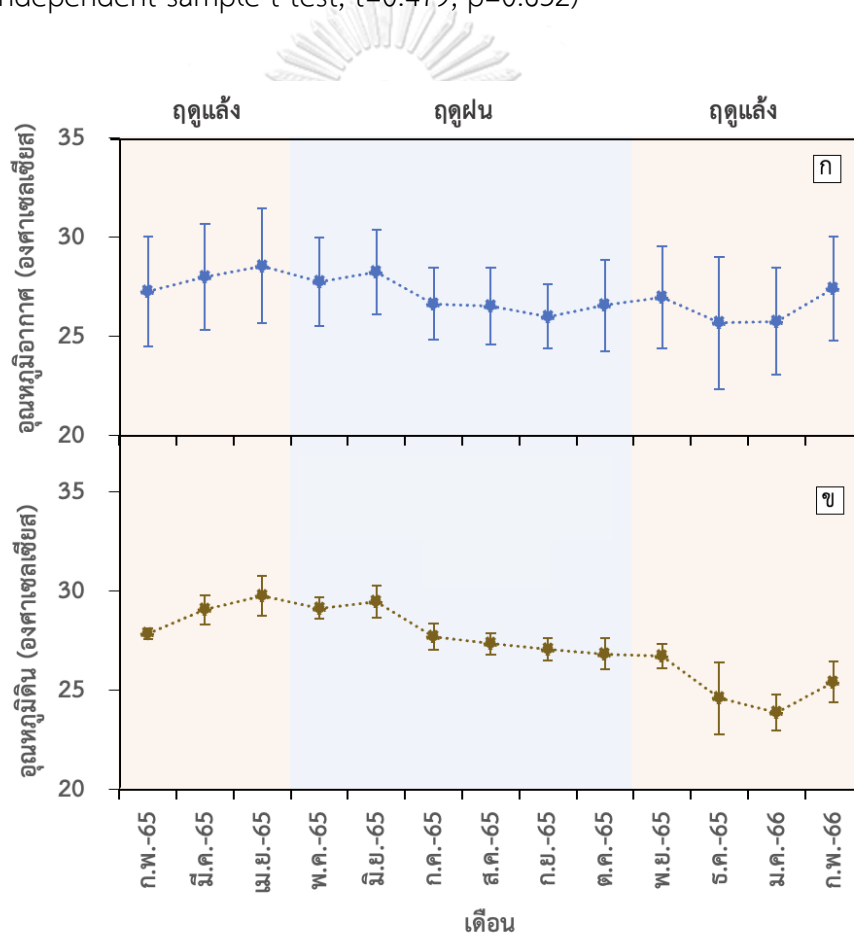


#### 4.4 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมและปัจจัยทางชีวภาพของรากที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลาย

##### 4.4.1 ปัจจัยทางภูมิอากาศ

##### อุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิดิน

อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566 มีค่าเท่ากับ  $27.0 \pm 0.94$  องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิอากาศมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดปี ในเดือนเมษายน 2565 มีอุณหภูมิอากาศสูงสุดที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $28.6 \pm 2.9$  ซึ่งอยู่ในช่วงฤดูแล้ง และเดือนธันวาคม 2565 มีอุณหภูมิอากาศต่ำสุดที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $25.7 \pm 3.3$  ซึ่งอยู่ในช่วงฤดูแล้ง (ภาพที่ 4.5 ก และตารางที่ 4.4) และยังพบว่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (independent sample t-test,  $t=0.479$ ,  $p=0.632$ )



ภาพที่ 4.5 อุณหภูมิอากาศ (ก) และ อุณหภูมิดินรายเดือน (ข) (ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD) ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566 ในบริเวณเขตพันธุ์ไม้ผสม ป่าชายเลนปากแม่น้ำตราด

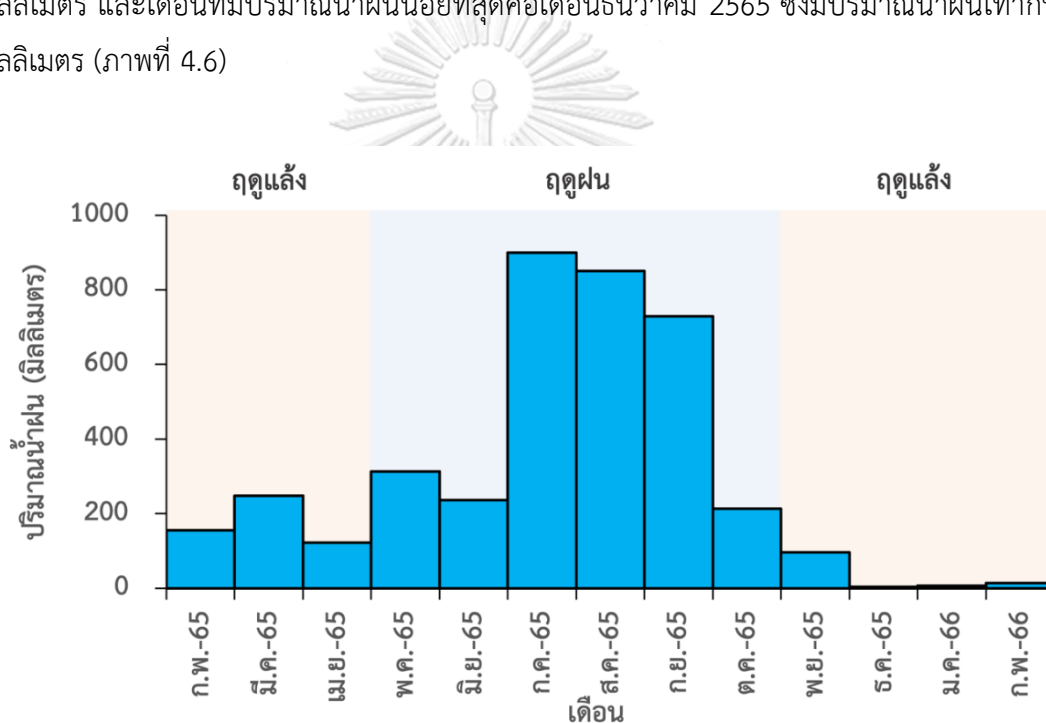
อุณหภูมิดินเฉลี่ยตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566 มีค่าเท่ากับ  $27.4 \pm 1.9$  องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.4) ซึ่งมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิอากาศดังแสดงในภาพที่ 4.5ข ในเดือนเมษายน 2565 มีอุณหภูมิดินสูงสุดที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $29.8 \pm 1.0$  ซึ่งอยู่ในช่วงฤดูแล้ง และเดือนมกราคม 2566 มีอุณหภูมิดินต่ำสุดที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $23.9 \pm 0.9$  ซึ่งอยู่ในช่วงฤดูแล้ง (ภาพที่ 4.5ก และตารางที่ 4.4) เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิดินเฉลี่ยในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝนพบว่า ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิดินในช่วงฤดูฝน (เดือนพฤษภาคม–ตุลาคม 2565) มีค่าต่ำกว่าในช่วงฤดูแล้ง (เดือนกุมภาพันธ์–เมษายน 2565 และเดือนพฤศจิกายน 2565–กุมภาพันธ์ 2566) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Mann-Whitney U test,  $z = -4.127$ ,  $p < 0.001$ )

**ตารางที่ 4.4** ข้อมูลอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิดินในช่วงเวลาที่ศึกษาตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566 โดยฤดูแล้ง ได้แก่ เดือนกุมภาพันธ์–เมษายน 2565 และเดือนพฤศจิกายน 2565–กุมภาพันธ์ 2566 และฤดูฝน ได้แก่ เดือนพฤษภาคม–ตุลาคม 2565

เดือน ปี	อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)			อุณหภูมิดิน (องศาเซลเซียส)		
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
กุมภาพันธ์ 2565	$27.3 \pm 2.8$	24.5	28.6	$27.9 \pm 0.3$	27.4	28.4
มีนาคม 2565	$28.0 \pm 2.7$	25.8	30.0	$29.1 \pm 0.8$	27.7	30.3
เมษายน 2565	$28.6 \pm 2.9$	23.5	30.5	$29.8 \pm 1.0$	27.3	31.0
พฤษภาคม 2565	$27.8 \pm 2.2$	23.9	29.6	$29.1 \pm 0.5$	28.0	30.2
มิถุนายน 2565	$28.2 \pm 2.1$	26.2	29.8	$29.5 \pm 0.8$	28.5	31.0
กรกฎาคม 2565	$26.6 \pm 1.8$	24.2	28.9	$27.7 \pm 0.7$	26.7	29.1
สิงหาคม 2565	$26.6 \pm 1.9$	24.0	29.0	$27.4 \pm 0.5$	26.1	28.2
กันยายน 2565	$26.0 \pm 1.6$	24.5	28.2	$27.1 \pm 0.6$	26.2	28.2
ตุลาคม 2565	$26.6 \pm 2.3$	23.6	28.3	$26.8 \pm 0.8$	25.0	27.9
พฤศจิกายน 2565	$27.0 \pm 2.6$	25.6	28.5	$26.7 \pm 0.6$	25.2	27.4
ธันวาคม 2565	$25.7 \pm 3.3$	22.0	28.5	$24.6 \pm 1.8$	22.0	27.3
มกราคม 2566	$25.8 \pm 2.7$	23.3	27.8	$23.9 \pm 0.9$	22.4	25.8
กุมภาพันธ์ 2566	$27.4 \pm 2.6$	26.0	28.4	$25.4 \pm 1.0$	23.3	26.9
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b><math>27.0 \pm 0.9</math></b>	-	-	<b><math>27.3 \pm 1.9</math></b>	-	-

### ปริมาณน้ำฝน

ปริมาณน้ำฝนรวมตลอดระยะเวลาของการศึกษาตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566 เท่ากับ 3,891 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำฝนทั้งหมดในช่วงฤดูแล้ง (เดือนกุมภาพันธ์–เมษายน 2565 และเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2565–กุมภาพันธ์ 2566) เท่ากับ 649 มิลลิเมตร และปริมาณน้ำฝนทั้งหมดในช่วงฤดูฝน (เดือนพฤษภาคม–ตุลาคม 2565) เท่ากับ 3,242 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 16.7 และ 83.3 ของปริมาณน้ำฝนทั้งหมดในเวลาที่ศึกษา ตามลำดับ โดยเดือนที่มีปริมาณน้ำฝนมากที่สุดคือเดือนกรกฎาคม 2565 ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 730 มิลลิเมตร และเดือนที่มีปริมาณน้ำฝนน้อยที่สุดคือเดือนธันวาคม 2565 ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 4 มิลลิเมตร (ภาพที่ 4.6)

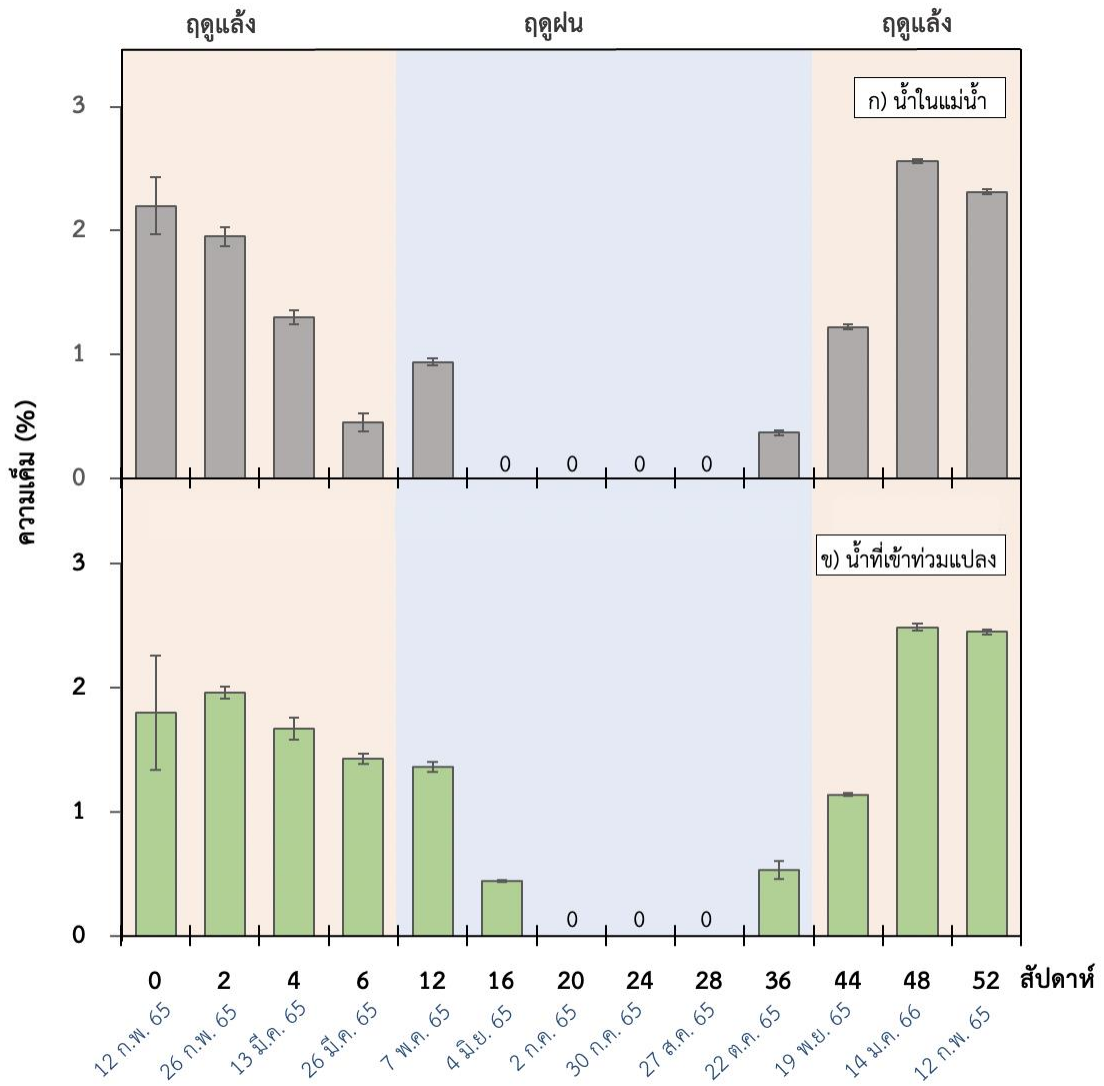


ภาพที่ 4.6 ปริมาณน้ำฝนรายเดือนจากสถานีตรวจวัดสภาพภูมิอากาศที่ตั้งอยู่บริเวณศูนย์วิจัยและพัฒนาทรัพยากรป่าชายเลนที่ 1 (ตราด) ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566

#### 4.4.2 ความเค็มของน้ำและดิน

จากการศึกษาเป็นระยะเวลาหนึ่งปีพบว่าความเค็มของน้ำในแม่น้ำและน้ำที่เข้าท่วมแปลงศึกษามีค่าสูงในช่วงฤดูแล้งและมีค่าต่ำในช่วงฤดูฝน (Kruskal–Wallis,  $H=37.72$  และ  $H=40.39$ ,  $p<0.001$  ตามลำดับ) ซึ่งให้เห็นถึงความผันแปรตามฤดูกาลของความเค็มที่ชัดเจน โดยในฤดูแล้ง (สัปดาห์ที่ 0–6 ช่วงเดือนกุมภาพันธ์–เมษายน 2565 และสัปดาห์ที่ 44–52 ช่วงเดือนพฤศจิกายน

2565—กุมภาพันธ์ 2566) ความเค็มของน้ำในแม่น้ำและน้ำที่เข้าท่วมแปลงศึกษาสูง โดยมีค่าในช่วงร้อยละ 0.45—2.56 และ 1.14—2.49 ตามลำดับ ขณะที่ฤดูฝนในสัปดาห์ที่ 12—36 (ช่วงเดือนพฤษภาคม—ตุลาคม 2565) ความเค็มของน้ำในแม่น้ำและน้ำที่เข้าท่วมแปลงศึกษาต่ำ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.00—0.94 และ 0.00—1.36 (ภาพที่ 4.7 และตารางที่ 4.5)



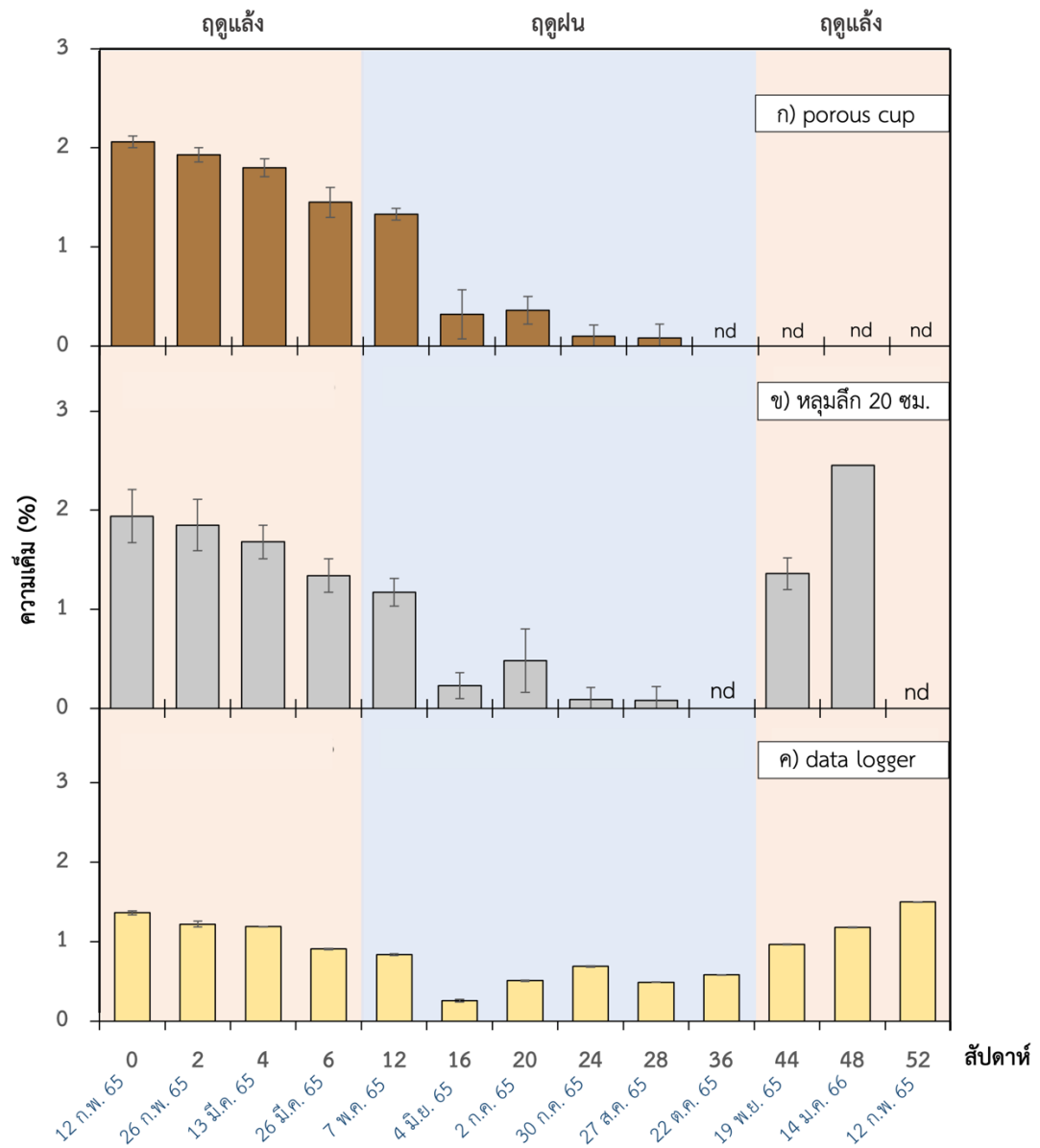
ภาพที่ 4.7 ความเค็ม (ค่าเฉลี่ย±SD) ของน้ำในแม่น้ำ (ก) และ น้ำที่เข้าท่วมแปลงศึกษา (ข) ตัวอักษรที่แตกต่างกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างสัปดาห์จากการทดสอบ Post hoc ด้วยวิธี pairwise comparison

ตารางที่ 4.5 ความเค็มของน้ำในแม่น้ำ น้ำที่เข้าท่วมแปลง และน้ำในดิน (ค่าเฉลี่ย±SD) ในแต่ละระยะเวลาของการศึกษา (n=3) โดยช่องสีส้มคือฤดูแล้ง และช่องสีฟ้าคือฤดูฝน

สัปดาห์	ความเค็มของน้ำ (%)		ความเค็มของน้ำในดิน (%)	
	น้ำในแม่น้ำ	น้ำที่เข้าท่วมแปลง	วิธี porous cup	วิธีเจาะหลุมลึก 20 ซม.
0	2.20±0.23 <sup>ab</sup>	1.80±0.46 <sup>abc</sup>	2.06±0.06 <sup>a</sup>	1.94±0.27 <sup>a</sup>
2	1.95±0.08 <sup>ab</sup>	1.96±0.05 <sup>abc</sup>	1.93±0.07 <sup>ab</sup>	1.85±0.26 <sup>a</sup>
4	1.30±0.06 <sup>ab</sup>	1.67±0.09 <sup>abc</sup>	1.80±0.09 <sup>ab</sup>	1.68±0.17 <sup>ab</sup>
6	0.45±0.07 <sup>bc</sup>	1.43±0.04 <sup>abc</sup>	1.45±0.15 <sup>bc</sup>	1.34±0.17 <sup>bc</sup>
12	0.94±0.03 <sup>abc</sup>	1.36±0.04 <sup>bcd</sup>	1.33±0.06 <sup>bc</sup>	1.17±0.14 <sup>bc</sup>
16	0.00±0.00 <sup>c</sup>	0.44±0.01 <sup>d</sup>	0.32±0.25 <sup>c</sup>	0.23±0.13 <sup>c</sup>
20	0.00±0.00 <sup>c</sup>	0.00±0.00 <sup>d</sup>	0.36±0.14 <sup>c</sup>	0.48±0.32 <sup>c</sup>
24	0.00±0.00 <sup>c</sup>	0.00±0.00 <sup>d</sup>	0.10±0.11 <sup>c</sup>	0.09±0.12 <sup>c</sup>
28	0.00±0.00 <sup>c</sup>	0.00±0.00 <sup>d</sup>	0.08±0.14 <sup>c</sup>	0.08±0.14 <sup>c</sup>
36	0.37±0.02 <sup>bc</sup>	0.53±0.07 <sup>d</sup>	nd	nd
44	1.22±0.02 <sup>abc</sup>	1.14±0.01 <sup>cd</sup>	nd	1.36±0.16 <sup>bc</sup>
48	2.56±0.02 <sup>a</sup>	2.49±0.03 <sup>a</sup>	nd	2.45±0.02 <sup>a</sup>
52	2.31±0.02 <sup>ab</sup>	2.45±0.02 <sup>ab</sup>	nd	nd
ค่าทางสถิติ	Kruskal–Wallis, H=37.72, p<0.001	Kruskal–Wallis, H=40.39, p<0.001	Kruskal–Wallis, H=34.43, p<0.001	Kruskal–Wallis, H=37.50, p<0.001

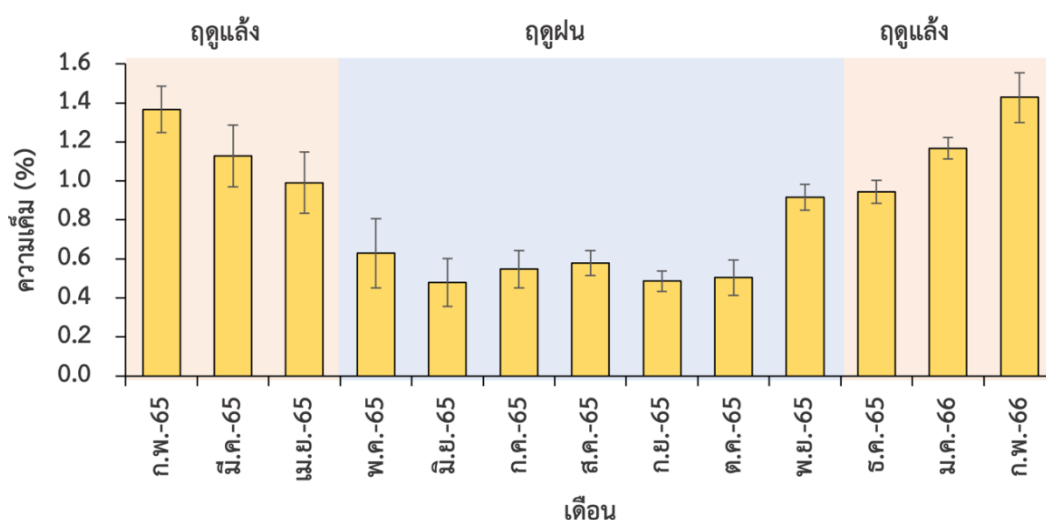
หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกัน หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในคอลัมน์เดียวกันจากการทดสอบ Post hoc ด้วยวิธี pairwise comparison และ nd หมายถึงไม่มีข้อมูล (no data)

ความเค็มของน้ำในดินที่วัดโดย salinometer จากน้ำที่เก็บด้วยวิธี porous cup และเก็บด้วยวิธีเจาะหลุมลึกลงไป 20 เซนติเมตรจากผิวดิน ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Mann-Whitney U Test, z=-0.154, p=0.877) ความเค็มของน้ำในดินมีความผันแปรตามฤดูกาลที่ชัดเจน โดยความเค็มของน้ำในดินในฤดูแล้ง (สัปดาห์ที่ 0–6 ช่วงเดือนกุมภาพันธ์–เมษายน 2565 และ สัปดาห์ที่ 44–52 ช่วงเดือนพฤศจิกายน 2565–เดือนกุมภาพันธ์ 2566) มีค่าสูงกว่าฤดูฝน (สัปดาห์ที่ 12–36 ช่วงเดือนพฤษภาคม–ตุลาคม 2565) (ภาพที่ 4.8ก และ ข)



ภาพที่ 4.8 ความชื้นของน้ำในดิน (ค่าเฉลี่ย±SD) ในแต่ละครั้งที่เก็บถ่วงย่อยสลายที่เก็บด้วยวิธี porous cup (ก) วิธีเจาะหลุมลึก 20 ซม. (ข) และข้อมูลจาก data logger (ค) อักษร nd หมายถึง ไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ (no data)

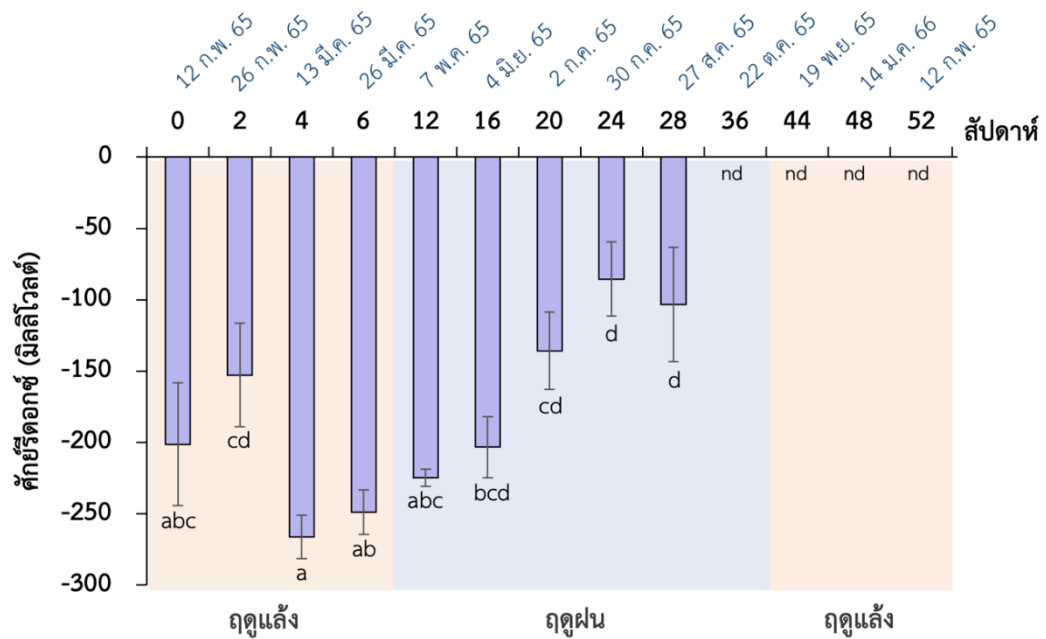
ค่าความเค็มที่วัดได้จากเครื่องวัดความเค็มที่บันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องทุก 1 ชั่วโมง ให้ค่าที่สอดคล้องกับการวัดความเค็มในแต่ละครั้งของการเก็บถ้อยสลายราก โดยความเค็มของน้ำในดินในฤดูแล้ง (เดือนกุมภาพันธ์—เมษายน 2565 และเดือนพฤศจิกายน 2565—เดือนกุมภาพันธ์ 2566) มีค่าสูงกว่าฤดูฝน (เดือนพฤษภาคม—ตุลาคม 2565) โดยเดือนมิถุนายน 2565 น้ำในดินมีความเค็มต่ำที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ  $0.48 \pm 0.12$  ส่วนเดือนกุมภาพันธ์ 2566 น้ำในดินมีความเค็มสูงที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ  $1.43 \pm 0.12$  (ภาพที่ 4.9)



ภาพที่ 4.9 ความเค็มของน้ำในดิน (ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD) บันทึกจาก data logger ที่ติดตั้งในพื้นที่ศึกษา บริเวณเขตพันธุ์ไม้เสม

#### 4.4.3 คุณสมบัติทางเคมีของดิน

ความเป็นกรดต่างของดิน (pH) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝน (independent sample t-test,  $t=0.126$ ,  $p=0.902$ ) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $7.52 \pm 0.35$  ค่าศักย์รีดอกซ์ (Eh) ของดินมีค่าติดลบตลอดช่วงเวลาหนึ่งปีที่ศึกษา โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $-190.99$  มิลลิโวลต์ ค่าศักย์รีดอกซ์ในสัปดาห์ที่ 0 ถึง 28 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Kruskal–Wallis,  $H=32.45$ ,  $p<0.001$ ) โดยศักย์รีดอกซ์ในฤดูแล้งมีค่าต่ำกว่าในฤดูฝน (ภาพที่ 4.10) แต่ในสัปดาห์ที่ 36 ถึง 52 ของการศึกษาไม่สามารถวัดค่าศักย์รีดอกซ์ของดินได้ เนื่องจากมีน้ำท่วมพื้นที่ศึกษาในช่วงกลางวันตั้งแต่วันที่ 22 ตุลาคม พ.ศ.2565 ถึง 12 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566



ภาพที่ 4.10 ศักย์รีดอกซ์ (Eh) ของดิน (ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD) ระหว่างการศึกษาการย่อยสลายราก อักษร nd หมายถึง ไม่มีข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ (no data) ตัวอักษรที่แตกต่างกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระหว่างแต่ละสัปดาห์ของการศึกษา จากการทดสอบ Post hoc ด้วยวิธี pairwise comparison

ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในดินที่เก็บในสัปดาห์ที่ 0 ในฤดูแล้งมีค่ามากกว่าฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในดินที่เก็บในสัปดาห์ที่ 12 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.6) นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในดินในฤดูแล้งในสัปดาห์ที่ 0 มีค่ามากกว่าสัปดาห์ที่ 12 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ในฤดูฝนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.6)



ตารางที่ 4.6 ปริมาณคาร์บอน (%C) ไนโตรเจน (%N) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) ของดิน (ค่าเฉลี่ย±SD) (n=3)

ตัวแปร	สัปดาห์	ฤดู		ค่าทางสถิติ
		แล้ง	ฝน	
%C	0	15.75±1.75	13.02±1.96	t=2.325, p=0.049
	12	12.80±1.34	12.40±2.06	t=0.359, p=0.729
	ค่าทางสถิติ	t=3.004, p=0.017	t=0.486, p=0.64	-
%N	0	0.84±0.08	0.73±0.09	t=2.065, p=0.073
	12	0.71±0.08	0.73±0.12	t=-0.274, p=0.791
	ค่าทางสถิติ	t=2.538, p=0.035	t=0, p=1	-
C:N	0	18.70±0.61	17.84±0.49	t=0.02, p=0.039
	12	18.06±0.83	17.04±0.10	z=-2.193, p=0.028
	ค่าทางสถิติ	t=1.395, p=0.201	z=-2.193, p=0.028	-

ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินในสัปดาห์ที่ 0 ในฤดูแล้งและฤดูฝนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าประมาณร้อยละ 0.84 และ 0.73 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.6) เมื่อเวลาผ่านไป 12 สัปดาห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินในฤดูแล้งและฤดูฝนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ มีค่าประมาณร้อยละ 0.71 และ 0.73 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าในฤดูแล้งปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในดินในสัปดาห์ที่ 0 ต่างจากในสัปดาห์ที่ 12 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนในฤดูฝนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

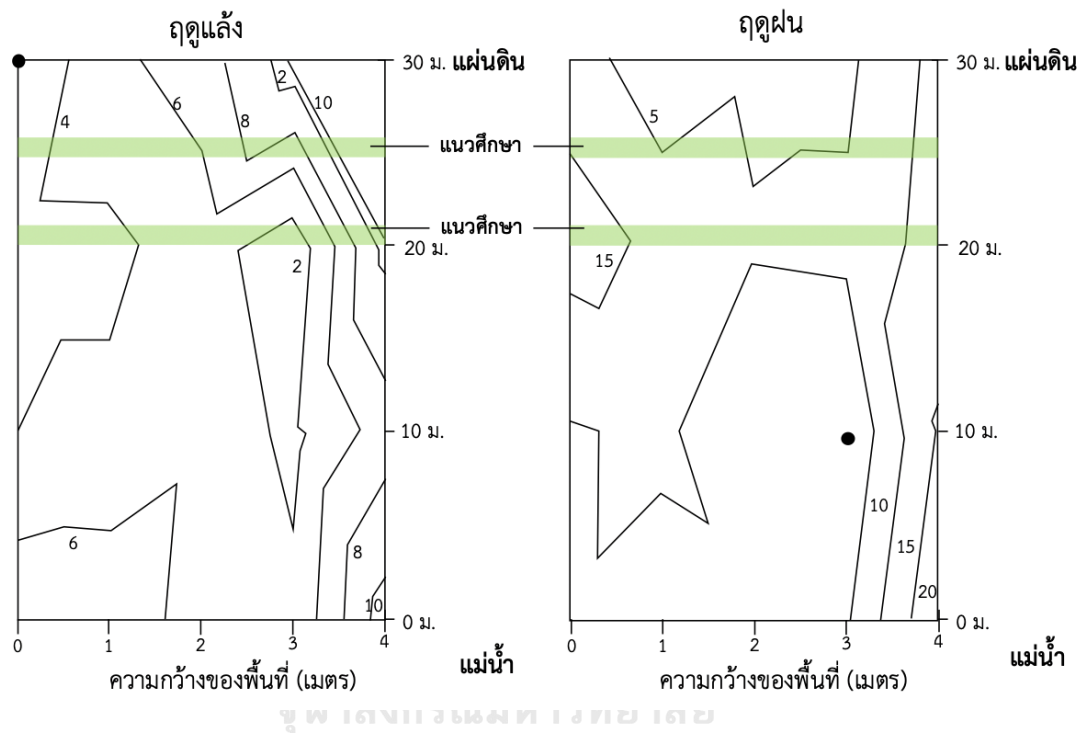
ค่า C:N ratio ของดินในสัปดาห์ที่ 0 ในฤดูแล้งมีค่ามากกว่าฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า 18.70 และ 17.84 ตามลำดับ ขณะที่ C:N ratio ของดินในสัปดาห์ที่ 12 ในฤดูแล้งมีค่าน้อยกว่าในฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ มีค่าประมาณ 18.06 และ 17.04 ตามลำดับ ในฤดูแล้ง C:N ratio ของดินในสัปดาห์ที่ 0 และ 12 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนฤดูฝนพบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของดินในสัปดาห์ที่ 0 มีค่ามากกว่าในสัปดาห์ที่ 12 (ตารางที่ 4.6)

เมื่อวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า C:N ratio ของดินกับรากฝอยผสมขาวพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกต่อกัน (Spearman correlation, rho=0.776, p<0.001)

#### 4.4.4 ภูมิลักษณะและระยะเวลาที่น้ำท่วม

##### ความสูงสัมพัทธ์และภูมิลักษณะของพื้นที่ศึกษา (relative elevation and topography)

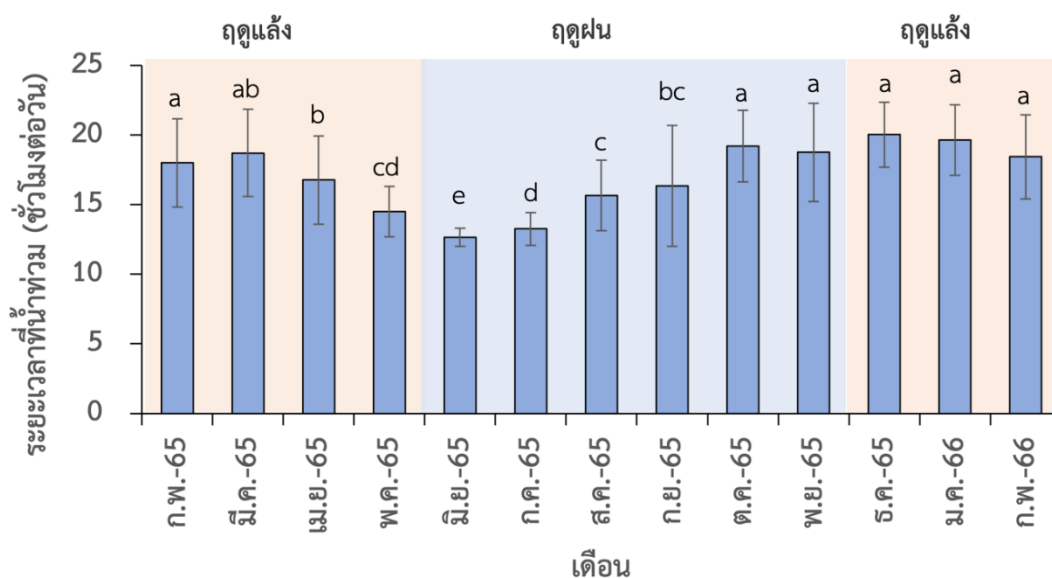
บริเวณที่ศึกษามีความสูงสัมพัทธ์เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงมีค่าในช่วง 0–10 และ 0–20 เซนติเมตร ในฤดูแล้ง (วันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2565) และฤดูฝน (วันที่ 23 กันยายน พ.ศ. 2565) ตามลำดับ (ภาพที่ 4.11) โดยเส้นความชัน (contour line) ในแผนที่ภูมิลักษณะแสดงความสูงสัมพัทธ์ของพื้นที่ แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ศึกษานี้มีความลาดชันต่ำ



ภาพที่ 4.11 แผนที่ภูมิลักษณะของพื้นที่ศึกษาในฤดูแล้ง (ซ้าย) และฤดูฝน (ขวา) โดยสัญลักษณ์วงกลมทึบแทนจุดอ้างอิง (datum point) และตัวเลขแสดงระดับความสูงสัมพัทธ์ในหน่วยเซนติเมตรเทียบกับจุดอ้างอิง

### ระยะเวลาที่น้ำท่วมพื้นที่ศึกษา (inundation period)

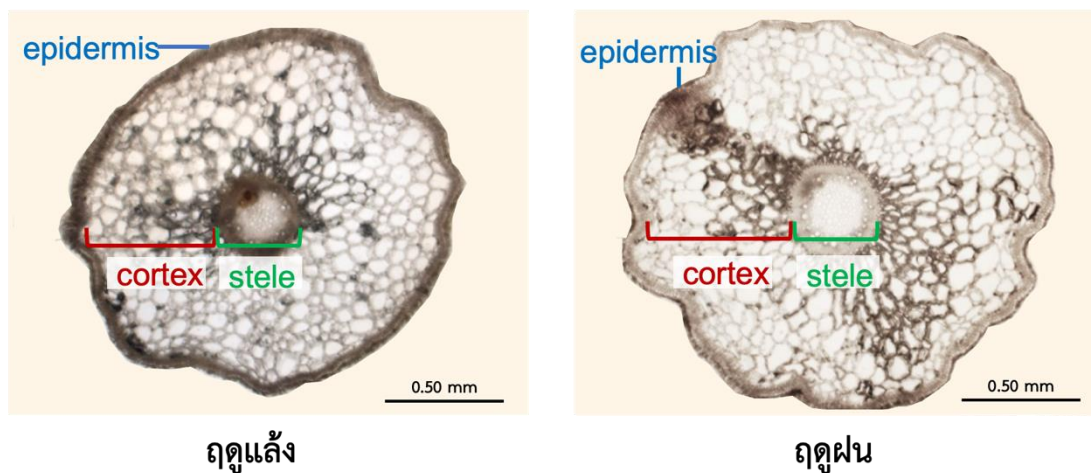
ในช่วงหนึ่งปีที่ศึกษาการย่อยสลายรากฝอยพบว่าระยะเวลาที่น้ำท่วมพื้นที่ศึกษาอยู่ในช่วง  $12.7 \pm 0.7$  ถึง  $20.0 \pm 2.3$  ชั่วโมงต่อวัน โดยระยะเวลาที่น้ำท่วมเฉลี่ยรายวันแต่ละเดือนมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Kruskal-Wallis,  $H=207.408$ ,  $p<0.001$ ) ดังแสดงในภาพที่ 4.12 และระยะเวลาที่น้ำท่วมพื้นที่ศึกษาในฤดูแล้งยาวนานกว่าฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (independent sample t-test,  $t=3.173$ ,  $p=0.017$ )



ภาพที่ 4.12 ระยะเวลาที่น้ำท่วมในพื้นที่ศึกษา (ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD) ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566 ตัวอักษรที่แตกต่างกันหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการทดสอบ Post hoc ด้วยวิธี pairwise comparison

#### 4.4.5 ปัจจัยทางชีวภาพ: ลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของรากฝอยแสมขาว

พื้นที่หน้าตัดรวมรากฝอยของแสมขาวที่เก็บในฤดูแล้งและฤดูฝนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่รากฝอยในฤดูแล้งมีพื้นที่ชั้นสตีล (stele) และชั้นคอร์เทกซ์ (cortex) น้อยกว่าในฤดูฝน (ภาพที่ 4.13 และ ตารางที่ 4.7) อัตราส่วนของพื้นที่ชั้นสตีลต่อพื้นที่หน้าตัดรากทั้งหมด ( $A_{\text{stele}}:A_{\text{total}}$ ) ในฤดูแล้งมีค่าน้อยกว่าอัตราส่วนในฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.7) เช่นเดียวกับอัตราส่วนของพื้นที่ชั้นคอร์เทกซ์ต่อพื้นที่หน้าตัดรวมทั้งหมด ( $A_{\text{cortex}}:A_{\text{total}}$ ) ในฤดูแล้งมีค่าน้อยกว่าอัตราส่วนในฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4.7)



ภาพที่ 4.13 ลักษณะภาพตัดขวางของรากฝอยแสมขาวในฤดูแล้งและฤดูฝนภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่ แสดงให้เห็นชั้นเอพิเดอร์มิส (epidermis) ชั้นสตีล (stele) และชั้นคอร์เทกซ์ (cortex)

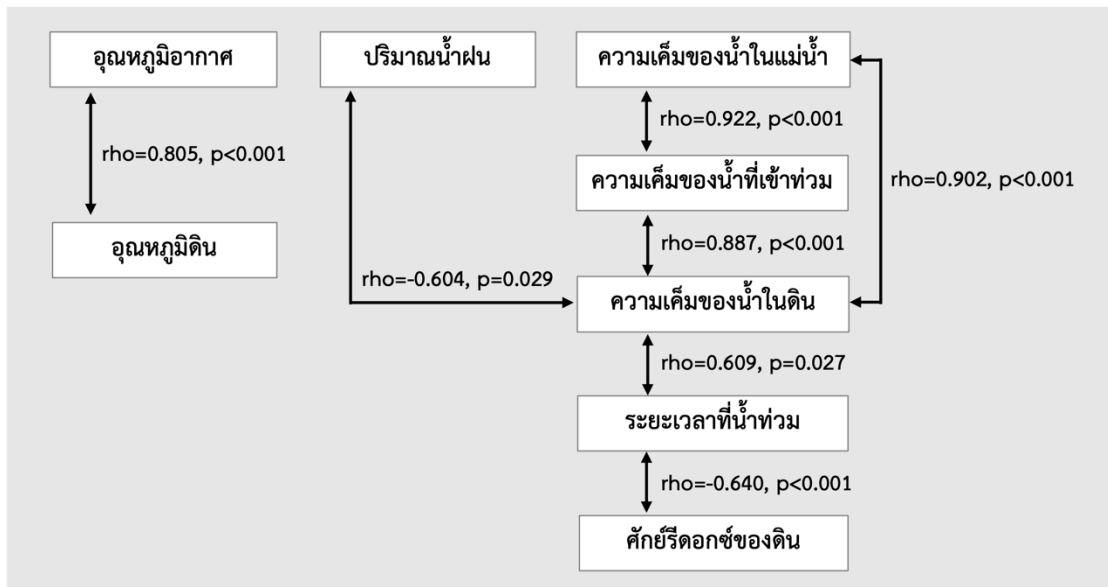
ตารางที่ 4.7 พื้นที่หน้าตัดรวม พื้นที่ชั้นสตีล พื้นที่ชั้นคอร์เทกซ์ของรากฝอยแสมขาว และอัตราส่วน ของพื้นที่ (ค่าเฉลี่ย±SD) ในฤดูแล้งและฤดูฝน (n=5) พร้อมค่าทางสถิติ

พื้นที่	ฤดูแล้ง	ฤดูฝน	ค่าทางสถิติ
พื้นที่หน้าตัดรวม $A_{total}$ (ตร.มม.)	1.157±0.553	1.462±0.720	$z=-1.186, p=0.237$
พื้นที่ชั้นสตีล $A_{stele}$ (ตร.มม.)	0.054±0.024	0.088±0.027	$t=-4.548, p<0.001$
พื้นที่ชั้นคอร์เทกซ์ $A_{cortex}$ (ตร.มม.)	0.876±0.431	1.500±0.602	$t=-3.724, p<0.001$
$A_{stele}:A_{total}$ (%)	4.787±0.688	6.528±1.394	$t=-4.548, p<0.001$
$A_{cortex}:A_{total}$ (%)	74.965±2.687	77.354±3.421	$t=-3.724, p<0.001$

#### 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายในป่าชายเลน

ในการศึกษานี้พบว่าปัจจัยสิ่งแวดล้อมในเขตพื้นที่ไม่แสม บริเวณป่าชายเลนปากแม่น้ำตราด มีสหสัมพันธ์กันดังแสดงในภาพที่ 4.14 โดยอุณหภูมิอากาศมีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิดิน ปริมาณน้ำฝนมีสหสัมพันธ์เชิงลบกับความเค็มของน้ำในดิน ความเค็มของน้ำในแม่น้ำมีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับความเค็มของน้ำที่เข้าท่วมและความเค็มของน้ำในดิน ความเค็มของน้ำที่เข้าท่วมมีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับความเค็มของน้ำในดิน ส่วนระยะเวลาที่น้ำท่วมมีสหสัมพันธ์เชิงลบกับค่าศักย์รีดอกซ์ของดินและมีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับความเค็มของน้ำในดิน

ทั้งนี้ไม่สามารถทดสอบสหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายกับอัตราการย่อยสลายรากฝอยของแสมขาวได้โดยตรง จึงเขียนอธิบายความสัมพันธ์ในส่วนอภิปรายผลการศึกษา (บทที่ 5)



ภาพที่ 4.14 สหสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ทดสอบด้วย Spearman correlation

## บทที่ 5

### อภิปรายผลการศึกษา

#### 5.1 ความผันแปรของปัจจัยสิ่งแวดล้อมระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝนในป่าชายเลน

ปัจจัยภูมิอากาศในป่าชายเลนที่ตั้งอยู่ภายใต้มรสุมเขตร้อนมีความผันแปรในรอบปี เช่น อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน จากการศึกษาที่อุณหภูมิอากาศในช่วงหนึ่งปีมีความผันแปรอยู่ในช่วง 1.6-3.3 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิดินมีความผันแปรอยู่ในช่วง 0.3-1.8 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.5 และ ตารางที่ 4.4) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิดินผันแปรในช่วงที่แคบกว่าอุณหภูมิอากาศ

อย่างไรก็ตามอุณหภูมิอากาศในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝนในช่วงที่ศึกษาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าอุณหภูมิอากาศมีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิดิน (ภาพที่ 4.14) สอดคล้องกับผลการศึกษาในป่าชายเลนเขตกึ่งร้อน ณ เกาะอิชิกากิ ประเทศญี่ปุ่น (Tomotsune et al., 2018) สำหรับอุณหภูมิดินของการศึกษาในป่าชายเลนปากแม่น้ำตราดนี้พบว่าอุณหภูมิดินในช่วงฤดูแล้งมีค่าต่ำกว่าช่วงฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยอุณหภูมิดินเฉลี่ยระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝนมีความผันแปรต่ำในช่วงประมาณ 1.1 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิดินในฤดูแล้งและฤดูฝนเท่ากับ 26.8 และ 27.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการศึกษาก่อนหน้าในเขตพันธุ์ไม้แสม ณ พื้นที่ศึกษาเดียวกัน ในปี พ.ศ. 2551 ที่อุณหภูมิดินในรอบปีมีความผันแปรต่ำในช่วงประมาณ 1.0 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิดินในฤดูแล้งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.2 องศาเซลเซียส และฤดูฝนเท่ากับ 27.2 องศาเซลเซียส (Poungparn et al., 2009)

ในการศึกษานี้พบว่าปัจจัยทางสภาพภูมิอากาศที่ผันแปรตามฤดูกาลอย่างชัดเจนคือปริมาณน้ำฝน โดยมีปริมาณน้ำฝนในฤดูฝนสูงถึงร้อยละ 83.3 ของปริมาณน้ำฝนทั้งหมดในช่วงเวลาที่ศึกษา (ภาพที่ 4.6) อันเนื่องมาจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จากอ่าวไทยที่พัดเอาความชื้นจากอ่าวไทยมาปกคลุมจังหวัดตราดในช่วงฤดูฝนตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ทำให้ช่วงเวลาดังกล่าวมีฝนตกปริมาณมาก อีกทั้งมีปริมาณน้ำท่า (runoff) ไหลลงสู่มแม่น้ำตราดมาก (เบญจมาศ มีทรัพย์ และคณะ, 2564) ซึ่งน้ำจืดปริมาณมากนี้เองที่มีอิทธิพลช่วยเจือจางความเค็มในป่าชายเลนปากแม่น้ำ นอกจากนี้ในการศึกษานี้พบว่าปริมาณน้ำฝนมีสหสัมพันธ์เชิงลบกับความเค็มของน้ำในดิน (ภาพที่ 4.14) ดังนั้นความเค็มในป่าชายเลนแห่งนี้จึงได้รับอิทธิพลจากความผันแปรตามฤดูกาลของปริมาณน้ำฝน

ความเค็มในป่าชายเลนปากแม่น้ำตราดแห่งนี้มีความผันแปรตามฤดูกาลที่ชัดเจน โดยมีความเค็มต่ำในฤดูฝนและมีความเค็มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่ฤดูแล้ง (ภาพที่ 4.8 และ 4.9) สอดคล้องกับการศึกษาของเบญจมาศ มีทรัพย์ และคณะ (2564) รายงานว่าความเค็มเฉลี่ยของน้ำในแม่น้ำตราดช่วงบริเวณที่ไหลผ่านจังหวัดตราดและบริเวณปากแม่น้ำมีค่าต่ำสุดในเดือนสิงหาคม (0.04 PSU) ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน

และมีค่าสูงในเดือนกุมภาพันธ์ ในฤดูแล้ง (19.83 PSU) และการศึกษาของ Komiyama และคณะ (2019) และ Kankong และคณะ (2021) ที่รายงานความเค็มของน้ำในแม่น้ำตราด น้ำที่เข้าท่วมและน้ำในดินในพื้นที่ศึกษาเดียวกันกับการศึกษานี้ โดยในเขตพื้นที่ไม่แสมมีความเค็มแตกต่างกันมากระหว่างฤดูฝนและฤดูแล้ง ในช่วงประมาณร้อยละ 0-2.7 (Komiyama et al., 2019) นอกจากนี้ การศึกษาในป่าชายเลนอื่นในเขตรวมศูนย์รายงานว่าความเค็มมีความผันแปรตามฤดูกาลโดยได้รับอิทธิพลจากน้ำฝนปริมาณมากในฤดูฝนเช่นเดียวกับการศึกษานี้ ได้แก่ ป่าชายเลนปากแม่น้ำประเทศฟิลิปปินส์มีค่าความเค็มของน้ำต่ำได้ถึงร้อยละ 0.33 ในช่วงฤดูฝน และมีค่าสูงถึงร้อยละ 2.4 ในช่วงฤดูแล้ง (Canini et al., 2013) ป่าชายเลนปากแม่น้ำ ประเทศบังคลาเทศ ในฤดูฝนมีความเข้มข้นของโซเดียม (Na) เท่ากับ 0.09 มิลลิกรัมต่อกรัม ต่ำกว่าในฤดูแล้งที่มีค่า 0.5 มิลลิกรัมต่อกรัม (Nasrin, Hossain and Rahman, 2019) ป่าชายเลนบางปู ประเทศไทย ที่จัดเป็นป่าชายเลนชายฝั่ง ความเค็มของน้ำมีค่าประมาณร้อยละ 0.50 ในช่วงฤดูฝน และ 1.50 ในช่วงฤดูแล้ง (ศรารวรรณ หงษ์วิเศษ, 2565) กล่าวได้ว่าในป่าชายเลนความเค็มเป็นปัจจัยที่มีความผันแปรตามฤดูกาลอย่างชัดเจน โดยความเค็มที่แตกต่างกันตามฤดูกาลนี้ส่งผลต่อการเติบโตของพืชชายเลน เช่น การเติบโตของลำต้นและการผลิใบใหม่ของต้นแสมขาวที่มีค่าสูงในช่วงฤดูฝน (Kankong et al., 2021) รวมถึงมวลชีวภาพของรากฝอยที่มีปริมาณมากในฤดูฝน (Hongwiset et al., 2021) ซึ่งการตอบสนองของพืชชายเลนต่อความผันแปรของความเค็มนี้อาจเป็นปัจจัยทางชีวภาพเชิงปริมาณที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้นในป่าชายเลนในแต่ละฤดูกาลได้

ในการศึกษานี้พบว่าระยะเวลาที่น้ำท่วมแปลงศึกษาอยู่ในช่วงประมาณ 12 ถึง 22 ชั่วโมงต่อวัน ส่งผลให้ดินอยู่ในสภาพน้ำท่วมซึ่งเป็นเวลานาน ทำให้ค่าศักย์รีดอกซ์ของดินที่วัดได้ตลอดการศึกษามีค่าติดลบ ซึ่งแสดงถึงสภาพที่ไร้ออกซิเจนของดิน (Pepper and Gentry, 2015) และระยะเวลาที่น้ำท่วมแปลงศึกษาในฤดูแล้งนานกว่าในฤดูฝน (ภาพที่ 4.12) ส่งผลให้ในช่วงฤดูแล้งดินป่าชายเลนอยู่ในสภาพน้ำท่วมซึ่งเป็นเวลานาน สอดคล้องกับค่าศักย์รีดอกซ์ในฤดูแล้งที่มีค่าต่ำกว่าในฤดูฝน นอกจากนี้ ระยะเวลาที่น้ำท่วมแปลงศึกษายังมีสหสัมพันธ์เชิงบวกกับความเค็มของน้ำในดิน (ภาพที่ 4.14) โดยน้ำที่เข้าท่วมจะซึมลงสู่ชั้นดินด้านล่างในฤดูแล้ง ความเค็มของน้ำที่เข้าท่วมมีค่าสูงและน้ำท่วมเป็นเวลานานกว่าฤดูฝนส่งผลให้ความเค็มของน้ำในดินสูง ขณะที่น้ำที่เข้าท่วมในฤดูฝนมีความเค็มต่ำจึงเจือจางความเค็มของน้ำในดิน (Komiyama et al., 2020)

## 5.2 อัตราการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวและใบชา

### 5.2.1 การย่อยสลายของรากฝอยในฤดูแล้งและฤดูฝน

จากการศึกษานี้อัตราการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวในฤดูแล้งมีค่าน้อยกว่าฤดูฝน (0.003 และ 0.005 ต่อวัน ตามลำดับ) ซึ่งการย่อยสลายของรากฝอยที่เกิดขึ้นซ้ำในฤดูแล้งได้รับอิทธิพลจากสภาวะความเค็มสูง สอดคล้องกับการศึกษาของ Ouyang และคณะ (2017) ที่รายงานความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการย่อยสลายรากพืชชายเลนทั่วโลกกับความเค็มของน้ำในดิน ซึ่งพบว่าอัตราการย่อยสลายของรากลดลงเมื่อความเค็มของน้ำในดินสูงขึ้น ในป่าชายเลนที่มีความเค็มสูงสามารถยับยั้งกิจกรรมของจุลชีพที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย่อยสลายในดินได้ จากการศึกษาคโครงสร้างทางสังคมของจุลชีพบริเวณปากแม่น้ำเหลือง ประเทศจีน พบว่าความเค็มของดินส่งผลต่อความมากมาย (abundance) ของจุลชีพในดินบริเวณที่น้ำท่วมถึง (intertidal zone) โดยบริเวณที่มีความเค็มต่ำ ( $0.69 \pm 0.18 \text{ mS cm}^{-1}$ ) และสูง ( $11.99 \pm 3.82 \text{ mS cm}^{-1}$ ) จะพบความมากมายของจุลชีพต่ำกว่าบริเวณที่มีความเค็มปานกลาง ( $5.44 \pm 1.11 \text{ mS cm}^{-1}$ ) ซึ่งจุลชีพที่พบส่วนใหญ่เกี่ยวข้องในกระบวนการสลายคาร์บอนและการหมุนเวียนไนโตรเจน (Zhang et al., 2021a) นอกจากนี้ความเค็มที่เพิ่มขึ้นในพื้นที่ชุ่มน้ำส่งผลให้การทำงานของเอนไซม์ของจุลชีพในดินลดลง โดยเฉพาะเอนไซม์ที่มีบทบาทในการย่อยสารอินทรีย์ที่ไม่คงตัว (labile substrates) เช่น ซูโครส คาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำ และเซลลูโลส โดยลดลงถึงร้อยละ 33 (Yang et al., 2022) ตัวอย่างจุลชีพที่มีบทบาทในการย่อยสลายในป่าชายเลน เช่น แบคทีเรียในไฟลัม Chloroflexi (Hug et al., 2013) จากที่ได้กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าความเค็มเป็นปัจจัยสำคัญที่มีส่วนยับยั้งกระบวนการทางชีวเคมีภายในดินของระบบนิเวศบริเวณปากแม่น้ำและชายฝั่งทะเล ดังนั้นความเค็มในป่าชายเลนที่ผันแปรตามฤดูกาลชัดเจนจึงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการย่อยสลาย ดังนั้นผลการศึกษานี้จึงสอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่าอัตราการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวในฤดูแล้งมีค่าน้อยกว่าฤดูฝนเนื่องจากความเค็มของน้ำและดินในฤดูแล้งที่มีค่าสูงกว่าในฤดูฝน

แม้ว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายซากพืชในระบบนิเวศป่าไม้อย่างมาก (Krishna and Mohan, 2017; Prescott, 2010) โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งเสริมให้เกิดการสูญเสียมวลของซากพืชได้มากขึ้น (Salah and Scholes, 2011; Waksman and Gerretsen, 1931) สะท้อนถึงการย่อยสลายที่เกิดเร็วขึ้นภายใต้อุณหภูมิสูง นอกจากนี้อุณหภูมิดินมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอัตราการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการหายใจของดิน (soil respiration) เช่น การศึกษาของ Pongpam และคณะ (2009) ในป่าชายเลนปากแม่น้ำตราด และ Xiao และคณะ (2014) ในป่าสนเขตกึ่งร้อน ประเทศจีน ซึ่งอัตราการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์นี้สามารถสะท้อนถึงกิจกรรมของจุลชีพในดินที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายซากพืชได้ และยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายของซากพืช เช่น ความชื้นและปริมาณสารอาหารในดิน (Berg and



McClagherty, 2008) อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้พบว่าอุณหภูมิอากาศที่ไม่ผันแปรระหว่างฤดูกาล นั้นไม่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาวโดยตรง ส่วนอุณหภูมิดินที่ผันแปรระหว่าง ฤดูกาลในช่วงแคบมีอิทธิพลต่อการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาวน้อยกว่าปัจจัยสิ่งแวดล้อมอื่นที่มี ความผันแปรตามฤดูกาลที่ชัดเจน ได้แก่ ความเค็มและระยะเวลาที่น้ำท่วม

ป่าชายเลนในการศึกษานี้มีระยะเวลาที่น้ำท่วมผันแปรตามฤดูกาลอย่างชัดเจน โดยในฤดูแล้ง พื้นที่ศึกษาถูกน้ำท่วมเป็นระยะเวลานานกว่าในฤดูฝน ซึ่งนอกจากจะส่งเสริมให้ดินในฤดูแล้งอยู่ใน สภาพที่มีความเค็มสูงเป็นระยะเวลานานที่ส่งผลในเชิงลบต่อการย่อยสลายของรากฝอยแล้ว ยัง ส่งเสริมสภาพไร้ออกซิเจนของดินในฤดูแล้ง เนื่องจากค่าศักย์รีดอกซ์ของดินในฤดูแล้งที่มีค่าติดลบ มากกว่าในฤดูฝน สภาพดินที่ไร้ออกซิเจนนี้ทำให้กระตุ้นการหายใจระดับเซลล์แบบไม่ใช้ออกซิเจนของ จุลชีพให้เพิ่มขึ้น ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการหายใจระดับเซลล์แบบใช้ออกซิเจน นอกจากนี้ ค่าศักย์รีดอกซ์ของดินยังมีความสัมพันธ์เชิงลบกับกิจกรรมของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสในดิน (soil dehydrogenase activity) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สะท้อนกิจกรรมของจุลชีพในดินโดยมีผลยับยั้งการ ดำเนินกิจกรรมของจุลชีพที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายได้ (Brzezinska, 2004)

คุณสมบัติทางเคมีของดินยังส่งผลต่อการย่อยสลายรากพืช ในการศึกษานี้ได้ศึกษาอัตราส่วน คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) ของดินในฤดูแล้งและฤดูฝน ซึ่งเป็นค่าที่สามารถชี้ให้เห็นถึง กระบวนการปลดปล่อย (mineralization) ของอินทรีย์วัตถุและเกิดการปลดปล่อยไนโตรเจนที่พืช สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้น C:N ratio ของดินสามารถเป็นตัวชี้วัดการย่อยสลายที่เกิดขึ้นใน ป่าได้ หากมีค่าตั้งแต่ 1-15 ชี้ให้เห็นว่าเกิดกระบวนการ mineralization เร็วและเกิดการปลดปล่อย ไนโตรเจน ค่าในช่วง 20-30 แสดงถึงภาวะสมดุลระหว่างกระบวนการ mineralization ที่เป็นการ ปลดปล่อยธาตุอาหารและกระบวนการตรึงโดยจุลชีพ (microbial immobilization) (Brust, 2019) สำหรับการศึกษา C:N ratio ของดิน ในฤดูแล้งมีค่าสูงกว่าฤดูฝน มีค่าประมาณ 18 และ 17 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5) ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับค่าที่รายงานในการศึกษาก่อนหน้าของ Hongwiset และคณะ (2021) ที่ศึกษาในเดือนมีนาคม 2561 (ฤดูแล้ง) และเดือนกรกฎาคม 2561 (ฤดูฝน) และปิยะพล แก่นคง (2563) ที่ศึกษาในเดือนกรกฎาคม 2562 (ฤดูฝน) และเดือนพฤศจิกายน 2562 (ฤดูแล้ง) ที่ศึกษาในเขตพันธุ์ไม้แสมในพื้นที่ศึกษาเดียวกัน ชี้ให้เห็นว่า C:N ratio ของดินในพื้นที่ศึกษา นี้เข้าใกล้ค่าที่จะเข้าสู่ภาวะสมดุลระหว่างกระบวนการ mineralization ที่เป็นการปลดปล่อย ธาตุอาหารและกระบวนการตรึงโดยจุลชีพ สำหรับ C:N ratio ของดินของป่าชายเลนในการศึกษาอื่น มีความแตกต่างกันขึ้นกับหลายปัจจัย ทั้งลักษณะทางธรณีสัณฐาน แหล่งที่มาของธาตุอาหารในดิน และกระบวนการทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นในดิน เช่น ป่าชายเลนปากแม่น้ำในเขตกึ่งร้อน ในฟูเจียน ประเทศจีน C:N ratio ของดินมีค่าประมาณ 7 (Guo et al., 2021) ในขณะที่ C:N ratio ของดิน ในป่าชายเลนชายฝั่งทะเลแดง ประเทศซาอุดีอาระเบีย มีค่าประมาณ 11 (Garcias-Bonet et al.,

2019) และ C:N ratio ของดินในป่าชายเลนชายฝั่ง รัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา มีค่าอยู่ในช่วง 18-35 (Poret et al., 2007)

นอกจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมจะมีอิทธิพลต่อการย่อยสลายของรากแล้วปัจจัยทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับรากพืชเองก็ส่งผลอย่างมากต่อการย่อยสลาย โดยเฉพาะคุณสมบัติทางเคมีของรากฝอยที่ส่งผลต่อคุณภาพซากพืช (litter quality) ที่จะเข้าสู่การย่อยสลาย (Swift et al., 1979) ในการศึกษาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในรากฝอยของแสมชวาก่อนเกิดการย่อยสลายในฤดูแล้งต่ำกว่าฤดูฝนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าประมาณร้อยละ 0.87 และ 0.95 ตามลำดับ แตกต่างกับการศึกษาก่อนหน้าในพื้นที่เดียวกันที่มีค่าประมาณร้อยละ 0.77 ในฤดูฝน (บัณฑิตูร์ย์ เกลิมฉัตรวิไล, 2553) และการศึกษาของ Hongwiset และคณะ (2021) มีค่าประมาณร้อยละ 1.13 ในฤดูแล้งและร้อยละ 1.22 ในฤดูฝน ซึ่งปริมาณไนโตรเจนในรากฝอยของแสมชวาที่แตกต่างกันในฤดูแล้งและฤดูฝนนี้อาจเป็นผลมาจากปริมาณธาตุอาหารที่มาจากแหล่งน้ำหรือปริมาณไนโตรเจนในดินที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาการศึกษา อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในรากฝอยของแสมชวาในฤดูฝนที่มีค่าสูงกว่าฤดูแล้ง อาจได้รับอิทธิพลจากปริมาณไนโตรเจนรวมทั้งหมดในน้ำที่เข้าท่วมป่าชายเลนที่เพิ่มขึ้นในฤดูฝน (ปิยะพล แก่นคง, 2563) อันเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำท่าในฤดูฝน ที่ทำให้สารอนินทรีย์จากพื้นที่เกษตรกรรม แหล่งชุมชน และพื้นที่อุตสาหกรรมถูกล้างและพัดพามาพร้อมกับมวลน้ำปริมาณมากในแม่น้ำตราด (เบญจมาศ มีทรัพย์, 2564) ดังนั้นในฤดูฝนจึงอาจมีไนโตรเจนในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้มาก (available nitrogen) ซึ่งรากฝอยของแสมชวามีโอกาสดูดซึมไนโตรเจนที่มีปริมาณมากในน้ำและสะสมในเนื้อเยื่อรากได้มาก

จากการศึกษานี้พบว่าปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในรากฝอยของแสมชวาก่อนเกิดการย่อยสลายไม่แตกต่างระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝน โดยมีค่าประมาณร้อยละ 42.71 ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาก่อนหน้าในพื้นที่เดียวกันที่รายงานปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในรากฝอย แสมชวาก่อนเกิดการย่อยสลายในฤดูฝน มีค่าประมาณร้อยละ 39.73 (บัณฑิตูร์ย์ เกลิมฉัตรวิไล, 2553) ขณะที่การศึกษาของ Hongwiset และคณะ (2021) พบว่าปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในรากฝอย แสมชวามีค่าสูงกว่าการศึกษานี้ โดยมีค่าประมาณร้อยละ 47.70 และ 48.38 ในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณา C:N ratio ในเนื้อเยื่อรากฝอยของแสมชวา พบว่าในฤดูแล้งมีค่าสูงกว่าในฤดูฝน (ร้อยละ 49.43 และ 44.87 ตามลำดับ) เป็นผลจากปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในรากฝอยที่มีค่าต่ำในฤดูแล้ง (ตารางที่ 4.2) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Hongwiset และคณะ (2021) ในพื้นที่เดียวกัน ที่รายงานค่า C:N ratio ของเนื้อเยื่อรากฝอยในฤดูแล้งมีค่าประมาณร้อยละ 42.43 และในฤดูฝนมีค่าประมาณร้อยละ 39.61 ซึ่งค่า C:N ratio ในเนื้อเยื่อพืชเป็นปัจจัยหนึ่งที่อธิบายการย่อยสลายที่เกิดขึ้น (ONeill and Norby, 1993) จากการศึกษาของ Huxham และคณะ (2010) ในป่าชายเลนประเทศเคนยา พบว่า C:N ratio ในเนื้อเยื่อรากที่มีค่าต่ำส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้เร็ว

ซึ่ง C:N ratio ในเนื้อเยื่อรากนี้แตกต่างกันไปตามชนิดพืช ขณะที่การศึกษาของ Poret และคณะ 2007 ในป่าชายเลนชายฝั่ง รัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่าง C:N ratio ในเนื้อเยื่อรากกับการย่อยสลาย

นอกจากปัจจัยทางชีวภาพด้านคุณสมบัติทางเคมีตั้งต้นของรากมีความแตกต่างกันระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝน ในการศึกษาวิจัยยังพบว่าลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของรากฝอยแสมขาวมีความแตกต่างในฤดูแล้งและฤดูฝนเช่นกัน โดยทั้งอัตราส่วนของพื้นที่ชั้นสตีลต่อพื้นที่หน้าตัดรากทั้งหมด และอัตราส่วนของพื้นที่ชั้นคอร์เทกซ์ต่อพื้นที่หน้าตัดรากทั้งหมด ในฤดูแล้งมีค่าน้อยกว่าในฤดูฝน (ตารางที่ 4.7) ซึ่งลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของรากฝอยที่เก็บในสองฤดูที่ต่างกันนี้อาจได้รับอิทธิพลจากความเค็มของน้ำในดินที่มีค่าสูงในฤดูแล้งและมีค่าต่ำในฤดูฝน โดยมีรายงานในพืชชนิดอื่นว่าความเค็มส่งผลต่อลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของรากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก เช่น การศึกษาของ Udovenko และคณะ (1970) พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) สูงส่งผลให้ความกว้างของชั้นสตีลและชั้นคอร์เทกซ์ของรากข้าวสาลี (*Triticum aestivum*) ลดลง นอกจากนี้จากการศึกษาในพื้นที่ลุ่มน้ำเค็ม (saltmarsh) พบว่ารากฝอยของพืชสกุล *Salicornia* มีผนังของเซลล์เวสเซลในท่อลำเลียงน้ำ (xylem) หนาขึ้นและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์พาราเอนไคมาในชั้นคอร์เทกซ์ลดลงเมื่อเจริญในสภาวะที่มีความเค็มสูง เป็นกลไกการปรับตัวเพื่อความอยู่รอดของพืชภายใต้ความเค็มโดยการลดการขยายตัวของเซลล์ราก (Moatabarniya et al., 2022) ดังนั้นในพืชชายเลนที่มีการปรับตัวต่อความเค็มเพื่อรักษาศักยภาพของการลำเลียงน้ำไปยังลำต้นในสภาวะที่ความเค็มภายนอกสูงขึ้น (Parida and Jha, 2010) จึงอาจอนุมานได้ว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของรากเป็นอีกหนึ่งกลไกเพื่อให้พืชชายเลนสามารถอยู่รอดในสภาวะที่มีความเค็มสูง จากการศึกษาวิจัยรากฝอยของแสมขาวในฤดูแล้งมีอัตราส่วนของพื้นที่ชั้นสตีลและคอร์เทกซ์ที่น้อยกว่าฤดูฝนจึงอาจอนุมานได้ว่าเป็นผลจากการปรับตัวในสภาวะที่มีความเค็มสูงขึ้น โดยความหนาของผนังของเซลล์ในเนื้อเยื่อท่อลำเลียงน้ำเกิดจากการสะสมลิกนิน ซึ่งถูกกระตุ้นได้ด้วยความเค็มที่สูงขึ้น (Jbir et al., 2001; Lastochkina et al., 2021; Maia et al., 2013) แสดงให้เห็นว่ารากฝอยของแสมขาวในฤดูแล้งมีแนวโน้มที่จะมีการสะสมลิกนินมากกว่ารากฝอยในฤดูฝน ส่งผลให้การย่อยสลายของรากในฤดูแล้งเกิดขึ้นช้ากว่า

นอกจากนี้ในชั้นคอร์เทกซ์ของรากพืชสกุลแสม (*Avicennia*) พบเนื้อเยื่อ aerenchyma เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านออกซิเจนภายในรากภายใต้สภาวะที่มีน้ำท่วมขัง (Pi et al., 2009) ในการศึกษาวิจัยพบว่ารากฝอยของแสมขาวในฤดูฝนมีพื้นที่ชั้นคอร์เทกซ์มากกว่าฤดูแล้ง รวมถึงมีพื้นที่ชั้นสตีลที่เป็นส่วนของท่อลำเลียงน้ำมากกว่าฤดูแล้ง จึงอนุมานได้ว่ารากฝอยในฤดูฝนมีการตอบสนองต่อความเค็มต่ำโดยเพิ่มประสิทธิภาพในการลำเลียงน้ำและธาตุอาหาร รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านออกซิเจนภายในราก เพื่อให้การเติบโตโดยรวมของต้นพืชเกิดขึ้นได้มากในช่วงที่มีความเค็มต่ำ

ดังนั้นรากฝอยในฤดูฝนที่มีพื้นที่ชั้นคอร์เทกซ์มากประกอบด้วยเซลล์พาราเนโคมาและโพรงอากาศมาก จึงเอื้อให้เกิดการย่อยสลายของรากภายใต้สภาวะที่มีความเค็มต่ำได้มาก จากการศึกษาในพื้นที่ศึกษาเดียวกันนี้พบว่ารากฝอยของแสมขามมีอัตราการเวียนกลับเท่ากับ 0.98 รอบต่อปี (ฉัตรลักษณ์ เจริญพรภักดี, 2557) กล่าวคือรากฝอยของแสมขามมีอายุขัยเท่ากับ 1.02 ปี ดังนั้นรากฝอยที่เจริญในฤดูฝนจะมีชีวิตอยู่และคงอยู่ในดินเป็นเวลาประมาณ 1 ปี เมื่อรากตายกลายเป็นซากรากก็จะถูกย่อยสลายในฤดูฝนของปีถัดไป อย่างไรก็ตามลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของรากพืชชายเลนก็มีความแตกต่างกันตามชนิดของพืช (Pi et al., 2009) ดังนั้นยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อยืนยันลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของรากพืชชายเลนต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มต่อไป

### 5.2.2 รูปแบบการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาม

การย่อยสลายของรากฝอยแสมขามในการศึกษานี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือช่วงที่เกิดการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (rapid phase) และช่วงที่เกิดการย่อยสลายอย่างช้า ๆ (slow phase) ซึ่งมีรูปแบบสอดคล้องกับการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขามที่ศึกษาในพื้นที่เดียวกัน (บัณฑิตบุรี เฉลิมฉัตรวิไล, 2553) และการศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยในป่าชายเลนเขตกิ่งร้อน ประเทศจีน (Zhang et al., 2021b) ในการศึกษานี้การย่อยสลายของรากฝอยของแสมขามเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วใน 2 สัปดาห์แรก จากการศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยในฤดูแล้ง (12 สัปดาห์) และในรอบปี (52 สัปดาห์) ที่เริ่มศึกษาในฤดูแล้ง น้ำหนักของรากฝอยลดลงประมาณร้อยละ 10 ในสัปดาห์ที่ 2 (ภาพที่ 4.1ก และ 4.2) ซึ่งน้อยกว่าน้ำหนักของรากฝอยจากการศึกษาในฤดูฝนที่ลดลงประมาณร้อยละ 20 (ภาพที่ 4.1ก) และหลังจาก 2 สัปดาห์แรกของการย่อยสลาย น้ำหนักของรากฝอยลดลงอย่างช้า ๆ ไปจนถึงสัปดาห์สุดท้ายของการศึกษาทั้งในแต่ละฤดูและรอบหนึ่งปี (ภาพที่ 4.1ก และ 4.2) แม้ว่าการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขามในการศึกษานี้มีแนวโน้มสอดคล้องกับการย่อยสลายของรากฝอยแสมขามในช่วง 1 ปีที่เริ่มศึกษาในฤดูฝนในพื้นที่ศึกษาเดียวกัน (บัณฑิตบุรี เฉลิมฉัตรวิไล, 2553) แต่ช่วงที่เกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็วในการศึกษานี้อยู่ในช่วง 2 สัปดาห์แรก และมีน้ำหนักรากฝอยเหลือประมาณร้อยละ 90 ขณะที่บัณฑิตบุรี เฉลิมฉัตรวิไล (2553) รายงานว่าในช่วง 4 สัปดาห์แรกเป็นช่วงที่เกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว และน้ำหนักรากฝอยลดลงเหลือร้อยละ 70

การย่อยสลายของรากฝอยที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (rapid phase) เนื่องจากรากฝอยมีแหล่งอาหารให้จุลินทรีย์นำไปใช้ได้มาก เช่น น้ำตาล แป้ง โปรตีน และกรดอินทรีย์ ซึ่งเป็นการสูญเสียองค์ประกอบที่ไม่คงตัวจากซากพืชไปอย่างรวดเร็ว (McClagherty and Melillo, 1984; Twilley et al. 1986) และหลังจากนั้นจะเป็นการย่อยสลายอย่างช้า ๆ (slow phase) ซึ่งเป็นการสลายสารที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น เซลลูโลสและลิกนิน (McClagherty and Melillo, 1984; Twilley et al. 1986)

### 5.2.3 การย่อยสลายของรากฝอยในรอบปี

การศึกษาอัตราการย่อยสลายรากพืชส่วนใหญ่มักศึกษาในช่วงเวลา 1 ปี เพื่อให้สอดคล้องกับการคำนวณผลผลิตของรากฝอยในรอบหนึ่งปีที่น่าไปใช้ในการประมาณคาร์บอนในระบบนิเวศป่าชายเลนได้ โดยอัตราการย่อยสลายรากฝอยของแสมขาวที่เกิดขึ้นในรอบหนึ่งปี ( $k_{\text{year}}$ ) ของการศึกษานี้ที่เริ่มศึกษาในฤดูแล้งมีค่าเท่ากับ 0.001 ต่อวัน ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอัตราการย่อยสลายของรากพืชชายเลนของการศึกษาอื่นที่ศึกษาในระยะเวลาประมาณ 1 ปี และส่วนใหญ่เริ่มศึกษาในช่วงฤดูฝน (ตารางที่ 5.1) อาจเป็นผลเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัยด้านความเค็มที่ต่างกันในช่วงฤดูเริ่มต้นของการติดตั้งถุงย่อยสลาย ทำให้การย่อยสลายของรากฝอยในช่วงแรกซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว (rapid phase) ต่างกัน โดยการศึกษาที่เริ่มในช่วงฤดูแล้งภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเค็มสูงอาจส่งผลให้การย่อยสลายของรากฝอยในช่วงแรกเกิดขึ้นได้น้อยกว่าในฤดูฝน ดังที่ได้อภิปรายในหัวข้อที่ 5.2.1 ดังนั้นเมื่อนำร้อยละน้ำหนักที่เหลือในแต่ละระยะเวลาของการย่อยสลายไปคำนวณอัตราการย่อยสลายจึงได้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการศึกษาที่เริ่มในช่วงฤดูฝน



ตารางที่ 5.1 การศึกษาการย่อยสลายของรากพืชในป่าชายเลนและอัตราการย่อยสลาย (k)

พื้นที่ศึกษา	ชนิดพืช/ส่วนของพืช	ฤดูที่เริ่มศึกษา	ระยะเวลาที่ศึกษา	โมเดลที่ใช้	k (ต่อวัน)	ที่มาของข้อมูล
ป่าชายเลนปากแม่น้ำ จังหวัดตราด ประเทศไทย	Avicennia alba / รากผอย	ฤดูแล้ง	84 วัน	Negative- exponential model	0.003	การศึกษานี้
		ฤดูฝน	84 วัน		0.005	
		ฤดูแล้ง	365 วัน		0.001	
ป่าชายเลนปากแม่น้ำ จังหวัดตราด ประเทศไทย	Avicennia alba / รากผอย Rhizophora sp. / รากผอย Xylocarpus granatum / รากผอย	ฤดูฝน	365 วัน	Two-stage (double exponential)	0.003	นันทูรี เดลิมัตวีเด (2553)
					0.003	
					0.004	
ป่าชายเลนชายฝั่ง ประเทศเคนยา	Avicennia marina / ราก Bruguiera gymnorrhiza / ราก และ Ceriops tagal / ราก	ฤดูฝน	365 วัน	Negative- exponential model	0.0039	Huxham และคณะ (2010)
ป่าชายเลนชายฝั่ง รัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา	Rhizophora mangle / รากผอย Avicennia germinans / รากผอย Loguncularia racemosa / รากผอย และ Conocarpus erectus / รากผอย	ฤดูฝน	250 วัน	Negative- exponential model	0.0012-0.0028	Poret และคณะ (2007)
ป่าชายเลนปากแม่น้ำ (Zhanjiang Mangrove Nature Reserve) ประเทศจีน	Avicennia marina / รากผอย Kandelia obovata / รากผอย Rhizophora stylosa / รากผอย Bruguiera gymnorrhiza / รากผอย Aegicera corniculatum / รากผอย	ฤดูหนาว (ปริมาณน้ำฝนต่ำ)	365 วัน	-	-	Zhang และคณะ (2021b)*

\* การศึกษาของ Zhang และคณะ (2021b) ไม่ได้รายงานอัตราการย่อยสลาย (k) แต่รายงานร้อยละน้ำหนักรากผอยที่เหลืออยู่ เท่ากับ 58-81

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายรากฝอยของแสมขาวที่เกิดขึ้นในรอบหนึ่งปี ( $k_{year}$ ) กับอัตราการย่อยสลายรากฝอยของแสมขาวในฤดูแล้ง ( $k_{dry}$ ) และฤดูฝน ( $k_{wet}$ ) ในการศึกษาพบว่า  $k_{year} < k_{dry} < k_{wet}$  ที่มีค่า 0.001 0.003 และ 0.005 ตามลำดับ สอดคล้องกับแนวโน้มของค่าครึ่งชีวิตของรากฝอย ( $t_{0.5}$ ) ซึ่งแสดงถึงระยะเวลาที่รากฝอยถูกย่อยสลายไปจนเหลือมวลเพียงครึ่งหนึ่งของมวลตั้งต้น ค่าครึ่งชีวิตของรากฝอยแสมขาวยาวนานถึง 693 วัน ในการศึกษาเป็นระยะเวลาหนึ่งปี ในขณะที่ค่าครึ่งชีวิตของรากฝอยแสมขาวในฤดูแล้งและฤดูฝน มีค่าเท่ากับ 231 และ 139 วัน ตามลำดับ ดังนั้นจึงชี้ให้เห็นว่าการศึกษการย่อยสลายรากฝอยเป็นระยะเวลานาน (1 ปี) อาจนำไปสู่การประมาณอัตราการย่อยสลายของรากฝอยที่ให้ค่าต่ำกว่าการพิจารณาแบบแยกฤดู และไม่สามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายของรากที่ผันแปรตามฤดูกาลกับอัตราการย่อยสลายของรากได้ แต่ที่กล่าวไปข้างต้นว่าส่วนใหญ่การศึกษการย่อยสลายของรากฝอยมักศึกษาเป็นระยะเวลาประมาณ 1 ปี อาจมีเหตุผลจากผู้ศึกษาต้องการคำนวณอัตราการย่อยสลายในรอบหนึ่งปี ที่สอดคล้องกับการประมาณผลผลิตในระบบนิเวศที่คำนวณเป็นรายปี ดังนั้นการคำนวณอัตราการย่อยสลายของรากฝอยในรอบปีจึงน่าจะสะดวกในการคำนวณระหว่างคาร์บอนที่กักเก็บและคาร์บอนที่ส่งผ่านที่เกิดขึ้นในระยะเวลาหนึ่งปีเท่ากัน อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ที่แสดงให้เห็นว่าอัตราการย่อยสลายที่คำนวณแบบแยกฤดูให้ค่าที่ต่างกันและต่างจากอัตราการย่อยสลายในรอบปี ดังนั้นจึงเสนอว่าควรนำอัตราการย่อยสลายในฤดูแล้งและฤดูฝนคำนวณร่วมกับจำนวนวันในแต่ละฤดูในรอบหนึ่งปีให้ได้อัตราการย่อยสลายรายปีที่จะสามารถสะท้อนอัตราการย่อยสลายรากฝอยของแสมขาวในรอบหนึ่งปีได้แม่นยำมากขึ้น

ในการศึกษการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาวนี้ยังพบว่าร้อยละน้ำหนักของรากฝอยที่เหลือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 20 (ภาพที่ 4.2) ซึ่งอยู่ในช่วงฤดูฝน ซึ่งเป็นช่วงที่มีผลผลิตรากฝอยสูง (Poungparn et al., 2016; Hongwiset et al., 2021) โดยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นนี้มาจากน้ำหนักของรากฝอยที่เจริญเข้าไปในถุงและไม่สามารถแยกจากรากฝอยตั้งต้นได้ ทำให้อัตราส่วนน้ำหนักของรากฝอยที่เหลืออยู่หลังจากสัปดาห์ที่ 20 ไปถึงเมื่อสิ้นสุดการศึกษาในสัปดาห์ที่ 52 เป็นน้ำหนักที่เหลือของรากฝอยตั้งต้นและรากฝอยใหม่ที่เจริญเข้าไปในถุงย่อยสลาย เมื่อคำนวณอัตราการย่อยสลายจากการศึกษาในรอบหนึ่งปีจึงมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการศึกษาแบบแยกฤดู ผลการศึกษานี้จึงชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดของการใช้วิธีถ่วงย่อยสลายเพื่อศึกษการย่อยสลายของรากฝอยที่ติดตั้งเป็นระยะเวลานานในระบบนิเวศป่าชายเลนที่มีอัตราการผลิตรากสูง ดังนั้นจากผลศึกษานี้จึงเสนอว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับศึกษการย่อยสลายรากฝอยในป่าชายเลนอยู่ในช่วงประมาณ 3 เดือน (12 สัปดาห์) เนื่องจากในการศึกษการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาวในรอบหนึ่งปีและการย่อยสลายในแต่ละฤดูกาล โดยเฉพาะฤดูฝนที่รากฝอยเจริญได้มาก ไม่พบว่ามีน้ำหนักคงเหลือของรากในถุงย่อยสลายเพิ่มขึ้นในช่วง 12 สัปดาห์แรกของการศึกษา อีกทั้งการศึกษการย่อยสลายในระยะเวลาประมาณ 3 เดือน (12 สัปดาห์)

ครอบคลุมช่วงเวลาในฤดูแล้งและฤดูฝน ทำให้สามารถศึกษาปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ผันแปรตามฤดูกาล โดยเฉพาะความเค็มที่มีผลต่อการย่อยสลายของรากได้ด้วย

#### 5.2.4 การย่อยสลายของใบชาที่ใช้เป็นชุดควบคุม

ในการศึกษาการย่อยสลายรากฝอยของแสมขาวนี้ ได้ใช้วิธีถุงชา (teabag method) ที่เสนอโดย Keuskamp และคณะ (2013) เป็นดัชนีชี้วัดการย่อยสลายที่เกิดขึ้นในป่าชายเลน โดยใช้ถุงย่อยสลายที่บรรจุใบชาเขียวมาเป็นชุดควบคุม จากการศึกษาพบว่ารูปแบบการย่อยสลายของใบชาสอดคล้องกับรูปแบบการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวที่แบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ rapid phase และ slow phase สอดคล้องกับการศึกษาของ Kriiska และคณะ (2021) ที่รายงานว่า การย่อยสลายของใบชาเขียวที่ศึกษาด้วยวิธีดัชนีถุงชา มีรูปแบบสอดคล้องกับการย่อยสลายของรากฝอยของสนสองชนิด คือ *Pinus sylvestris* และ *Picea abies* แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายของใบชาในการศึกษาครั้งนี้สามารถสะท้อนรูปแบบการย่อยสลายของรากฝอยในป่าชายเลนที่เกิดขึ้นทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝนได้ อย่างไรก็ตาม อัตราการย่อยสลายของใบชา เร็วกว่าอัตราการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาว ในทั้งสองฤดู ส่งผลให้ร้อยละน้ำหนักที่เหลืออยู่ในสัปดาห์สุดท้ายของการศึกษาของใบชาน้อยกว่ารากฝอยถึงประมาณ 4 เท่า (ภาพที่ 4.1) ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก C:N ratio ของใบชาที่มีค่าประมาณ 12 (Keuskamp et al., 2013) นั้นต่ำกว่า C:N ratio ของรากฝอยของแสมขาวก่อนเกิดการย่อยสลายในการศึกษาครั้งนี้ที่มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 45-50 ส่งผลให้ใบชาถูกย่อยสลายได้เร็วกว่ารากฝอยของแสมขาว นอกจากนี้ใบชามีลักษณะเป็นชิ้นขนาดเล็กจะถูกชะล้างโดยน้ำที่เข้าท่วมพื้นที่ป่าได้มากกว่ารากพืช (Seelen et al., 2019) และโดยทั่วไกร รากพืชมีปริมาณลิกนินมากกว่าในใบพืช (Guo et al., 2021) ซึ่งลิกนินเป็นองค์ประกอบซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนจึงถูกย่อยสลายได้ช้า (Twilley et al., 1986) ทำให้รากถูกย่อยสลายได้ช้ากว่าใบ

การย่อยสลายของใบชาในฤดูแล้งและฤดูฝนสอดคล้องกับการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาว โดยอัตราการย่อยสลายของใบชาในฤดูแล้งมีค่าน้อยกว่าฤดูฝน (0.024 และ 0.032 ต่อวัน ตามลำดับ) สะท้อนถึงอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ผันแปรตามฤดูกาลต่อการย่อยสลายที่เกิดขึ้นในดินป่าชายเลนโดยใช้ซากพืชตั้งต้น คือ ใบชา ที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน นอกจากนี้อัตราการย่อยสลายที่ได้ในทั้งสองฤดูจากการศึกษานี้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับการย่อยสลายของใบชาในป่าชายเลนชายฝั่ง รัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา ที่มีค่าเท่ากับ 0.0203 ต่อวัน (Keuskamp et al., 2013) และใกล้เคียงกับอัตราการย่อยสลายของใบแสมขาว ที่ศึกษาในป่าชายเลนปากแม่น้ำ จังหวัดตราด (วิลาณี สุชีวบริพันธ์, 2553) ที่มีค่าเท่ากับ 0.023 ต่อวัน

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายของใบชาในฤดูแล้งและฤดูฝนกับการย่อยสลายของใบชาในรอบปีพบว่า อัตราการย่อยสลายของใบชาในรอบปีมีค่าต่ำกว่าทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝน ซึ่งมีค่า



เท่ากับ 0.006 ต่อวัน สอดคล้องกับอัตราการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาวที่ได้อภิปรายไปก่อนหน้านี้ เช่นเดียวกับการศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาวพบว่าน้ำหนักของใบชาที่เหลือในถุงย่อยสลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 20 ไปจนถึงสัปดาห์ที่ 28 (ภาพที่ 4.2) เนื่องจากมีรากฝอยของแสมขาวเจริญเข้าไปในถุงย่อยสลายและไม่สามารถแยกรากฝอยใหม่ที่เจริญและเกิดการย่อยสลายในถุงย่อยสลายออกจากใบชาได้ทั้งหมดจึงส่งผลต่อน้ำหนักคงเหลือของใบชาที่เพิ่มขึ้น

### 5.3. การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนระหว่างการย่อยสลายราก

แม้ว่าการเปลี่ยนแปลงร้อยละของคาร์บอนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยในแต่ละระยะเวลาของการย่อยสลายจะมีความผันแปรต่ำในฤดูแล้งและไม่มีความแตกต่างในฤดูฝน (ตารางที่ 4.2) แต่ร้อยละการสูญเสียคาร์บอน (%C loss) จากเนื้อเยื่อรากฝอยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นระหว่างช่วงที่ทำการศึกษาทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝน โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลอง %C loss มีค่าประมาณร้อยละ 20 และ 29 ในฤดูแล้งและฤดูฝน ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าในช่วงฤดูแล้งเกิดการสูญเสียคาร์บอนจากกระบวนการย่อยสลายรากฝอยน้อยกว่าในช่วงฤดูฝน สอดคล้องกับอัตราการย่อยสลายที่มีค่าต่ำในฤดูแล้งและมีค่าสูงในฤดูฝน

ในทางกลับกันร้อยละของไนโตรเจนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยในแต่ละระยะเวลาของการย่อยสลายทั้งในฤดูแล้งและฤดูฝนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.2) ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละของไนโตรเจนทั้งหมดในเนื้อเยื่อรากฝอยในแต่ละระยะเวลาของการย่อยสลายของแสมขาวที่ศึกษาในพื้นที่เดียวกัน (บัณฑิตบุรี เณลินฉัตรวิไล, 2553) ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเยื่อซากรากฝอยที่เพิ่มขึ้นเมื่อถูกย่อยสลายเกิดจากการตรึงไนโตรเจน (nitrogen immobilization) โดยจุลินทรีย์ในดินเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมขณะย่อยสลายซากพืช (O'Neill and Norby, 1993) ซึ่งความเข้มข้นของปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเยื่อซากพืชจะเพิ่มขึ้นเมื่อกระบวนการย่อยสลายซากพืชดำเนินต่อไป (Berg and Laskowski; Berg and McClaugherty, 2008) ส่งผลให้ C:N ratio ในเนื้อเยื่อรากฝอยลดลงเมื่อผ่านการย่อยสลายเป็นเวลานาน (ตารางที่ 4.2 และ 4.3) ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปไนโตรเจนที่ถูกตรึงและสะสมไว้ในมวลชีวภาพของจุลินทรีย์ระหว่างการย่อยสลายซากพืชสามารถถูกปลดปล่อยกลับคืนสู่ดินเมื่อจุลินทรีย์ตาย ทำให้เกิดการหมุนเวียนไนโตรเจนซึ่งเป็นสารอาหารของพืชและสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ นำไปใช้ต่อไป

จากการศึกษาการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวนี้ชี้ให้เห็นว่าในฤดูฝนที่มีการปลดปล่อยคาร์บอนจากเนื้อเยื่อซากรากฝอยจากการย่อยสลายสูงกว่าฤดูแล้ง ประกอบกับการมีแหล่งของคาร์บอนจากรากฝอยที่สร้างใหม่ปริมาณมากในฤดูฝน (Hongwiset et al., 2021; Pongparn et al., 2016) รวมถึงมีร้อยละของไนโตรเจนทั้งหมดในเนื้อเยื่อซากรากฝอยในฤดูฝนมากกว่าฤดูแล้ง (ตารางที่ 4.2) อาจเป็นผลจากการสะสมไนโตรเจนในซากรากพืชจากการตรึงโดยจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นมาก

ในฤดูฝนสะท้อนให้เห็นว่าความผันแปรของปัจจัยสิ่งแวดล้อมในป่าชายเลนปากแม่น้ำแห่งนี้มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาว ที่จะส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยธาตุอาหารจากรากฝอยไปสู่ส่วนอื่นในระบบนิเวศป่าชายเลนได้



## บทที่ 6

### สรุปผลการศึกษา

การศึกษาความผันแปรตามฤดูกาลของการย่อยสลายรากฝอยของแสมขาว (*Avicennia alba* Blume) ด้วยวิธีถุงย่อยสลาย ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565 จนถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2566 ภายในเขตพื้นที่ไม้ของแปลงศึกษาถาวรขนาด 1 เฮกตาร์ ตั้งอยู่ในป่าชายเลนรุ่มสอง บริเวณปากแม่น้ำตราด จังหวัดตราด สามารถสรุปได้ดังนี้

การย่อยสลายของรากฝอยแสมขาวทั้งจากการศึกษาในฤดูแล้งและฤดูฝนและในรอบหนึ่งปี แบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือช่วงที่การย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (rapid phase) ภายใน 2 สัปดาห์แรกของการย่อยสลาย เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นของการย่อยสลายรากฝอยยังมีแหล่งอาหารที่จุลชีพสามารถนำไปใช้ได้มากจึงเกิดการสูญเสียองค์ประกอบที่ไม่คงตัวจากรากฝอยไปอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นเป็นช่วงที่รากฝอยเกิดการย่อยสลายอย่างช้า ๆ (slow phase) โดยเกิดการสลายสารที่มีโครงสร้างซับซ้อนที่เหลืออยู่ในเนื้อเยื่อรากฝอยที่ผ่านการย่อยสลายมาระยะหนึ่งแล้ว นอกจากนี้ รูปแบบการย่อยสลายของใบชาที่ใช้เป็นดัชนีชี้วัดการย่อยสลายที่เกิดขึ้นในป่าชายเลนในการศึกษานี้สอดคล้องกับรูปแบบการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวที่สามารถแบ่งเป็นสองช่วง ชี้ให้เห็นว่าสามารถประยุกต์ใช้ใบชาเพื่อสะท้อนรูปแบบของการย่อยสลายรากในป่าชายเลนได้ แต่ไม่แสดงอัตราการย่อยสลายที่แท้จริงของรากพืชชายเลนที่จำเป็นต่อการประเมินการส่งผ่านคาร์บอนที่เกิดขึ้นในระบบนิเวศ

ตลอดระยะเวลาหนึ่งปีที่ศึกษาพบว่าปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ผันแปรตามฤดูกาลอย่างชัดเจน คือ ปริมาณน้ำฝน ส่งผลให้ความเค็มของน้ำในดินในป่าชายเลนแห่งนี้มีความผันแปรตามฤดูกาลที่ชัดเจนด้วย โดยในช่วงฤดูฝนที่มีน้ำฝนปริมาณมาก คิดเป็นร้อยละ 83.3 ของปริมาณน้ำฝนทั้งหมดในช่วงที่ศึกษา ทำให้มีปริมาณน้ำท่าไหลลงสู่แม่น้ำตราดมาก ช่วยเจือจางความเค็มในป่าชายเลนปากแม่น้ำตราด ส่งผลให้ในฤดูฝนความเค็มของน้ำในดินมีค่าต่ำกว่าฤดูแล้ง โดยในฤดูฝนมีความเค็มของน้ำในดินเกือบเท่าความเค็มของน้ำจืด (ร้อยละ 0) ขณะที่ในฤดูแล้ง อาจมีค่าสูงถึงร้อยละ 2.45 ซึ่งในเขตพื้นที่ไม้แสมที่ศึกษานี้มีความผันแปรของความเค็มในรอบปีอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ร้อยละ 0.08-2.45 ในขณะที่อุณหภูมิอากาศตลอดระยะเวลาหนึ่งปีที่ศึกษาไม่แตกต่างระหว่างฤดูกาล ส่วนอุณหภูมิดินที่มีค่าสัมพันธ์กับอุณหภูมิอากาศนั้นมีค่าสูงในฤดูฝนและมีค่าต่ำในฤดูแล้ง แต่มีความผันแปรในช่วงแคบ ดังนั้นในการศึกษานี้ความเค็มของน้ำในดินที่ผันแปรตามฤดูกาลนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้การย่อยสลายรากฝอยของแสมขาวแตกต่างกันตามฤดูกาลด้วย

นอกจากนี้พบว่าระยะเวลาที่น้ำท่วมมีความผันแปรตามฤดูกาล โดยในฤดูแล้งมีน้ำท่วมเป็นระยะเวลานานกว่าในฤดูฝน ส่งผลให้ดินอยู่ในสภาวะที่มีความเค็มสูงและไร้ออกซิเจนเป็นระยะ

เวลานานในฤดูแล้ง ระยะเวลาที่น้ำท่วมยาวนานในช่วงฤดูแล้งจึงมีผลยับยั้งการดำเนินกิจกรรมของจุลชีพที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายได้

ผลการศึกษการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวพบว่าในฤดูแล้งเกิดการย่อยสลายน้อยกว่าฤดูฝน โดยพิจารณาจากร้อยละของน้ำหนักรากฝอยที่เหลืออยู่ในถุงย่อยสลายเมื่อผ่านการย่อยสลายเป็นเวลา 12 สัปดาห์ พบว่าในฤดูแล้งมีค่าเท่ากับร้อยละ 81.61 และ ในฤดูฝนมีค่าเท่ากับร้อยละ 70.72 และอัตราการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาว ( $k$ ) ในฤดูแล้งมีค่าน้อยกว่าฤดูฝน (0.003 และ 0.005 ต่อวัน ตามลำดับ) ซึ่งอัตราการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวที่แตกต่างในฤดูแล้งและฤดูฝนได้รับอิทธิพลจากความผันแปรของปัจจัยสิ่งแวดล้อมระหว่างฤดูกาล คือ ความเค็มที่ผันแปรตามปริมาณน้ำฝน รวมถึงในฤดูแล้งพื้นที่ศึกษาถูกน้ำท่วมเป็นระยะเวลานานกว่าฤดูฝนดังที่กล่าวไปข้างต้น ซึ่งอัตราการย่อยสลายนี้สอดคล้องกับการสูญเสียคาร์บอนจากกระบวนการย่อยสลายรากฝอยโดยที่ในฤดูแล้งที่มีค่าน้อยกว่าในฤดูฝน มีค่าเท่ากับร้อยละ 19.82 และ 28.86 ตามลำดับ ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่าการส่งผ่านคาร์บอนจากรากฝอยไปยังส่วนอื่น ๆ ในระบบนิเวศป่าชายเลนเกิดขึ้นในฤดูแล้งได้น้อยกว่าในฤดูฝน

นอกจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมทางกายภาพที่ผันแปรตามฤดูกาลแล้ว ในการศึกษาพบว่าปัจจัยทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของรากก็มีความแตกต่างในฤดูแล้งและฤดูฝน ทั้งคุณสมบัติทางเคมีตั้งต้นและลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของรากต่างก็มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายของรากฝอยที่ต่างกันระหว่างฤดูกาล โดยรากฝอยของแสมขาวที่เก็บในฤดูฝนมีร้อยละไนโตรเจนทั้งหมดในเนื้อเยื่อมากกว่ารากฝอยที่พบในฤดูแล้ง ซึ่งอาจได้รับอิทธิพลจากปริมาณไนโตรเจนในน้ำที่เข้าท่วมป่าชายเลนที่เพิ่มขึ้นในฤดูฝน ทำให้พืชสามารถนำไปใช้และสะสมในเนื้อเยื่อได้มาก ซากรากฝอยที่มีปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเยื่อที่มากกว่ามีแนวโน้มที่จะถูกย่อยสลายได้มากกว่า สอดคล้องกับผลการศึกษาที่พบว่าอัตราการย่อยสลายของรากฝอยแสมขาวในฤดูฝนมีค่ามากกว่าฤดูแล้ง อีกทั้งลักษณะทางกายวิภาคศาสตร์ของตัวอย่างรากฝอยของแสมขาวที่เก็บจากทั้งสองฤดูพบว่ามีลักษณะที่แสดงถึงการปรับตัวเพื่อตอบสนองต่อความเค็มที่สูงในฤดูแล้ง ที่อาจส่งผลให้การย่อยสลายของรากในฤดูแล้งเกิดขึ้นช้ากว่าฤดูฝน

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาวที่ศึกษาในช่วง 12 สัปดาห์ในฤดูแล้งและฤดูฝน กับ อัตราการย่อยสลายในช่วง 52 สัปดาห์ (1 ปี) ที่เริ่มต้นศึกษาในฤดูแล้ง พบว่าอัตราการย่อยสลายรากฝอยของแสมขาวที่ศึกษาในรอบหนึ่งปี (52 สัปดาห์) มีค่าเท่ากับ 0.001 ต่อวัน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอัตราการย่อยสลายที่ได้จากการศึกษาในช่วง 12 สัปดาห์ในฤดูแล้งและฤดูฝน อีกทั้งจากการศึกษาในรอบหนึ่งปีน้ำหนักของรากฝอยที่เหลือในถุงย่อยสลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูฝน ซึ่งเป็นช่วงที่มีผลผลิตรากฝอยสูง จึงมีรากฝอยปริมาณมากเจริญเข้าไปในถุงย่อยสลาย ทำให้ไม่สามารถแยกรากฝอยใหม่ที่เจริญและตายในถุงย่อยสลายออกจากรากฝอยตั้งต้นได้ หากศึกษการย่อยสลายของรากฝอยในป่าชายเลนเป็นเวลานานอาจส่งผลให้การประมาณอัตราการย่อยสลายของ

รากฝอยมีค่าต่ำกว่าที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นจึงเสนอว่าระยะเวลา 12 สัปดาห์เป็นช่วงที่เหมาะสมในการศึกษาอัตราการย่อยสลายของรากฝอยในป่าชายเลน

อัตราการย่อยสลายของใบชามีค่ามากกว่าอัตราการย่อยสลายของรากฝอยของแสมขาว เป็นผลจากลักษณะของใบชาที่เป็นชิ้นขนาดเล็กและคุณสมบัติทางเคมีของใบที่ต่างจากรากที่เอื้อต่อการย่อยสลายมากกว่า อย่างไรก็ตามอัตราการย่อยสลายของใบชามีความผันแปรตามฤดูกาลเช่นเดียวกับรากฝอย โดยในฤดูแล้งมีค่าน้อยกว่าฤดูฝน สะท้อนถึงอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ผันแปรตามฤดูกาลต่อการย่อยสลายที่เกิดขึ้นในดินป่าชายเลนจากการใช้ซากพืชตั้งต้นที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาในระบบนิเวศป่าชายเลนอื่นและสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

สำหรับประโยชน์ของการศึกษานี้กล่าวโดยสรุปได้ว่า สามารถใช้เป็นแนวทางในการประมาณอัตราส่วนคาร์บอนใต้ดินในวัฏจักรคาร์บอนของระบบนิเวศป่าชายเลนให้มีความแม่นยำมากขึ้นภายใต้ความผันแปรตามฤดูกาลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงมากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก โดยเฉพาะการประมาณคาร์บอนที่สูญเสียไปจากระบบนิเวศที่เกิดผ่านกระบวนการย่อยสลายที่ได้รับอิทธิพลจากความผันแปรตามฤดูกาลของปัจจัยสิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงจนทำให้กระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้นในป่าชายเลน รวมถึงสัดส่วนคาร์บอนใต้ดินเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นหากทราบอัตราการย่อยสลายที่เกิดขึ้นในแต่ละฤดูกาลและเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ จะสามารถนำไปใช้ประกอบการวางแผนฟื้นฟูระบบนิเวศป่าชายเลนต่อไป เช่น การประเมินความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนของพื้นที่ป่าชายเลนเสื่อมโทรม ตลอดจนพื้นที่ป่าชายเลนที่กำลังฟื้นฟู

## บรรณานุกรม

- Akratos, C. S., Tekerlekopoulou, A. G., Vasiliadou, I. A., and Vayenas, D. V. 2017. Cocomposting of olive mill waste for the production of soil amendments. In Olive Mill Waste (pp. 161-182). Elsevier.
- Alongi, D. M. 2005. Mangrove–microbe–soil relations. Interactions between macro-and microorganisms in marine sediments, 60: 85-103.
- Alongi, D. M. 2013. Cycling and global fluxes of nitrogen in mangroves. Global Environmental Research, 17(2013): 173-182.
- Alongi, D. M. 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests. Annual review of marine science, 6: 195-219.
- Alongi, D. M. 2018. Impact of global change on nutrient dynamics in mangrove forests. Forests, 9(10): 596.
- Arnaud, M., Morris, P. J., Baird, A. J., Dang, H., and Nguyen, T. T. 2021. Fine root production in a chronosequence of mature reforested mangroves. New Phytologist, 232(4): 1591-1602.
- Ashton, E., Hogarth, P., and Ormond, R. (1999). Breakdown of mangrove leaf litter in a managed mangrove forest in Peninsular Malaysia. Diversity and Function in Mangrove Ecosystems: Proceedings of Mangrove Symposia held in Toulouse, France, 9–10 July 1997 and 8–10 July 1998,
- Augustinus, P. G. 1995. Geomorphology and sedimentology of mangroves. In Developments in sedimentology (Vol. 53, pp. 333-357). Elsevier.
- Averill, C., and Waring, B. 2018. Nitrogen limitation of decomposition and decay: How can it occur? Global change biology, 24(4): 1417-1427.
- Beidler, K. V., and Pritchard, S. G. 2017. Maintaining connectivity: Understanding the role of root order and mycelial networks in fine root decomposition of woody plants. Plant and Soil, 420: 19-36.
- Berg, B., and Laskowski, R. Virzo De Santo A (1999) Estimated N concentration in humus as based on initial N concentration in foliar litter—a synthesis. Can J Bot, 77: 1712-1722.
- Berg, B., and McClaugherty, C. 2008. Plant litter: decomposition, humus formation,

carbon sequestration. Springer.

- Brown, D., and Upchurch, D. 1987. Minirhizotrons: A summary of methods and instruments in current use. Minirhizotron observation tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics, 50: 15-30.
- Brust, G. E. 2019. Management strategies for organic vegetable fertility. In Safety and practice for organic food (pp. 193-212). Elsevier.
- Brzezinska, M. 2004. Aeration status of soil and enzyme activity. SOIL-PLANT-ATMOSPHERE AERATION AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS: 55.
- Canini, N. D., Metillo, E. B., and Azanza, R. V. 2013. Monsoon-influenced phytoplankton community structure in a Philippine mangrove estuary. Tropical Ecology, 54(3): 331-343.
- Chalermchatwilai, B., Pongpan, S., and Patanaponpaiboon, P. 2011. Distribution of fine-root necromass in a secondary mangrove forest in Trat province, Eastern Thailand. ScienceAsia, 37(1): 1-5.
- Chambers, L. G., Davis, S. E., Troxler, T., Boyer, J. N., Downey-Wall, A., and Scinto, L. J. 2014. Biogeochemical effects of simulated sea level rise on carbon loss in an Everglades mangrove peat soil. Hydrobiologia, 726: 195-211.
- Chorchuhirun, B., Kraichak, E., and Kermanee, P. 2020. Comparative anatomy of two mangrove species, *Xylocarpus granatum* and *Xylocarpus moluccensis* (Meliaceae). Thai Journal of Science and Technology, 9(3): 355-367.
- Chowdhury, M. Q., De Ridder, M., and Beeckman, H. 2016. Climatic signals in tree rings of *Heritiera fomes* Buch.-Ham. in the Sundarbans, Bangladesh. PloS one, 11(2): e0149788.
- Comley, B. W., and McGuinness, K. A. 2005. Above-and below-ground biomass, and allometry, of four common northern Australian mangroves. Australian Journal of Botany, 53(5): 431-436.
- Cotrufo, M. F., Ngao, J., Marzaioli, F., and Piermatteo, D. 2010. Inter-comparison of methods for quantifying above-ground leaf litter decomposition rates. Plant and Soil, 334: 365-376.
- Duddigan, S., Shaw, L. J., Alexander, P. D., and Collins, C. D. 2020. Chemical underpinning of the tea bag index: an examination of the decomposition of tea

- leaves. Applied and Environmental Soil Science, 2020.
- Duke, N. C., Meynecke, J.-O., Dittmann, S., Ellison, A. M., Anger, K., Berger, U., Cannicci, S., Diele, K., Ewel, K. C., and Field, C. D. 2007. A world without mangroves? Science, 317(5834): 41-42.
- Ewel, K., Twilley, R., and Ong, J. 1998. Different kinds of mangrove forests provide different goods and services. Global Ecology & Biogeography Letters, 7(1): 83-94.
- Feller, I. C., Whigham, D. F., McKee, K. L., and Lovelock, C. E. 2003. Nitrogen limitation of growth and nutrient dynamics in a disturbed mangrove forest, Indian River Lagoon, Florida. Oecologia, 134: 405-414.
- Fourqurean, J. W., and Schlau, J. E. 2003. Changes in nutrient content and stable isotope ratios of C and N during decomposition of seagrasses and mangrove leaves along a nutrient availability gradient in Florida Bay, USA. Chemistry and Ecology, 19(5): 373-390.
- Fréchet, M. 1927. Sur la loi de probabilité de l'écart maximum. Ann. Soc. Math. Polon., 6: 93-116.
- Garcias-Bonet, N., Delgado-Huertas, A., Carrillo-de-Albornoz, P., Anton, A., Almahasheer, H., Marbà, N., Hendriks, I. E., Krause-Jensen, D., and Duarte, C. M. 2019. Carbon and nitrogen concentrations, stocks, and isotopic compositions in Red Sea seagrass and mangrove sediments. Frontiers in Marine Science, 6: 267.
- Gill, R. A., and Jackson, R. B. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. The New Phytologist, 147(1): 13-31.
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., Masek, J., and Duke, N. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. Global Ecology and Biogeography, 20(1): 154-159.
- Göltenboth, F., and Schoppe, S. 2006. Mangroves. In Ecology of insular southeast Asia (pp. 187-214). Elsevier.
- Guo, L., Deng, M., Yang, S., Liu, W., Wang, X., Wang, J., and Liu, L. 2021. The coordination between leaf and fine root litter decomposition and the difference in their controlling factors. In Vol. 30: pp. 2286-2296.
- Harmon, M. E., Silver, W. L., Fasth, B., Chen, H., Burke, I. C., Parton, W. J., Hart, S. C., Currie, W. S., and Lidet. 2009. Long-term patterns of mass loss during the



- decomposition of leaf and fine root litter: an intersite comparison. Global change biology, 15(5): 1320-1338.
- Hobbie, S. E., Oleksyn, J., Eissenstat, D. M., and Reich, P. B. 2010. Fine root decomposition rates do not mirror those of leaf litter among temperate tree species. Oecologia, 162: 505-513.
- Hogarth, P. J. 1999. The biology of mangroves. Oxford University Press (OUP).
- Hongwiset, S., Rodtassana, C., Pongparn, S., Umnouysin, S., and Komiyama, A. 2021. Spatiotemporal heterogeneity of mangrove root sphere under a tropical monsoon climate in Eastern Thailand. Forests, 12(8): 966.
- Hossain, M., and Nuruddin, A. 2016. Soil and mangrove: a review. Journal of Environmental Science and Technology, 9(2): 198-207.
- Hug, L. A., Castelle, C. J., Wrighton, K. C., Thomas, B. C., Sharon, I., Frischkorn, K. R., Williams, K. H., Tringe, S. G., and Banfield, J. F. 2013. Community genomic analyses constrain the distribution of metabolic traits across the Chloroflexi phylum and indicate roles in sediment carbon cycling. Microbiome, 1(1): 1-17.
- Hutchinson, D. H., and Robinson, C. W. 1990. A microbial regeneration process for granular activated carbon—II. Regeneration studies. Water Research, 24(10): 1217-1223.
- Huxham, M., Langat, J., Tamoooh, F., Kennedy, H., Mencuccini, M., Skov, M. W., and Kairo, J. 2010. Decomposition of mangrove roots: effects of location, nutrients, species identity and mix in a Kenyan forest. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 88(1): 135-142.
- Iversen, C. M., Murphy, M. T., Allen, M. F., Childs, J., Eissenstat, D. M., Lilleskov, E. A., Sarjala, T. M., Sloan, V. L., and Sullivan, P. F. 2012. Advancing the use of minirhizotrons in wetlands. Plant and Soil, 352: 23-39.
- Jbir, N., Chaïbi, W., Ammar, S., Jemmali, A., and Ayadi, A. 2001. Root growth and lignification of two wheat species differing in their sensitivity to NaCl, in response to salt stress. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie, 324(9): 863-868.
- Joslin, J., Gaudinski, J., Torn, M., Riley, W., and Hanson, P. J. 2006. Fine-root turnover patterns and their relationship to root diameter and soil depth in a <sup>14</sup>C-labeled

- hardwood forest. New Phytologist, 172(3): 523-535.
- Kamruzzaman, M., Ahmed, S., and Osawa, A. 2017. Biomass and net primary productivity of mangrove communities along the Oligohaline zone of Sundarbans, Bangladesh. Forest Ecosystems, 4(1): 1-9.
- Kankong, P., Pongpan, S., Komiyama, A., Rodtassana, C., and Pravinvongvuthi, T. 2021. Leaf phenology and trunk growth of *Avicennia alba* (Blume) under a seasonally fluctuating saline environment in the tropical monsoon area of eastern Thailand. Ecological Research, 36(5): 854-865.
- Keuskamp, J. A., Dingemans, B. J., Lehtinen, T., Sarneel, J. M., and Hefting, M. M. 2013. Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. Methods in Ecology and Evolution, 4(11): 1070-1075.
- Komiyama, A., Ogino, K., Aksornkoae, S., and Sabhasri, S. 1987. Root biomass of a mangrove forest in southern Thailand. 1. Estimation by the trench method and the zonal structure of root biomass. Journal of Tropical Ecology, 3(2): 97-108.
- Komiyama, A., Ong, J. E., and Pongpan, S. 2008. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. Aquatic Botany, 89(2): 128-137.
- Komiyama, A., Pongpan, S., Umnouysin, S., Rodtassana, C., Kato, S., Pravinvongvuthi, T., and Sangtiew, T. 2020. Daily inundation induced seasonal variation in the vertical distribution of soil water salinity in an estuarine mangrove forest under a tropical monsoon climate. Ecological Research, 35(4): 638-649.
- Komiyama, A., Pongpan, S., Umnouysin, S., Rodtassana, C., Pravinvongvuthi, T., Noda, T., and Kato, S. 2019. Occurrence of seasonal water replacement in mangrove soil and the trunk growth response of *Avicennia alba* related to salinity changes in a tropical monsoon climate. Ecological Research, 34(3): 428-439.
- Krauss, K. W., and Ball, M. C. 2013. On the halophytic nature of mangroves. Trees, 27(1): 7-11.
- Kriiska, K., Löhmus, K., Frey, J., Asi, E., Kabral, N., Napa, Ü., and Ostonen, I. 2021. The dynamics of mass loss and nutrient release of decomposing fine roots, needle litter and standard substrates in hemiboreal coniferous forests. Frontiers in Forests and Global Change, 4: 686468.
- Krishna, M., and Mohan, M. 2017. Litter decomposition in forest ecosystems: a review.

Energy, Ecology and Environment, 2: 236-249.

- Lastochkina, O., Aliniaiefard, S., Garshina, D., Garipova, S., Pusenkova, L., Allagulova, C., Fedorova, K., Baymiev, A., Koryakov, I., and Sobhani, M. 2021. Seed priming with endophytic *Bacillus subtilis* strain-specifically improves growth of *Phaseolus vulgaris* plants under normal and salinity conditions and exerts anti-stress effect through induced lignin deposition in roots and decreased oxidative and osmotic damages. Journal of Plant Physiology, 263: 153462.
- Liu, X., Xiong, Y., and Liao, B. 2017. Relative contributions of leaf litter and fine roots to soil organic matter accumulation in mangrove forests. Plant and Soil, 421: 493-503.
- Lovelock, C. E., Cahoon, D. R., Friess, D. A., Guntenspergen, G. R., Krauss, K. W., Reef, R., Rogers, K., Saunders, M. L., Sidik, F., and Swales, A. 2015. The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise. Nature, 526(7574): 559-563.
- Lovelock, C. E., Feller, I. C., Ball, M. C., Engelbrecht, B. M., and Ewe, M. L. 2006. Differences in plant function in phosphorus- and nitrogen-limited mangrove ecosystems. New Phytologist, 172(3): 514-522.
- Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Osland, M. J., Reef, R., and Ball, M. C. 2016. The physiology of mangrove trees with changing climate. Tropical tree physiology: adaptations and responses in a changing environment: 149-179.
- Lugo, A. E., and Snedaker, S. C. 1974. The ecology of mangroves. Annual review of ecology and systematics, 5(1): 39-64.
- MacKenzie, R., Sharma, S., and Rovai, A. R. 2021. Environmental drivers of blue carbon burial and soil carbon stocks in mangrove forests. In Dynamic sedimentary environments of mangrove coasts (pp. 275-294). Elsevier.
- Macreadie, P. I., Anton, A., Raven, J. A., Beaumont, N., Connolly, R. M., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Kuwae, T., and Lavery, P. S. 2019. The future of Blue Carbon science. Nature communications, 10(1): 3998.
- Maia, J. M., Voigt, E. L., Ferreira-Silva, S. L., de V. Fontenele, A., Macêdo, C. E., and Silveira, J. A. 2013. Differences in cowpea root growth triggered by salinity and dehydration are associated with oxidative modulation involving types I and III peroxidases and apoplastic ascorbate. Journal of plant growth regulation, 32:

376-387.

- Majdi, H. 1996. Root sampling methods-applications and limitations of the minirhizotron technique. Plant and Soil, 185: 255-258.
- Marley, A. R., Smeaton, C., and Austin, W. E. 2019. An assessment of the tea bag index method as a proxy for organic matter decomposition in intertidal environments. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 124(10): 2991-3004.
- McClaugherty, C., Aber, J., and Melillo, J. 1984. Decomposition dynamics of fine roots in forested ecosystems. Oikos: 378-386.
- McKee, K. L. 1993. Soil physicochemical patterns and mangrove species distribution--reciprocal effects? Journal of ecology: 477-487.
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., and Silliman, B. R. 2011. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO<sub>2</sub>. Frontiers in Ecology and the Environment, 9(10): 552-560.
- Middleton, B., and McKee, K. 2001. Degradation of mangrove tissues and implications for peat formation in Belizean island forests. Journal of Ecology: 818-828.
- Moatabarniya, S., Rad, A. C., Sima, N. A. K., Askari, H., Zeinalabedini, M., Hesarkhani, Z., and Ghaffari, M. R. 2022. Morphological and anatomical changes of *Salicornia* roots are associated with different salinity and nutrients conditions in contrasting genotypes. Rhizosphere, 24: 100629.
- Monkolprasit, S. 1983. Fish in mangroves and adjacent areas. 1st Training course introduction to mangrove ecosystem, Thailand: 2-30.
- Muhammad-Nor, S. M., Huxham, M., Salmon, Y., Duddy, S. J., Mazars-Simon, A., Mencuccini, M., Meir, P., and Jackson, G. 2019. Exceptionally high mangrove root production rates in the Kelantan Delta, Malaysia; An experimental and comparative study. Forest Ecology and Management, 444: 214-224.
- Mun, H.-T., and Whitford, W. 1997. Changes in mass and chemistry of plant roots during long-term decomposition on a Chihuahuan Desert watershed. Biology and Fertility of Soils, 26: 16-22.
- Nguyen, H. T., Stanton, D. E., Schmitz, N., Farquhar, G. D., and Ball, M. C. 2015. Growth responses of the mangrove *Avicennia marina* to salinity: development and

- function of shoot hydraulic systems require saline conditions. Annals of Botany, 115(3): 397-407.
- Norris, B. K., Mullarney, J. C., Bryan, K. R., and Henderson, S. M. 2017. The effect of pneumatophore density on turbulence: a field study in a *Sonneratia*-dominated mangrove forest, Vietnam. Continental Shelf Research, 147: 114-127.
- Ochieng, C. A., and Erftemeijer, P. L. 2002. Phenology, litterfall and nutrient resorption in *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh in Gazi Bay, Kenya. Trees, 16: 167-171.
- Odum, W. E., and Heald, E. J. 1972. Trophic analyses of an estuarine mangrove community. Bulletin of Marine Science, 22(3): 671-738.
- Odum, W. E., McIvor, C. C., and Smith, T. J. 1982. The ecology of the mangroves of south Florida: a community profile. The Service.
- Ola, A., Gauthier, A. R., Xiong, Y., and Lovelock, C. E. 2019. The roots of blue carbon: responses of mangrove stilt roots to variation in soil bulk density. Biology Letters, 15(4): 20180866.
- Ola, A., and Lovelock, C. E. 2021. Decomposition of mangrove roots depends on the bulk density they grew in. Plant and Soil, 460: 177-187.
- Olson, J. S. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology, 44(2): 322-331.
- ONEILL, E. G., and NORBY, R. J. (1993). *Litter quality and decomposition rates of foliar litter produced under CO<sub>2</sub> enrichment*.
- Ong, J., Gong, W., and Wong, C. 2004. Allometry and partitioning of the mangrove, *Rhizophora apiculata*. Forest Ecology and Management, 188(1-3): 395-408.
- Ouyang, X., Lee, S. Y., and Connolly, R. M. 2017. The role of root decomposition in global mangrove and saltmarsh carbon budgets. Earth-Science Reviews, 166: 53-63.
- Parida, A. K., and Jha, B. 2010. Salt tolerance mechanisms in mangroves: a review. Trees, 24(2): 199-217.
- Partain, M. 2019. Decomposition rates in black mangrove (*Avicennia germinans*) sediment determined using the Tea Bag Index (TBI) method
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and earth system sciences,

11(5): 1633-1644.

- Pepper, I. L., and Gentry, T. J. 2015. Earth environments. In Environmental Microbiology (pp. 59-88). Elsevier.
- Pi, N., Tam, N., Wu, Y., and Wong, M. H. 2009. Root anatomy and spatial pattern of radial oxygen loss of eight true mangrove species. Aquatic Botany, 90(3): 222-230.
- Poret, N., Twilley, R. R., Rivera-Monroy, V. H., and Coronado-Molina, C. 2007. Belowground decomposition of mangrove roots in Florida coastal Everglades. Estuaries and Coasts, 30: 491-496.
- Poungparn, S., Charoenphonphakdi, T., Sangtiew, T., and Patanaponpailboon, P. 2016. Fine root production in three zones of secondary mangrove forest in eastern Thailand. Trees, 30: 467-474.
- Poungparn, S., Komiyama, A., Tanaka, A., Sangtiew, T., Maknual, C., Kato, S., Tanapermpool, P., and Patanaponpailboon, P. 2009. Carbon dioxide emission through soil respiration in a secondary mangrove forest of eastern Thailand. Journal of Tropical Ecology, 25(4): 393-400.
- Poungparn, S., Komiyama, A., Umnouysin, S., Rodtassana, C., Sangtiew, T., Maknual, C., Pravinvongvuthi, T., Suchewaboripont, V., and Kato, S. 2020. Ten-year estimation of net primary productivity in a mangrove forest under a tropical monsoon climate in eastern Thailand: Significance of the temperature environment in the dry season. Forests, 11(9): 987.
- Prescott, C. E. 2010. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? Biogeochemistry, 101: 133-149.
- Pumijumnong, N. 2014. Mangrove forests in Thailand. Mangrove ecosystems of Asia: Status, challenges and management strategies: 61-79.
- Rahman, M. S., Sass-Klaassen, U., Zuidema, P. A., Chowdhury, M. Q., and Beeckman, H. 2020. Salinity drives growth dynamics of the mangrove tree *Sonneratia apetala* Buch.-Ham. in the Sundarbans, Bangladesh. Dendrochronologia, 62: 125711.
- Reddy, K. R., and DeLaune, R. D. 2008. Biogeochemistry of wetlands: science and applications. CRC press.
- Reef, R., Feller, I. C., and Lovelock, C. E. 2010. Nutrition of mangroves. Tree physiology,

30(9): 1148-1160.

- Salah, Y. M., and Scholes, M. C. 2011. Effect of temperature and litter quality on decomposition rate of *Pinus patula* needle litter. Procedia Environmental Sciences, 6: 180-193.
- Salin, K. R., and Vinh, N. T. 2023. Biofloc technology in aquaculture. In Frontiers in Aquaculture Biotechnology (pp. 69-88). Elsevier.
- Santisuk, T. 1983. Taxonomy and distribution of terrestrial trees and shrubs in the mangrove formations in Thailand. Nat Hist Bull Siam Soc, 31: 63-91.
- Scheu, S., and Schauermaun, J. 1994. Decomposition of roots and twigs: effects of wood type (beech and ash), diameter, site of exposure and macrofauna exclusion. Plant and Soil, 163: 13-24.
- Seelen, L. M., Flaim, G., Keuskamp, J., Teurlincx, S., Font, R. A., Tolunay, D., Fránková, M., Šumberová, K., Temponeras, M., and Lenhardt, M. 2019. An affordable and reliable assessment of aquatic decomposition: Tailoring the Tea Bag Index to surface waters. Water Research, 151: 31-43.
- Shiau, Y.-J., and Chiu, C.-Y. 2020. Biogeochemical processes of C and N in the soil of mangrove forest ecosystems. Forests, 11(5): 492.
- Siddique, M. R. H., Saha, S., Salekin, S., and Mahmood, H. 2017. Salinity strongly drives the survival, growth, leaf demography, and nutrient partitioning in seedlings of *Xylocarpus granatum* J. König. iForest-Biogeosciences and Forestry, 10(5): 851.
- Silver, W. L., and Miya, R. K. 2001. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects. Oecologia, 129: 407-419.
- Simpson, L. T., Cherry, J. A., Smith, R. S., and Feller, I. C. 2021. Mangrove encroachment alters decomposition rate in saltmarsh through changes in litter quality. Ecosystems, 24: 840-854.
- Snedaker, S. C. 1982. Mangrove species zonation: why? Contributions to the Ecology of Halophytes: 111-125.
- Spivak, A. C., Sanderman, J., Bowen, J. L., Canuel, E. A., and Hopkinson, C. S. 2019. Global-change controls on soil-carbon accumulation and loss in coastal vegetated ecosystems. Nature Geoscience, 12(9): 685-692.
- Srikanth, S., Lum, S. K. Y., and Chen, Z. 2016. Mangrove root: adaptations and ecological

- importance. Trees, 30: 451-465.
- Swift, M. J., Heal, O. W., Anderson, J. M., and Anderson, J. 1979. Decomposition in terrestrial ecosystems (Vol. 5). Univ of California Press.
- Tang, W., Zheng, M., Zhao, X., Shi, J., Yang, J., and Trettin, C. C. 2018. Big geospatial data analytics for global mangrove biomass and carbon estimation. Sustainability, 10(2): 472.
- Tomlinson, P. B. 2016. The botany of mangroves. Cambridge University Press.
- Tomotsune, M., Yoshitake, S., Iimura, Y., Kida, M., Fujitake, N., Koizumi, H., and Ohtsuka, T. 2018. Effects of soil temperature and tidal condition on variation in carbon dioxide flux from soil sediment in a subtropical mangrove forest. Journal of Tropical Ecology, 34(4): 268-275.
- Torres, J. R., Barba, E., and Choix, F. J. 2019. Production and biomass of mangrove roots in relation to hydroperiod and physico-chemical properties of sediment and water in the Mecoacan Lagoon, Gulf of Mexico. Wetlands Ecology and Management, 27: 427-442.
- Twilley, R. R., Pozo, M., Garcia, V. H., Rivera-Monroy, V. H., Zambrano, R., and Boderó, A. 1997. Litter dynamics in riverine mangrove forests in the Guayas River estuary, Ecuador. Oecologia, 111: 109-122.
- Udovenko, G., Gradchaninova, O., and Semushina, L. 1970. Morphological and anatomical changes in wheat leaves and roots with increasing soil salinity. Botanicheskii Zhurnal, 55(7): 931-937.
- Umnouysin, S., Sangtjean, T., and Pongpan, S. 2017. Zonal distribution of coarse woody debris and its contribution to net primary production in a secondary mangrove forest. Ecological Research, 32: 51-60.
- Van der Valk, A., and Attiwill, P. 1984. Decomposition of leaf and root litter of *Avicennia marina* at Westernport Bay, Victoria, Australia. Aquatic Botany, 18(3): 205-221.
- Virzo De Santo, A., De Marco, A., Fierro, A., Berg, B., and Rutigliano, F. A. 2009. Factors regulating litter mass loss and lignin degradation in late decomposition stages. Plant and Soil, 318: 217-228.
- Waksman, S. A., and Gerretsen, F. 1931. Influence of temperature and moisture upon the nature and extent of decomposition of plant residues by microorganisms.



Ecology, 12(1): 33-60.

- Wakushima, S., Kuraishi, S., Sakurai, N., Supappibul, K., and Siripatanadllok, S. 1994. Stable soil pH of Thai mangroves in dry and rainy seasons and its relation to zonal distribution of mangroves. Journal of Plant Research, 107: 47-52.
- Wanthongchai, P., and Pongruktham, O. 2019. Mangrove cover, biodiversity, and carbon storage of mangrove forests in Thailand. Sabkha Ecosystems: Volume VI: Asia/Pacific: 459-467.
- Watson, J. D. 1928. Mangrove forests of the Malay Peninsula. Malay Forest Records, 6: 1-275.
- Xiao, W., Ge, X., Zeng, L., Huang, Z., Lei, J., Zhou, B., and Li, M. 2014. Rates of litter decomposition and soil respiration in relation to soil temperature and water in different-aged *Pinus massoniana* forests in the three gorges reservoir area, China. PLoS one, 9(7): e101890.
- Yang, S., Wu, H., Wang, Z., Semenov, M. V., Ye, J., Yin, L., Wang, X., Kravchenko, I., Semenov, V., and Kuzyakov, Y. 2022. Linkages between the temperature sensitivity of soil respiration and microbial life strategy are dependent on sampling season. Soil Biology and Biochemistry, 172: 108758.
- Zhang, G., Bai, J., Tebbe, C. C., Zhao, Q., Jia, J., Wang, W., Wang, X., and Yu, L. 2021a. Salinity controls soil microbial community structure and function in coastal estuarine wetlands. Environmental Microbiology, 23(2): 1020-1037.
- Zhang, Y., Xiao, L., Guan, D., Chen, Y., Motelica-Heino, M., Peng, Y., and Lee, S. Y. 2021b. The role of mangrove fine root production and decomposition on soil organic carbon component ratios. Ecological Indicators, 125: 107525.
- เทียมใจ คมกฤษ. 2536. การปรับตัวทางโครงสร้างของ ไม้เบิกนำ ในป่าชายเลน. . การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 3: 106-116.
- ฉัญลักษณ์ เจริญพรภักดี. 2557. การกระจายและผลผลิตรากใต้ดินในป่าชายเลนรุ่นสอง จังหวัดตราด จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- บัณฑิตชัย เฉลิมฉัตรวิไล. 2553. อัตราการย่อยสลายของรากฝอยในป่าชายเลนรุ่นสอง จังหวัดตราด จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. . กรุงเทพฯ.
- เบญจมาศ มีทรัพย์, อนุกุล บูรณประทีปรัตน์, ภัทรารุช ไทยพิชิตบุรพา, สุธิดา กาญจน์อติเรกลาภ, and ศุภวัตร กาญจน์อติเรกลาภ. 2564. ฟลักซ์ของสารอาหารอนินทรีย์ละลายน้ำและตะกอน

แขวนลอยที่บริเวณปากแม่น้ำตราด จังหวัดตราด ปี พ.ศ. 2561. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 26, 1: 526-544.

ปิยะพล แก่นคง. 2563. ผลของฤดูกาลต่อการเติบโตและประสิทธิภาพของการดูดซึ่มกลับของไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของแสมขาว *Avicennia alba* Blume ในป่าชายเลน ปากแม่น้ำตราด จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิลานี สุชีวบริพนธ์. 2553. พลวัตของซากใบไม้ในป่าชายเลนรุ่นสอง จังหวัดตราด จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศรารวรรณ หงษ์วิเศษ. 2565. อิทธิพลของลักษณะเชิงปริมาณของรากแสมขาวต่อการตกตะกอนในแปลงปลูกป่าชายเลน จังหวัดสมุทรปราการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สนิท อักษรแก้ว. 2542. ป่าชายเลน นิเวศวิทยาและการจัดการ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สรายุทธ บุญยะเวชชีวิน, ร. บ. 2554. ป่าชายเลน: นิเวศวิทยาและพรรณไม้. มูลนิธิกระต่ายในดวงจันทร์.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวนดา ยิ้มสชา
วัน เดือน ปี เกิด	9 กรกฎาคม พ.ศ. 2540
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ชีววิทยา) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผลงานตีพิมพ์	นดา ยิ้มสชา, ศศิธร พ่วงปาน, สุธาทิพย์ อำนวยสิน และฉัตรทิพย์ รอด ทัศน์า. 2566. การประยุกต์ใช้วิธีถุงชาเบื้องต้นในภาคสนามเพื่อศึกษาการ ย่อยสลายของรากพืช ในป่าชายเลนปากแม่น้ำ จังหวัดตราด. การประชุม วิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 14. หน้า 226-235. 25-26 พฤษภาคม 2566 ณ มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา.