การศึกษาพลวัตของรากพืชต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน เพื่อการป้องกันเสถียรภาพลาดดินเชิงนิเวศอย่างยั่งยืน

INVESTIGATING PLANT ROOT-INDUCED CHANGES IN SOIL SHEAR STRENGTH FOR SUSTAINABLE GREEN SLOPE PROTECTION

ฐาปกรณ์ สากลปัญญา

TAPAKORN SAKOLPANYA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2568

KMITL-2025-EN-D-098-076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVESTIGATING PLANT ROOT-INDUCED CHANGES IN SOIL SHEAR STRENGTH FOR SUSTAINABLE GREEN SLOPE PROTECTION

TAPAKORN SAKOLPANYA

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

DOCTOR OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2025

KMITL-2025-EN-D-098-076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2025

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพลวัตของรากพืชต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินเพื่อการป้องกันเสถียรภาพลาดดินเชิงนิเวศอย่างยั่งยืน
นักศึกษา	นายฐาปกรณ์ สากลปัญญา
รหัสประจำตัว	62601009
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิรุฬห์ คำชุม

บทคัดย่อ

การป้องกันลาดดินตื้นถล่มและการกัดเซาะของดินเป็นประเด็นสำคัญที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของชุมชน รวมถึงการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในพื้นที่ลาดชัน แนวทางหนึ่งที่ได้รับความสนใจคือการใช้พืชเพื่อเสริมความมั่นคงของดิน เนื่องจากรากพืชมีคุณสมบัติในการยึดเกาะและสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดิน โดยเฉพาะคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ของราก เช่น ความสามารถในการรับแรงดึง (Root tensile strength) ซึ่งมีบทบาทในการพัฒนาโครงสร้างเชิงกลของดินอย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติเหล่านี้ไม่ได้คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงตลอดวงจรชีวิตของรากพืช โดยเฉพาะในช่วงการเสื่อมสภาพซึ่งอาจเกิดขึ้นจากกระบวนการตามธรรมชาติ หรือถูกเร่งโดยปัจจัยภายนอก เช่น การถูกเผาไหม้และหรือการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืช จากผลการศึกษา พบว่าในช่วงการเจริญเติบโตของพืช รากสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงการเสื่อมสภาพ กำลังรับแรงเฉือนลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยในกรณีของการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช กำลังรับแรงเฉือนลดลงจนเทียบเท่ากับดินเปล่าภายใน 2 เดือน และในกรณีการเผาไหม้ภายใน 4 เดือน ซึ่งจะเป็นช่วงเวลาที่ลาดดินอาจเข้าสู่สภาวะไม่มั่นคง ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของชีวิตและทรัพย์สินบริเวณใกล้เคียง และเพื่อการแก้ไขปัญหานี้ งานวิจัยจึงได้ทำการศึกษาต่อไปยังบทบาทของ Arbuscular Mycorrhizal fungi (AM fungi) ซึ่งสามารถชะลอการเสื่อมสภาพของรากพืช พบว่า AM fungi มีศักยภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของรากและคงไว้ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลที่ดีของรากแม้ในช่วงการเสื่อมสภาพ ทั้งยังช่วยเพิ่มกำลังอย่างมีนัยสำคัญในทุกช่วงอายุของพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Investigating Plant Root-Induced Changes in Soil Shear Strength for Sustainable Green Slope Protection
Student	Mr. Tapakorn Sakolpanya
Student ID.	62601009
Degree	Doctor of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2025
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Viroon Kamchoom

ABSTRACT

The prevention of shallow slope failures and soil erosion is essential for ensuring public safety and preserving the environment in sloped terrains. Vegetative solutions have gained interest as eco-friendly approaches to enhance soil stability. Plant roots improve soil shear strength through their anchoring capacity and biomechanical properties, particularly root tensile strength, which contributes significantly to reinforcing the soil structure. However, these properties are dynamic and change throughout the life cycle of plant roots. During root degradation caused naturally or accelerated by external factors such as burning or herbicide exposure, mechanical properties and chemical compositions of roots deteriorate, potentially compromising slope stability. This study found that during the growth phase, roots notably enhance soil shear strength. However, the soil's shear strength decreases progressively. In herbicide-treated soils, shear strength dropped to levels comparable to bare soil within two months, while in burned soils, this occurred within four months. These findings highlight the critical importance of monitoring slope conditions following such disturbances to mitigate associated risks. To address this issue, the study further investigated the potential of Arbuscular Mycorrhizal (AM) fungi to improve root resilience and sustain strength. Results indicated that AM fungi promote root growth and help maintain biomechanical properties even during degradation. Moreover, AM fungi significantly enhance Root Tensile strength across all root development stages, suggesting their effectiveness as a biological amendment for long-term slope stabilization.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การเรียนต่อในระดับดุษฎีบัณฑิตนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความอนุเคราะห์ และการสนับสนุนเป็นอย่างดีจากหลายฝ่าย โดยในที่นี้ ผมขอแสดงความขอบคุณถึงทุกๆท่านที่ได้ช่วยเหลือและสนับสนุน ในตลอดช่วงระยะเวลาการเดินทางในเส้นทางของการเรียนต่อระดับดุษฎีบัณฑิตที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารแห่งนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วิรุฬห์ คำชุม อาจารย์ที่ปรึกษา ที่สละเวลาอันมีค่า และให้โอกาสผมในการเรียนต่อระดับดุษฎีบัณฑิตนี้ รวมถึงให้ข้อเสนอแนะ คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ตลอดจนช่วยเหลือและช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาการเรียนนี้ จนกระทั่งสามารถสำเร็จการศึกษาได้อย่างลุล่วง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ซึ่งให้เกียรติเป็นกรรมการคุมสอบ ผู้ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือชี้แนะจุดบกพร่องของงานวิจัยนี้ เพื่อแก้ไขและปรับปรุงให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมปฐพี, ห้องแบบจำลองหมุนเหวี่ยงทางวิศวกรรมปฐพี และห้องศูนย์นวัตกรรมการก่อสร้างใต้ดินและอุโมงค์พระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา รวมถึงไปถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการเอกสารต่างๆ

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และทุนการศึกษา (KDS2019) ที่สนับสนุน ช่วยเหลือค่าใช้จ่าย และให้โอกาสผมได้เข้าเรียน ณ ที่แห่งนี้

และในท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่คอยสนับสนุนทั้งด้านการเงิน และกำลังใจจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณครับ

ฐาปกรณ์ สากลปัญญา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VI

สารบัญรูป.....VII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....1

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษาวิจัย.....2

1.3 เนื้อหาในเล่มรายงาน.....3

บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4

2.1 ชีววิศวกรรมปฐพี.....4

2.2 รากพืช.....4

2.2.1 ชนิดของรากพืช.....5

2.2.2 ลักษณะโครงสร้างของรากพืช.....6

2.3 คุณสมบัติของรากพืชต่อการเสริมเสถียรภาพและป้องกันปัญหาการพังทลายของดิน.....10

2.3.1 รูปร่างของราก Root Geometry.....10

2.3.2 กลศาสตร์ของราก Root Mechanics.....15

2.3.3 อุทกพลศาสตร์ของราก Root Hydrology.....17

2.4 กำลังรับแรงเฉือนของดิน.....19

2.5 เสถียรภาพลาดดิน.....21

2.6 การเสื่อมสภาพของรากพืช.....22

2.6.1 อัตราการสลายตัวของราก.....22

2.6.2 การเสื่อมสภาพของรากพืชต่อคุณสมบัติการต้านทางแรงดึง.....23

2.6.3 การเสื่อมสภาพของรากพืชต่อคุณสมบัติการต้านทางแรงเฉือนของดิน.....24

2.7 ปฏิกิริยาไมคอร์ไรซา.....25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 27
3.1 แผนการทดสอบ 27
3.2 ชนิดพืชและดิน 28
3.3 การเจริญเติบโต และการย่อยสลายของรากพืช 29
3.4 การวัดค่าความต้านทานแรงดึงของรากพืช 32
3.5 การวัดค่าปริมาณเซลลูโลสและลิกนินในรากพืช 33
3.6 การวัดปริมาณ AM fungi 34
3.7 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรง 34
3.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ 35
บทที่ 4 ผลการทดสอบ คุณสมบัติของรากพืช ในช่วงการเปลี่ยนแปลง 36
4.1 กำลังรับแรงดึงของรากพืช 36
4.2 ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินในรากพืช 36
4.3 ช่วงการเจริญเติบโตของรากพืช 41
4.4 ช่วงการย่อยสลายของรากพืช 43
4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรคุณสมบัติของรากพืช 46
บทที่ 5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน ในช่วงการเปลี่ยนแปลง 47
5.1 ผลจากการเจริญเติบโตของรากพืช 47
5.2 ผลจากการย่อยสลายของรากพืช 52
บทที่ 6 ผลการทดสอบการเสริมคุณสมบัติของรากพืชด้วย AM fungi 56
6.1 อัตราการเจริญเติบโตของ AM fungi และชีวมวลของราก 56
6.2 ผลจาก AM fungi ต่อปริมาณเซลลูโลสและลิกนินในราก 57
6.3 ผลจาก AM fungi ต่อคุณสมบัติชีวกลศาสตร์ของรากพืช 59
บทที่ 7 การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินที่มีพืช 65
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัย 71
บรรณานุกรม 74
ประวัติผู้เขียน 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติรากพืชที่สำคัญ ต่อการพิจารณานำพืชไปใช้งานด้านวิศวกรรม 18

ตารางที่ 3.1 แผนการทดสอบ..... 27

ตารางที่ 3.2 สรุปคุณสมบัติดินที่สำคัญ..... 29

ตารางที่ 3.3 ตัวย่อและรายการตัวอย่างทดสอบ 32

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่า Pearson's Correlation Coefficient 46

ตารางที่ 6.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลลูโลสกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก 63

ตารางที่ 6.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึง กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก 63

ตารางที่ 6.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัส กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก 64

ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติของรากพืช และค่า Root cohesion ที่ได้จากการคำนวณ 67

ตารางที่ 7.2 ค่า root cohesion และสัดส่วนความปลอดภัยที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี infinite slope method โดยเปรียบเทียบค่าจาก Wu model และ ค่าจากการทดสอบแรงเฉือนตรง..... 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

รูปที่ 1.1 แผนผังการศึกษา 3
รูปที่ 2.1 แสดงระนาบการเลื่อนไถลที่มีแนวโน้มจะเกิดขึ้น โดยรากพืชสามารถเสริมเสถียรภาพได้ 4
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างการเจริญเติบโตของรากพืช 7
รูปที่ 2.3 ลักษณะการเจริญเติบโตของระบบรากในช่วงต่างๆ 9
รูปที่ 2.4 ลักษณะการเจริญเติบโตและกระจายตัว ทางด้านข้างของรากพืช 9
รูปที่ 2.5 คุณสมบัติของรากพืชต่อการเสริมเสถียรภาพและป้องกันปัญหาการพังทลายของดิน 10
รูปที่ 2.6 รูปตัวอย่างการพิจารณารากพืชเพื่อหาอัตราส่วนปริมาตรรากและดัชนีพื้นที่ราก 14
รูปที่ 2.7 กราฟแสดง Extended Mohr-Coulomb failure envelope 18
รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างทดสอบ ก่อนและหลังการเผาไหม้ 30
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงเครื่องทดสอบ สำหรับการทดสอบความต้านทานแรงดึงของราก 31
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการทดสอบความต้านทานแรงดึงของรากพืช 33
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างกระบอกทดสอบ 35
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ปริมาณเซลลูโลสและ (b) ปริมาณลิกนิน และ (c) กำลังรับแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก 37
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับปริมาณเซลลูโลสของราก 38
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าหลังจาก (a) การเผาหญ้า และ (b) การใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช 39
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลลูโลสกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากของหญ้าหลังจาก (a) การเผาหญ้า และ (b) การใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช 40
รูปที่ 5.1 พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินเปล่า (a) ค่ากำลังรับแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของตัวอย่างทดสอบ (b) การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวราบของตัวอย่างในช่วงรับแรงเฉือนที่มีแรงกระทำ Normal stress เท่ากับ 7.1, 14.6 และ 29.2 kPa 47
รูปที่ 5.2 พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชในช่วงการเจริญเติบโต 2, 4, 6 เดือน (a,c,e) ค่ากำลังรับแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของตัวอย่างทดสอบ (b,d,f) การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวราบของตัวอย่างในช่วงรับแรงเฉือนที่มีแรงกระทำ Normal stress 7.1 kPa 48
รูปที่ 5.3 การเปลี่ยนแปลงของ (a) ค่ากำลังรับแรงเฉือน (b) ค่าการขยายตัว และ (c) สัดส่วนการขาดของรากพืช ในช่วงระยะเวลาต่างๆ 49
รูปที่ 5.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดิน กับ (a) กำลังรับแรงดึงของรากพืช (b) ค่ายังโมดูลัสของรากพืช และ (c) ค่าชีวมวลของรากพืช 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.5 พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชในช่วงการเสื่อมสภาพจากการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืช 0.5, 1, 2 เดือน (a,c,e) ค่ากำลังรับแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของตัวอย่างทดสอบ (b,d,f) การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวราบของตัวอย่างในช่วงรับแรงเฉือนที่มีแรงกระทำ Normal stress เท่ากับ 7.1 kPa 53
รูปที่ 5.6 พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชในช่วงการเสื่อมสภาพจากการเผาไหม้ 1, 2, 4, 6, 12 เดือน (a,c,e,g,i) ค่ากำลังรับแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของตัวอย่างทดสอบ (b,d,f,h,j) การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวราบของตัวอย่างในช่วงรับแรงเฉือนที่มีแรงกระทำ Normal stress เท่ากับ 7.1 kPa 54
รูปที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงของ (a) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก, (b) กำลังรับแรงดึงของราก, (c) ยังโมดูลัสของราก, (d) ค่าความเครียดจากการดึงรากทดสอบ, (e) ปริมาณชีวมวลแห้งในราก, (f) ปริมาณเซลลูโลสในราก, (g) ปริมาณลิกนินในราก ในช่วงระยะเวลาต่างๆ 55
รูปที่ 6.1 อัตราการเจริญเติบโตของ AM fungi ในรากพืชช่วงการเจริญเติบโต 2, 4, 6 เดือน 56
รูปที่ 6.2 ปริมาณชีวมวลของรากแห้ง ในช่วงการเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพเนื่องจากการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืช และการเผาไหม้ 57
รูปที่ 6.3 ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินของรากพืชในช่วง (a,b) การเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพเนื่องจากการได้รับ (c,d) สารเคมีกำจัดวัชพืช และ (e,f) การเผาไหม้ 58
รูปที่ 6.4 ค่าความต้านทานแรงดึงของรากพืชในช่วง (a) การเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพเนื่องจากการได้รับ (c) สารเคมีกำจัดวัชพืช (e) การเผาไหม้ และ ค่ายังโมดูลัสของรากพืชในช่วง (b) การเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพเนื่องจากการได้รับ (d) สารเคมีกำจัดวัชพืช (f) การเผาไหม้ โดยเทียบกับระยะเวลา 61
รูปที่ 6.5 ค่าความต้านทานแรงดึงของรากพืชในช่วง (a) การเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพเนื่องจากการได้รับ (c) สารเคมีกำจัดวัชพืช (e) การเผาไหม้ และ ค่ายังโมดูลัสของรากพืชในช่วง (b) การเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพเนื่องจากการได้รับ (d) สารเคมีกำจัดวัชพืช (f) การเผาไหม้ โดยเทียบกับขนาดราก 62
รูปที่ 6.6 ค่าความต้านทานแรงดึงของรากพืชในช่วงและค่ายังโมดูลัสของรากพืช เปรียบเทียบกับปริมาณสารเคมีในรากพืช 63
รูปที่ 7.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ปริมาณชีวมวลแห้งของพืช, (b) ปริมาณชีวมวลแห้งของรากพืชในช่วง ต่อร้อยละพื้นที่ผิวด้านข้าง 66
รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงเฉือน กับระยะเวลา 67
รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงเฉือน และ Root cohesion กับ กำลังรับแรงดึงของรากพืช ปริมาณชีวมวลแห้งของรากพืช และค่าร้อยละพื้นที่ผิวด้านข้างของราก 68
รูปที่ 7.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยวิธี infinite slope method 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การเลือกใช้ พืชพรรณ ในการแก้ไขปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพของลาดดินตื้นและปัญหาการถูกกัดเซาะของหน้าดิน โดยใช้รากพืชเพื่อเสริมความแข็งแรงของดิน เป็นวิธีการที่เป็นมิตรกับธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยรากพืชจะทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงของดิน ช่วยยึดเหนี่ยวอนุภาคดิน เพิ่มแรงยึดเกาะในดิน และในการศึกษาของ Wu et al. (1979) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดิน และรากพืช อธิบายถึงผลอันเนื่องมาจากรากพืช ทั้งกำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากมีอยู่ของรากพืชในดิน และแรงดันน้ำในดินที่มีการเปลี่ยนแปลง และ Waldron and Dakessian (1981) ศึกษาถึงการคำนวณความสามารถในการรับแรงเฉือนในดินที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของรากพืชในดิน พบว่าค่ากำลังรับแรงดึงของรากพืช และความแข็งแรง ทั้งค่า Modulus และ Strength นั้นจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดรากพืชนั้นมีขนาดใหญ่มากขึ้น และในการศึกษาของ Ng et al. (2018) ได้อธิบายถึงความสามารถของรากพืชที่เสริมกำลังและเพิ่มเสถียรภาพลาดดินตื้นได้ โดยการมีอยู่ของรากพืชจะทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินเปล่า เนื่องจากความสามารถของรากพืชในการดูดน้ำที่ส่งผลต่อแรงดันน้ำในดินที่เปลี่ยนแปลง และการศึกษาอื่น ๆ ที่ศึกษาคุณสมบัติแรงเสียดทานระหว่างผิวดินกับรากพืช และคุณสมบัติที่รากพืชสามารถรับแรงดึงได้ รวมไปถึงปริมาณชีวมวลของรากพืชในช่วงพื้นที่หน้าตัดเฉือนนั้น ๆ อีกทั้งสัณฐานวิทยาของพืชที่ช่วยเสริมให้ดินนั้นสามารถรับแรงเฉือนได้มากขึ้น โดยมีงานวิจัยศึกษาถึงคุณสมบัติเหล่านี้ ด้วยวิธีการศึกษาที่หลากหลาย อาทิเช่น การศึกษาด้วยการทดสอบแรงเฉือนตรง Mahannopkul and Jotisankasa(2019) การทดสอบกำลังถอนของรากพืช (Kamchoom et al., 2014) การทดสอบกำลังรับแรงดึงของราก (De Baets et al., 2008; Genet et al., 2005) หรือการทดสอบด้วยแบบจำลองหมุนเหวี่ยงทางวิศวกรรมปฐพี (Liang et al., 2017; Sonnenberg et al., 2010) แต่อย่างไรก็ตาม การศึกษาส่วนใหญ่จะศึกษารากพืชในขณะช่วงที่รากพืชนั้นเจริญเติบโตดี หรือเพียงช่วงอายุหนึ่งเท่านั้น แต่ พืช เป็นสิ่งมีชีวิต ซึ่งจะมีทั้งช่วงการเจริญเติบโต และการเสื่อมสภาพ โดยในช่วงการเสื่อมสภาพนั้นเป็นช่วงที่มีความท้าทายในการศึกษา

เนื่องจากรากพืชซึ่งมีปฏิสัมพันธ์กับดิน (interaction) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพืชนั้นอยู่ในสภาวะที่เจริญเติบโตแข็งแรงดี (mature) แต่ในสภาพแวดล้อมทั่วไป พืชนั้นเป็นสิ่งมีชีวิตจึงมีทั้งช่วงการเจริญเติบโตและช่วงการเสื่อมสภาพ โดยช่วงการเจริญเติบโตและช่วงการเสื่อมสภาพนั้นจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพลาดดิน โดยมีการศึกษาถึงคุณสมบัติการซึมผ่านของน้ำในดินที่เปลี่ยนแปลงในช่วงการเปลี่ยนแปลงของรากพืช (Jotisankasa and Sirirattanachat, 2017; Leung et al., 2015) และการศึกษาผลจากปริมาณของรากพืชต่อกำลังรับแรงเฉือน (Mahannopkul and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jotisankasa, 2019) พบว่าขณะที่มีปริมาณรากพืชเพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้นเช่นกัน แต่ในทางกลับกัน หากพืชนั้นเกิดการเสื่อมสภาพทั้งจากธรรมชาติ สิ่งแวดล้อม หรือพฤติกรรมของมนุษย์ ค่ากำลังความสามารถในการรับแรงของรากพืชในช่วงกำลังเสื่อมสภาพนี้จะมีค่าลดลง (Zhu et al., 2020) อีกทั้งในสภาวะปัจจุบัน ปัญหาการเสื่อมสภาพของรากพืช อันเนื่องมาจากการเผาไหม้ของป่า หรือการกระทำของมนุษย์ซึ่งใช้สารเคมีกำจัดพืชเพื่อความต้องการเปิดพื้นที่ใช้งาน จะส่งผลอย่างไรต่อความสามารถของรากพืชนั้น ยังคงเป็นที่น่าสนใจในการทำการศึกษา จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ทำให้เกิดการศึกษานี้ โดยในการศึกษานี้จะศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากรากพืช ในช่วงการเจริญเติบโตและช่วงการเสื่อมสภาพที่แตกต่างกัน ต่อความแข็งแรงและกำลังรับแรงเฉือนของดิน

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรากพืชทั้งช่วงการเจริญเติบโตและเสื่อมสภาพ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อดังนี้

1. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของรากพืช อาทิเช่น กำลังรับแรงดึงของรากพืช ในช่วงการเปลี่ยนแปลงทั้งการเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากการเผาไหม้ และการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืช
2. เพื่อศึกษากำลังรับแรงเฉือนในดินที่มีรากพืช ในช่วงการเปลี่ยนแปลงทั้งการเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากการเผาไหม้ และการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืช
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของรากพืชที่เปลี่ยนแปลง กับกำลังรับแรงเฉือนในดิน
4. เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ของราก ด้วย AM fungi

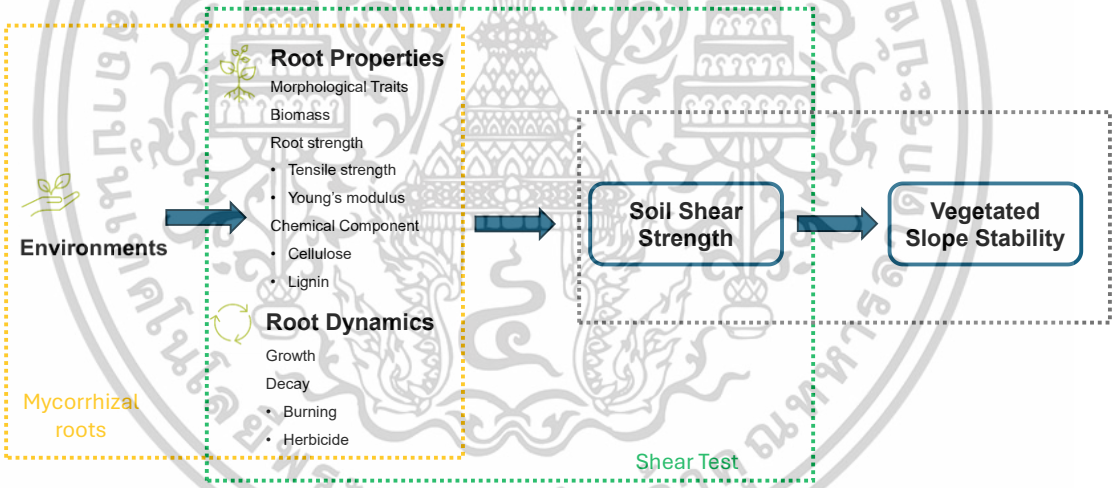
โดยในการศึกษานี้เลือกใช้หญ้า Bermuda grass หรือในชื่อวิทยาศาสตร์ที่เรียกว่า Cynodon dactylon ทำการศึกษาทั้งในห้องปฏิบัติการทดสอบด้วยการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรง ตรวจวัดความสามารถในการรับแรงดึงของรากพืช และตรวจวัดปริมาณเซลลูโลส และลิกนินในรากพืช ในช่วงการเปลี่ยนแปลงสภาพของรากพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 เนื้อหาในเล่มรายงาน

การศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนสภาพของรากพืชต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินเพื่อป้องกันเสถียรภาพลาดดินเขียวที่ยั่งยืน ในวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 8 บท โดยในแต่ละบทจะแสดงถึงขั้นตอน วิธีการศึกษา และรายละเอียด โดยมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1-2 เป็นการเกริ่นนำ แสดงถึงที่มาและความสำคัญในการศึกษานี้ รวมไปถึงการศึกษาทบทวนงานวิจัย literature review ต่อมาในบทที่ 3 เป็นกระบวนการทดสอบ methodology โดยจะมุ่งเน้นที่การศึกษาในห้องปฏิบัติการทดสอบ ซึ่งจะศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงชีวกลศาสตร์ของรากพืช รวมไปถึงกำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชทั้งในช่วงการเจริญเติบโตและช่วงการเสื่อมสภาพของรากพืช ต่อมาในบทที่ 4 และ 5 จะเป็นผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงชีวกลศาสตร์ของรากพืช และคุณสมบัติกำลังรับแรงเฉือนของดิน และในบทที่ 6 จะเป็นผลการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อการปรับปรุงคุณภาพของรากดินเพื่อส่งเสริมลาดดินเขียว โดยการใช้จุลินทรีย์ AM fungi และในบทที่ 7 จะแสดงตัวอย่างการคำนวณสัดส่วนความปลอดภัยที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากรากพืช และในบทสุดท้าย บทที่ 8 จะเป็นการสรุปผลการศึกษาทั้งหมดรวมไปถึงแนวทางการศึกษาต่อในอนาคต



รูปที่ 1.1 แผนผังการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

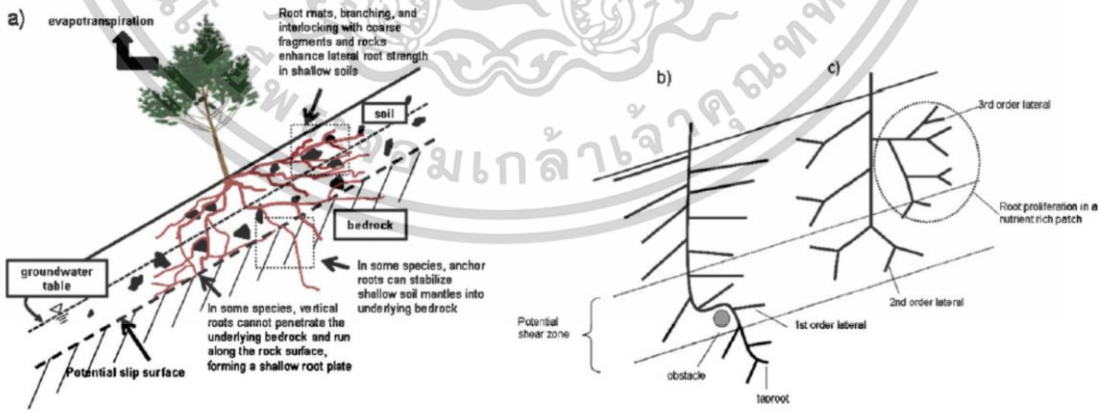
บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีววิศวกรรมปฐพี

ชีววิศวกรรมปฐพี หรือ Soil Bioengineering คือ การประยุกต์ใช้ ธรรมชาติ พืชพรรณ กับการออกแบบทางวิศวกรรม เพื่อป้องกันปัญหาการถูกกัดเซาะและการพังทลายของลาดดิน ซึ่งเป็นปัญหาที่มีความสำคัญเนื่องจากส่งผลกระทบเป็นวงกว้างทั้งต่อสิ่งก่อสร้างและสิ่งมีชีวิตในบริเวณใกล้เคียง ด้วยการศึกษาและวิเคราะห์ผล คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของดินที่มีรากพืช เพื่อนำผลการศึกษามาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมต่างๆ เนื่องจาก ความสามารถของรากพืช ที่สามารถช่วยในการป้องกันการกัดเซาะและพังทลายของลาดดินได้ โดยเนื้อหาในบทนี้ จะอธิบายถึงรากพืชและความสามารถของรากพืชในการเสริมกำลังรับแรงในดิน

2.2 รากพืช

รากพืช (Plant Roots) คือส่วนของพืชที่เจริญเติบโตอยู่ใต้ดิน เป็นอวัยวะสำคัญของพืช โดยทั่วไปมักจะอยู่ใต้ระดับผิวดิน ทำหน้าที่ดูดซึม ลำเลียงน้ำและสารอาหารจากดินเข้าสู่ส่วนต่างๆ ของพืช (absorption and transportation) และยึดเกาะกับดิน (anchorage) คอยค้ำจุนให้ลำต้นทรงตัว ในทาง ชีววิศวกรรมปฐพี (Bioengineering for Geotechnics) รากพืชมีบทบาทสำคัญในการเสริมเสถียรภาพของดินและลดปัญหาการพังทลายของดิน ดังแสดงตัวอย่างใน รูปที่ 2.1 (รูปอ้างอิงจาก Stokes et al. (2009))



รูปที่ 2.1 แสดงระนาบการเลื่อนไถลที่มีแนวโน้มจะเกิดขึ้น โดยรากพืชสามารถเสริมเสถียรภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ชนิดของรากพืช

2.2.1.1 การแบ่งชนิดของรากพืชตามลักษณะของราก

โดยชนิดของรากพืช หากแบ่งชนิดตามลักษณะของราก จะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ชนิด

1. Primary root รากแก้ว (tap root) ตรงโคนมีขนาดใหญ่และมีขนาดเล็กลงไปจนถึงปลาย มีความยาวและใหญ่กว่ารากอื่นที่แตกแขนง ทำหน้าที่ค้ำจุนให้พืชทรงตัวได้ รากชนิดนี้พบในพืชใบเลี้ยงคู่ที่งอกออกจากเมล็ดโดยปกติ ส่วนพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่รากเพิ่งงอกออกจากเมล็ดใหม่ จะมีรากนี้เช่นกันแต่มีอายุได้ไม่นานก็เสื่อมสภาพแล้วเกิดรากชนิดใหม่ขึ้นมาแทน (รากฝอย)

2. Secondary root รากแขนง (lateral root หรือ branch root) เป็นรากที่เจริญเติบโตออกมาจาก รากแก้ว มักงอกเอียงลงไปในดินจนเกือบขนานหรือขนานไปกับพื้นดิน รากชนิดนี้อาจแตกแขนงกระจายออกได้กว้างขวาง

3. Adventitious root รากพิเศษ เป็นรากที่ไม่ได้กำเนิดจากรากแก้วหรือรากแขนง รากชนิดนี้อาจแตกแขนงออกจากโคนต้นพืช ตามข้อของลำต้นหรือกิ่ง ตามใบหรือจากกิ่งตอนของไม้ผลทุกชนิด แยกเป็นชนิดย่อยได้ตามรูปร่างและหน้าที่ดังนี้

- รากฝอย (Fibrous root) เป็นรากขนาดเล็กสม่ำเสมอ มีจำนวนมาก รากงอกออกจากรอบโคนต้นแทนรากแก้วที่ย่อยสลายเสียไปหรือหยุดเติบโต พบในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวเป็นส่วนใหญ่
- รากค้ำจุน (Prop root) เป็นรากที่แตกออกจากข้อของลำต้นที่อยู่ใต้ดิน และเหนือดินขึ้นมาเล็กน้อย รากพุ่งแทงลงในดินเพื่อพยุงลำต้นไม่ให้ล้ม ยกตัวอย่างเช่นรากค้ำจุนของต้นข้าวโพด ต้นลำเจียก และต้นโกงกาง
- รากเกาะ (Climbing root) เป็นรากที่แตกออกจากข้อของลำต้น เกาะตามหลักหรือเสาเพื่อพยุงลำต้นให้ติดแน่น ชูลำต้นขึ้นที่สูง ยกตัวอย่างเช่นรากของพลู พลูด่าง และกล้วยไม้
- รากสังเคราะห์แสง (Photosynthetic root) เป็นรากที่แตกออกจากข้อของลำต้นแล้วห้อยลงมาในอากาศ มีสีเขียวของคลอโรฟิล ทำหน้าที่สังเคราะห์แสง ยกตัวอย่างเช่น รากกล้วยไม้ที่มีสีเขียวเฉพาะรากอ่อน หรือปลายรากที่แก่เท่านั้น
- รากหายใจ (Respiratory root) แตกแขนงออกจากรากใหญ่ที่อยู่ในดิน แต่งอกขึ้นมาชูปลายเหนือดิน ผิวน้ำ หรืออาจลอยตามผิวน้ำ เช่นรากของแพงพวย
- รากกาฝาก (Parasitic root) เป็นรากของพืชบางชนิดที่เป็นปรสิต เช่นรากของต้นกาฝาก และต้นฝอยทอง
- รากสะสมอาหาร (Storage root) เป็นรากที่ทำหน้าที่ในการสะสมอาหารประเภทแป้ง น้ำตาล หรือ โปรตีน มีลักษณะอวบอ้วนหรือที่เรียกว่า หัว เช่น หัวแครอต หัวผักกาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวมันเทศ หัวมันแกว มันสำปะหลัง กระชาย เป็นต้น แต่รากสะสมอาหารบางชนิดอาจเกิดจากรากแก้วสะสมอาหาร

2.2.1.2 การแบ่งชนิดของรากพืชตามขนาดของราก

การแบ่งชนิดของรากพืชตามขนาด จะแบ่งออกเป็น 3 ชนิด โดยการแบ่งชนิดของรากพืชแบบนี้ ไม่ได้สะท้อนถึงขั้นตอนการเจริญเติบโตของราก แต่ขนาดของรากพืชที่อายุต่างกัน จะขึ้นกับชนิดของพืช

1. Fine roots (<2.0 mm) มีหน้าที่ดูดซึมน้ำและสารอาหาร โดยหากว่ารากนั้นยังอ่อนและยังโตไม่เต็มที่ อาจมี Root hair ช่วยในการดูดซึม โดยการเปลี่ยนแปลงของราก Fine root มักจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

2. Thin roots (2.0-10.0 mm) ในพืชพันธุ์ไม้ต่างๆ ส่วนมากรากชนิดนี้จะมีน้อย และรากนี้อาจขยายใหญ่ขึ้น โดยขึ้นกับกระบวนการเจริญเติบโตทั้งภายในและภายนอกของรากพืช

3. Thick roots (>10.0 mm) รากเหล่านี้จะเป็นส่วนสำคัญสำหรับการยึดเกาะระหว่างพืชกับดินเพื่อป้องกันการถูกถอนของราก (uprooting) โดยตำแหน่งของราก Thick root นี้จะเป็นตัวกำหนดของตำแหน่งรากชนิดอื่นๆ ซึ่งมีผลทางอ้อมกับการดูดซึมน้ำและสารอาหารของพืช

2.2.2 ลักษณะโครงสร้างของรากพืช

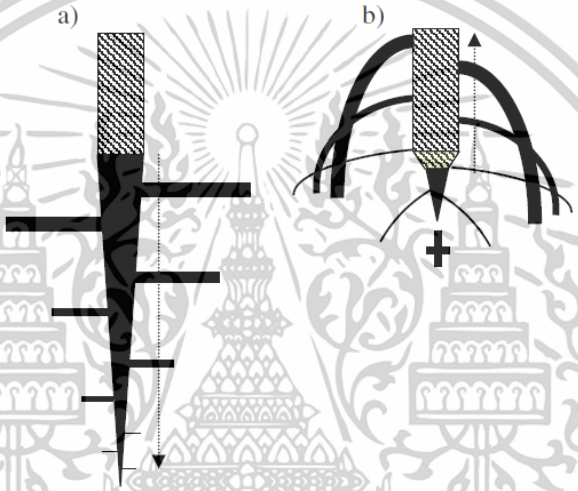
ลักษณะโครงสร้างของรากพืช Root system architecture ขึ้นอยู่กับธรรมชาติและลักษณะการจัดเรียงตัวในแต่ละส่วนที่เกี่ยวข้องกับรากพืช (Barthélémy and Caraglio, 2007) ตั้งแต่ต้นพืชเกิดจนถึงพืชตาย ความหลากหลายของลำดับ ขั้นตอนการเจริญเติบโตที่ชัดเจน สามารถกำหนดลักษณะการพัฒนา การทำงานของรากพืช รวมไปถึงการจัดเรียงตัวของส่วนต่างๆที่สัมพันธ์กันได้ โดยในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมานี้ ปริมาณข้อมูลการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับลักษณะโครงสร้างของรากพืชนั้นมีไม่มาก เนื่องจากความลำบากในการศึกษา ทั้งลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรากพืชในดิน และการเจริญเติบโตของรากที่ศึกษาได้ ข้อมูลไม่เด่นชัดเท่ากับส่วนที่อยู่นอกดินซึ่งสังเกตได้ง่ายกว่า เช่น ระบบของรากนั้นไม่มี ลักษณะของโหนดใบ (leaf nodes) เกล็ดตา (bud-scales) หรือวงปี (annual growth rings) จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงของลักษณะทั่วไปจะไม่สามารถระบุถึงระยะเวลาย้อนหลังได้ และลักษณะของความแตกต่างโครงสร้างรากพืชระหว่างชนิด จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลัก คือแบบพันธุ์ไม้ (woody) และแบบไม่ใช่พันธุ์ไม้ (non woody) ด้วยการพิจารณาการพัฒนาของรากในช่วงเริ่มต้น ซึ่งส่วนใหญ่จะขึ้นกับการควบคุมทางพันธุ์กรรมในช่วงระยะแรก (Stokes et al., 2009) โดยลักษณะการเจริญเติบโตและการพัฒนาของรากพืชจะขึ้นกับการพัฒนาออกจากรากแรกเกิด (radical) ดังในรูปที่ 2.2 จาก Stokes et al. (2009)

โดยรากแรกเกิด (Radical) คือรากที่เกิดจากเมล็ด จะเติบโตหยั่งลึกลงไปในดิน ในพืชบางชนิดจะเติบโตเป็นรากแก้ว (รูปที่ 2.2) หรืออาจมีรากงอกทางด้านข้างในลำดับต่อมา หากว่ารากแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นถูกดึงออกหรือเกิดการขาดขึ้น จะเกิดรากใหม่ที่เข้ามาทำหน้าที่แทนรากแก้วนั้นๆ และในพืชบางชนิด รากแรกเกิดนี้จะตายหลังจากงอก โดยไม่มีรากใหม่เกิดมาแทนที่ แต่รากที่เกิดมาใหม่จะเกิดบริเวณที่คอรากหรือโคน (รูปที่ 2.2)

การเจริญเติบโตของรากวิสามัญ adventitious roots จะสามารถพบเจอได้ในรากลักษณะแบบที่หนึ่ง เช่นกัน โดยในพืชพันธุ์ต้นไม้เขตร้อนหลายพันธุ์ จะมีรากวิสามัญจำนวนมากที่โคนลำต้นเป็นทรงกรวยขนาดใหญ่ ซึ่งจะสามารถเสริมกำลังรับแรงในรากปฐมภูมิได้ และอาจพบได้ในลักษณะผสม และในพืชพันธุ์สำหรับเขตอบอุ่น (temperate species) การเจริญเติบโตของรากวิสามัญจะพบเจอได้น้อยกว่า เนื่องจากมีอยู่ในช่วงระดับเซนติเมตรเริ่มต้นจากโคนลำต้นเท่านี้)



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างการเจริญเติบโตของรากพืช แบบ (a) ระบบรากทั้งหมดจะเจริญเติบโตและแตกแขนงจากรากแรกเกิด แบบ (b) รากแรกเกิด (radical) จะหยุดเจริญเติบโตหลักจากงอกจากเมล็ด

ลักษณะแบบที่หนึ่ง ในรูปที่ 2.2a ระบบรากทั้งหมดจะเจริญเติบโตและแตกแขนงจากรากแรกเกิด (radical) ตรงกันข้ามกับการเจริญเติบโตของต้นกล้า รากปฐมภูมิจะงอกเจริญเติบโตลงด้านล่างและแตกแขนงลงไปตามลำดับ สร้างระบบของรากแบบพันธุ์ไม้ (woody) ออกทางด้านข้าง (Bell and Bryan, 2008) ในระหว่างกระบวนการแตกแขนงของราก รากแก้ว (tap root) จะทำหน้าที่หยั่งลึกลงไปในดินตามแรงโน้มถ่วง (Gravitropism) และมีรากทางด้านข้าง (lateral roots) แตกแขนงออกมาจากรากแก้ว ซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะทางสัณฐานวิทยาและหน้าที่ที่แตกต่างกันของราก (Champagnat et al., 1974; Dyanat Nejad and Neville, 1972) โดยตัวอย่างลักษณะรากพืชนี้คือลักษณะของต้นกล้าที่มีรากแก้วหยั่งลึกลงไปในดิน เมื่อไม่พิจารณาการเจริญเติบโตขั้นต่อๆไปคือ การพัฒนารากของพืชใบเลี้ยงคู่ (dicotyledonous) เช่น พืชสมุนไพรและพุ่มไม้ (herbs and shrubs) จะมีลักษณะการพัฒนารากแบบนี้ และในระยะการพัฒนาของต้นอ่อนพืช (juvenile

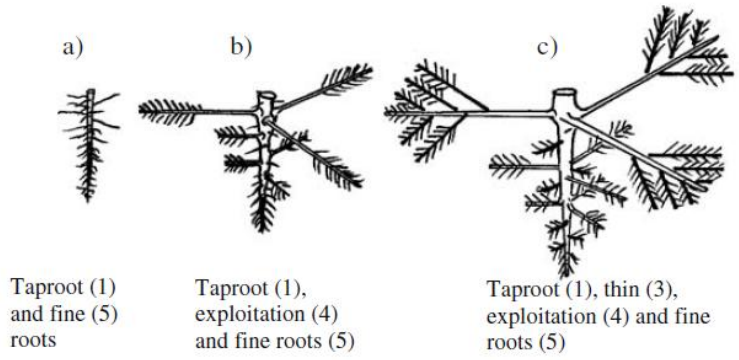
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

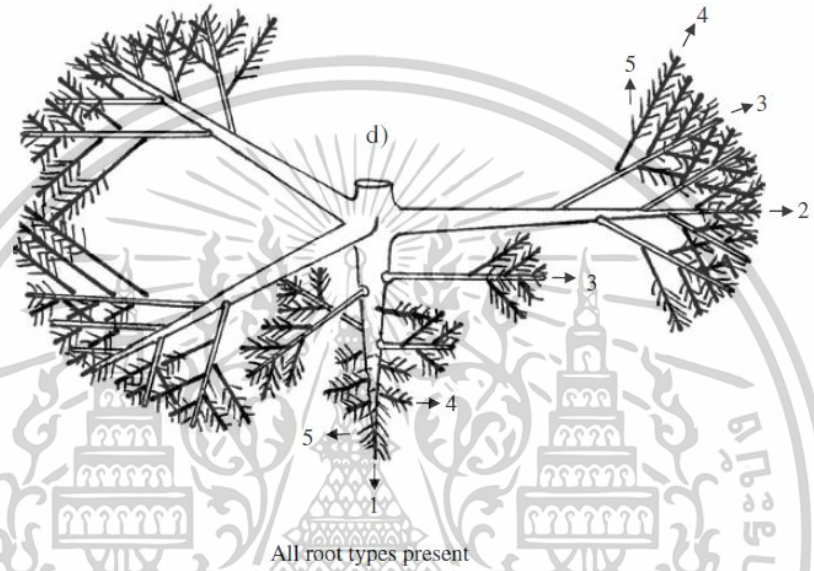
developmental stages) มักจะแสดงในลักษณะแบบนี้เช่นกัน แม้ว่าในภายหลังรากแก้วอาจหายไป เนื่องจาก การขาด ได้รับความเสียหาย ก็จะมีรากในแนวดิ่งใหม่ปรากฏขึ้นแทน หรือรากทางด้านข้างเดิมอาจงอกเพิ่มลงไปแทนที่รากแก้วจึงทำให้คุณสมบัติของรากแก้วนั้นจะยังคงอยู่ (Khuder et al., 2007)

ลักษณะแบบที่สอง ในรูปที่ 2.2b รากแรกเกิด (radical) จะหยุดเจริญเติบโตหลักจากงอกจากเมล็ดไม่นาน (Charles-Dominique et al., 2009) โดยระบบของรากแบบนี้ จะเป็นลักษณะของรากวิสามัญ (adventitious) และประกอบด้วยรากลักษณะเดียวกันจำนวนมากเกิดขึ้นในบริเวณโคนต้นของพืช โดยตัวอย่างลักษณะรากพืชนี้จะมีอยู่ใน ธัญพืช (cereals) หรือพืชหัว (bulbs) แต่ในต้นปาล์มที่ปลูกในพื้นที่เขตร้อนหรือเฟิร์นยังจำเป็นต้องมีการพิจารณาเพิ่มเติม

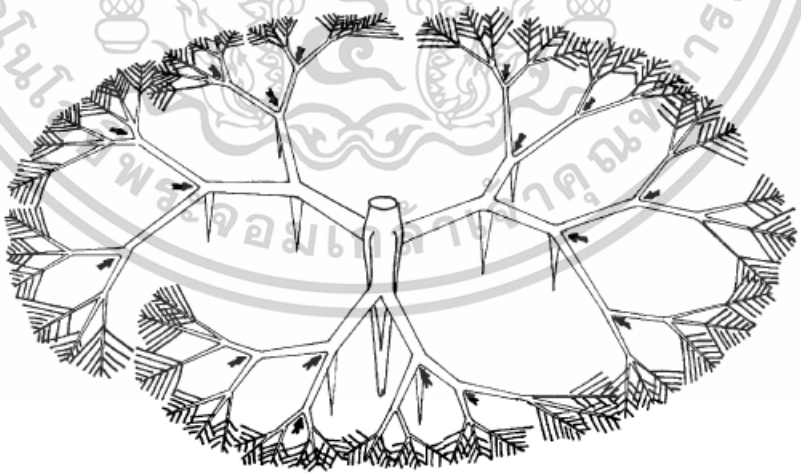
โดยลักษณะทั้งสองแบบนี้จะถูกกำหนดไว้ตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นเกี่ยวกับการที่รากหยั่งลึกลงไปในดินเพื่อสร้างระบบของรากภายในดิน และรากพืชจะช่วยเสริมเสถียรภาพในดิน เนื่องจากอิทธิพลของความสัมพันธ์ระหว่างรากพืชกับดิน มุมของราก การแพร่กระจายของรากทั้งในแนวดิ่ง แนวราบ และความหนาแน่นของรากภายในดิน โดยเฉพาะลักษณะแบบที่หนึ่ง การกระจายตัวของรากในแนวราบออกห่างลำต้นจะทำให้เกิดช่องว่างในดิน (รูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4) ในขณะที่ลักษณะแบบที่สอง รากจำนวนมากจะขยายออกจากโคนต้นอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานในช่วงการเจริญเติบโต และบนลาดดินที่มีดินร่วนซุยและตะกอนดินจะถูกกักไว้บนลาดดินเนื่องจากรากพืช และรากพืชวิสามัญนี้ (adventitious roots) จะสามารถเจริญเติบโตได้บนดินเหล่านี้ ช่วยเสริมเสถียรภาพได้ดีกว่าการที่รากเจริญเติบโตลึกลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2.3 ลักษณะการเจริญเติบโตของระบบรากในช่วงต่างๆ

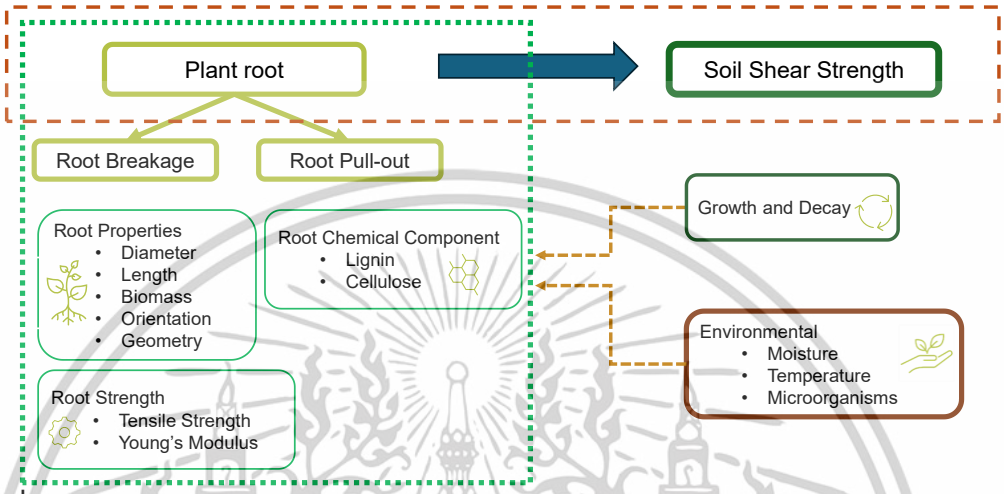


รูปที่ 2.4 ลักษณะการเจริญเติบโตและกระจายตัว ทางด้านข้างของรากพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คุณสมบัติของรากพืชต่อการเสริมเสถียรภาพและป้องกันปัญหาการพังทลาย

ลักษณะของรากพืชที่ควรพิจารณาเพื่อการนำรากไปใช้สำหรับการเสริมเสถียรภาพของดินและลดปัญหาการพังทลายของดิน โดยในการศึกษานี้จะแบ่งคุณสมบัติของรากพืช ดังรูปที่ 2.5 เพื่อการพิจารณาในการเสริมเสถียรภาพและป้องกันปัญหาการพังทลายของลาดดิน



รูปที่ 2.5 คุณสมบัติของรากพืชต่อการเสริมเสถียรภาพและป้องกันปัญหาการพังทลายของดิน

2.3.1 รูปร่างของราก Root Geometry

2.3.1.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืช Root Thickness

โดยรากที่มีความหนาหรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มาก Thick roots (>10.0 mm) จะทำหน้าที่เสมือน Soil nails บนลาดชันดิน ช่วยเสริมเสถียรภาพลาดดินด้วยหลักการที่ใกล้เคียงกันกับ Steel rods ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยตำแหน่งของราก Thick roots นี้ จะส่งผลทางอ้อมต่อคุณสมบัติการยึดเกาะของดิน และตำแหน่งของราก Thin roots และ Fine roots ก็จะขึ้นกับการเรียงตัวของราก Thick roots นี้ด้วย Thin root (2.0-10.0 mm) และ Fine roots (<2.0 mm) จะทำหน้าที่รับแรงดึงระหว่างการเกิดการพังทลายของลาดดิน เมื่อรากเหล่านั้นอยู่ในระนาบแนวเฉือนพัง ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อเสถียรภาพของลาดดิน (รูปที่ 2.1) โดยความหนาของรากพืช จะเป็นลักษณะสำคัญที่ต้องพิจารณา ซึ่งสามารถบ่งบอกอายุขัยของรากได้ (รากที่หนากว่า มักจะมีอายุที่มากกว่า) และความหนาของรากพืชนั้นยังส่งผลต่อคุณสมบัติการหยั่งลงไปดินของราก (Ability to penetrate) การต้านทานแรงดัด (Soil Bending stiffness) และการกักเก็บน้ำและส่งผ่านน้ำ (store and transport water)

2.3.1.2 ความลึกของราก Shallow/Deep rooting

Root depth ความลึกของราก ที่สามารถส่งผลต่อเสถียรภาพลาดดินตื้น ตัวรากควรที่จะมีความลึกมากกว่าแนวเฉือนพัง shear surface (รูปที่ 2.1) ซึ่งโดยปกติมักจะอยู่ที่ประมาณความลึก 2 เมตรในลาดดินทั่วไป โดยความลึกของรากนี้จะขึ้นกับชนิดพืชและ คุณสมบัติของดิน เมื่อคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของดินไม่เป็นข้อจำกัดสำหรับการเจริญเติบโต โดยทั่วไปจะพบว่าบริเวณผิวดินชั้นบนสุดช่วง 0.4 ถึง 0.5 เมตรจะพบรากมากที่สุด (>80% biomass) จำนวนของรากและการเรียงตัวของรากก็สำคัญเช่นกัน โดยจำนวนของราก และการเรียงตัวของราก มักจะแตกต่างกันเล็กน้อยแม้ว่าจะเป็นพืชชนิดเดียวกัน และเมื่อรากลึกลงไปเพียงไม่กี่เซนติเมตรก็จะมีความต่างเช่นกัน (รูปที่ 2.1b และ รูป 2.1c) รากในแนวที่ตั้งตรงกับแนวเฉือนพังจะเกิดการเคลื่อนที่ตามความยาวของรากและมีมุมกระทำกับดินที่มากขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มว่ารากจะหลุดจากดินก่อนที่จะเกิดการพังจากการขาดของราก โดยจำนวนของรากที่มาก ร่วมกับมีการแตกแขนงของรากที่มาก จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ shear zone ซึ่งช่วยรักษาเสถียรภาพลาดดินได้ และถึงแม้ว่ามุมของรากกับพื้นที่ shear zone มักจะไม่ถูกพิจารณาและถูกกำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วง 40 ถึง 70 องศา แต่ได้มีงานวิจัยระบุไว้ว่าการกำหนดค่าเช่นนี้ มักจะเป็นการประเมินค่าการต้านทานแรงเฉือนที่มากกว่าความเป็นจริง (overestimation of the shear resistance contributed by roots) และถึงแม้ว่าจะเป็นรากเดียวกันก็ตาม มุมกระทำระหว่างดินกับรากที่เติบโตก็สามารถเปลี่ยนแปลงได้หลายครั้งตลอดความยาวของรากพืช ขึ้นกับสรีรวิทยาของรากนั้นๆ ซึ่งการแตกแขนงของรากพืช สามารถแตกแขนงได้ตลอดความยาวของรากหลัก แต่อาจไม่เจริญเติบโตเต็มที่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมโดยรอบ และปริมาณสาร auxin ภายในราก เมื่อรากได้หยั่งลึกลงไปในดินเพิ่มขึ้น ก็จะสามารถกระตุ้นให้เกิดการงอกของรากทางด้านข้างเพิ่มขึ้น และหากว่ารากนั้นได้ยึดเกาะกับชั้นดินด้านล่างที่มีความแข็งแรง เช่น bedrock จะสามารถช่วยเพิ่มความสามารถการยึดเกาะได้ แต่หากว่ารากนั้นได้เจริญเติบโตลงไปในชั้นดินและ ทำให้เกิดรอยแตก (crack) หรือเติบโตลงในรอยแตกและทำให้รอยแตกนั้นขยายใหญ่ขึ้น สามารถนำไปสู่การพังทลายได้เช่นกัน

2.3.1.3 ค่ามุมราก Root angle

มุมระหว่างรากในระนาบแนวดิ่งหรือแนวราบ โดยรากที่มีการกระจายตัวในดินจะขยายพื้นที่รับแรงเฉือน shear zones และสามารถเพิ่มกำลังรับแรงในดินได้อย่างช้าๆ เนื่องจากกำลังรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้นของรากพืชและกระจายตัวของราก ถึงแม้ว่าจะมีการเคลื่อนตัวเนื่องจากแรงเฉือนขนาดใหญ่

2.3.1.4 ชีวมวลของพืช Plant Biomass

ชีวมวลคือ มวลต่อหน่วยพื้นที่ หรือหน่วยปริมาตร รวมไปถึงมวลอินทรีย์ทั้งหมด ทั้งแบคทีเรีย พืช หรือสัตว์ เมื่อต้องการควบคุมป้องกันการพังทลายของผิวดินและเสริมเสถียรภาพลาดดินตื้น (ในช่วง 1-2 m) ชีวมวลของพืชจะสามารถส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติเชิงชลศาสตร์ของดิน (รวมไปถึงผลของการคายน้ำหรือการหายใจของพืช) และเสริมกำลังเชิงกลศาสตร์ในดิน ตัวอย่างเช่น การเพิ่มขึ้นของชีวมวลพืช พื้นที่ใบมีมากขึ้นขึ้น และความสามารถในการดูดซับ CO_2 ในระหว่างช่วงการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้อัตราการคายน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำในดินลดลง ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงดึงน้ำในดิน และมีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีหลายวิธีในการพิจารณาค่าชีวมวลของพืช ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการทดลองที่ต้องการ โดยค่าชีวมวลของพืชจะแบ่งออกเป็น ชีวมวลของลำต้น (shoot biomass) และชีวมวลของราก (root biomass) โดย shoot biomass จะรวมไปถึงลำต้นและใบพืช ในขณะที่ root biomass จะหมายถึงส่วนของพืชที่อยู่ใต้ผิวดิน และโดยปกติชีวมวลของพืชจะหมายถึงหน่วยน้ำหนักแห้ง dry mass และในระหว่างการทดสอบ ส่วนของพืชที่ต้องการวัดค่าจะถูกนำไปใส่ในเครื่องอบ หรือเตาอบ ที่อุณหภูมิคงที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง โดยการวัดมวลจะเริ่มทำการวัดได้ต่อเมื่อชีวมวลของพืชจะคงที่ (Cornelissen et al., 2003)

$$Plant\ Biomass = \frac{Dry\ Biomass}{Area}\ or\ \frac{Dry\ Biomass}{Volume} \quad (2.1)$$

2.3.1.5 ดัชนีพื้นที่ราก Root Area Index (RAI)

รากพืชเป็นอวัยวะสำคัญในการดูดซึมน้ำและสารอาหารจากดิน การจายตัวของรากมีผลต่อการกระจายตัวของแรงดึงน้ำในดินอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าดัชนีพื้นที่ราก Root Area Index (RAI) เป็นอัตราส่วนพื้นที่ผิวรากทั้งหมดสำหรับความลึกที่กำหนด หารด้วยพื้นที่หน้าตัดดินรูปวงกลมในแนวราบ (รูปที่ 2.6 อ้างอิงจาก Francour and Semroud (1992)) โดยพื้นที่หน้าตัดดินรูปวงกลม มีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับขนาดการแพร่กระจายทางด้านข้างสูงสุดของระบบรากในความลึกที่กำหนด และพื้นที่ผิวรากทั้งหมด (ผิวภายนอก) หมายถึง พื้นที่ผิวของรากทั้งหมดภายในปริมาตรดินที่กำหนด กำหนดด้วยพื้นที่หน้าตัดและช่วงความลึก โดยค่า RAI เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ (ไม่มีหน่วย) ใช้อธิบายถึงความสามารถการดูดซึมน้ำของรากภายในพื้นที่โซนราก (Ng et al., 2016) และพิจารณาเฉพาะรากที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2 mm เนื่องจากเป็นส่วนสำคัญของการดูดซึมน้ำ (Jackson et al., 1997) (หากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากเกิน 2 mm มีโอกาสที่จะเกิดโพรงอากาศ (cavitate) เนื่องจากแรงดันน้ำติดลบมีค่ามากภายในท่อน้ำ xylem ส่งผลให้มีช่องทางการลำเลียงน้ำน้อยลง (การซึมผ่านได้ของน้ำมีค่าต่ำ)) และด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากที่มีขนาดเล็กกว่า 2 mm พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวรากกับอนุภาคของดินจะมีพื้นที่มาก ทำให้การส่งผ่านน้ำในท่อ xylem หรือการดูดซึมน้ำมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น (Segal et al., 2008)

ก่อนจะทำการวัดค่า RAI จะต้องนำรากต้นไม้ออกจากตัวอย่างดินทดสอบอย่างระมัดระวัง ดินที่อยู่ติดกับรากจะถูกล้างออกด้วยความระมัดระวังอย่างยิ่ง ตามขั้นตอนมาตรฐานการล้างรากพืช โดย Smucker et al. (1982) ใช้หลักการชะล้างด้วยน้ำแบบ hydropneumatic รากจะถูกแยกออกจากดินโดยพยายามไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อรากทางด้านข้างขนาดเล็กและโครงสร้างรากที่เปราะบาง ในระหว่างการขุดรากออกมา ความลึกของรากจะถูกกำหนดจากความลึกของดินที่ขุดลงไปแล้วไม่พบราก หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยโปรแกรม ImageJ เพื่อพิจารณาค่า RAI ตามขั้นตอนที่แนะนำโดย (Garg et al., 2015) และนำภาพถ่ายความละเอียดสูงที่ถ่ายรอบรากพืช 360 องศาทั้งหมดนำมารวมกันเพื่อสร้างภาพสามมิติ (3D) โดยแต่ละช่องกริด (Grids) จะมีขนาด pixels

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากัน (เช่น 12 pixels ในรูปภาพจะมีความยาวเท่ากับ 1 mm) และนับจำนวนกริดทั้งหมดที่มีรากพืชตามช่วงความลึกที่กำหนด แปลงเป็นพื้นที่ผิวทั้งหมดของรากพืชในหน่วย mm^2แล้วจึงจะสามารถหาค่า RAI ที่ความลึกที่กำหนดภายในพื้นที่โซนรากได้ จากการแบ่งพื้นที่ผิวรากภายนอกทั้งหมดตามระยะความลึกที่กำหนดและหารด้วยพื้นที่หน้าตัดดินรูปวงกลมตามสมการคำนวณนี้

$$RAI = \frac{\sum_{i=1}^{n} \pi d_i \Delta h}{\frac{\pi {D_r}^2}{4}} \qquad (2.2)$$

โดยที่ Δh คือช่วงความลึกแต่ละระดับ (เช่น 10 มม.)

D_r คือความยาวการแพร่กระจายสูงสุดของรากในแนวนอน

d_i คือเส้นผ่านศูนย์กลางของรากเส้นที่ i

n คือจำนวนรากทั้งหมด

ระหว่างการวิเคราะห์ภาพถ่าย อาจมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นประมาณ 5-10 % โดยข้อผิดพลาดนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการสันนิษฐานพื้นที่โซนราก เป็นแบบรูปวงกลมในหน้าตัดระนาบ

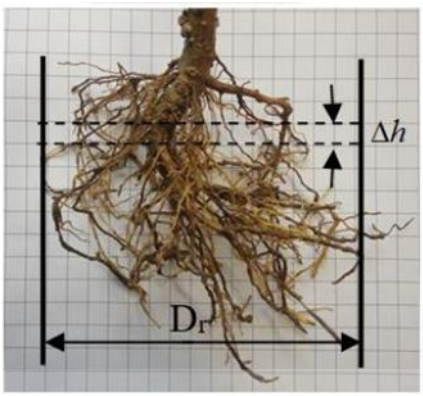
2.3.1.6 อัตราส่วนปริมาตรราก Root Volume Ratio

อัตราส่วนปริมาตรรากเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ (ไม่มีหน่วย) เป็นปริมาตรรากทั้งหมดในปริมาตรดินหนึ่งหน่วย มีวิธีการคำนวณดังสมการ

$$R_v = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\pi {d_i}^2}{4} \Delta h}{\frac{\pi {D_r}^2}{4} \Delta h} \qquad (2.3)$$

การหาค่าอัตราส่วนปริมาณราก โดยทั่วไปจะมี 2 วิธีคือ 1.วิธีการจมน้ำ (water sink method) โดยการจุ่มรากพืชลงในภาชนะที่มีน้ำเต็ม น้ำที่ไหลออกจากภาชนะคือปริมาตรของรากพืช โดยสันนิษฐานว่าน้ำที่รากพืชดูดซับระหว่างช่วงการแช่น้ำจะมีเพียงเล็กน้อย และวิธีการต่อมาคือ 2. วิธีการวิเคราะห์ภาพ image analysis โดยการวัดความยาวรากและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก และคำนวณหาปริมาตรรากซึ่งเป็นวิธีการทางอ้อม แล้วจึงจะสามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วนปริมาตรราก โดยการหารปริมาตรรากด้วยปริมาตรดิน ซึ่งค่าอัตราส่วนนี้สามารถใช้พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนช่องว่างในดินที่เกิดจากรากพืช และความเกี่ยวข้องกับอัตลักษณ์ของน้ำในดิน (soil water retention ability) (Ng et al., 2016).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 รูปตัวอย่างการพิจารณารากพืชเพื่อหาอัตราส่วนปริมาตรรากและดัชนีพื้นที่ราก

2.3.1.7 ระนาบพื้นที่ของรากพืชต่อพื้นที่ของชั้นดิน Root area ratio

ระนาบพื้นที่ของรากพืชต่อพื้นที่ของชั้นดิน เป็นการพิจารณาอัตราส่วนของรากต่อพื้นที่หน้าตัดของดิน หากค่าระนาบพื้นที่ของรากพืชต่อพื้นที่ของชั้นดินมีค่ามากขึ้น จะมีความแปรผันตรงกับการกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของลาดดิน และถึงแม้ว่าค่าระนาบพื้นที่ของรากพืชต่อพื้นที่ของชั้นดิน อาจจะมีค่าเท่ากัน แต่ค่าที่ได้จากรากขนาดเล็กแต่มีจำนวนมาก จะส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนมากกว่าค่าจากรากขนาดใหญ่แต่มีจำนวนน้อยกว่าเนื่องจากรากขนาดเล็กนั้นมีพื้นที่ผิวสัมผัสและความสามารถการรับแรงดึงที่สูงกว่า โดยสามารถคำนวณค่าระนาบพื้นที่ของรากพืชต่อพื้นที่ของชั้นดิน ได้จากสมการ

$$RAR = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\pi {d_i}^2}{4}}{A_s} \qquad (2.4)$$

2.3.1.8 ค่าความยาวของรากพืชต่อหน่วยปริมาตรดิน

ค่าความยาวของรากพืชต่อหน่วยปริมาตรดิน Root length density คืออัตราส่วนระหว่างความยาวของรากทั้งหมด ต่อปริมาตรของดินในตัวอย่าง โดยการเพิ่มขึ้นของความยาวรากพืช จะช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการดึง (pull-out) ของรากพืชจนกระทั่งความยาวมีค่าถึงความยาววิกฤต (critical length) หรือก็คือค่าสูงสุดของความยาวพืชที่ได้ก่อนที่จะเกิดการขาดจากแรงดึง (tension) แทนที่การลื่นไถลของรากออกจากดิน (slipping) และอัตราการดูดน้ำจากดินในแนวราบจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความยาว RLD ที่เพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับอัตราการระเหยหรือคายน้ำในดิน และเสถียรภาพลาดดินจะได้รับผลจากปริมาณน้ำในดินโดยเฉพาะในพื้นที่เขตร้อน ดังนั้นจึงควรจะมีค่า RLD สูงมากขึ้นในดินระดับที่อยู่ลึกลงไป

$$RLD = \frac{\sum_{i=1}^{n} L_i}{V_s} \qquad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\sum_{i=1}^{n} L_i$ คือช่วงความความยาวของรากพืชทั้งหมดในตัวอย่าง

V_s คือปริมาตรดินในตัวอย่าง

2.3.1.9 ค่าความยาวจำเพาะของราก Specific root length (SRL)

ค่าความยาวจำเพาะของราก คือขนาดความยาวของรากพืชต่อหนึ่งหน่วยของชีวมวลรากแห้ง หากมีค่า 8 ค่าความยาวจำเพาะของรากมากหมายถึง มีรากจำนวนมากแต่มีความหนาของรากน้อย หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากต่ำ และหากมีค่าความยาวจำเพาะของรากน้อย หมายถึงการที่มีรากจำนวนที่น้อยกว่าแต่มีความหนาที่มากกว่าหรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า โดยค่าที่สำหรับพืชไม้ล้มลุกหรือสมุนไพร herbs และพืชไม้ยืนต้น perennials มักจะมีค่าความยาวจำเพาะของรากสูง

$$SRL = \frac{\sum_{i=1}^{n} L_i}{M_r} \tag{2.6}$$

โดยที่ $\sum_{i=1}^{n} L_i$ คือช่วงความความยาวของรากพืชทั้งหมดในตัวอย่าง

M_r คือชีวมวลของรากแห้งในตัวอย่าง

2.3.2 กลศาสตร์ของราก Root Mechanics

2.3.2.1 กำลังต้านทานแรงดึงของรากพืช Root Tensile strength

ค่าความสามารถต้านทานแรงดึงของรากที่มากขึ้น จะช่วยให้รากสามารถแสดงความสามารถในการเสริมเสถียรภาพลาดดินได้มากยิ่งขึ้น ขณะกำลังเกิดแรงถอนราก รากอาจเกิดการขาดหรือลื่นหลุดออกจากดินได้ โดยรากแบบ Thin root มักจะมีความสามารถในการต้านทานแรงดึงได้ดี (Tension) โดยความหนาของรากนั้นจะเป็นตัวบ่งชี้อายุของราก (รากทีมีความหนามากกว่า จะมีอายุที่มากกว่า) และเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถต้านทานการดัด (Bending stiffness) และความสามารถในการหยั่งลึกลงไปในดินของราก (Penetrate soil) ซึ่งการตรวจวัดค่ากำลังต้านทานแรงดึงของรากพืช จะสามารถทำได้โดยการนำรากพืชมาดึงเพื่อหากำลังรับแรงดึงของราก (Nilaweera and Nutalaya, 1999; Operstein and Frydman, 2000) และพิจารณาร่วมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืช โดยรากพืชแบบ Fine roots (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2 mm) มักจะมีกำลังรับแรงดึงสูงถึง 100 MPa เนื่องจากการมีอยู่ของปริมาณเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของ Xylem fiber ส่วนรากพืชแบบ Coarse roots (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 2 mm) จะมีปริมาณ Cellulose ที่น้อยกว่า (Genet et al., 2005) และมีกำลังรับแรงดึงในช่วง 10 – 40 MPa แต่การเสริมกำลังรับแรงในดินอันเนื่องมาจากรากพืช ส่วนมากจะได้รับอิทธิพลจากราก Coarse roots เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่เยอะกว่า และกำลังรับแรงดึงในรากพืชนั้นมีแนวโน้มว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในระหว่างชนิดพืช (De Baets et al., 2008) และอายุ (Operstein and Frydman,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2000) และในการศึกษาของ Sonnenberg et al. (2010) พบว่ากำลังรับแรงดึงของรากพืชที่มีอายุมากกว่าจะมีค่ามากกว่า ในขณะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน และรากพืชนั้นอาจมีอายุไม่เท่ากันทั้งหมดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของรากพืชในช่วงต่างๆ

$$Root\ Tensile\ Strength = \frac{F_{max}}{A_r} = \frac{F_{max}}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (2.7)$$

โดยที่ F_{max} คือแรงดึงสูงสุดที่รากพืชสามารถต้านทานได้ของรากพืช

A_r คือพื้นที่หน้าตัดของรากพืช

2.3.2.2 กำลังต้านทานแรงถอนของพืช Pullout Strength

ค่ากำลังต้านทานแรงถอนของรากพืช Pullout Strength คือค่ากำลังที่ใช้สำหรับการดึงรากพืชออกจากดินหรือวัสดุที่ยึดอยู่ ซึ่งแสดงถึงความสามารถของรากพืชในการยึดเกาะกับดิน ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากการดึงพืชขึ้นจากดินและทำการตรวจวัดค่ากำลังที่ใช้ในดึงพืชเพื่อถอนรากออก (Leung et al., 2018) ซึ่งการทดสอบกำลังต้านทานแรงถอนของรากพืชไม่สามารถทดสอบรากที่ละเส้นได้ แต่มักทดสอบด้วยการดึงพืชทั้งต้นขึ้น ซึ่งค่ากำลังต้านทานแรงถอนของรากพืชจะขึ้นกับหลากหลายปัจจัย อาทิเช่น ลักษณะรูปร่างของรากพืช ชนิดดิน ความหนาแน่นของดิน และปริมาณความชื้นในดิน

$$Pullout\ Strength = F_{max} \quad (2.8)$$

โดยที่ F_{max} คือแรงดึงสูงสุดที่พืชสามารถต้านทานได้ก่อนจะเกิดการถอนรากขึ้นมา

2.3.2.3 ความแข็งแกร่งของรากพืช Root stiffness

ค่าความแข็งแรงของรากพืช คือ ความต้านทานของรากพืชต่อการยืดหรือการโก่งตัว เมื่อรากได้รับแรงกระทำ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากการทดสอบที่กล่าวไปแล้วในข้างต้น และสามารถพิจารณาได้จากค่าความแข็งแกร่งของรากในทิศทางแกนของวัสดุ Axial Stiffness (EA) และ ค่าความแข็งแกร่งของรากต่อการต้านทานการโก่งงอ Flexural Stiffness (EI). และในการพิจารณารากพืชเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการเสริมเสถียรภาพลาดดิน จะพิจารณาจาก Axial Stiffness (EA) เป็นหลัก เนื่องจากการเสียเสถียรภาพของลาดดินสามารถป้องกันได้ด้วยการเสริมความแข็งแรงตามแนวแกนของวัสดุ

ความแข็งแกร่งของรากพืชจะพิจารณาจากค่า โมดูลัส Elastic Modulus ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงของรากพืช และการตรวจวัดขนาดพื้นที่หน้าตัดของราก โดยการศึกษาของ Hamza et al. (2006) พบว่ารากพืชหลังจากการทดสอบจะมีค่าความยืดของรากพืชและสามารถยืดได้ตั้งแต่ค่าความเครียดที่ 10% จนกระทั่งรากพืชเกิดการขาด และค่าโมดูลัสของราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พืชจะไม่ขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืช แต่จะขึ้นกับชนิดของพืช และมีค่าอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 100 - 600 MPa

$$Young's\ Modulus\ (E) = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \quad (2.9)$$

$$Axial\ Stiffness\ (EA) = E \times A$$

$$Flexural\ Stiffness\ (EI) = E \times I$$

โดยที่ σ คือความเค้นของราก เมื่อได้รับแรงกระทำ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ Root Tensile strength

ε คือความเครียดของรากหรือสัดส่วนขนาดความยาวของรากพืชที่เปลี่ยนไปขณะได้รับแรงดึง

E คือค่ายังโมดูลัส ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแกร่งของรากพืช

A คือขนาดพื้นที่หน้าตัด

I คือค่า Moment of inertia

โดยค่าสำหรับรากพืชซึ่งมีรูปร่างหน้าตัดเป็นวงกลมจะเท่ากับ $\frac{\pi d^4}{64}$

2.3.2.4 มุมเสียดทานของดินและรากพืช

ค่ามุมเสียดทานของดินที่มีรากพืช Soil-root interface friction จะสามารถตรวจวัดได้โดยการทำการศึกษากำลังรับแรงเฉือนตรง อาทิเช่น ในการศึกษาของ Wang et al. (2010) แสดงค่ามุมเสียดทานของดิน silty sand และรากพืช จะมีค่าอยู่ในช่วง 36 – 38 องศา และพบความแตกต่างเพียงเล็กน้อยระหว่างชนิดพืชที่แตกต่างกัน

2.3.3 อุทกพลศาสตร์ของราก Root Hydrology

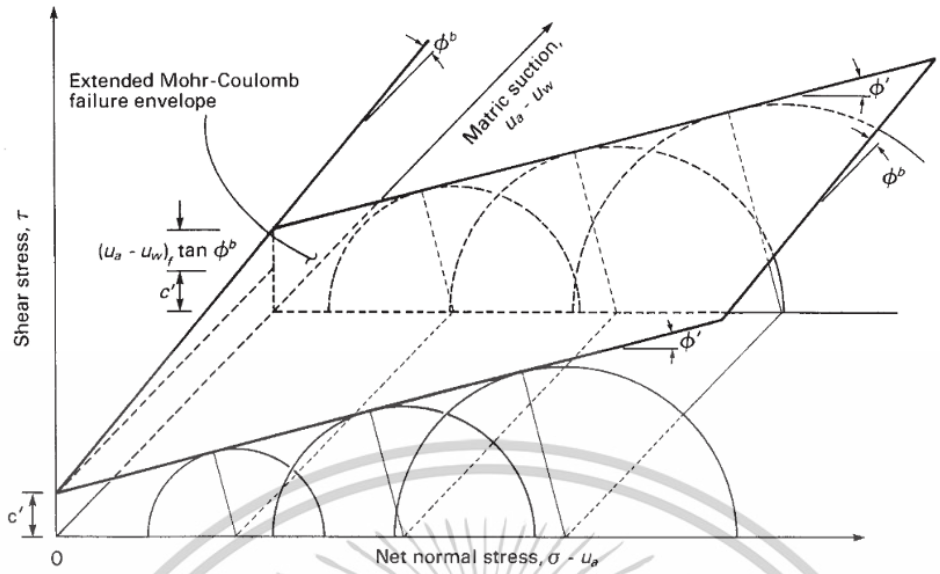
2.3.3.1 การคายน้ำของพืช

การคายน้ำของพืช Plant Transpiration จะส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนในดิน เนื่องจากการคายน้ำของพืชจะส่งผลต่อปริมาณความชื้นในดิน และการมีอยู่ของรากพืช โดยการคายน้ำจะลดปริมาณความชื้นในดิน เพิ่มแรงดึงน้ำในดิน Matric suction และส่งผลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน โดยสามารถพิจารณากำลังรับแรงเฉือนได้จากสมการ extended Mohr–Coulomb ดังนี้

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\varphi' + (u_a - u_w)\tan\varphi^b \quad (2.10)$$

โดยในเทอมของ $(u_a - u_w)$ เป็นค่าในส่วนของ แรงดึงน้ำในดิน Matric suction และ φ^b เป็นค่ามุมซึ่งแสดงถึงค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นขณะที่ Matric suction เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 กราฟแสดง Extended Mohr-Coulomb failure envelope

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติรากพืชที่สำคัญ ต่อการพิจารณานำพืชไปใช้งานด้านวิศวกรรม

Root geometry	
Root thickness	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืช
Shallow/deep rooting	ความลึกของรากพืชที่หยั่งลงในชั้นดิน
Root angle	ค่ามุมของรากที่กระทำต่อระนาบการพัง
Plant Biomass	ชีวมวลของพืช
Root Area Index	ดัชนีพื้นที่ราก
Root Volume Ratio	อัตราส่วนปริมาตรราก
Root area ratio	ระนาบพื้นที่ของรากพืชต่อพื้นที่ของชั้นดิน
Root length density	ค่าความยาวของรากพืชต่อหน่วยปริมาตรดิน
Specific root length	ความยาวจำเพาะของราก
Root Mechanics	
Tensile strength	กำลังต้านทานการขาดจากแรงดึง
Pullout Strength	กำลังต้านทานแรงถอนของพืช
Root stiffness	ความแข็งแกร่งของรากพืช
Root Hydrology	
Plant Transpiration	การคายน้ำของพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กำลังรับแรงเฉือนของดิน

การพิจารณาการพังทลายของลาดดินที่มีรากพืชนั้น สิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาคือ ความหนาของรากพืช (Root thickness) ค่ากำลังรับแรงดึงของราก (Tensile strength) ที่จะเปลี่ยนแปลงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืช แม้ว่ารากที่มีความหนามากกว่านั้นจะต้องใช้แรงดึงที่มากกว่า แต่เมื่อคำนวณความแข็งแรงของราก (แรงหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของราก) จะพบว่ารากที่มีความบางกว่าจะมีความแข็งแรงมากกว่ารากที่หนากว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเซลลูโลส (เซลลูโลสจะมีผลต่อความต้านทานแรงดึงมาก) (Genet et al., 2005) และค่า Tensile strength จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตั้งแต่ 20 ถึง 730 MPa สำหรับรากพืชที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.15 ถึง 4.5 mm (Bischetti et al., 2005) ของพืช Fagus sylvatica L. ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก สูงกว่าค่า Tensile strength ของเหล็ก (เหล็กจะมีค่าอยู่ในช่วง 400 – 700 MPa) และค่า Tensile strength ของรากพืชอื่นๆอีก 67 ชนิดจะมีแสดงอยู่ในงานวิจัยของ Stokes et al. (2009) แต่ในแบบจำลองเสถียรภาพลาดชันของ Danjon et al. (2008) ได้เลือกใช้สมการยกกำลังเพื่อหาค่า Tensile strength ของรากโดยเทียบจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากและค่าเฉพาะของพืชแต่ละชนิดจากสมการของ Genet et al. (2005) ดังนี้

$$Tensile\ strength = 28.97x^{-0.52} \tag{2.11}$$

โดย (Genet et al., 2008) ได้เสนอว่าความแตกต่างของค่า Tensile strength ในพืชแต่ละชนิดจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าความปลอดภัย FOS ของลาดชันที่มีรากพืชเกี่ยวข้อง โดยการกระจายตัวของรากในดินจะส่งผลต่อเสถียรภาพลาดชันมากกว่า

ความยาวรากเป็นคุณสมบัติที่ได้มีการศึกษาเป็นจำนวนมากในเรื่องระบบของราก และในพืชล้มลุก (herbaceous species) มักจะมีการศึกษาร่วมกับชีวมวลของราก (Root biomass) และมีพารามิเตอร์ที่เรียกว่า Specific Root Length (SRL) หรือความยาวจำเพาะของราก เป็นการคำนวณความยาวของรากต่อหน่วยชีวมวลแห้งของรากพืช ซึ่งอัตราส่วนนี้สามารถอธิบายถึงสัดส่วนของความบางหรือความหนาในระบบของรากได้ (ค่า SRL มากหมายถึงรากบางแต่มีจำนวนมาก และค่า SRL น้อยหมายถึงรากจำนวนน้อยแต่มีความหนามากกว่า) และควรพิจารณาค่า SRL ที่สูง สำหรับดินที่มีความลึกมาก โดยพืชฤดูเดียว (Annual) หรือพืชล้มลุก (herbaceous) มักจะมีค่า SRL มากกว่าพืชยืนต้น (Perennials) ซึ่งอาจมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการเจริญเติบโตที่เร็วกว่า (Relative Growth Rate (RGR)) และมีการเผาผลาญพลังงานที่มากกว่า (metabolic activity) โดย RGR ของส่วนประกอบในพืชจะคำนวณจากอัตราการเพิ่มขึ้นของชีวมวลแห้งต่อหน่วยน้ำหนักมวลแห้งเดิม และสำหรับวิศวกร การเลือกใช้พืชที่สามารถเจริญเติบโตได้รวดเร็ว จะมีความสำคัญมากเนื่องจากสามารถเสริมเสถียรภาพลาดชันได้เร็วหลังจากการเกิดเหตุการณ์เช่น ต้นไม้ล้ม ต้นพืชเหลือน้อย หรือถูกทำลาย กำจัดออก (Sidle 1992) โดยรากของพืชเดิมที่อยู่ใกล้กับช่องว่างที่เกิดขึ้นใหม่ หรือรากของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พืชต้นใหม่ที่เจริญเติบโตตามธรรมชาติ หรือพืชที่กำลังเจริญเติบโตตั้งแต่ปลูกจากเมล็ด จำเป็นจะต้องมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็วเพื่อสามารถยึดเกาะกับดิน และป้องกันการลื่นไถล (soil slippage) และป้องกันการพังทลายของลาดดินที่มีความเสี่ยงในการพังทลาย โดยค่า RGR จะขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดพืช สภาพแวดล้อม โดยในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช ดินมีสารอาหารอุดมสมบูรณ์ พืชจะเจริญเติบโตได้เร็วกว่า พืชที่ดินไม่มีสารอาหารหรือมีน้อยกว่า และชนิดของพืชที่เป็นพืชล้มลุก (annuals) มักจะเจริญเติบโตได้รวดเร็วกว่าพืชไม้ยืนต้น (perennials) และถึงแม้ว่าค่า RGR จะไม่สามารถแสดงถึงลักษณะเฉพาะของพืชแต่ละชนิดได้โดยตรง แต่ค่านี้ก็มีความสัมพันธ์กับค่าต่างๆ เช่น SRL โดยการศึกษาของ Wright and Westoby (1999) พบว่าต้นกล้าที่ปลูกจากเมล็ดจำนวน 33 สายพันธุ์ที่เติบโตในช่วงระดับปริมาณน้ำฝนต่างๆที่ออสเตรเลีย ค่า SRL จะลดลงในขณะที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรากส่วนใหญ่เพิ่มขึ้น (เป็นสัดส่วนของรากที่มีความหนามากกว่า เมื่อเทียบกับบริเวณที่มีน้ำฝนน้อยกว่า) และมีความสัมพันธ์กับค่า RGR อย่างมาก สามารถพิจารณาความเหมาะสมสำหรับความสามารถการดูดซึมน้ำระหว่างช่วงการเจริญเติบโตของต้นกล้าจากเมล็ดพืช ในพื้นที่ปริมาณน้ำฝนน้อยหรือรากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ ซึ่งอาจช่วยเพิ่มความสามารถในการหยั่งรากลึกลงไปในดินแห้ง (Wright and Westoby, 1999) แต่ในการศึกษาของ Poorter and Remkes (1990) กลับไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างค่า SRL กับ RGR ในพืชจำนวน 24 สายพันธุ์ โดยหากว่าปริมาณสารอาหารในดินส่งผลต่อการเจริญโตของรากที่เร็วขึ้นหรือช้าลงจะขึ้นกับค่า RGR และสามารถสรุปได้ว่าความแตกต่างเหล่านี้อาจจะสะท้อนถึงความสามารถการต้านทานแรงดึงของรากพืช

แม้ว่าลักษณะของราก เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากพืช และค่า SRL จะสามารถอธิบายถึงโครงสร้างของพืชได้ แต่ก็เป็นเพียงการอธิบายอย่างคร่าวๆว่า ระบบรากเป็นอย่างไร โดยลักษณะเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามลำดับการเจริญเติบโตของรากพืช (root order) (ในรูปที่ 2.3) ขั้นตอนการพัฒนาเจริญเติบโตของราก (development stage) และตำแหน่งของรากในกิ่งราก (branched hierarchy) ของระบบราก (root system) (Eissenstat et al., 2000) เพื่อความเข้าใจมากขึ้นเกี่ยวกับระบบรากพืช รากพืชในช่วงระยะเวลาต่างๆ และในพื้นที่ต่างๆ วิศวกรจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงรูปร่างลักษณะ โครงสร้างของรากพืชในแบบ 3 มิติ ของรากพืชสายพันธุ์ต่างๆ ซึ่งการศึกษาลักษณะนี้ทำได้ยาก แต่สามารถพิจารณาให้สะดวกขึ้นโดยอาศัยการสังเกต และการพัฒนาความรู้ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ ลักษณะพันธุ์กรรมของพืช รวมไปถึงลักษณะและประวัติของพืช (ตั้งแต่พืชแรกเกิดจนถึงช่วงย่อยสลายหรือตายลง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เสถียรภาพลาดดิน

พืชถูกนำมาใช้งานด้านชีววิศวกรรมเพื่อป้องกันลาดดินถล่มและการถูกกัดเซาะ (Stokes et al. 2014; Eab et al. 2015; Leung et al. 2017; Kamchoom and Leung 2018a; Nguyen et al. 2019, 2020) โดยรากของพืชขณะเจริญเติบโตจะทำให้รากและดินยึดเกาะกันมีลักษณะเป็นวัสดุคอมโพสิต ทำให้กำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินเปล่าเนื่องจากมีความเสียดทานระหว่างรากพืชกับดิน คุณสมบัติการรับแรงดึงของรากพืช พฤติกรรมกำลังรับแรงดึงของรากพืช ปริมาณชีวมวลของราก (root biomass) ในพื้นที่หน้าตัดรับแรงเฉือนของดิน (shear plan) (เช่น การหาอัตราส่วนพื้นที่ระหว่างรากกับดิน root area ratio (RAR)) คุณสมบัติการรับแรงเฉือนของรากพืชกับดิน และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของราก (สัณฐานวิทยา) ซึ่งมีผลต่อปริมาณกำลังรับแรงดึงของรากและแรงเฉือนในดิน โดยในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาคุณสมบัติการเสริมกำลังจากรากพืชอย่างกว้างขวางผ่านวิธีการทดสอบที่หลากหลาย เช่น การทดสอบแรงดึงทิศทางเดียว (Uniaxial tensile test) เช่นการศึกษาของ Genet et al. 2005; Boldrin et al. 2017; Wu et al. 2021, การทดสอบแรงถอนราก (Pull-out tests) เช่นการศึกษาของ Schwarz et al. 2011; Kamchoom et al., 2014, การทดสอบหาค่าแรงเฉือนโดยวิธีตรง (Direct shear tests) เช่นการศึกษาของ Waldron, 1977; Eab et al. 2015; Mahannopkul and Jotisankasa, 2019; Liang et al. 2019; Phan et al. 2021, การทดสอบหาค่ากำลังดินในแบบสามแกน (Triaxial tests) เช่นการศึกษาของ Graf et al., 2009; Karimzadeh et al. 2021, 2022, และการทดสอบด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงทางวิศวกรรมปฐพี (Centrifuge modelling) เช่นการศึกษาของ Sonnenberg et al., 2012; Eab et al., 2014; Ng et al., 2016, 2017; Leung et al. 2017; Kamchoom and Leung 2018a

แต่การศึกษาเหล่านี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงคุณสมบัติที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงการเจริญเติบโต การมีอายุมากขึ้น รวมไปถึงการย่อยสลายของพืช เนื่องจากพืชเป็นสิ่งมีชีวิต รากพืชจะเจริญเติบโตและตายไปตามกาลเวลา (เช่น การเปลี่ยนแปลงหมุนเวียนของรากพืชที่จะตายและเติบโตขึ้นมาใหม่) ขึ้นอยู่กับอายุของพืช สภาพแวดล้อม (เช่นลมพายุ หรือโรคพืช) และการรบกวนจากมนุษย์ (เช่นการเก็บเกี่ยวพืชผล การตัดไม้ หรือการเปลี่ยนแปลงสภาพที่ดิน) จึงทำให้รากที่อยู่ในดินมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างดินกับรากพืช หรือในเชิงเกษตรกรรม ก็เกี่ยวเนื่องกับการเพิ่มขึ้นของความต้องการอาหาร ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงที่ดินเดิมที่ถูกทิ้งรกร้าง ไปสู่ทำการเกษตรกรรมบนพื้นที่ต่างๆในแต่ละท้องถิ่น และที่ดินเหล่านี้ส่วนมากมักจะมีลักษณะของดินที่มีความอุดมสมบูรณ์น้อย มีวัชพืชรุกรานในพื้นที่ รวมไปถึงเป็นพื้นที่ลาดชันที่มีความไวต่อการกัดเซาะและมีเสถียรภาพต่ำ (Alexandratos and Bruinsma 2012; Fargione et al. 2008) และการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงพื้นที่เพื่อทำการเกษตรกรรมนั้น มักจะทำการกำจัดพืช และวัชพืชที่อยู่ในพื้นที่เดิมก่อนจะทำการปลูกพืชที่ต้องการ ซึ่งการกำจัดพืชเดิมนั้น อาจส่งผลต่อความปลอดภัยของเสถียรภาพลาดดิน (Pisano et al. 2017; Kamchoom and Leung 2018b; Kamchoom and Jotisankasa 2019;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Leknoi and Likitlersuang 2020) และยิ่งไปกว่านั้น ไฟป่าที่กำลังเกิดขึ้นบ่อยและรุนแรงขึ้นในหลายส่วนของโลกจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ ส่งผลให้เกิดการทำลายของพืชพรรณตามธรรมชาติอย่างรุนแรง (Turco et al. 2018) เทคนิคการกำจัดวัชพืชแบบต่างๆ เช่นการไถพรวน การเผาไหม้ (การเผาไหม้ชีวมวลเหนือพื้นดิน) และการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการทำการเกษตรกรรม (Ludwig 1986; Parish 1990; Clements et al. 2017) การเปลี่ยนแปลงที่ดินเพื่อเตรียมพื้นที่สำหรับการเพาะปลูกนั้น ส่งผลเช่นเดียวกับการเกิดไฟไหม้ป่า ทำให้รากพืชตายและเน่าเปื่อยในพื้นที่ขนาดใหญ่ ซึ่งมีผลกระทบต่อการเสริมกำลังรับแรงดึงของรากในดิน ทั้งด้านเสถียรภาพและการถูกกัดเซาะ (Giadrossich et al., 2017; Watson et al., 1999)

2.6 การเสื่อมสภาพของรากพืช

2.6.1 อัตราการสลายตัวของราก

อัตราการสลายตัวของราก Root decay rate คืออัตราการสูญเสียมวลแห้ง ต่อหนึ่งหน่วยมวลแห้งในปัจจุบัน (Rate of dry mass loss per unit dry mass initially present) โดยรากที่เกิดการเน่าเปื่อยจะปรับเปลี่ยนสภาพดินอย่างช้าๆ เป็นระยะเวลายาวนาน และอาจก่อให้เกิดช่องทางการไหลผ่านของน้ำในดิน (preferential flow pathways) โดยค่าอัตราการสลายตัวของรากนี้จะแตกต่างกันไปตาม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืช องค์ประกอบทางเคมี และชนิดของพืช และสามารถทำการตรวจวัดได้โดยการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของรากพืชในช่วงอายุต่างๆ และนำมาเปรียบเทียบ ซึ่งสาเหตุในการเสื่อมสภาพ โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่ได้รับผลกระทบจากกิจกรรมมนุษย์ เช่น การใช้สารเคมีทางการเกษตรหรือการเผาเพื่อจัดการพื้นที่การเกษตร การได้รับสารเคมีจากการใช้ยาฆ่าวัชพืชหรือสารกำจัดศัตรูพืชสามารถทำให้ระบบรากของพืชเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว โดยส่งผลกระทบต่อคุณภาพของดินและการพัฒนาโครงสร้างของราก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการดูดซึมธาตุอาหารและน้ำจากดิน นอกจากนี้ การเผาไหม้ที่ใช้ในการจัดการพื้นที่หรือทำลายวัชพืชอาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของราก เนื่องจากความร้อนสูงที่เกิดขึ้นจากการเผาสามารถทำลายผิวรากและโครงสร้างเซลล์ ทำให้รากไม่สามารถทำหน้าที่ได้เต็มที่ การเสื่อมสภาพของรากที่เกิดจากการเผาไหม้และสารเคมีนี้มีผลต่อการลดประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตของพืช และอาจส่งผลกระทบต่อความยั่งยืนในในระยะยาวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 การเสื่อมสภาพของรากพืชต่อคุณสมบัติการต้านทางแรงดึง

งานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาคุณสมบัติของกำลังรับแรงดึงรากพืชภายใต้สภาวะการทดสอบที่แตกต่างกัน (เช่น Mao et al. 2012; Wu et al. 2021) พบว่าเซลลูโลสและลิกนิน เป็นส่วนประกอบหลักสำคัญที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงดึงของรากพืช (เช่นการศึกษาต้นสน Pinus tabulaeformis โดย Zhang et al. (2014), การศึกษาต้นสน Pinus pinaster และต้นเกาลัด Castanea sativa โดย Genet et al. (2005) และการศึกษาต้น Symplocos setchuensis โดย Zhu et al. (2020) เมื่อรากพืชมีอายุมากขึ้น จะพบสารประกอบเหล่านี้จะถูกสะสมไว้ภายในผนังเซลล์ระหว่างการพัฒนาเนื้อเยื้อ (Campbell and Sederoff 1996) ซึ่งหมายถึงกำลังรับแรงดึงของรากพืชที่เพิ่มสูงมากขึ้น (เช่น การสังเกตพืชข้าวบาร์เลย์ Hordeum vulgare โดย Loades et al. 2015) และถึงแม้ว่าคุณสมบัติการต้านทานแรงดึงของรากพืชจะสามารถอธิบายได้จากอายุของราก แต่การศึกษาผลกระทบของอายุพืชต่อรากทั้งหมด (และชนิดของราก) ยังมีการศึกษาที่ไม่มากนัก โดยเฉพาะการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ ระหว่างช่วงการเจริญเติบโตอาจมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการพังทลายและการรักษาเสถียรภาพลาดดินในช่วงต้นที่พืชปกคลุมผิวดิน เมื่อปลูกพืชใหม่แทนที่ มีแนวโน้มจะทำให้ดินถูกกัดเซาะและเกิดการพังทลายได้ แม้ว่าผลจากคุณสมบัติเชิงกลของเซลลูโลสและลิกนินในพืชไม้ยืนต้นชนิดต่างๆได้ถูกทดสอบแล้ว แต่ยังคงไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับพืชพันธ์หญ้า โดยเฉพาะวัชพืชที่เติบโตเร็วซึ่งแพร่หลายในสถานที่ต่างๆและพื้นที่รกร้าง

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติความสามารถการต้านทานแรงดึงของราก และการเสริมกำลังของรากในด้านเสถียรภาพลาดดิน ต่อการตายและย่อยสลายจากการรบกวนทางธรรมชาติ (เช่น พายุและโรคภัย) และกิจกรรมของมนุษย์ (เช่น การเก็บเกี่ยวพืชผลหรือการตัดไม้) เป็นประเด็นที่นักวิจัยต่างให้สนใจ มีงานวิจัยมาตั้งแต่ทศวรรษ 1960 (เช่น O'loughlin and Ziemer 1982; Watson et al. 1997, 1999; Vergani et al. 2014, 2016; Liu et al. 2017; Kong et al. 2018; Zhu et al. 2019; Chen et al. 2021) และถึงแม้ว่าจะได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยมานาน แต่กลับมีงานศึกษาวิจัยไม่มาก ซึ่งงานที่มีอยู่ส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่ต้นไม้และพันธุ์ไม้หลังจากการตัดไม้ หรือเกิดไฟป่า โดยการศึกษาเหล่านี้มักจะแสดงให้เห็นถึงค่ากำลังรับแรงดึงที่ลดลงเมื่อรากเน่าเปื่อย และเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดครึ่งหนึ่งจากค่าเดิม (t_{50}) แตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ ซึ่งสรุปโดย Zhu et al. (2020) และพบว่าพันธุ์ไม้ชนิดหนึ่งมีค่า t_{50} ตั้งแต่หนึ่งปีไปจนถึง 8 ปี (สำหรับต้นสน Picea abies; (Ammann et al., 2009)) โดยการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายของรากพืชไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดในความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก และถึงแม้จะทราบว่าการเปลี่ยนแปลงที่ดินเพื่อทำเกษตรกรรม เป็นหนึ่งในสาเหตุจากการกระทำของมนุษย์ที่ก่อให้เกิดการพังทลายของลาดดิน และทำให้ลาดดินสูญเสียเสถียรภาพ (Glade 2003; Pisano et al. 2017) แต่กลับพบว่าการศึกษาเรื่องผลกระทบจากรากวัชพืชหรือหญ้าที่ถูกกำจัดจากการเปลี่ยนแปลงที่ดินเพื่อการเกษตรกรรมยังคงมีไม่มาก และยังไม่มีผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบจากการเปลี่ยนแปลงด้วยที่วิธีต่างๆ (หมายถึงวิธีการที่ใช้สำหรับกำจัดวัชพืช และทำให้รากเน่าสลาย) ยกตัวอย่างเช่น การเผาหญ้า และการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ของราก และคุณสมบัติกำลังรับแรงดึงของราก

2.6.3 การเสื่อมสภาพของรากพืชต่อคุณสมบัติการต้านทางแรงเฉือนของดิน

แม้ว่าในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาใดเกี่ยวกับผลกระทบจากการเสื่อมสลายของรากพืช ต่อคุณสมบัติการต้านทางแรงเฉือน เนื่องจากคาดการณ์ว่าการเสริมกำลังของดินจากรากพืช จะมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาการเจริญเติบโตของราก อายุที่เพิ่มขึ้น และการย่อยสลายของราก ซึ่งคุณสมบัติต่างๆของรากพืช โดยเฉพาะกำลังรับแรงดึง เมื่อรากเน่าเปื่อยย่อยสลายจะเป็นเหตุทำให้ดินถูกกัดเซาะและเกิดการพังทลาย แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อมูลการศึกษาผลของรากที่มีขนาดเล็ก และผลจากการย่อยสลายที่มีสาเหตุแตกต่างกัน (เช่นการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช และการเผาหญ้า) มีงานวิจัยบางส่วนเท่านั้นที่ได้ศึกษาถึงผลกระทบจากปริมาณราก (ซึ่งถูกอธิบายอยู่ในรูปของค่า biomass, RAR หรือ root volume ratio) ในด้านคุณสมบัติกำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชไม้ยืนต้น woody species (Yildiz et al. 2018) และพืชล้มลุก herbaceous species (Mahannopkul and Jotisankasa, 2019; Mickovski and van Beek, 2009; Wu et al. 2021; Karimzadeh et al. 2021) โดยในดินเดียวกัน ดินที่มีจำนวนรากที่มากกว่าจะมีความแข็งแรงมากกว่า (มีค่าแรงเฉือนสูงสุดที่มากกว่า) มีความเหนียว (ductile) มากกว่าและมีค่าขยายตัว (dilative) ที่สูงกว่า แต่ผลจากจำนวนของปริมาณรากพืช ไม่สามารถเปรียบเทียบโดยตรงกับผลจากการเจริญเติบโตของพืชได้ และการศึกษาที่มีอยู่ส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การสลายตัวของรากเนื่องจากการโค่นหรือการเก็บเกี่ยวของไม้ยืนต้นเท่านั้น แม้ว่าไฟป่าและการแปลงสภาพที่ดิน กลายเป็นข้อกังวลทั่วโลกในสถานการณ์ภาวะโลกร้อนด้วยผลกระทบและขนาดที่ไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อน (Jolly et al. 2015) มีเพียงการศึกษาเพียงบางงานเท่านั้นที่ศึกษาผลกระทบของการเผาพืชและการใช้สารกำจัดวัชพืชต่อการสลายตัวของราก การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ และการเสริมแรงของดิน (เช่น Vergani et al. 2017 ในไม้ยืนต้น) ปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลพรรณพืชจำพวกหญ้า อันที่จริงรากที่มีเส้นใยของหญ้ามีรูปแบบการเติบโต การเปลี่ยนแปลงทางกายวิภาค (ตามอายุ) และการสลายตัวแตกต่างกับรากไม้ของพุ่มไม้และต้นไม้ ตัวอย่างเช่น รากที่มีเส้นใยไม่มีการเจริญเติบโตในแนวรัศมีรอง ดังนั้นจึงไม่มีรากหนาและเนื้อเยื่อที่อุดมด้วยลิกนินเป็นรากไม้ของต้นไม้ (Cutler et al. 2009; Roumet et al. 2016) ไม่ทราบผลของการสลายตัวของรากที่เกิดจากการเผาไหม้ (เช่น ไฟป่า) และการใช้สารกำจัดวัชพืช (เช่น การกำจัดวัชพืชเนื่องจากการเปลี่ยนการใช้ที่ดิน) ต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ปลูกเนื่องจากขาดข้อมูล โดยมีงานศึกษาวิจัยที่ได้อธิบายถึงผลของการเจริญเติบโต ต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของคุณสมบัติการรับแรงดึงของราก (เช่นการศึกษาของ Vergani et al. 2016; Kamchoom et al. 2021) มีเพียง Zhu et al. (2020) เท่านั้นที่ตรวจวัดผลกระทบจากการย่อยสลายของรากพืชต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชของไม้ยืนต้นพันธุ์ Symplocos setchuensis โดยพบว่า มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40% ของกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดที่เพิ่มสูงขึ้นจากรากพืช จะลดลงหลังจากถูกตัดลำต้นเป็นเวลา 1 ปี เนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบของการพังทลายจากรากขาด (breakage) เป็นการถอนออก (pull-out) และการลดลงของ Young's modulus จากการย่อยสลายตัว แต่ภายในการทดสอบนี้ไม่ได้ควบคุมปริมาณน้ำในดินอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นพฤติกรรมการรับแรงเฉือนจะมีผลจากแรงดึงน้ำในดิน soil matric suction และการย่อยสลายของรากพืช ซึ่งไม่สามารถพิจารณาแยกออกจากกันได้ และยังไม่มีการกล่าวถึงผลกระทบจาก การย่อยสลายของรากพืชต่อค่า dilatancy เนื่องจากกำลังรับแรงเฉือน shear-induced dilatancy ซึ่งเป็นพฤติกรรมของดินที่สำคัญ ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณรวมของค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด และการหาค่า dilatancy ในดินที่มีรากพืช (งานวิจัยของ Yildiz et al. 2018) เพิ่งได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก แต่การหาค่านี้ทำได้ยาก โดยเฉพาะภายใต้ผลกระทบจากการเติบโตและย่อยสลายของรากพืช

2.7 ปฏิกิริยาไมคอร์ไรซา

ปฏิกิริยาไมคอร์ไรซา Mycorrhizal interaction เป็นปฏิกิริยาของความสัมพันธ์ทางชีวภาพระหว่างฟังไจ (fungus) กับรากพืช โดยเส้นใยของฟังไจ (Arbuscular mycorrhizas hyphae) จะเข้าไปในเซลล์ของรากพืช และ Ectomycorrhizas ที่ประกอบไปด้วยเส้นใยของฟังไจจะเข้าไปเจริญรอบบริเวณปลายราก บางส่วนจะเจริญแล้วสานกันเป็นตาข่ายรอบๆเซลล์ (hartig net) ภายในชั้น Cortex ของเซลล์รากพืช โดยความสัมพันธ์ระหว่างฟังไจกับรากพืชนี้จะเป็นการอยู่ร่วมกันแบบภาวะพึ่งพากัน ไมคอร์ไรซาจะช่วยเพิ่มความหนาแน่นของการแตกแขนงรากพืช และชนิดของต้นไม้ที่มี Ectomycorrhiza เป็นส่วนใหญ่จะมีความหนาแน่นของการแตกแขนงรากพืชสูงกว่าต้นไม้ที่มี Arbuscular mycorrhiza โดยรากที่มีเชื้อ Ectomycorrhizal จะมีความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น และการทำให้เกิดปฏิกิริยาไมคอร์ไรซานี้ สามารถช่วยดินในกรณีดินเสื่อมโทรมได้

กระบวนการย่อยสลายรากอาจได้รับผลกระทบจากจุลินทรีย์ในความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัย พืชส่วนใหญ่ที่เจริญเติบโตในดินมีความสัมพันธ์แบบพึ่งพาอาศัยกับ AM fungi โดย AM fungi จะช่วยให้พืชได้รับสารอาหาร ขณะที่พืชจะให้คาร์บอนแก่ AM fungi (Smith and Read, 2008; Jiang et al., 2017) โดยการศึกษาในปัจจุบันยืนยันว่า AM fungi สามารถเพิ่มปริมาณเซลลูโลสในราก (Chen et al., 2018); Basyal and Emery, 2021) และทำให้ความแข็งแรงของรากเพิ่มขึ้น (Chen et al., 2018)) ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับความสมบูรณ์ของผนังเซลล์ เส้นใยเซลลูโลส (MFA) และความหนาแน่นของเส้นใยเซลลูโลส (Page et al., 1971; Burgert, 2006) ในทางตรงกันข้าม AM fungi ยังสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินอย่างมีนัยสำคัญ เช่น การรวมตัวของดิน (aggregation) (Leifheit et al., 2013) ลักษณะการกักเก็บน้ำ (Augé et al., 2001) และการอยู่ร่วมกันของแบคทีเรีย (Chen et al., 2019; Emmett et al., 2021) และการเสื่อมสภาพของรากจะส่งผลต่อคุณสมบัติต่างกันของราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(เช่น คุณสมบัติทางเคมี ปริมาณเซลลูโลสและลิกนิน) ความชื้นในดิน อุณหภูมิของดิน และปริมาณธาตุอาหารในดิน (Solly et al., 2014) คุณภาพของรากยังมีบทบาทสำคัญในการแปรผันของอัตราการย่อยสลายราก (Silver and Miya, 2001) ในกรณีนี้ กระบวนการย่อยสลายราก (ไม่ว่าจะได้รับผลกระทบจากคุณภาพรากหรือสภาพแวดล้อมโดยรอบ) อาจถูกเปลี่ยนแปลงโดยการมีปฏิสัมพันธ์กับไมคอร์ไรซา และการศึกษาแสดงให้เห็นว่าไมคอร์ไรซามีผลต่อการย่อยสลายราก (Langley and Hungate, 2003; Langley et al., 2006; Beidler and Pritchard, 2017; See et al., 2019; Jiang et al., 2021) อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลที่เรามี กระบวนการย่อยสลายรากที่ได้รับผลกระทบจากการใช้สารเคมีฆ่าวัชพืชและการเผา รวมถึงผลกระทบต่อคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ของราก ยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างละเอียด

การฉีดจุลินทรีย์ AM สามารถเปลี่ยนแปลงทั้งคุณสมบัติทางเคมีของรากและสภาพแวดล้อมในดิน ซึ่งอาจส่งผลต่อการย่อยสลายรากในสภาพแวดล้อมจริง ดังนั้น เราจึงตั้งสมมติฐานว่า อัตราการย่อยสลายของรากที่มีไมคอร์ไรซาในสถานที่จริงจะช้ากว่ารากที่ไม่มีไมคอร์ไรซา ซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างในคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ เช่น tensile strength และ Young's modulus เพื่อประเมินบทบาทของ AM fungi ในการส่งผลต่อการย่อยสลายรากและความแข็งแรงทางชีวกลศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง จึงได้ดำเนินการทดลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางชั่วระยะเวลาในคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ของราก โดยใช้วิธีการทำให้รากพืชย่อยสลาย คือ การใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชและการเผาไหม้เพื่อทำให้รากพืชเกิดการเสื่อมสภาพ และทำการเปรียบเทียบระหว่างรากที่มี AM fungi และรากที่ไม่มี AM fungi ทั้งในช่วงระยะการเจริญเติบโตและการย่อยสลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดสอบ

การศึกษาพลวัตของรากพืชต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน เพื่อการเสริมเสถียรภาพลาดดินเชิงนิเวศอย่างยั่งยืนในที่นี้ จะเริ่มต้นจากการเปรียบเทียบระหว่างช่วงการเจริญเติบโตของรากพืชและช่วงการเสื่อมสภาพจากผลกระทบของการเผาไหม้และการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืช โดยจะเริ่มต้นด้วยการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของดินและรากพืชที่นำมาศึกษา จากนั้นจะวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของดินในช่วงอายุที่แตกต่างกันของรากพืช และคาดการณ์ว่าในช่วงที่เกิดการเสื่อมสภาพ คุณสมบัติทางกายภาพและชีวภาพของรากพืชจะลดลง ดังนั้น จึงมีการศึกษาวิธีการเสริมความสามารถของรากโดยการใช้จุลินทรีย์ไมคอร์ไรซา (AM fungi) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงและเสถียรภาพของดิน.

ตารางที่ 3.1 แผนการทดสอบ

Test	Soil Sample		
	Lateritic Soil	Lateritic Soil with Bermuda Grass	Lateritic Soil with AM Fungi and Bermuda Grass
Direct Shear Test	3	30	-
Root Biomass	-	30	30
Root Morphological	-	35 root / treatment	35 root / treatment
Root Tensile Strength	-	35 root / treatment	35 root / treatment
Root Chemical Component	-	30	30
AM Fungi	-	-	7-14 root / sample

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ชนิดพืชและดิน

ในการศึกษานี้ได้เลือกหญ้าเบอร์มิวด้า หรือ หญ้าแพรก (Cynodon dactylon) สำหรับการทดสอบ เนื่องจากหญ้าชนิดนี้เป็นหญ้าที่เจริญเติบโตได้ดีในภูมิภาคที่มีอากาศร้อนและอากาศอบอุ่น (Skerman and Riveros 1990) ซึ่งแผ่กระจายด้วย rhizomes (ลำต้นใต้ดิน) และ Stolons (ลำต้นเหนือพื้นดินที่อยู่ในแนวนอน) โดยหญ้าแพรกนี้ถูกจัดเป็นหนึ่งในวัชพืชที่มีความสำคัญชนิดหนึ่งต่อโลก (Holm et al. 1977) และสามารถแพร่กระจายเข้าไปในพื้นที่ต่างๆได้อย่างรวดเร็ว เมื่อแพร่กระจายบุกรุกเข้าไปในพื้นที่การเกษตร จะก่อให้เกิดความเสียหาย และสูญเสียผลผลิตได้ เนื่องจากการกำจัดให้หมดไปยาก ซึ่งข้อมูลจะถูกรวบรวมอยู่ในฐานข้อมูล Global Invasive Species Database (GISD 2010) และหญ้าชนิดนี้มีระบบรากที่หนาแน่นอยู่ในชั้นดินตื้น ทำให้มักถูกใช้สำหรับการป้องกันการถูกกัดเซาะของหน้าดิน (Faucette et al. 2006; Ng et al. 2014) โดยในการศึกษานี้ ได้ทำการหว่านเมล็ดหญ้าลงบนดินมูลไส้เดือนที่อุดมไปด้วยสารอาหาร เป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือนเพื่ออนุบาลให้รากเจริญเติบโต

ดินทรายปนดินเหนียว (Clayey Sand) เป็นดินที่สามารถพบได้ในหลายๆส่วนของประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่ลาดชันตามธรรมชาติ และที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยดินที่ใช้ทดสอบมีค่า D60, D30 และ D10 เท่ากับ 1.90, 0.62 และ 0.15 mm ตามลำดับ (เป็นค่าขนาดเม็ดดินที่มีขนาดเล็กกว่าค่านั้นเป็นจำนวน 60, 30 และ 10 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น ดินทรายที่มีการกระจายตัวที่ดี (well-graded sand) ตาม ASTM D2487 โดยคุณสมบัติอื่นของดินจะถูกสรุปไว้ในตารางที่ 3.2 สรุปคุณสมบัติดินที่สำคัญ และดินนี้จะถูกบดอัดที่ความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1520 kg/m3 ในกระบอกพลาสติกทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 90 mm กระบอกมีความลึก 115 mm โดยก่อนทำการบดอัดดิน จะเลือกดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm นำดินนั้นไปผสมเข้ากับน้ำที่เปอร์เซ็นต์น้ำเหมาะสมเท่ากับ 13% โดยน้ำหนัก (optimum water content) และทำการบดอัดเป็นจำนวน 5 ชั้นที่ความหนาเท่ากันทุกชั้น (23 mm) เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่สม่ำเสมอ โดยพื้นผิวระหว่างแต่ละชั้นจะถูกขูดเพื่อให้พื้นผิวระหว่างชั้นสัมผัสเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างชั้นดินบดอัด โดยตัวอย่างชั้นดินทั้งหมดจะสูง 115 mm และมีชั้นหญ้ารวมไปถึงดินมูลไส้เดือนที่มีความลึก 15mm ปกคลุมผิวหน้าอยู่ด้านบนชั้นดินที่ถูกบดอัด มีจำนวนกระบอกตัวอย่างที่จะทำการทดสอบทั้งหมด 30 ตัวอย่าง ซึ่งจะถูกวางไว้ในเรือนเพาะเลี้ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สรุปคุณสมบัติดินที่สำคัญ

Parameter	Value	Unit	Reference
Index property			
Specific gravity (G_s)	2.59	-	Specific Gravity test (ASTM D854)
Maximum dry density	1870	kg/m^3	Standard compaction test (ASTM D698)
Target dry density	1520		
Optimum moisture content	13	%	
D_{60}	1.9	mm	Sieve analysis (ASTM D2487)
D_{30}	0.62		
D_{10}	0.15		
Coefficient of uniformity (C_u)	12.67	-	
Coefficient of curvature (C_c)	1.35	-	
Chemical property			
pH	6.5	-	Standard buffer solution
Mechanical property (at target density)			
Effective cohesion (c')	1.4	kPa	Direct shear test (ASTM D3080)
Critical-state friction angle (ϕ_{cr}')	31	degree	
Hydraulic property (at target density)			
Saturated hydraulic conductivity (k_s)	$1x10^{-7}$	m/s	Falling head test

3.3 การเจริญเติบโต และการย่อยสลายของรากพืช

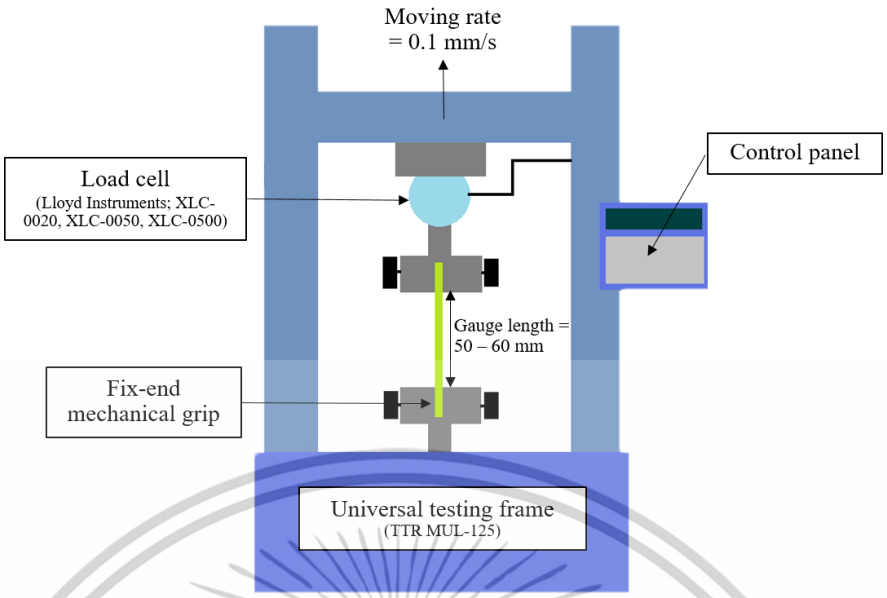
ตัวอย่างที่มีการปลูกพืชทั้งหมด 60 ตัวอย่างจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ส่วนแรกสำหรับการศึกษาช่วงการเจริญเติบโตจำนวน 18 ตัวอย่าง และส่วนที่สองสำหรับศึกษาช่วงการย่อยสลายของรากพืชจำนวน 42 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างทั้งหมดจะถูกวางไว้ในเรือนเพาะเลี้ยงของภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย เพื่อเพาะเลี้ยงหญ้าให้เจริญเติบโต และทำการศึกษาทดลองในช่วงเดือนสิงหาคม ปีพ.ศ.2561 ถึงเดือนมกราคม ปีพ.ศ.2562 โดยแบ่งระยะการเจริญเติบโตออกเป็นช่วง 2, 4, 6 เดือน (กำหนดตัวย่อเป็น G2, G4, G6 ตามลำดับ) ซึ่งในช่วงระยะเวลาดังกล่าวเป็นช่วงฤดูฝนของประเทศไทย มีอุณหภูมิเฉลี่ยต่อวันอยู่ที่ 33 องศาเซลเซียส และเรือนเพาะเลี้ยงนั้นเป็นระบบเปิด มีอากาศถ่ายเทสะดวก ตัวอย่างจะได้รับแสงแดดต่อเนื่องประมาณ 10 ชั่วโมงทุกวัน และรดน้ำให้แก่ตัวอย่าง สองครั้งต่อสัปดาห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากหญ้าเติบโตมีอายุ 6 เดือน จึงจะเริ่มทำการเผาและใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชให้แก่ตัวอย่าง เพื่อให้เกิดการย่อยสลายของราก โดยจะทำการเผาตัวอย่างจำนวน 12 ตัวอย่าง เผาชีวมวลที่อยู่เหนือพื้นดินทั้งหมดรวมไปถึงลำต้นและใบ โดยเผาไฟด้วยอุปกรณ์พ่นไฟจากแก๊สกระป๋องเป็นระยะเวลา 15 นาที ซึ่งกำจัดชีวมวลทั้งหมดบนผิวดิน และปล่อยให้เย็นตัวลงเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง โดยขั้นตอนนี้เป็นการเลียนแบบการปฏิบัติของเกษตรกรที่ใช้ในการเผาหญ้าในทุ่งนาเพื่อกำจัดวัชพืช โดยระหว่างกระบวนการเผาไหม้ทั้งหมด อุณหภูมิสูงสุดที่มีการจดบันทึกที่ความลึก 30 mm จากผิวดินคือ 55 องศาเซลเซียส หลังจากการเผาไหม้เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง (ระยะความลึก 30 mmจากผิวดินคือระยะที่เริ่มเก็บรากนำไปทดสอบ) โดยพบว่าหลังจากที่หญ้าถูกเผาไหม้เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ชีวมวลบนผิวดินของหญ้าทั้งหมดถูกเผาไหม้และกลายเป็นขี้เถ้า (รูปที่ 3.1) หลังจากเผาไหม้เสร็จสิ้นจะปล่อยตัวอย่างไว้เป็นระยะเวลา 1, 2, 4, 6 และ 12 เดือน (กำหนดตัวย่อเป็น B1, B2, B4, B6 และ B12 ตามลำดับ) เพื่อศึกษาการย่อยสลายของรากพืชที่เกิดจากการเผาไหม้ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างทดสอบ ก่อนและหลังการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงเครื่องทดสอบ (TTR MUL-125) สำหรับการทดสอบความต้านทานแรงดึงของรากพืช

สำหรับการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช จะทำการทดสอบทั้งหมด 9 ตัวอย่าง โดยเลือกใช้สารเคมีโพรพานิล propanil (N-[3,4-dichlorophenyl] propanamide) ที่ความเข้มข้น 36% โดยน้ำหนักในน้ำที่เป็นตัวทำละลาย ปริมาณที่ให้คือ 2 ครั้ง ผสมเข้ากับน้ำที่ใช้รดต้นไม้ โดยโพรพานิลนี้เป็นสารเคมีกำจัดวัชพืชที่ใช้กันโดยแพร่หลายสำหรับการกำจัดวัชพืชในการเกษตรกรรมของประเทศไทย และหลังจากที่ให้สารเคมีกำจัดวัชพืชแก่ตัวอย่าง จะใช้เวลาศึกษาการย่อยสลายของรากพืชเป็นระยะเวลาสั้นกว่าการเผาไหม้ คือ 0.5, 1 และ 2 เดือน (กำหนดตัวย่อเป็น H0.5, H1, และ H2 ตามลำดับ) และสำหรับทุกตัวอย่างที่ศึกษาทั้งการเผาหญ้าและให้สารเคมี จะทำการรดน้ำสัปดาห์ละ 2 ครั้ง ตลอดช่วงที่ทำการศึกษา เพื่อป้องกันไม่ให้ดินแห้งมากเกินไป

รากที่ใช้ทดสอบ (ทั้งรากแก้วและรากฝอย) จะถูกเก็บรวบรวมจากตรงกลางของตัวอย่าง (ที่ความลึกในช่วง 40 – 130 mm) ในแต่ละตัวอย่าง โดยนำรากนั้นมาทดสอบตรวจวัดค่าความต้านทานแรงดึง ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินในราก โดยการแยกรากออกจากดิน ด้วยการร่อนแบบเปียก (wet-sieving) และนำรากไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ตัวย่อและรายการตัวอย่างทดสอบ

TEST ID	Soil	Vegetated	Growth	Decay	Amount
B	Lateritic Soil	-	-	-	3
G2	Lateritic Soil	Bermuda Grass	2 months	-	6
G4			4 months	-	6
G6			6 months	-	6
H0.5	Lateritic Soil	Bermuda Grass	6 months	0.5 months	6
H1				1 months	6
H2				2 months	6
B1	Lateritic Soil	Bermuda Grass	6 months	1 months	6
B2				2 months	6
B4				4 months	4
B6				6 months	4
B12				12 months	4

3.4 การวัดค่าความต้านทานแรงดึงของรากพืช

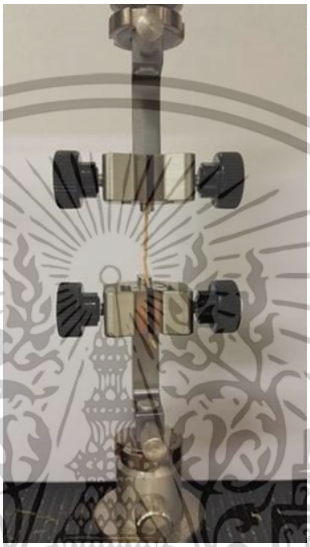
รากที่ถูกแช่น้ำ จะถูกตัดแต่งให้เป็นส่วนๆ มีความยาว 50-70 mm โดยแต่ละส่วนจะต้องไม่มีการบิดเบี้ยวหรือเนื้อเยื่อเสียหายจึงจะถูกนำไปทดสอบ และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยจะถูกคำนวนจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรากที่ถูกนำไปทดสอบ (วัดค่าบริเวณส่วนที่อยู่ใกล้กับปลายทั้งสองข้าง และตรงกลางนำมาเฉลี่ย) วัดโดยใช้ electronic slide gauge ค่าที่ได้จากการตรวจวัดอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.9 mm และจะสุ่มเลือกนำไปทดสอบ โดยเลือกให้ครอบคลุมตัวอย่างมากที่สุด ต่อมาการทดสอบหาค่าแรงดึงแกนเดียว uniaxial tensile test จะทดสอบที่อัตราเร็วคงที่ 0.1 mm/s ด้วยเครื่อง universal testing frame (TTR MUL-125) ดังแสดงในรูปที่ 10 และใช้ชิ้นไม้ขนาดบางช่วยจับรากเพื่อป้องกันรากหลุดจากแท่นจับ (Nilaweera and Nu-talaya 1999) ความยาวพิกัด gauge length ของแต่ละส่วนจะมีค่า 50-60 mm และให้แรงแก่รากแตกต่างกัน (20, 50 และ 500 N) ขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพื่อวัดแรงที่เกิดขึ้นในราก โดยการทดสอบนี้ รากที่เกิดการวิบัติหรือขาดในช่วงระยะใกล้ที่จับจะไม่ถูกนำมาวิเคราะห์ การทดสอบจะใช้เวลาโดยเฉลี่ยประมาณ 5 นาที ต่อหนึ่งตัวอย่างราก โดยหลังจากการทดสอบ รากนั้นจะถูกนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง และนำไปอบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาค่าปริมาณน้ำในรากทั้งก่อนและหลังการทดสอบ พบว่าปริมาณน้ำในรากระหว่างการทดสอบนั้นสูญเสียไม่เกิน 5%

จากผลการทดสอบที่ได้ ค่าความต้านทานแรงดึงของรากที่มีความเค้นสูงสุดเพื่อทำให้รากขาดจะสามารถคำนวนได้จากสมการ 2.7

$$Root\ Tensile\ Strength = \frac{F_{max}}{A_r} = \frac{F_{max}}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2}$$



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการทดสอบความต้านทานแรงดึงของรากพืช

3.5 การวัดค่าปริมาณเซลลูโลสและลิกนินในรากพืช

วิธีการของ Leavitt and Danzer (1993) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อวัดปริมาณเซลลูโลสและลิกนินที่มีอยู่ภายในราก โดยใช้หลักการ การกำจัดสารประกอบอินทรีย์ออกก่อนแล้วจึงนำลิกนินออกจากราก โดยส่วนที่เหลือคือนั้นสารประกอบที่เป็นเซลลูโลส

ตัวอย่างรากหลังจากการทดสอบหาค่าแรงดึง จะถูกอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปบดเป็นผงละเอียด ชั่งน้ำหนักผงรากแห้งโดยใช้เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ความแม่นยำสูง (ความแม่นยำ 0.001 มิลลิกรัม) ต่อมาจึงเริ่มการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ โดยรากแต่ละตัวอย่างจะถูกสกัดด้วยอุปกรณ์ Soxhlet extractor ที่มีสารละลาย toluene 99% และ ethanol 96% (2:1, v/v) ขนาด 700 มิลลิลิตร ให้ความร้อนแก่ส่วนผสมจนกระทั่งเดือดเป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากการสกัด สารละลาย toluene–ethanol จะถูกแทนที่ด้วย ethanol ขนาด 700 มิลลิลิตร และให้ความร้อนแก่ส่วนผสมที่อุณหภูมิเดิมเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำส่วนผสมออกจากอุปกรณ์ Soxhlet และแช่ส่วนผสมในน้ำกลั่นที่ต้มไว้เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ล้างส่วนผสมด้วยน้ำกลั่นและนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำไปชั่งน้ำหนักของลิกนินและเซลลูโลสที่เหลืออยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อมาเป็นการนำส่วนของลิกนินออกจากราก นำส่วนผสมใส่ลงในกระบอกทดลองที่ประกอบด้วยน้ำกลั่นขนาด 700 มิลลิลิตร, sodium chlorite ($NaClO_2$) 7.0 กรัม, acetic acid ($C_2H_4O_2$) 1.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก และให้ความร้อน 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นล้างส่วนผสมด้วยน้ำกลั่น อบให้แห้งในเตาอบ 60 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง แล้วจึงชั่งน้ำหนัก โดยน้ำหนักที่ชั่งได้คือน้ำหนักของเซลลูโลส ส่วนน้ำหนักของลิกนินคือผลต่างระหว่างน้ำหนักที่ชั่งได้นี้กับขั้นตอนก่อนหน้า ปริมาณของเซลลูโลสกับลิกนินจะถูกเขียนในรูปของอัตราส่วนน้ำหนักเริ่มต้นของรากที่ทดสอบ

3.6 การวัดปริมาณ AM fungi

หลังจากการทดสอบกำลังรับแรงดึงของราก บางส่วนของรากจะถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าอัตราการเจริญเติบโตของ AM fungi โดยเลือกรากแบบสุ่ม ตัดเป็นความยาว 1 เซนติเมตร และแช่ในสารละลาย KOH 10% (w/v) ภายในภาชนะแก้ว ภาชนะจะถูกปิดด้วยฟอยล์อลูมิเนียมเพื่อป้องกันการระเหย จากนั้นทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ต่อมา รากจะถูกเก็บจากภาชนะแก้วโดยใช้แหนบ และล้างด้วยน้ำกลั่น รากจะถูกย้อมสีและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อการพิจารณาอัตราการเจริญเติบโตของ AM fungi โดยเปอร์เซ็นต์ของความยาวรากที่มีการเจริญเติบโตของ AM fungi ครอบคลุม (Giovannetti and Mosse 1980) ซึ่งอัตราการเจริญเติบโตของ AM fungi จะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของรากตัวอย่างอย่าง 7 ถึง 14 รากในภาชนะตัวอย่างเดียวกัน

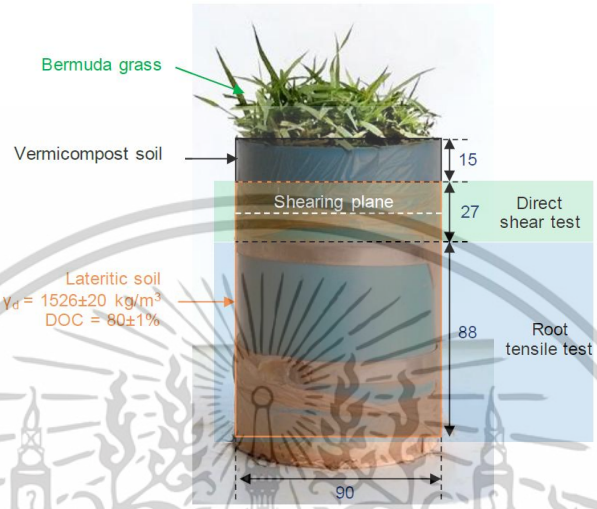
3.7 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนตรง

ตัวอย่างดินที่นำไปทดสอบหาค่าแรงเฉือน ในช่วงแรกจะเป็นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำซึ่งถูกเสริมกำลังด้วยรากพืช และสามารถคงรูปร่างได้โดยไม่มีการพังทลาย โดยแบบทดสอบแรงเฉือน (shearing mould) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 90 mm สูง 27 mm ดังรูปที่ 3.3 และตัวอย่างดินจะถูกตัดแต่งครั้งสุดท้าย และแยกส่วนบนออกจากส่วนล่างโดยใช้มีด โดยระนาบเฉือน shear plane จะอยู่ที่ระยะประมาณ 30 mm จากผิวดินของแต่ละกระบอกทดสอบ

ตัวอย่างดินจะถูกนำไปใส่ในเครื่องทดสอบแรงเฉือน และมีน้ำหนักกระทำในแนวดิ่งกดตัวอย่างดิน ในสภาวะ K_0 condition ภายใต้สภาวะความเค้นปกติ (normal stress) ที่กำหนด เพื่อลดช่องว่างระหว่างผิวด้านข้างกับตัวอย่างดิน จากนั้นจึงนำตัวอย่างดินไปแช่ในน้ำเพื่อให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าแรงเฉือน ด้วยอัตราการเคลื่อนที่แนวราบคงที่ 0.1 mm/min เพื่อให้มีความช้าเพียงพอสำหรับการให้น้ำไหลออก (fully drained condition) หลังจากการทดสอบแรงเฉือนเสร็จ จะนับจำนวนรากที่ถูกถอนออกหรือลื่นหลุดออก (ที่ยังไม่ขาด และไม่ย่อยสลาย) บนระนาบเฉือนทั้งหมด แล้วจึงแยกรากออกจากดินด้วยการร่อนดินแบบเปียก (wet-sieving) และนำรากไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง เพื่อหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลชีวภาพ (saturated root biomass) ในขณะที่รากอิ่มตัวด้วยน้ำ หลังจากนั้นนำรากไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อวัดปริมาณน้ำในรากที่อิ่มตัว และหามวลชีวภาพของรากแห้ง (dry root biomass)



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างกระบอกทดสอบ

3.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการประเมินหาค่าความแตกต่างที่มีนัยสำคัญด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว one-way ANOVA โดยมีการตั้งสมมุติฐาน H_0: ค่าเฉลี่ยของทุกกลุ่มตัวอย่างมีค่าเท่ากัน และ H_1: มีอย่างน้อย 1 คู่ ที่มีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากัน ต่อมาทำการวิเคราะห์ด้วย post hoc Tukey's จากข้อมูลที่ไม่มีการกระจายตามปกติ เพื่อระบุความแตกต่างระหว่างกลุ่ม, สาเหตุการย่อยสลายของรากพืชที่แตกต่างกัน (เช่น เมื่อระยะเวลาผ่านไปหลังจากการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชหรือการเผาไฟ) และผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะถูกพิจารณาว่ามีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อ ค่า $p \leq 0.05$ และความแปรปรวนของข้อมูลเฉลี่ยจะแสดงเป็น ค่าเฉลี่ย ± ค่าความคลาดเคลื่อน

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้วยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรคุณสมบัติเชิงกลของรากพืช โดยค่าที่ได้จาก Pearson's Correlation Coefficient จะแสดงค่าอยู่ในช่วงระหว่าง -1 และ +1 โดย -1 หมายถึงการที่ตัวแปรมีความสัมพันธ์กันในทางลบแบบสมบูรณ์ 0 หมายถึงตัวแปรไม่มีความสัมพันธ์กัน และ +1 หมายถึงตัวแปรมีความสัมพันธ์ในทางบวกแบบสมบูรณ์ การที่ตัวแปรมีความสัมพันธ์กันในทางบวก หมายถึงเมื่อตัวแปรหนึ่งขึ้นหรือลดลง อีกตัวแปรก็มีทิศทางขึ้นหรือลดลงในทางเดียวกัน ในขณะที่การที่ตัวแปรมีความสัมพันธ์กันในทางลบนั้น หมายถึง เมื่อตัวแปรตัวหนึ่งเพิ่มขึ้น อีกตัวแปรจะมีทิศทางในทางตรงกันข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดสอบ คุณสมบัติของรากพืช ในช่วงการเปลี่ยนแปลง

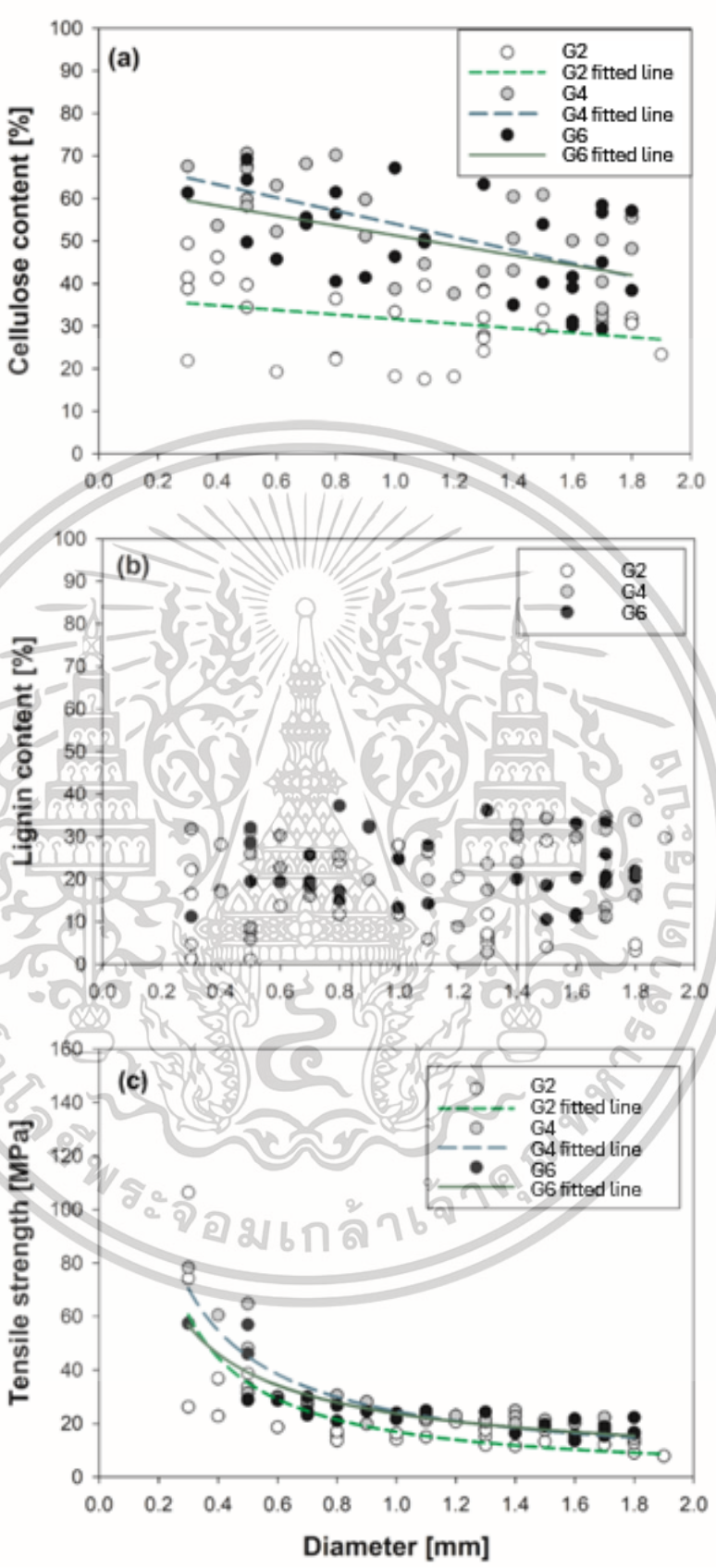
4.1 กำลังรับแรงดึงของรากพืช

การเจริญเติบโตของหญ้าในช่วง 6 เดือน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรากเท่ากับ 1.07 ± 0.05 มิลลิเมตร และมีค่ากำลังรับแรงดึงเท่ากับ 26.05 ± 1.71 MPa โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในแต่ละช่วงอายุที่ 2, 4, และ 6 เดือน ส่วนค่าเฉลี่ยกำลังต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นตามอายุ (เท่ากับ 17.5, 22.3, 22.7MPa ที่ 2, 4, และ 6 เดือน ตามลำดับ) สังเกตว่าค่ากำลังต้านทานแรงดึงจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 2-4 เดือนและค่อนข้างคงที่ในช่วง 4-6 เดือน ค่ากำลังรับแรงดึงของรากหญ้าที่พบนี้มีค่าอยู่ในช่วงของรากหญ้าที่เป็นแบบรากฝอย ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากจะเป็นไปตามสมการยกกำลัง (ค่า R2 > 0.6 ดังแสดงในรูปที่ 4.1) โดยพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงจะมีความสัมพันธ์กับทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากและอายุพืชอย่างมีนัยสำคัญ (p-value < 0.001) โดยกำลังรับแรงดึงของรากจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากเพิ่มขึ้น

4.2 ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินในรากพืช

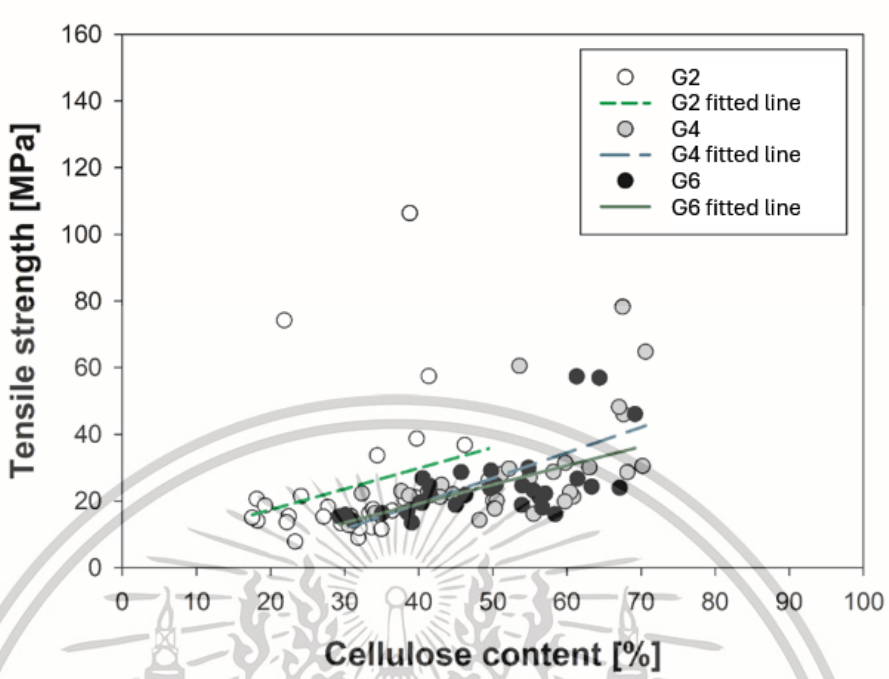
ปริมาณเซลลูโลสที่ตรวจพบในรากพืชช่วงเจริญเติบโต มีค่าค่อนข้างแกว่งและอยู่ในช่วง 17.5–70.6% ส่วนปริมาณลิกนินที่พบมีค่าน้อยกว่าเซลลูโลส มีค่าระหว่าง 1.0 – 37.2% ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยระยะเวลาการเจริญเติบจะมีผลต่อปริมาณเซลลูโลสและลิกนินอย่างมีนัยสำคัญในช่วงระหว่างช่วงอายุ 2 เดือนและ 4 เดือน (p-value < 0.001) ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงดึงที่ 4 เดือน แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงหลังจาก 4 เดือน ถึงปริมาณของเซลลูโลสมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (รูปที่ 4.1a) แต่ปริมาณลิกนินแทบจะไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากเลย (รูปที่ 4.1b) ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลให้สรุปได้ว่ากำลังรับแรงดึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณเซลลูโลส (รูปที่ 4.2) แต่ค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นกับช่วงอายุของพืช โดยพบว่าช่วงอายุน้อยจะส่งผลหรือมีความสัมพันธ์ที่น้อยระหว่างกำลังรับแรงดึงกับเซลลูโลส (เช่น G2 รูปที่ 4.2) และในช่วงอายุที่มากขึ้น (G4 และ G6) ปริมาณเซลลูโลสกับกำลังรับแรงดึงจะมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ (p-value < 0.001 และ R^2 = 0.34)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ปริมาณเซลลูโลสและ (b) ปริมาณลิกนิน และ (c) กำลังรับแรงดึง กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก

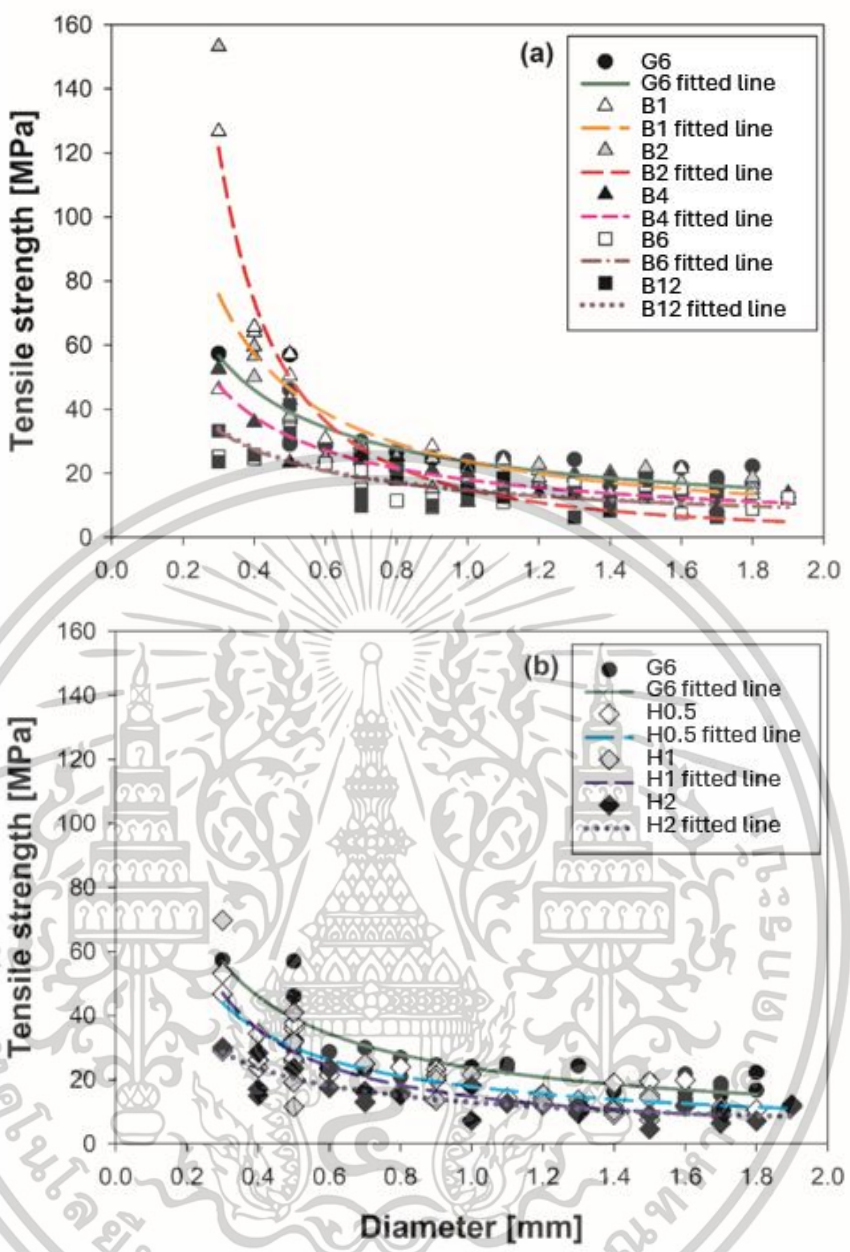
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับปริมาณเซลลูโลสของราก

กำลังรับแรงดึงในช่วงย่อยสลายยังคงมีจะมีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดังสมการยกกำลัง (รูปที่ 4.3) กำลังรับแรงดึงโดยเฉลี่ยจะลดลงตามระยะเวลาหลังการย่อยสลายของรากที่เพิ่มมากขึ้น โดยจะลดลง 30% เหลือประมาณ 17.27 ± 1.83 MPa เมื่อเวลาผ่านไป 12 เดือนหลังจากการเผา (รูปที่ 4.4a) แต่ในช่วงย่อยสลายของรากการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช กำลังรับแรงดึงลดลงมากอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบการเผา (p-value < 0.001) ถึงแม้กระบวนการย่อยสลายของรากจะแตกต่างกัน โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ากำลังรับแรงดึงของรากลดลงเหลือ 50% จะใช้เวลาประมาณ 1-8 ปี ขึ้นกับชนิดและสภาวะโดยรอบ (Watson et al. 1999, Zhu et al. 2020) แต่ในการศึกษาที่ผ่านมามักจะมุ่งเน้นไปที่รากของพืชไม้ยืนต้น (เช่นการศึกษาของ Vergani et al. 2016 และ Zhu et al. 2020) ตัวอย่างเช่น รากของพืช Picea abies มีกำลังรับแรงดึงลดลง 50% หลังจากการย่อยสลายของรากเป็นระยะเวลา 8 ปี (Ammann et al. 2009) ในการศึกษานี้พบว่าหญ้าเกิดการย่อยสลายที่เร็วกว่า ทั้งนี้เนื่องจากหญ้ามีความแตกต่างกับไม้ยืนต้น เพราะหญ้ามีรากเป็นระบบรากฝอย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก ลักษณะของราก และส่วนประกอบภายในเนื้อเยื่อ แตกต่างกับรากของไม้ยืนต้น และรากของไม้ยืนต้นจะมีการเจริญเติบโตแบบทุติยภูมิโดยขยายตัวออกทางด้านข้างตามอายุที่มากขึ้น ในขณะที่รากฝอยของหญ้าไม่มีการเจริญเติบโตแบบนี้ ซึ่งทำให้รากบางกว่า มีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรมากกว่า ทำให้มีโอกาศสัมผัสกับแบคทีเรียมากกว่าและก่อให้เกิดการย่อยสลายตัวของอินทรีวัตถุที่เร็วกว่าไม้ยืนต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

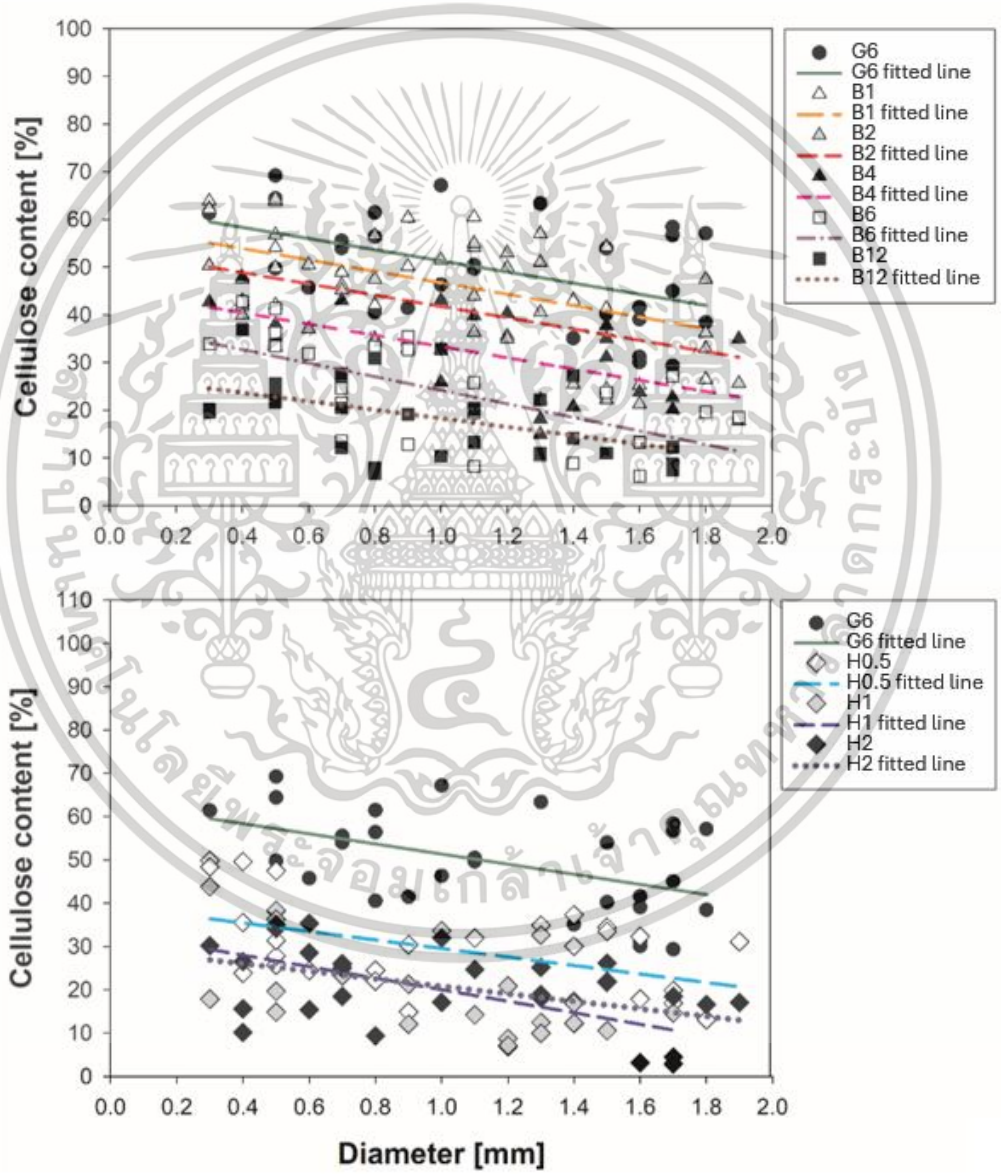


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าหลังจาก (a) การเผาหญ้า และ (b) การใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช

เมื่อเทียบผลจากการเผานั้น รากในดินอาจตายลงอย่างช้าๆ เนื่องจากไม่สามารถเจริญเติบโตต่อได้ ขาดการสังเคราะห์แสงจากส่วนที่อยู่เหนือดินขึ้นไป (คล้ายการคลุมดิน) แต่ในทางตรงข้าม การใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช รากจะอ่อนแอรวดเร็ว การลดลงของกำลังรับแรงดึงราก สามารถอธิบายได้ด้วยคุณสมบัติเชิงกลจากการสลายตัวของสารประกอบในรากพืช เช่น เซลลูโลสและลิกนิน ปริมาณเซลลูโลสจะลดลงเป็นค่าคงที่อย่างมีนัยสำคัญหลังจากการตายของพืช (รูปที่ 4.4) Zhu et al. (2020) ได้อธิบายถึงกำลังรับแรงดึงที่ลดลงของรากพืชไม้ยืนต้นเนื่องจากการลดลงของปริมาณเซลลูโลส ซึ่งการลดลงของเซลลูโลสมีความแตกต่างกันการศึกษานี้ กล่าวคือ มีการลดลงเพียง 8% ของปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลลูโลสหลังจากผ่านไป 3 เดือน ในช่วงการย่อยสลายของรากพืช S. setchuensis แต่ในการศึกษานี้ปริมาณเซลลูโลสจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ 6 เดือนหลังจากการเผาหญ้า (รูปที่ 4.4a) และที่ 1 เดือนหลังการใช้สารเคมี (รูปที่ 4.4b) ปริมาณเซลลูโลสพบว่ามีความสัมพันธ์แปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก (รูปที่ 4.4) ส่วนปริมาณลิกนินนั้นพบว่าไม่มีความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก (รูปที่ 4.1) ในการศึกษานี้พบว่า การลดลงของปริมาณเซลลูโลสและลิกนินทำให้รากอ่อนตัวลง แต่ปริมาณลิกนินที่ลดลงส่งผลกระทบเชิงกลกับกำลังรับแรงดึงน้อยกว่าซึ่งสามารถสังเกตได้ในช่วงระยะหลังของการย่อยสลายตัวของราก



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลลูโลสกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากของหญ้าหลังจาก (a) การเผาหญ้า และ (b) การใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ช่วงการเจริญเติบโตของรากพืช

ค่าความต้านทานแรงดึงของรากหญ้าแพรก C. dactylon ที่ตรวจวัดค่าได้ มีค่าอยู่ในช่วงของรากหญ้าที่เป็นแบบ fibrous grass roots (เช่น รากของพืชที่ไม่ใช่พืชยืนต้น (Comino et al., 2010) et al. 2010; Loades et al. 2013; Boldrin et al. 2021; Wu et al. 2021) อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ fibrous grass roots ระหว่างพืชแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น Boldrin et al. (2021) พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมีค่าไม่เกิน 40 MPa ในหญ้าสามชนิดที่พบได้ทั่วไปในทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ของยุโรป ในขณะที่ Comino et al. (2010) พบว่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมากถึง 365 MPa สำหรับพืชสายพันธุ์คล้ายเคียงกัน แต่อย่างไรก็ตาม ช่วงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทดสอบในรายงานที่กล่าวมานั้นมีความแตกต่างกันมาก และเมื่อพิจารณาช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เท่ากันกับการศึกษานี้ (ขนาด 0.1-1.9 mm) พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Boldrin et al. (2021) และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากของหญ้าแพรก C. dactylon เป็นไปตามรูปแบบของสมการยกกำลังติดลบที่มักจะพบเจอได้จากการศึกษาเรื่อง fibrous roots (Mao et al., 2014) โดยความสัมพันธ์นี้ไม่มีความเกี่ยวข้องกับวิธีการที่ทำให้รากย่อยสลายในการศึกษานี้ (เช่น ช่วงเจริญเติบโต หรือช่วงย่อยสลาย) แต่อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบว่าการปรับค่าให้มีความใกล้เคียง (fitting) ไม่สามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากได้เสมอไป ตัวอย่างเช่นการศึกษาที่ผ่านมาของ Boldrin et al. (2018) แสดงให้เห็นว่าความต้านทานแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากของไม้ยืนต้น 10 สายพันธุ์ที่แตกต่างกันและมีถิ่นกำเนิดอยู่ในเขตภูมิอากาศแบบอบอุ่นของยุโรปที่ไม่ได้เป็นไปตามรูปแบบของสมการยกกำลังติดลบ แต่สามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบของสมการเชิงเส้น หรือสมการเลขชี้กำลัง และจากข้อมูลการศึกษาพบว่ารูปแบบของสมการยกกำลังติดลบจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด coefficient of determination (R^2) สูงสุดสำหรับการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากของ C. dactylon

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากนั้นแปรผกผันกัน ความสัมพันธ์ที่ถูกพบในการศึกษาที่ผ่านนี้มาสามารถอธิบายได้ด้วยส่วนประกอบทางเคมีที่อยู่ภายในเนื้อเยื่อของรากที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากต่างๆ (Genet et al., 2005; Zhang et al., 2014) โดยเฉพาะพืชยืนต้นเป็นส่วนใหญ่ แต่ก็มักจะพบข้อมูลที่ขัดแย้งกัน โดย Genet et al. (2005) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนั้นแปรผันตามกันในรากของพืช P. pinaster และ C. sativa แต่ Zhang et al. (2014) ได้ทดสอบพืช P. tabulaeformis สังเกตพบแนวโน้มความสัมพันธ์ที่แปรผกผันกัน และได้อธิบายถึงความสัมพันธ์ที่แปรผกผันกันระหว่างความต้านทานแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนั้นเกิดจากอัตราส่วนของลิกนินและเซลลูโลสที่ลดต่ำลงเมื่อรากมีความหนามากขึ้น และจากผลการศึกษาหญ้าแพรกในที่นี้พบว่า ความต้านทานแรงดึงและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณเซลลูโลสจะลดต่ำลงเมื่อรากมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Genet et al. (2005) แต่ปริมาณของลิกนินไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดของราก โดยรากของหญ้านั้นไม่มีเนื้อเยื่อ secondary xylem จึงไม่มีเนื้อเยื่อที่เต็มไปด้วยลิกนินแบบพืชไม้ยืนต้น (Cutler et al. 2009; Roumet et al. 2016) และถึงแม้ในการศึกษานี้ปริมาณลิกนินกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากจะไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจน แต่มีผลต่อคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ (Niklas et al. 1992)

ความต้านทานแรงดึงที่มีค่าในช่วงที่กว้าง และการแผ่กระจายที่หนาแน่นของรากหญ้าแพรก C. dactylon ทำให้พืชชนิดนี้มักถูกนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมสำหรับงานปรับปรุงคุณภาพดิน โดยความต้านทานแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกับค่าของพืช Chrysopogon zizanioides L. (หญ้าแฝก; ; (Mahannopkul and Jotisankasa, 2019; Mickovski and van Beek, 2009; Wu et al. 2021; Karimzadeh et al. 2021) ซึ่งได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในการควบคุมการกัดเซาะและการรักษาเสถียรภาพของลาดดิน ในภูมิภาคเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน (National Research Council 1993) และรากสามารถหยั่งลึกได้ 3-5 m (Hellin and Haigh 2002) แต่หญ้าแพรก C. dactylon นั้นมีรากลึกไม่เกิน 0.5 m (Ng et al. 2013) และรากแพร่กระจายหนาแน่น มีรากเหง้าที่ยาว แพร่กระจายได้รวดเร็ว ปกคลุมผิวดินได้ดี (Norris et al. 2008) จึงทำให้หญ้าแพรกนั้นเหมาะสมสำหรับการป้องกันการกัดเซาะผิวดินจากน้ำที่ไหล่บ่า

การเสริมกำลังรับแรงดึงของรากเนื่องจากอายุของพืชที่มากขึ้น สามารถอธิบายได้จาก รากที่มีอายุมากขึ้นจะมีปริมาณเซลลูโลสและลิกนินเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ารากฝอยจะมีความต้านทานแรงดึงจากแกนของรากเพิ่มขึ้น เนื่องจากอายุรากที่เพิ่มขึ้น (Dumlao et al. 2015; Loades et al. 2015; Boldrin et al. 2021) โดยการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงดึงของรากตามอายุรากนั้นเป็นผลมาจาก การสะสมของเซลลูโลสและลิกนิน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงตามอายุพืชที่เพิ่มขึ้น จึงสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณเซลลูโลสและลิกนินเมื่ออายุพืชเพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับสมมติฐานของการศึกษาที่ผ่านมาในเรื่องอายุรากพืชและชีวกลศาสตร์ (Dumlao et al. 2015, Loades et al. 2015, Boldrin et al. 2021) และถึงแม้ว่าตัวอย่างของรากที่ได้จะมาจากต้นเดียวกัน แต่อายุของรากอาจแตกต่างกัน โดยมักกำหนดให้อายุของพืชมีค่าเท่ากับอายุของราก (รวมไปถึงคุณสมบัติด้านการเสริมกำลัง) สำหรับพืชที่มีอายุไม่มาก (เช่นสูงสุดที่ 4 เดือน) และสำหรับพืชที่มีอายุมากกว่านั้น การเจริญเติบโตของรากใหม่ และการเปลี่ยนแปลงของราก อาจส่งผลกระทบต่ออายุของรากแต่ละราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ช่วงการย่อยสลายของรากพืช

การสลายตัวของรากหลังจากการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชและการเผาหญ้า ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงของรากลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าความต้านทานแรงดึงของรากลดลงเหลือ 50% จะใช้เวลาประมาณ 1-8 ปี ขึ้นกับชนิดและสภาวะโดยรอบ (Watson et al. 1999, Zhu et al. 2020) แต่ในการศึกษานี้พบว่าเกิดการย่อยสลายที่เร็วกว่าเนื่องจากพืชที่ใช้ทดสอบเป็นพืชหญ้า แต่ในการศึกษาที่ผ่านมามักจะมุ่งเน้นไปที่รากของพืชไม้ยืนต้น (เช่นการศึกษาของ Vergani et al. 2016 และ Zhu et al. 2020) และอาจไม่ได้พิจารณาถึงรากของพืชหญ้าที่มีระบบรากเป็นรากฝอย ตัวอย่างเช่น รากของพืช Picea abies มีความต้านทานแรงดึงลดลง 50% หลังจากการย่อยสลายของรากเป็นระยะเวลา 8 ปี (Ammann et al. 2009) และความแตกต่างอย่างมากของคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ของรากพืชที่ย่อยสลายระหว่าง พืชไม้ยืนต้น (ในการศึกษาที่ผ่านมา) กับพืชขนาดเล็กหรือหญ้าที่มีรากเป็นระบบรากฝอย (ในการศึกษานี้) เป็นผลจากลักษณะของรากพืชที่แตกต่างกัน เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก ลักษณะของราก และส่วนประกอบภายในเนื้อเยื่อ โดยรากฝอยที่ถูกทดสอบในการศึกษานี้มีขนาดบางกว่า 2 mm ในขณะที่รากของพืชไม้ยืนต้นระหว่างช่วงการย่อยสลายในการศึกษาที่ผ่านมา มีขนาดตั้งแต่บางกว่า 1 mm ไปจนถึงมากกว่า 10 mm (เช่นการศึกษาของ Vergani et al. 2016; Watson et al. 1998; Zhu et al. 2020) และรากของพืชไม้ยืนต้นที่จะมีการเจริญเติบโตออกทางด้านข้าง (รากหนาขึ้น) ตามอายุที่มากขึ้น ในขณะที่รากฝอยของหญ้าไม่มีการเจริญเติบโตทางด้านข้าง ทำให้การเกิดเปลี่ยนแปลงลักษณะของรากตามอายุที่น้อยกว่าพืชไม้ยืนต้น (Cutler et al. 2009; Roumet et al. 2016) โดยทั่วไป รากที่บางกว่าจะมีแนวโน้มที่ผุกร่อนย่อยสลายมากขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรมากกว่า ทำให้สัมผัสกับแบคทีเรียหรือสิ่งมีชีวิตที่เป็นผู้ย่อยสลายมากและก่อให้เกิดการย่อยสลายตัวของอินทรีวัตถุ โดยเฉพาะโครงสร้างทางกายภาพ อายุ และการย่อยสลายของรากแต่ละรากนั้นขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก อาหารในดิน โครงสร้างราก และปริมาณจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซาในดิน (Pregitzer, 2002) โดยปริมาณส่วนทางประกอบเคมี (เช่น ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนและไนโตรเจน) และการหายใจของพืช สามารถอธิบายการย่อยสลายของรากที่มีขนาดเล็กได้ (Prieto et al. 2016; Roumet et al. 2016) และทั่วไปนั้นพืชพันธุ์ต้นไม้เล็กหรือพวกหญ้ามักถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อมจึงทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างรวดเร็ว เจริญเติบโตและอัตราการหายใจของพืชที่รวดเร็ว รวมไปถึงสามารถเกิดการย่อยสลายได้รวดเร็วเช่นกัน ในทางกลับกัน พันธุ์ไม้ยืนต้นจะมีลักษณะการเจริญเติบโตที่ช้า รากหนา อายุยืนยาวขึ้น และย่อยสลายได้น้อยลง (Roumet et al. 2016) และรากที่อยู่ตื้นหรือระบบนิเวศที่ทำการเกษตร มักจะเกิดการย่อยสลายที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรากที่อยู่ลึกกว่าหรือระบบนิเวศแบบป่า (Prieto et al, 2016)

ช่วงการย่อยสลายของราก ความต้านทานแรงดึงจะมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก โดยความสัมพันธ์นี้มักถูกพบในรากฝอยและรากของไม้ยืนต้น ในการศึกษาที่ผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มา (Boldrin et al. 2021; Mao et al. 2012) การสลายตัวของรากไม่ส่งผลกระทบสำคัญต่อรูปร่างของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก แต่ส่งผลให้เส้นโค้งความสัมพันธ์ขยับตัวลดลงในทุกขนาดของราก ซึ่งคล้ายเคียงกับผลการศึกษาของ Zhu et al. (2020) ที่ศึกษารากของพืช Symplocos setchuensis ซึ่งเป็นไม้ยืนต้น

จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรม และศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ผลการศึกษานี้เป็นหลักฐานแรกที่แสดงผลกระทบจากสาเหตุการย่อยสลายของรากต่อการลดลงของความต้านทานแรงดึง ถึงแม้ว่าในงานศึกษาที่ผ่านมา (จะศึกษาโดยเน้นที่ต้นไม้ยืนต้น) ได้มีการทดสอบการย่อยสลายของรากพืชจากสาเหตุที่แตกต่างกันของการตายของราก แต่ไม่มีการเปรียบเทียบกันอย่างชัดเจน และการศึกษาส่วนมากจะศึกษาการย่อยสลายตัวของรากพืชไม้ยืนต้น และไม่มีการศึกษาใดที่พิจารณาถึงผลกระทบจากการปรับปรุงพื้นที่ การเปลี่ยนแปลงที่ดินเพื่อทำเกษตรกรรม ที่มีผลต่อพืชไม้ขนาดเล็กหรือหญ้า เช่นการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชและการเผาหญ้า แต่ปัญหาเรื่องไฟป่าและการเปลี่ยนแปลงสภาพที่ดินนั้นเป็นปัญหาที่ทั่วโลกให้ความสนใจเนื่องจากมีผลต่อภาวะโลกร้อนด้วยผลกระทบที่ไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อน (Jolly et al. 2015) และมีการศึกษาจำกัด ที่ศึกษาผลจากการเผาไหม้ การย่อยสลายของรากพืช ต่อคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์และการเสริมแรงในดิน เช่น การศึกษาของ Vergani et al. 2017 ที่ศึกษาการลดลงของความต้านทานแรงดึงรากและคุณสมบัติการเสริมกำลังเชิงกลของดินหลังจากไฟไหม้พืช Pinus sylvestris ที่ woodland เป็นระยะเวลา 4 ปี พบว่าความต้านทานแรงดึงของรากมีค่าลดลงเหลือเพียง 24% ของรากขณะยังมีชีวิต และในการศึกษานี้รากของหญ้าแพรกที่ถูกเผามีความต้านทานแรงดึงลดลงโดยเฉลี่ย 30% ในเวลาเพียง 12 เดือนหลังจากการเผาหญ้า

ความต้านทานแรงดึงของรากหลังจากถูกเผา จะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงในเวลาต่อมา โดยความต้านทานแรงดึงที่เปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงพืชตายได้มีการนำเสนอโดย Watson et al. (1998) ในรากของพืช Kunzea ericoides ที่เป็นพืชยืนต้น พบว่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นในช่วงแรก 27% และลดลงอย่างคงที่ในช่วงการย่อยสลายของรากเช่นเดียวกันกับการศึกษานี้ โดยการเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงดึงหลังจากสังเกตเป็นเวลา 2 เดือน ของ C. dactylon สามารถอธิบายได้ด้วยการสูญเสียความชื้นของรากและการหดตัวของเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ก่อนหน้านี้โดย Watson et al. (1998) สำหรับรากของพืช K. ericoides และการศึกษาของ Boldrin et al. (2018) สำหรับรากของพืช Ulex europaeus และการศึกษาของ Wu et al. (2021) สำหรับพืช C. zizanioides และผลการทดสอบแสดงถึงการลดลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 1 เดือนหลังจากการเผาหญ้า ความต้านทานแรงดึงลดลงจนเป็นค่าคงที่ จึงตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้ ข้อ 1. ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการคำนวณที่มีการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ข้อ 2. กระบวนการย่อยสลายที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตในดินทำให้รากอ่อนตัวลง และ ข้อ 3. ความต้านทานแรงดึงถึงค่าคงที่ (เช่นที่ 6 เดือน และ 12 เดือน) เนื่องจากเนื้อเยื่อถูกย่อยสลายไปเยอะ เหลือเพียงเนื้อเยื่อที่มีความทนทานต่อชีวภาพสูง (เช่น อัตราส่วนคาร์บอน-ไนโตรเจนสูง) จึงต้องใช้ระยะเวลานานขึ้นเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย่อยสลายเนื้อเยื่อเหล่านี้ ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไปเพื่อยืนยันข้อสมมติฐานนี้ โดยการทดสอบที่ใช้ระยะเวลาการย่อยสลายที่ยาวนานกว่าศึกษานี้

การใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชทำให้รากอ่อนแอเร็วกว่าเมื่อเทียบกับการเผาหญ้า ตัวอย่างเช่น หลังจาก 2 เดือนของการสลายตัวของราก ความต้านทานแรงดึงของรากที่ถูกสารเคมีคือ 54% ของรากที่เผาไหม้ และรากที่ถูกสารเคมีจะไม่มีการเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงดึงในช่วงแรกเหมือนกับรากที่ถูกเผาไหม้ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากไม่มีการเปลี่ยนแปลง แตกต่างกันรากที่ถูกเผาไหม้ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เปลี่ยนไปอาจทำให้มีความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น Hollis et al. (2019) พบความต้านทานเชิงกลลดลง (กำลัง ณ จุดพังทลาย) ในรากของ Spartina patens เติบโตในดินที่ปนเปื้อนด้วยสารเคมีกำจัดวัชพืช atrazine แต่การศึกษามุ่งเน้นไปที่มลพิษในพื้นที่ชุ่มน้ำ ไม่ได้พิจารณาถึงปริมาณสารเคมีที่ทำให้ตายหรือการย่อยสลายของรากตามระยะเวลา การศึกษาของเรานี้จึงมีการตรวจสอบผลจากสารเคมีกำจัดวัชพืชที่มีต่อความต้านทานแรงดึงของรากพืชที่กำลังเจริญเติบโต รากที่ถูกย่อยสลายจากการเผาหญ้าและการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช ซึ่งนำไปสู่การตายและย่อยสลายของรากที่แตกต่างกัน เนื่องจากลักษณะเชิงกลไกแตกต่าง ที่นำไปสู่การตายและการย่อยสลายเน่าเปื่อยของราก และผลกระทบจากไฟต่อรากนั้นจะขึ้นกับความลึกของราก อุณหภูมิและช่วงระยะเวลาเผาไหม้ (Swezy et al. 1991; Vergani et al. 2017) รากพืชที่อยู่ในชั้นดินตื้น ไฟสามารถส่งผลโดยตรงทำให้รากตาย เนื่องจากอุณหภูมิสูง และรากที่อยู่ลึกลงไปก็ยังได้รับผลกระทบจากความเสียหายที่เกิดขึ้นจากด้านบนเช่นกัน ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลทั้งการทำให้รากตาย และมีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแรงดึงราก นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงขณะการเผาหญ้านำไปสู่การสูญเสียความชื้นในดินและราก ทำให้รากพืชเกิดการหดตัวเล็กลง และเพิ่มกำลังความต้านทานแรงดึงของราก ต่อมารากในดินอาจตายลงอย่างช้าๆ เนื่องจากไม่สามารถเจริญเติบโตต่อได้ ขาดการสังเคราะห์แสงจากส่วนที่อยู่เหนือดินขึ้นไป (โดนไหม้จนหมด) และการเผาไหม้อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในดินที่ทำหน้าที่เป็นผู้ย่อยสลายอินทรียวัตถุในดิน (เช่นย่อยสลายราก) จากอุณหภูมิที่สูงและพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ (Certini et al. 2021) แต่ในทางตรงข้าม การใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชอาจทำให้พืชนั้นตายโดยไม่มีผลกระทบทางกายภาพต่อดินและเนื้อเยื่อของราก (เปรียบเทียบกับการทำให้แห้งจากการเผาไหม้) Vergani et al. (2017) ได้ให้แนะนำว่า การย่อยสลายจากการเผาไหม้ที่ woodland รากจะอ่อนแอรวดเร็วกว่าผลจากการตัดไม้เก็บเกี่ยว แต่อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบระหว่างพืชต่างชนิดกัน และสถานที่ศึกษาแตกต่างกันไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้อย่างชัดเจน ในเรื่องความต้านทานแรงดึงที่ลดลงหลังจากถูกไฟเผา และการศึกษารวมไปถึงการคาดการณ์ รากที่อ่อนแอลงจากการย่อยสลายเป็นพื้นฐานสำหรับการพิจารณาลาดชันดินที่อาจเกิดการกัดเซาะและดินถล่มในลาดดินตื้น ตัวอย่างเช่น ช่วงระยะเวลาที่มีความเป็นไปได้ที่อาจเกิดดินถล่มอยู่ในช่วง 3 ถึง 20 ปี หลังจากการตัดไม้ซึ่งกับสายพันธุ์ของพืช (สำหรับพืชไม้ยืนต้น) และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม แม้ว่าปริมาณน้ำฝนยังเป็นตัวการหลักที่ทำให้เกิดดินถล่ม (เนื่องจากการลดลงของ matric suction ในดิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่การพิจารณาถึงข้อมูลอื่นก็จำเป็น (Sidle and Bogaard 2016) และผลจากการศึกษาที่ได้ คือรากจะอ่อนแอลงหลังจากการเผาและการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืช และพบว่าลาดดินจะมีความไวต่อการกัดเซาะหลังจากการเตรียมพื้นที่ในพื้นที่รกร้างและกำจัดวัชพืช ซึ่งสามารถนำไปสู่การถูกกัดเซาะและพังทลายของลาดดิน (Alexandratos and Bruinsma 2012; Fargione et al. 2008) และการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชจะทำให้ลาดดินสูญเสียเสถียรภาพเร็วขึ้น (ในช่วงเดือน) และความต้านทานแรงดึงของรากจะลดลงเร็วกว่า (ในช่วงปี)

4.5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรคุณสมบัติของรากพืช

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่าง ๆ ของรากพืชดำเนินการโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) เพื่อประเมินระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ผลการวิเคราะห์แสดงไว้ในตารางนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่า Pearson's Correlation Coefficient

Pearson correlation coefficient	Root diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Cellulose content (%)	Lignin content (%)	Breakage strain (%)
Root diameter (mm)	-	-0.61	-0.68	-0.30	0.05	-0.26
Tensile strength (MPa)	-0.61	-	0.70	0.46	0.11	0.32
Elastic modulus (MPa)	-0.68	0.70	-	0.50	0.07	0.29
Cellulose content (%)	-0.30	0.46	0.50	-	0.27	0.45
Lignin content (%)	0.05	0.11	0.07	0.27	-	0.13
Breakage strain (%)	-0.26	0.32	0.29	0.45	0.13	-

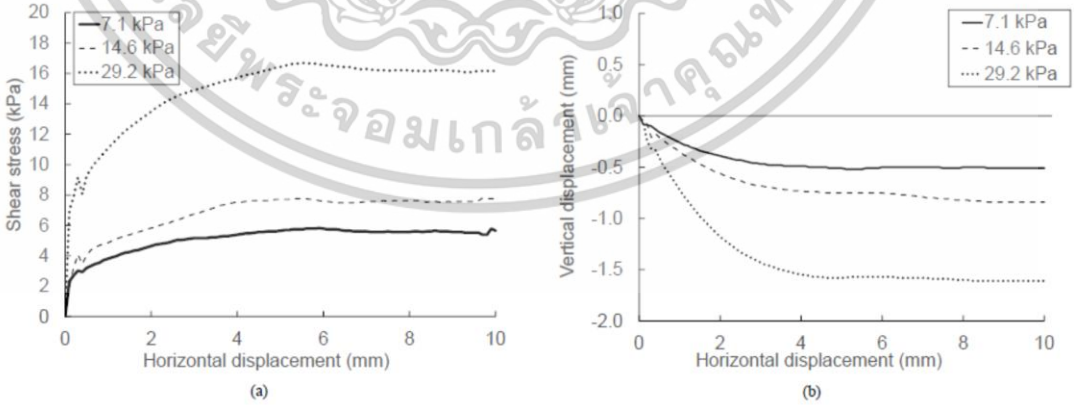
จากข้อมูลที่แสดงในตาราง พบว่า คุณสมบัติทางกลของรากพืช โดยเฉพาะค่ากำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) และมอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus) มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และมีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากและปริมาณเซลลูโลส ตามลำดับ โดยปริมาณเซลลูโลสมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับค่ามอดูลัสยืดหยุ่น ค่ากำลังรับแรงดึง ค่าการเปลี่ยนรูปก่อนขาด (Breakage Strain) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม ปริมาณลิกนินไม่แสดงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับตัวแปรที่ทำการวัดในตารางนี้แต่อย่างใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน ในช่วงการเปลี่ยนแปลง

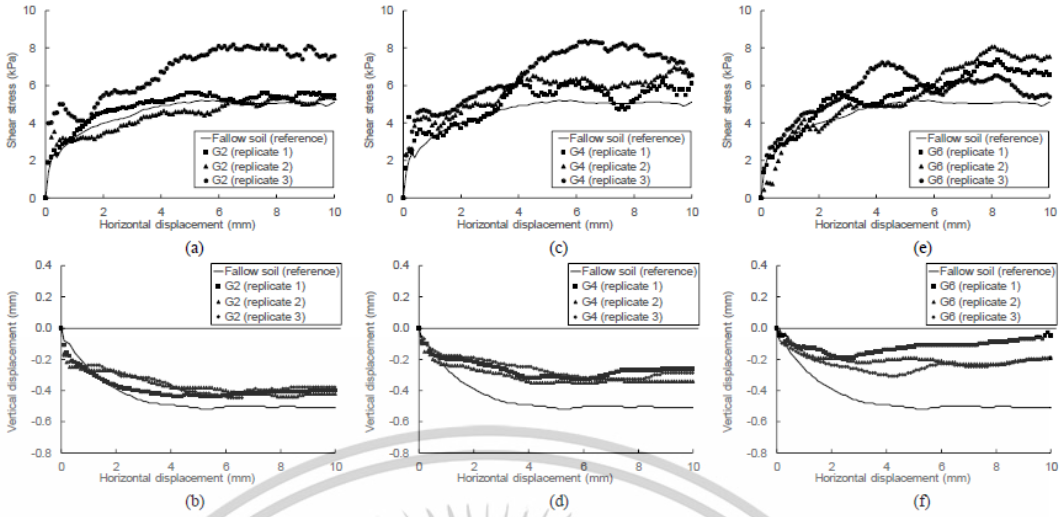
5.1 ผลจากการเจริญเติบโตของรากพืช

พฤติกรรมของการรับแรงเฉือนในดินเปล่า จะแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งโดยทั่วไป ดินจะมีลักษณะของการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (strain-hardening behaviour) ตลอดช่วงของความเค้นที่ได้รับ (stress levels) และทำให้เกิดการหดตัวลงของปริมาตร (volumetric contraction) ในตอนรับแรงเฉือน โดยในขณะช่วงการวิเคราะห์ข้อมูลแรงเฉือนจาก Mohr–Coulomb failure envelop พบว่าค่า effective cohesion (c') มีค่าเท่ากับ 1.4 kPa และ effective peak friction angle (ϕ_p') มีค่าเท่ากับ 28.2° และรูปที่ 5.2 แสดงถึงการเปรียบเทียบพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินที่มีพืชในช่วงอายุการเจริญเติบโต (เช่น ที่ 2, 4 และ 6 เดือน) กับพฤติกรรมของดินเปล่า พบว่ามีความเปลี่ยนแปลงของแรงเฉือน และระยะการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง เนื่องมาจากรากพืชในช่วงการเจริญเติบโตและคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง ถึงแม้ว่าจะเจริญเติบโตภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมือนกัน โดยเส้นกราฟระหว่างแรงเฉือนและการเคลื่อนที่แนวราบ ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นคลื่น (ซึ่งในกรณีของดินเปล่าจะไม่เป็น) ซึ่งการค้นพบนี้อาจบ่งชี้ถึงการพังทลายแบบ progressive root failure หลังจากการลื่นหลุดหรือการขาดของรากพืชขณะรับแรงเฉือน (รายละเอียดเกี่ยวกับลักษณะการพังของดินที่มีรากพืชจะกล่าวในภายหลัง) ซึ่งมีส่วนทำให้เกิดความแปรปรวนของข้อมูล และถึงแม้ว่าจะมีความแปรปรวนในข้อมูล แต่พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชก็เป็นไปตามลักษณะของ strain-hardening behaviour (ดังแสดงในรูปที่ 5.2a, c และ e)



รูปที่ 5.1 พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินเปล่า (a) ค่ากำลังรับแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของตัวอย่างทดสอบ (b) การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวราบของตัวอย่างในช่วงรับแรงเฉือนที่มีแรงกระทำ Normal stress เท่ากับ 7.1, 14.6 และ 29.2 kPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

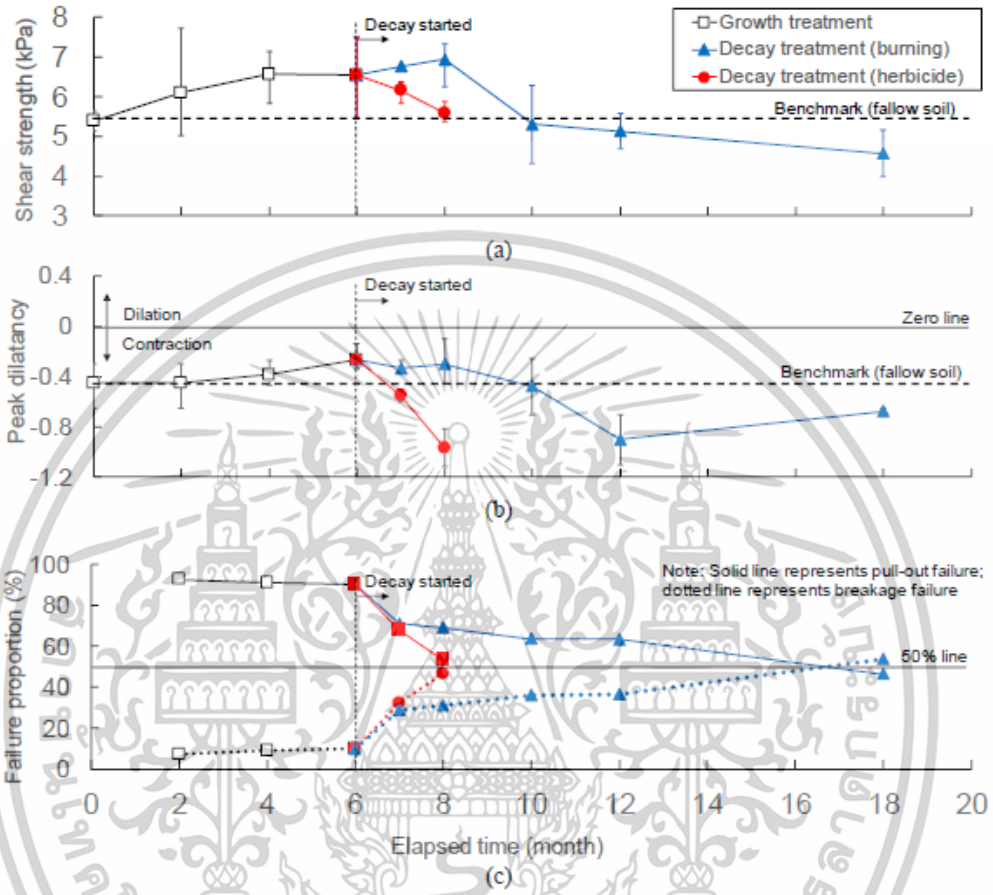


รูปที่ 5.2 พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชในช่วงการเจริญเติบโต 2, 4, 6 เดือน (a,c,e) ค่ากำลังรับแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของตัวอย่างทดสอบ (b,d,f) การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวราบของตัวอย่างในช่วงรับแรงเฉือนที่มีแรงกระทำ Normal stress 7.1 kPa

ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดของดินที่มีรากพืช (เช่นค่าความแข็งแรงเมื่อสิ้นสุดการเฉือนที่ระยะการเคลื่อนที่ 10 mm) จะสูงกว่าค่าที่ได้จากดินเปล่าเสมอ ดังรูปที่ 5.3a ที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงเฉือนโดยเฉลี่ย ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาของดินที่มีรากพืช และผลการวิจัยพบว่ากำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการเจริญเติบโต และในงานวิจัยของ Yildiz et al. (2018), D'Souza et al., (2019) และ Mahannopkul and Jotisankasa (2019) สังเกตพบว่า ค่ากำลังรับแรงสูงสุดของดินจะเพิ่มขึ้น เมื่อชีวมวลของราก (root biomass) เพิ่มสูงขึ้น และจากผลการศึกษาที่ได้ความสัมพันธ์จะแปรผันตามกันอย่างมีนัยสำคัญในรูปที่ 5.4 โดยในการศึกษานี้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงในดิน ซึ่งจะสามารถอธิบายได้จาก ความแข็งแรงของราก root strength (25.8%) ค่าโมดูลัส modulus (36.0%) และชีวมวลของราก root biomass (1.6%) โดยการเจริญเติบโตของระบบรากอาจประกอบไปด้วยการย่อยสลายของราก การลดลงของความแข็งแรงราก และการลดลงของค่าโมดูลัส เมื่อไม่พิจารณาถึงระยะเวลาการเจริญเติบโต ลักษณะการพังจากรากจะเกิดจาก การลื่นหลุดออกของรากหรือถูกถอนออก pull-out (มากกว่า 90%) และการขาดของราก breakage (น้อยกว่า 10%) ดังแสดงในรูปที่ 5.3c และถึงแม้ว่าการเคลื่อนตัวเนื่องจากแรงเฉือนเช่นที่ 10 mm จะมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะทำให้ดินพังทลายได้ แต่น้อยเกินไปที่จะทำให้รากพืชรับกำลังเต็มความสามารถจนถึงการขาดของราก โดยการค้นพบนี้สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่าง กำลังรับแรงเฉือนของดินกับโมดูลัสของราก (R^2 = 0.360; p-value < 0.01; ดังรูปที่ 5.4b) และพบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินกับกำลังรับแรงของราก (R^2 = 0.258; p-value < 0.01; ดังรูปที่ 5.4b) และกำลังรับแรงของรากมีความแปรผันกับโมดูลัส

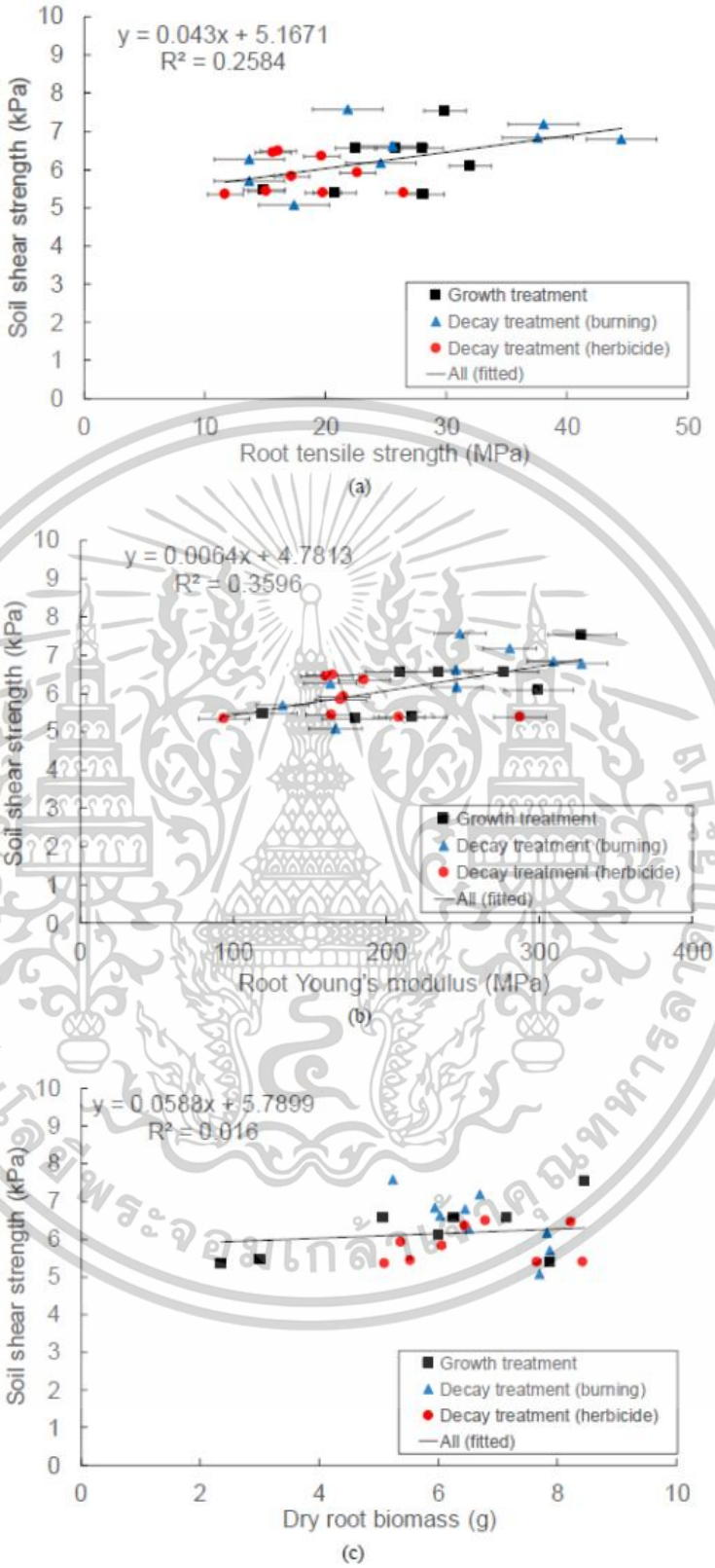
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของราก (p-value < 0.001; ไม่ได้แสดงข้อมูล) ซึ่งพบได้ในพันธุ์พืชล้มลุก herbaceous species (เช่น การศึกษาของ Wu et al. 2021) และในพันธุ์ไม้ยืนต้น (เช่นการศึกษาของ Boldrin et al. 2017).



รูปที่ 5.3 การเปลี่ยนแปลงของ (a) ค่ากำลังรับแรงเฉือน (b) ค่าการขยายตัว และ (c) สัดส่วนการขาดของรากพืช ในช่วงระยะเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดิน กับ (a) กำลังรับแรงดึงของรากพืช (b) ค่ายังโมดูลัสของรากพืช และ (c) ค่าชีวมวลของรากพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การค้นพบในรูปที่ 5.3 และ รูปที่ 5.4 สามารถบ่งบอกถึง การใช้แบบจำลองเสริมกำลังรับแรงจากรากพืชที่พิจารณาการพังเนื่องจากการขาดพร้อมกันทั้งหมดของรากพืช จะไม่เหมาะสมสำหรับการคาดการณ์ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินสำหรับช่วงการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือนหรือความเค้นในระดับทั่วไปที่มักเกี่ยวข้องกับการนำไปใช้ในลาดดิน และในเชิงประจักษ์ ปัจจัยการเสริมกำลังของรากพืช (เช่น root cohesion ซึ่งเป็นคำศัพท์ที่ถูกใช้บ่อยในงานวิจัยที่ผ่านมา เช่นงานวิจัยของ Kamchoom and Leung 2018; Liang et al. 2020) ในสภาวะมีแรงดันดินด้านข้างเท่ากัน เมื่อเทียบกับดินเปล่า จะสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนในดินได้มากกว่าเนื่องจากรากพืช แต่ก็ควรระวังเรื่องการเสริมกำลังของดินซึ่งไม่ได้เพิ่มขึ้นจากกำลังรับแรงดึงของรากเพียงอย่างเดียว เนื่องจากในสภาวะปกติดินจะพังทลายที่ความเค้นน้อยกว่ามาก ซึ่งรากอาจช่วยรับแรงดึงเพียงบางส่วน และในกรณีนี้ ควรพิจารณาเพิ่มเติมถึงคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ของราก ค่ายังโมดูลัสของราก ซึ่งอธิบายถึงกำลังรับแรงของรากพืชในช่วงการรับแรงช่วงเริ่มต้น และควรพิจารณาเมื่อปัจจัยต่างๆของการเสริมกำลังรับแรงของรากรวมกัน โดยวิธีการพิจารณาการรวมกันของค่าโมดูลัสของรากกับปัจจัยการเสริมกำลังของรากยังคงเป็นคำถามปลายเปิด และจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตด้วยแบบจำลองเชิงกลของรากพืชกับดิน และในบางสภาวะที่รุนแรง เช่นการขาดน้ำในราก (root dehydration) อาจสามารถช่วยเสริมกำลังรับแรงดึง tensile strength และต้านทานการขาด breakage ของรากในช่วง small strain (เช่นตัวอย่างงานวิจัยของ Boldrin et al. 2018; Wu et al. 2021) เนื่องจากความหลากหลายของพืชด้านสรีรวิทยา (plant physiological เช่นการหายใจของพืช respiration และการคายน้ำ transpiration) สภาพแวดล้อม (environmental conditions เช่น ดินแห้ง soil drying) และการตายหรือการย่อยสลายของรากพืช โดยการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ ควรพิจารณาร่วมกับ ปริมาณน้ำในราก (root water status) และลักษณะการแลกเปลี่ยนน้ำระหว่างดินกับรากพืช (soil–root water exchange mechanism) (ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Leung et al. 2019) สำหรับการคาดการณ์ผลจากการเสริมกำลังรับแรงของดินเนื่องจากรากพืช

ปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอีกประการหนึ่ง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 5.3b คือ ดินที่มีพืชปลูกอยู่นั้นจะมีการหดตัวลงที่น้อยกว่าดินเปล่า หรือก็คือการเพิ่มขึ้นของค่า dilatancy (คือความลาดชันสูงสุดของเส้นโค้งการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งกับเส้นโค้งการเคลื่อนที่ในแนวราบ) อันเนื่องมาจากรากพืชที่อยู่ในดิน และมีการค้นพบที่คล้ายคลึงกัน (เช่น การเพิ่มขึ้นของค่า dilatancy เนื่องจากรากพืช ในงานวิจัยของ Mahannopkul and Jotisankasa 2019; Yildiz et al. 2018; Karimzadeh et al. 2021, 2022) โดยการเปลี่ยนแปลงของค่า dilatancy อันเนื่องมาจากรากพืชเกิดจากหลากหลายปัจจัย รวมไปถึงคุณสมบัติการบดอัดเชิงกล mechanical confinement (Karimzadeh et al. 2021) ระดับการอิ่มตัวด้วยน้ำในดิน soil degree of saturation (Mahannopkul and Jotisankasa 2019) ปริมาณชีวมวลของราก root biomass (Yildiz et al. 2018; Karimzadeh et al. 2021) และความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการวางตัวของรากพืชกับแนวความเค้น (Karimzadeh et al. 2022)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหากผลจากการเสริมกำลังของรากฝอยหรือรากขนาดเล็ก fibrous root (เช่นในกรณีของหญ้าแพรก หญ้าเบอร์มิวด้าในการศึกษานี้) มีความคล้ายเคียงกับกรณีของเส้นใย fibers ดังสมมติฐานของ Diambra et al. (2010) และ Muir Wood et al. (2016) อาจใช้เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ในรูปที่ 5.3b ถึงเส้นใยหรือรากพืชที่แทรกเข้าไปในบางส่วนของช่องว่างในดิน ทำให้อัตราส่วนช่องว่างลดลง ดินแน่นขึ้น ซึ่งหมายถึงการลดค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยบางอย่าง (เช่น กำลังรับแรงเฉือนของดินเข้าใกล้กับเส้น critical-state line มากยิ่งขึ้น และน่าเสียดายที่ข้อมูลของพฤติกรรมเชิงปริมาตรในดินที่มีรากพืชนั้นมีไม่เพียงพอ ในงานวิจัยที่ผ่านมา โดยเฉพาะเส้นกราฟ critical-state line ของหญ้าที่มีรากพืชยังไม่สามารถตรวจสอบเพิ่มเติมได้ในขณะนี้

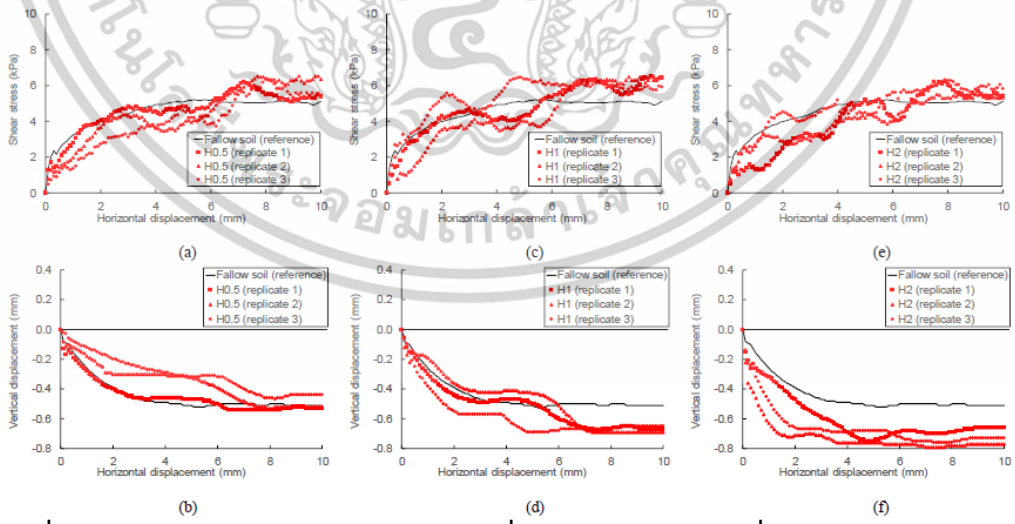
5.2 ผลจากการย่อยสลายของรากพืช

หลังจากการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช (รูปที่ 5.5a, c และ e) และการเผาไหม้ (รูปที่ 5.6a, c และ e) เมื่อไม่พิจารณาถึงระยะเวลาการย่อยสลาย ดินที่มีรากพืชทุกตัวอย่างจะมีพฤติกรรมแบบ strain-hardening เช่นเดียวกับดินเปล่า (ในรูปที่ 5.1) โดยการย่อยสลายทั้งสองแบบ ค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุด ultimate shear strength ของดินที่มีรากพืชอยู่ ไม่ได้สูงกว่าดินเปล่าเสมอไป มีแนวโน้มดังแสดงในรูปที่ 5.3a ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของดินที่ลดลงตามระยะเวลาการย่อยสลายของรากที่เพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับการลดลงของความแข็งแรงราก root strength กับโมดูลัสของราก root modulus (รูปที่ 5.4) โดยในกรณีการเผาหญ้า ค่าความแข็งแรงของดินจะลดลงต่ำกว่าดินเปล่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป 4 เดือน (ในรูปที่ 5.6) และหลังจากผ่านไป 1 ปี ค่าความแข็งแรงจะเหลือเพียง 80% เทียบกับดินเปล่า และจะลดลงอย่างรวดเร็วมากกว่าในกรณีของการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช (รูปที่ 5.3 และ รูปที่ 5.5) ตัวอย่างเช่นความแข็งแรงของดินจะลดลงประมาณ 40% ในระยะเวลา 2 เดือนหลังจากการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช และลดลงใกล้เคียงกันเมื่อผ่านไป 4 เดือนหลังจากการเผาหญ้า โดยขนาดและแนวโน้มของการลดลงที่พบในการศึกษานี้ จะมีความแตกต่างกับการศึกษาของ Zhu et al. (2020) ซึ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงเฉือนในดินที่มีรากพืชของพืชไม้ยืนต้น หลังจากการตัดไม้เก็บเกี่ยว พบว่าการเสริมกำลังเนื่องจากรากพืชจะลดลง 50% ในระยะเวลาไม่เกิน 1 ปี และรายงานว่ากำลังรับแรงเฉือนจะลดลงเล็กน้อยในช่วงแรก แต่มีนัยสำคัญเพิ่มขึ้นหลังจากช่วง 3 เดือน โดยชนิดพืชที่ทดสอบ (เช่นรากของพืชแบบไม้ล้มลุก กับไม้ยืนต้น) คุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ และลักษณะการจัดเรียงตัวของราก ระหว่างการศึกษาทั้งสอง พบว่าการเคลื่อนตัวของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะการเคลื่อนที่มีความคล้ายเคียงกัน ตลอดช่วงระยะเวลาที่รากย่อยสลาย (เช่นที่ 12 เดือน) แต่ไม่ได้นำเสนอข้อมูลในส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน โดยในการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงดินที่มีรากพืช หลังจากการเผาหญ้าหรือการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช จะมีความเหนียว ductile และหดตัว contractive มากยิ่งขึ้น ตามระยะเวลาการย่อยสลายที่เพิ่มขึ้น และตรงกันข้ามกับสิ่งที่สังเกตพบในช่วงการเจริญเติบโตของรากพืช โดยกระบวนการของการย่อยสลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

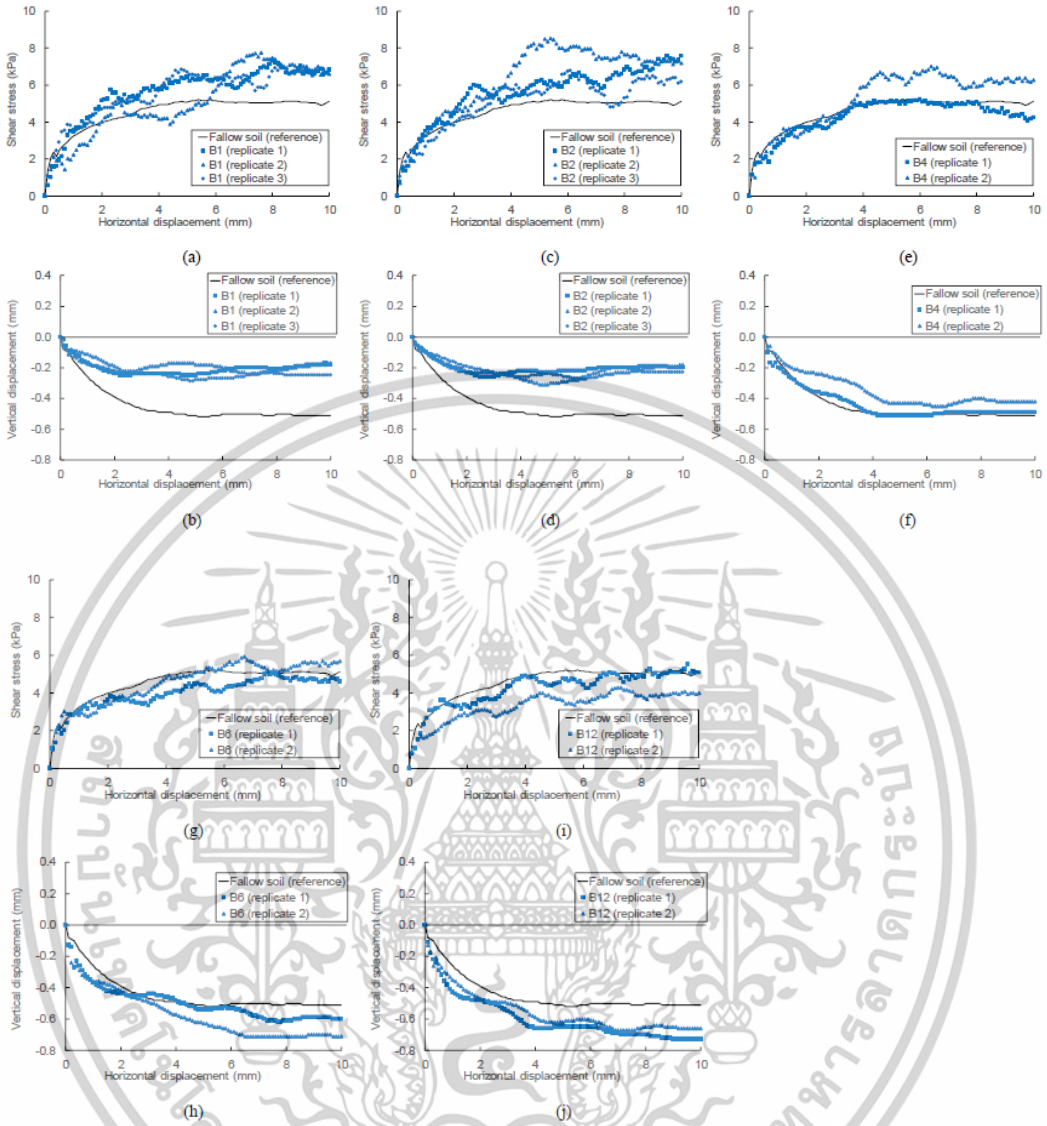
ของรากพืช ทั้งจากการเผาหญ้าหรือการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช จะพบว่ามีเพิ่มขึ้นของการหดตัวเชิงปริมาตรอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 5.3b) และในงานวิจัยของ Diambra et al. (2010) และ Muir Wood et al. (2016) มีสมมติฐานเดียวกันคือ การเพิ่มขึ้นของการหดตัวเชิงปริมาตรที่เกี่ยวข้องกับรากพืช เนื่องมาจากการย่อยสลาย อาจเกี่ยวข้องกับการลดลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก root diameter และการเพิ่มขึ้นของช่องว่างในดินที่เคยมีรากอยู่ แต่เมื่อรากเน่าเปื่อยและสูญเสียมวลชีวภาพจึงอาจทำให้ดินเกิดช่องว่าง ซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

เมื่อระยะเวลาช่วงการย่อยสลายของรากพืชเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.3c สัดส่วนของการพังเนื่องจากราก เกิดจากการถูกถอนออกหรือลื่นหลุดออกของราก pull-out จะลดลงและต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการสังเกตที่ได้จากช่วงเจริญเติบโตเป็นอย่างมาก และในระยะสุดท้ายที่ศึกษาการย่อยสลายจากการเผาหญ้า (ที่12 เดือน) และการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช (ที่ 2 เดือน) ประมาณ 50% ของรากจะเกิดการขาด breakage โดยในช่วงของค่า root breakage strain และ root modulus จากสาเหตุการย่อยสลายทั้งสองจะมีค่าต่ำกว่า และสูงกว่า อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับช่วงเจริญเติบโตตามลำดับ ซึ่งการค้นพบนี้หมายถึง รากที่ย่อยสลายจะสามารถรับแรงดึงได้รวดเร็วมากกว่ารากที่ไม่มีการย่อยสลาย และอธิบายถึงสัดส่วนที่สูงขึ้นของการขาดของรากระหว่างการเฉือน (รูปที่ 5.3c) และมีความสัมพันธ์แปรผันตามกันระหว่างค่าความแข็งแรงของดิน กับความแข็งแรงของรากพืช ในช่วงการย่อยสลายทั้งสองแบบ แต่โดยประมาณ 70% ของรากจะพังแบบลื่นหลุดออก โดยเฉพาะช่วงระยะแรกของการย่อยสลาย และการย่อยสลายเหล่านี้จะทำให้การพิจารณากำลังรับแรงของดินที่มีความเกี่ยวข้องกับรากมักจะประเมินกำลังรับแรงเฉือนสูงเกินความเป็นจริง



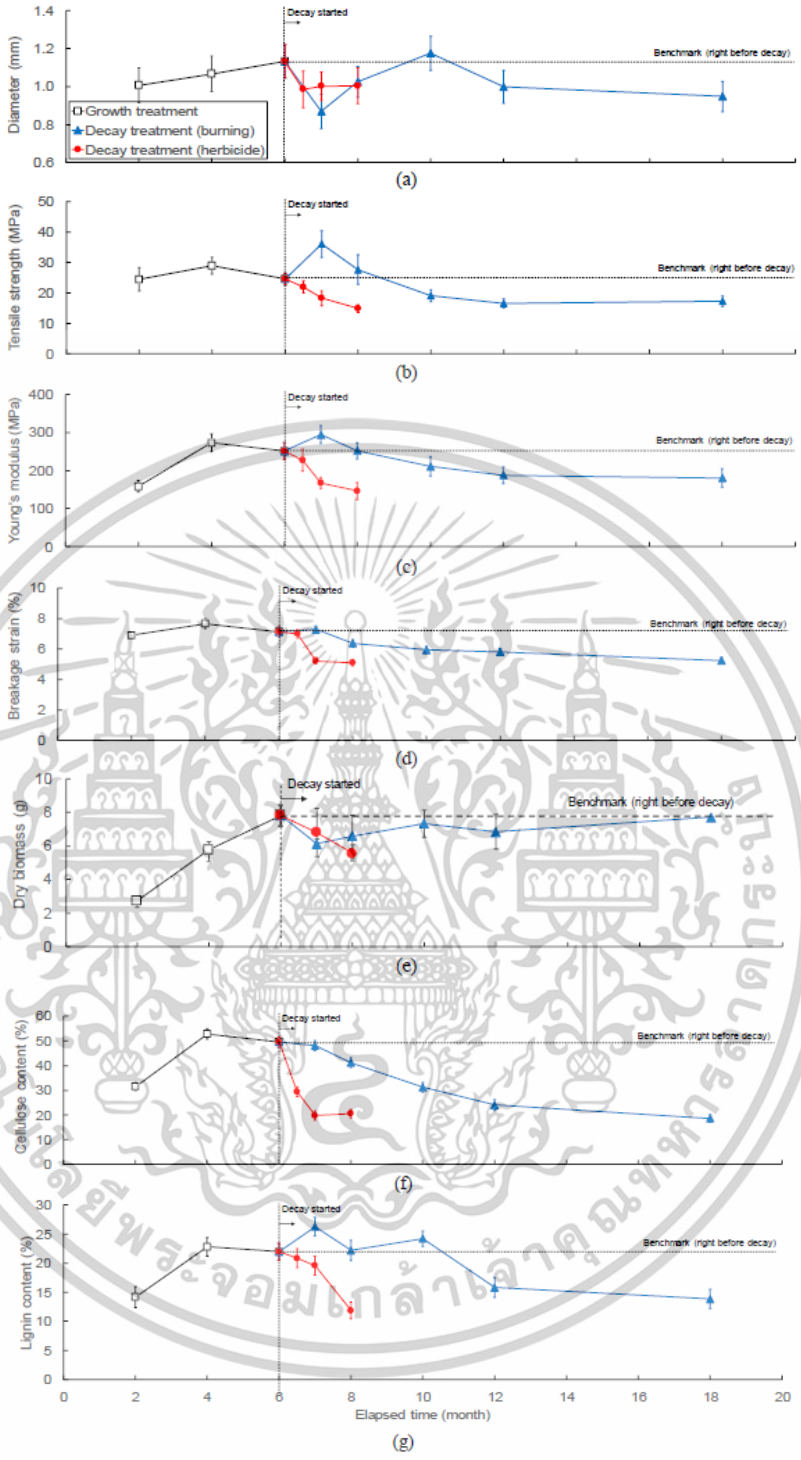
รูปที่ 5.5 พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชในช่วงการเสื่อมสภาพจากการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืช 0.5, 1, 2 เดือน (a,c,e) ค่ากำลังรับแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของตัวอย่างทดสอบ (b,d,f) การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวราบของตัวอย่างในช่วงรับแรงเฉือนที่มีแรงกระทำ Normal stress เท่ากับ 7.1 kPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชในช่วงการเสื่อมสภาพจากการเผาไหม้ 1, 2, 4, 6, 12 เดือน (a,c,e,g,i) ค่ากำลังรับแรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ในแนวราบของตัวอย่างทดสอบ (b,d,f,h,j) การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งและแนวราบของตัวอย่างในช่วงรับแรงเฉือนที่มีแรงกระทำ Normal stress เท่ากับ 7.1 kPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



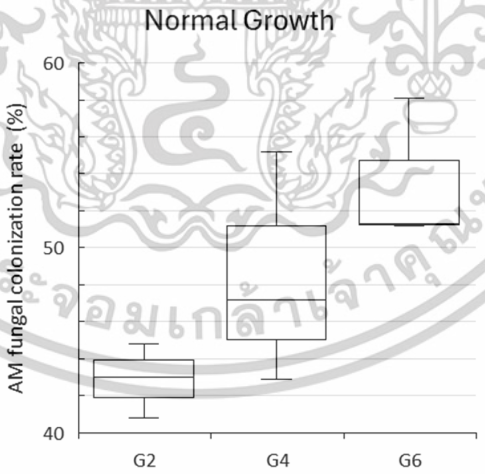
รูปที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงของ (a) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก, (b) กำลังรับแรงดึงของราก, (c) ยังโมดูลัสของราก, (d) ค่าความเครียดจากการดึงรากทดสอบ, (e) ปริมาณชีวมวลแห้งในราก , (f) ปริมาณเซลลูโลสในราก, (g) ปริมาณลิกนินในราก ในช่วงระยะเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
ผลการทดสอบการเสริมคุณสมบัติของรากพืชด้วย AM fungi

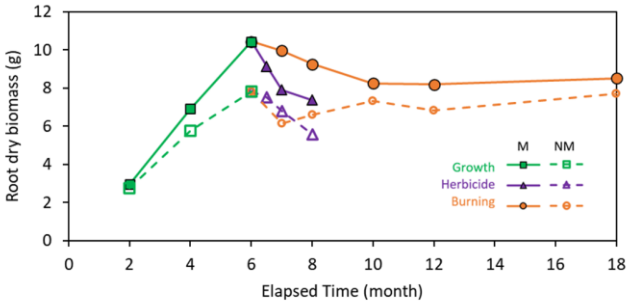
6.1 อัตราการเจริญเติบโตของ AM fungi และชีวมวลของราก

ในช่วงการเจริญเติบโตของราก อัตราการเจริญเติบโตของ AM fungi หรือ AM fungal colonization จะมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นคือ 43% ในช่วง 2 เดือน 48% ในช่วง 4 เดือน และ 54% ในช่วง 6 เดือน ดังรูปที่ 6.1) และในกลุ่มตัวอย่าง (M) ที่มี AM fungi จะมีปริมาณชีวมวลรากมากกว่ากลุ่มตัวอย่าง (NM) ที่ไม่มี AM fungi (รูปที่ 6.2) โดยมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วง 4 เดือน และเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 6 เดือน ดังนั้นในกรณีของ M จึงให้มวลรากที่มากขึ้น สำหรับการย่อยสลายหลังจากการใช้สารเคมีป้องกันวัชพืชและการเผา ระหว่างการย่อยสลาย พืชที่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าแสดงมวลรากมากกว่าพืชที่ไม่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าในทุกขั้นตอนของการย่อยสลาย สำหรับการเสื่อมสภาพด้วยสารเคมีกำจัดวัชพืช แม้ว่าความแตกต่างในมวลราก (ระหว่าง M และ NM) จะไม่มีนัยสำคัญในช่วง 0.5 และ 1 เดือน แต่ความแตกต่างนี้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีนัยสำคัญหลังจากการย่อยสลาย 2 เดือน สำหรับการเสื่อมสภาพจากการเผาไหม้ ก็มีแนวโน้มโดยทั่วไปว่าพืชที่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าเก็บรักษามวลรากได้มากกว่าพืชที่ไม่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าในระหว่างการย่อยสลาย



รูปที่ 6.1 อัตราการเจริญเติบโตของ AM fungi ในรากพืชช่วงการเจริญเติบโต 2, 4, 6 เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

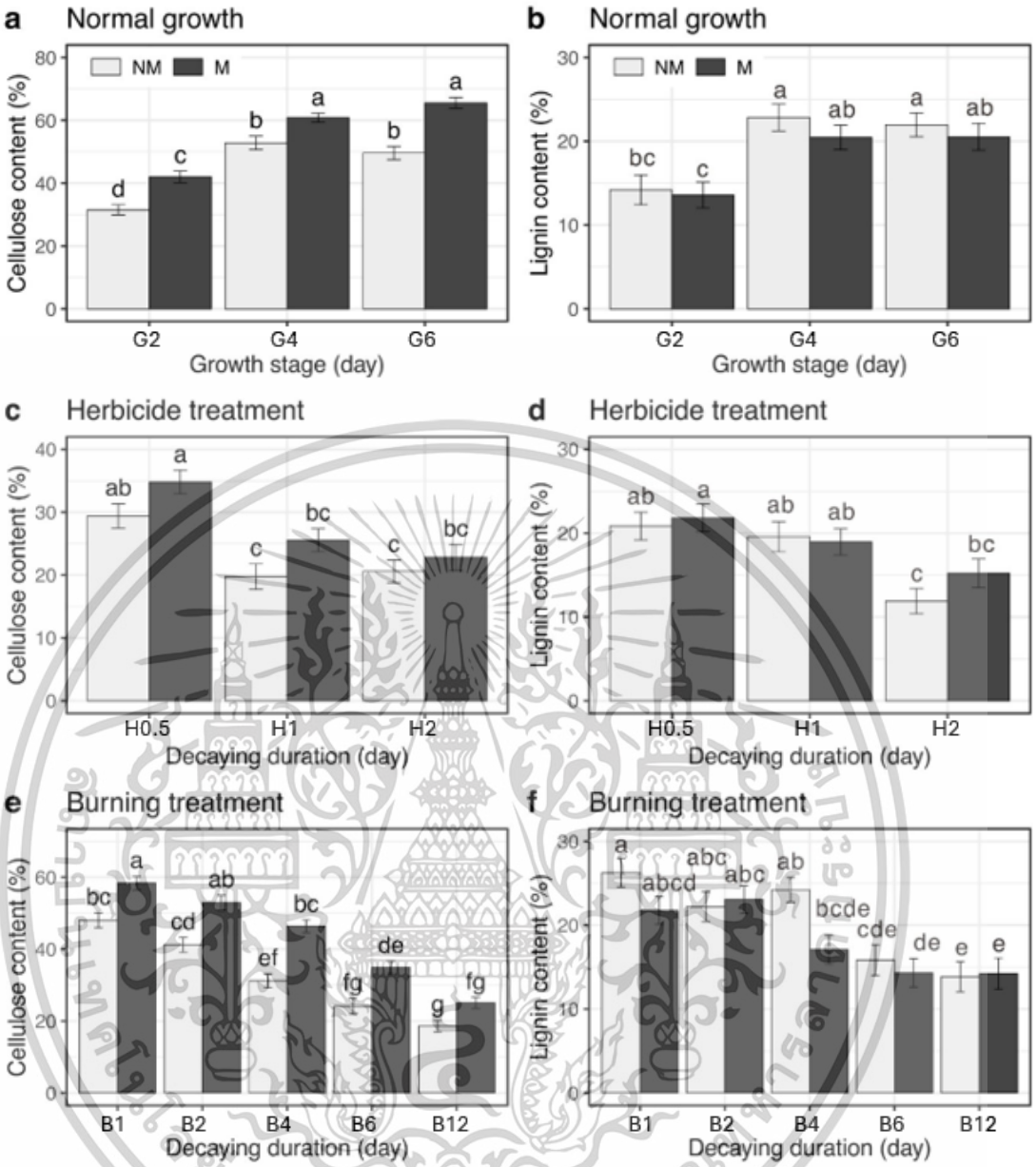


รูปที่ 6.2 ปริมาณชีวมวลของรากแห้ง ในช่วงการเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพเนื่องจากการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืช และการเผาไหม้

6.2 ผลจาก AM fungi ต่อปริมาณเซลลูโลสและลิกนินในราก

ในช่วงการเจริญเติบโตของราก ในกลุ่มตัวอย่าง (NM) ที่ไม่มี AM fungi ค่าเฉลี่ยของปริมาณเซลลูโลสในรากคือ 31.5%, 52.8%, และ 49.6% ในเดือนที่ 2, 4, และ 6 ตามลำดับ (รูปที่ 6.3) ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ประมาณ 67% จากเดือนที่ 2 ถึง 4 แต่ไม่ได้มีการเพิ่มขึ้นเพิ่มเติมจากเดือนที่ 4 ถึง 6 สำหรับกลุ่มที่มีการฉีดจุลินทรีย์ (M) ปริมาณเซลลูโลสในรากคือ 42.0%, 60.8%, และ 65.6% ในเดือนที่ 2, 4, และ 6 ตามลำดับ ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ประมาณ 45% จากเดือนที่ 2 ถึง 4 และเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง ($P < 0.05$) ประมาณ 8% จากเดือนที่ 4 ถึง 6 (รูปที่ 6.3) การฉีดจุลินทรีย์มีผลเพิ่มปริมาณเซลลูโลสในรากอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่มีการฉีดจุลินทรีย์ โดยเพิ่มขึ้น 33%, 15%, และ 32% ในเดือนที่ 2, 4, และ 6 ตามลำดับ โดยรวมแล้ว การฉีดจุลินทรีย์ AM fungi เพิ่มการสะสมเซลลูโลสในทุกขั้นตอนของการเจริญเติบโต และยังช่วยเพิ่มปริมาณเซลลูโลสในขั้นตอนสุดท้าย (G6 เทียบกับ G4) ซึ่งไม่พบในกลุ่ม NM (รูปที่ 6.3a) นอกจากนี้ ปริมาณลิกนินในรากเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากเดือนที่ 2 ถึง 4 แต่ไม่มีการเพิ่มขึ้นในช่วง 6 เดือน (รูปที่ 6.3b) การฉีดจุลินทรีย์ AM fungi ไม่มีผลที่มีนัยสำคัญในการเปลี่ยนแปลงปริมาณลิกนินและอัตราการเพิ่มขึ้นตามเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินของรากพืชในช่วง (a,b) การเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพเนื่องจากการได้รับ (c,d) สารเคมีกำจัดวัชพืช และ (e,f) การเผาไหม้

หลังจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช ค่าเฉลี่ยของปริมาณเซลลูโลสในรากลดลงประมาณ 30% จากช่วง 0.5 ถึง 1 เดือน สำหรับทั้งกลุ่ม M และ NM (รูปที่ 6.3c) แต่ในช่วงเดือนที่ 1 ถึง 2 ค่าเฉลี่ยของปริมาณเซลลูโลสในรากไม่ได้ลดลง ปริมาณเซลลูโลสสุดท้ายสำหรับกลุ่ม NM และ M ในเดือนที่ 2 คือ 20.6% และ 22.8% ตามลำดับ (รูปที่ 6.3c) ส่วนปริมาณลิกนินในรากก็ลดลงเช่นกันในช่วง 0.5 ถึง 2 เดือน (รูปที่ 6.3d การลดลงนี้ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจาก 0.5 ถึง 1 เดือน แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากเดือนที่ 1 ถึง 2 สำหรับกลุ่ม NM สำหรับกลุ่ม M ปริมาณลิกนินไม่ได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจากเดือนที่ 1 ถึง 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากการเผาไหม้ แนวโน้มการลดลงของปริมาณเซลลูโลสในรากของทั้งกลุ่ม NM และ M จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเห็นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลง (รูปที่ 6.3e และ f) แต่ในช่วงของการเสื่อมสภาพ พืชที่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่ามีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าพืชที่ไม่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าโดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นระหว่าง 21.5% – 48.7% สำหรับทั้งสองกลุ่ม ในขณะที่ปริมาณลิกนินโดยทั่วไปลดลงประมาณ 40% ตามเวลา จากเดือนที่ 1 ถึง 12 ไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญในปริมาณลิกนินระหว่างกลุ่ม NM และ M ในแต่ละช่วงของการเสื่อมสภาพ สำหรับกลุ่ม NM มีการลดลงที่มีนัยสำคัญในปริมาณลิกนินจากเดือนที่ 4 ถึง 6 ในขณะที่สำหรับกลุ่ม M การลดลงที่เด่นชัดที่สุดเกิดขึ้นก่อน (แม้ว่าจะไม่มีนัยสำคัญตามการทดสอบ Tukey's HSD) จากเดือนที่ 2 ถึง 4

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเซลลูโลสได้รับผลกระทบจากการมีอยู่ของ AM fungi อย่างมีนัยสำคัญทั้งในกลุ่มที่เจริญเติบโตปกติและการเสื่อมสภาพด้วยการเผาไหม้ แต่ไม่พบในกลุ่มที่เสื่อมสภาพด้วยสารเคมีกำจัดวัชพืช ส่วนกรณีของปริมาณลิกนิน ไม่ได้รับผลกระทบจากการมีอยู่ของ AM fungi

6.3 ผลจาก AM fungi ต่อคุณสมบัติชีวกลศาสตร์ของรากพืช

ในช่วงการเจริญเติบโตของราก ในกลุ่มตัวอย่าง NM ค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) คือ 24.5 MPa, 29 MPa, และ 24.7 MPa ในเดือนที่ 2, 4, และ 6 ตามลำดับ (รูปที่ 6.4a) ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ 18% จากเดือนที่ 2 ถึง 4 แต่ลดลงจากเดือนที่ 4 ถึง 6 สำหรับกลุ่มตัวอย่าง M ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยคือ 25 MPa, 26 MPa, และ 32 MPa ในเดือนที่ 2, 4, และ 6 ตามลำดับ ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 4% จากเดือนที่ 2 ถึง 4 และเพิ่มขึ้นต่อเนื่องประมาณ 23% จากเดือนที่ 4 ถึง 6 (รูปที่ 6.4a) และในกลุ่มตัวอย่าง M ที่มี AM fungi จะสามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่มี AM fungiโดยเพิ่มขึ้น 35% ใน 6 เดือน (จาก 24.6 MPa เป็น 33.3 MPa) แต่การมีอยู่ของ AM fungi ไม่ได้ปรับปรุงความต้านทานแรงดึงในช่วงการเจริญเติบโตเริ่มต้น แต่ได้เพิ่มความต้านทานแรงดึงในช่วงท้าย (G6 เมื่อเปรียบเทียบกับ G2 และ G4) (รูปที่ 6.4a)

สำหรับกลุ่มตัวอย่าง NM จะมีค่า Young's modulus เท่ากับ 158 MPa, 273 MPa, และ 251 MPa ในเดือนที่ 2, 4, และ 6 ตามลำดับ (รูปที่ 6.4b) และสำหรับกลุ่มตัวอย่าง M ค่า Young's modulus คือ 195 MPa, 276 MPa, และ 318 MPa ในเดือนที่ 2, 4 และ 6 ตามลำดับ การมีอยู่ของ AM fungi มีผลกระทบน้อยในช่วง 2 ถึง 4 เดือน (G2 และ G4) แต่ในช่วงท้ายที่ 6 เดือน (G6) แสดงการพัฒนาอย่างเด่นชัดเมื่อเปรียบเทียบกับ G2 โดยหลังจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของทั้งกลุ่ม M และ NM ลดลงอย่างมากระหว่าง 0.5 ถึง 1 เดือน (รูปที่ 6.4c) นอกจากนี้ ทั้งกลุ่ม NM และ M ยังลดลงเพิ่มเติมจากเดือนที่ 1 ถึง 2 โดยในเดือนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

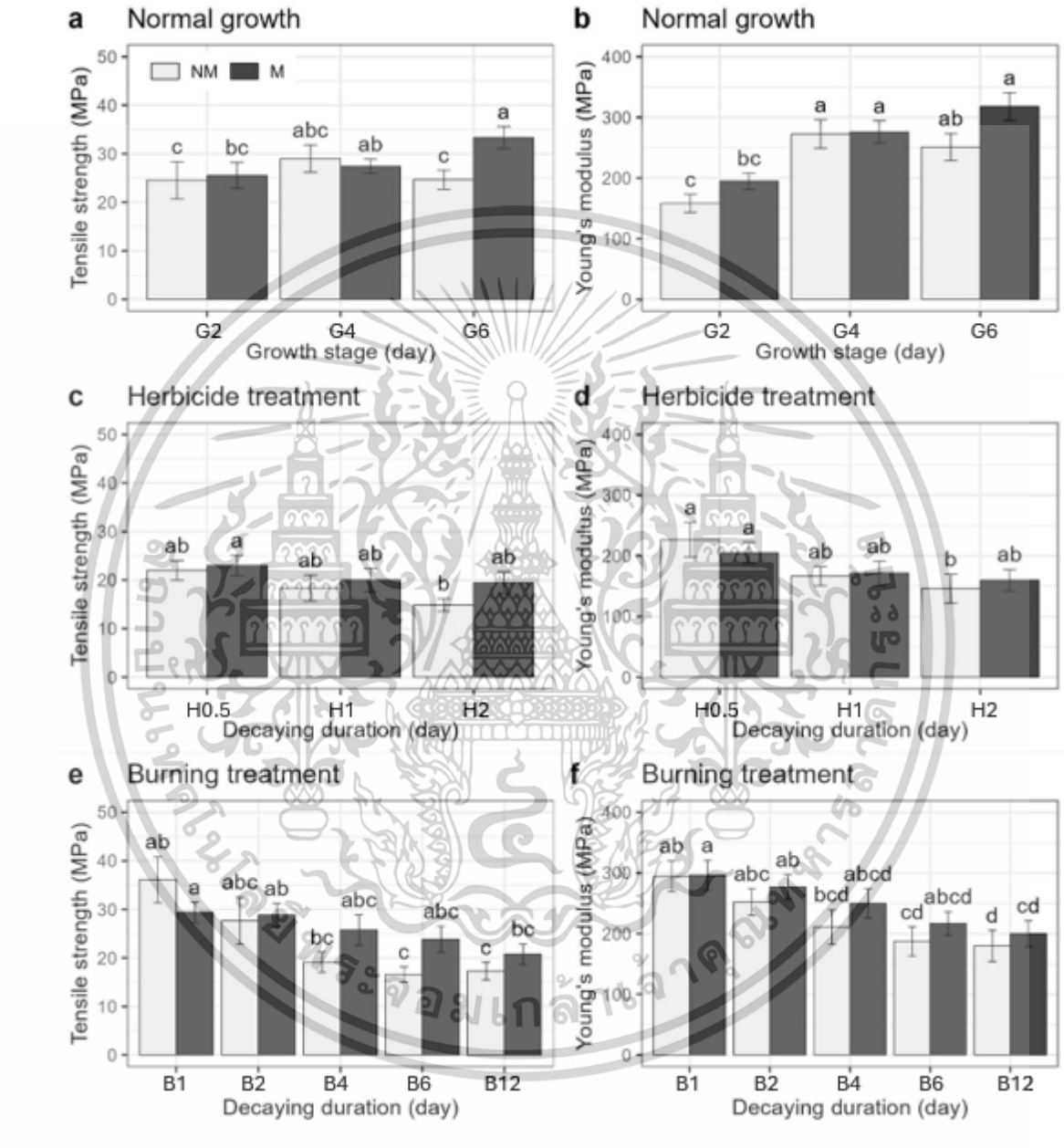
2 ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของกลุ่ม NM และ M คือ 14.9 MPa และ 19.5 MPa ตามลำดับ ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของทั้งสองกลุ่มลดลงตามเวลาในช่วงการเสื่อมสภาพหลังจากการเผาไหม้ พืชที่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าจะมีความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยสูงกว่าพืชที่ไม่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าในทุกช่วงของการเสื่อมสภาพ และค่า Young's modulus ของทั้งกลุ่ม M และ NM ลดลงอย่างมีนัยสำคัญระหว่างช่วง 0.5 ถึง 1 เดือน จากการเสื่อมสภาพด้วยสารเคมีกำจัดวัชพืช และค่า Young's modulus ของทั้งสองกลุ่มยังคงลดลงเพิ่มเติมจากเดือนที่ 1 ถึง 2 ค่า Young's modulus ของกลุ่ม NM และ M ในเดือนที่ 2 คือ 146 MPa และ 160 MPa ตามลำดับ สำหรับการเสื่อมสภาพจากการเผาไหม้ ค่า Young's modulus จะมีค่าลดลงในทั้งสองกลุ่มตามเวลา เมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่ไม่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่า พืชที่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าจะมีค่า Young's modulus สูงกว่าในช่วงของการเสื่อมสภาพ โดยมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นประมาณ 11.1% – 18.5%

ความต้านทานแรงดึง และค่า Young's modulus (รูปที่ 6.5) มีความสัมพันธ์แปรผกผันกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรากในช่วงการเจริญเติบโตและการเสื่อมสภาพ โดยการมีอยู่ของจุลินทรีย์ AM fungi จะส่งผลกระทบต่อความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's modulus และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากอย่างมีนัยสำคัญ รากที่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าจากกลุ่มการเจริญเติบโตปกติและการเสื่อมสภาพจากการเผาไหม้มีความต้านทานแรงดึงและค่า Young's modulus สูงกว่ารากที่ไม่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่า โดยในระหว่างการเจริญเติบโต รากที่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่ามีความต้านทานแรงดึงและค่า Young's modulus สูงกว่ารากที่ไม่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่า รากที่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าหลังการใช้สารเคมีป้องกันวัชพืชและการเผายังคงมีความต้านทานแรงดึงสูงในรากที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า แต่รากที่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าหลังการใช้สารเคมีป้องกันวัชพืชและการเผามีค่า Young's modulus ที่สูงกว่า

ความต้านทานแรงดึง (รูปที่ 6.6a) และค่า Young's modulus (รูปที่ 6.6d) มีความสัมพันธ์แปรผันตามกับปริมาณเซลลูโลส อย่างไรก็ตาม ไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างปริมาณลิกนินและความต้านทานแรงดึง (รูปที่ 6.6b) หรือค่า Young's modulus (รูป 28e) ความต้านทานแรงดึงและค่า Young's modulus มีความสัมพันธ์แปรผกผันกับอัตราส่วนของลิกนินต่อเซลลูโลส (รูปที่ 6.6c และ f) นอกจากนี้ การฉีดจุลินทรีย์ AM fungi ไม่ได้เปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ (เช่น ความต้านทานแรงดึงกับปริมาณเซลลูโลส, ความต้านทานแรงดึงกับปริมาณลิกนิน, และความต้านทานแรงดึงกับอัตราส่วนลิกนิน/เซลลูโลส) (รูปที่ 6.6a, b และ c) โดยความสัมพันธ์เดียวกันพบในค่า Young's modulus (รูปที่ 6.6d, e และ f) และในทุกช่วงของการเจริญเติบโตและการเสื่อมสภาพ ค่า Young's modulus มีความสัมพันธ์แปรผันตามกับความต้านทานแรงดึง และไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในความชันของความสัมพันธ์ระหว่างรากที่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่ากับรากที่ไม่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าในช่วงการเจริญเติบโต หรือหลังจากการ

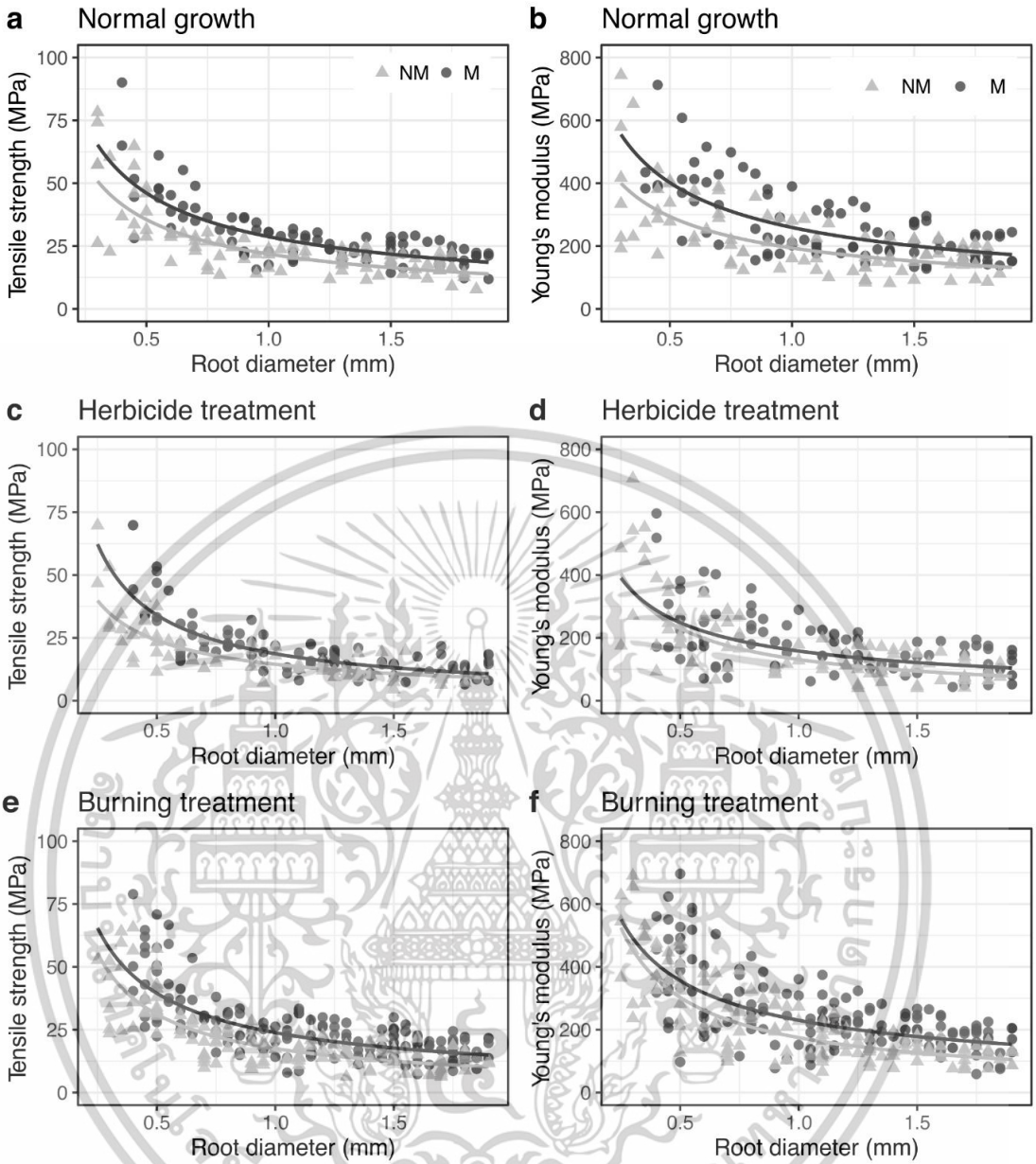
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสื่อมสภาพด้วยการเผาไหม้ แต่อย่างไรก็ตาม รากที่มีจุลินทรีย์ไมคอร์ไรซ่าสำหรับกรณีหลังจากเสื่อมสภาพด้วยสารเคมีกำจัดวัชพืช ซึ่งหมายถึงการลดลงของค่า Young's modulus เมื่อเทียบกับรากที่มีความต้านทานแรงดึงเท่ากัน



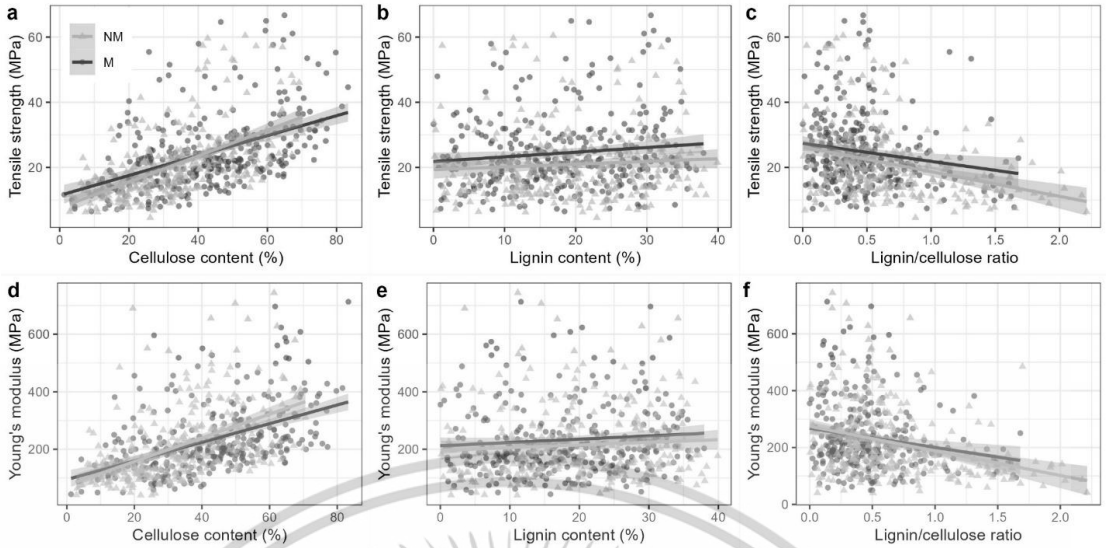
รูปที่ 6.4 ค่าความต้านทานแรงดึงของรากพืชในช่วง (a) การเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพเนื่องจากการได้รับ (c) สารเคมีกำจัดวัชพืช (e) การเผาไหม้ และ ค่ายังโมดูลัสของรากพืชในช่วง (b) การเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพเนื่องจากการได้รับ (d) สารเคมีกำจัดวัชพืช (f) การเผาไหม้ โดยเทียบกับระยะเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.5 ค่าความต้านทานแรงดึงของรากพืชในช่วง (a) การเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพเนื่องจากการได้รับ (c) สารเคมีกำจัดวัชพืช (e) การเผาไหม้ และ ค่ายังโมดูลัสของรากพืชในช่วง (b) การเจริญเติบโต และเสื่อมสภาพเนื่องจากการได้รับ (d) สารเคมีกำจัดวัชพืช (f) การเผาไหม้ โดยเทียบกับขนาดราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 ค่าความต้านทานแรงดึงของรากพืชในช่วงและค่ายังโมดูลัสของรากพืช เปรียบเทียบกับปริมาณสารเคมีในรากพืช

ตารางที่ 6.1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลลูโลสกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก

Cellulose content (*CL*) vs. root diameter (*d*)					
Treatment	**Inoculation**	**Fitting equation**	**R^2**	***P* value**	**n**
Normal growth	NM	$CL = -9.12*d + 54.37$	0.1007	<0.001	90
	M	$CL = -7.79*d + 65.49$	0.0641	0.01603	90
Herbicide treatment	NM	$CL = -10.24*d + 33.76$	0.2086	<0.001	82
	M	$CL = -8.68*d + 37.59$	0.1260	<0.001	90
Burning treatment	NM	$CL = -12.42*d + 45.41$	0.1563	<0.001	131
	M	$CL = -5.22*d + 49.68$	0.0241	0.06436	143

ตารางที่ 6.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึง กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก

Tensile strength (T_r) vs. root diameter					
Treatment	**Inoculation**	**Fitting equation**	**R^2**	***P* value**	**n**
Normal growth	NM	$T_r = 21.83*d^{-0.70}$	0.6594	<0.001	90
	M	$T_r = 28.72*d^{-0.68}$	0.6304	<0.001	90
Herbicide treatment	NM	$T_r = 14.49*d^{-0.73}$	0.6616	<0.001	82
	M	$T_r = 18.68*d^{-0.87}$	0.6232	<0.001	90
Burning treatment	NM	$T_r = 17.49*d^{-0.83}$	0.6239	<0.001	131
	M	$T_r = 23.84*d^{-0.73}$	0.5286	<0.001	143

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัส กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก

Young's modulus (*E*) vs. root diameter					
Treatment	**Inoculation**	**Fitting equation**	**R^2**	***P* value**	**n**
Normal growth	NM	$E = 193.91*d^{-0.60}$	0.4789	<0.001	90
	M	$E = 259.18*d^{-0.63}$	0.4813	<0.001	90
Herbicide treatment	NM	$E = 131.12*d^{-0.81}$	0.5308	<0.001	82
	M	$E = 158.13*d^{-0.65}$	0.3146	<0.001	90
Burning treatment	NM	$E = 174.79*d^{-0.79}$	0.6175	<0.001	131
	M	$E = 229.95*d^{-0.63}$	0.3960	<0.001	143

แม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ (R^2) จะอยู่ในระดับที่ค่อนข้างต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม ค่านี้ยังคงแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญระหว่างคุณสมบัติของรากพืชที่วัดได้กับพฤติกรรมทางชีวกลศาสตร์ของระบบรากและดิน ผลการวิเคราะห์นี้สะท้อนให้เห็นว่า นอกจากคุณสมบัติของรากพืชแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่อาจส่งผลร่วมกันต่อพฤติกรรมทางชีวกลศาสตร์ของระบบ อาทิ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของราก องค์ประกอบทางเคมีของราก สภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโต ตลอดจนคุณสมบัติทางกายภาพของดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินที่มีพืช

การนำพืชมาใช้ในการเสริมเสถียรภาพลาดดิน (vegetative slope stabilization) ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีต้นทุนต่ำ และสามารถฟื้นฟูระบบนิเวศได้อย่างยั่งยืน รากพืชมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงของดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการต้านทานแรงเฉือนผ่านกระบวนการยึดเหนี่ยวระหว่างรากและเม็ดดิน ซึ่งช่วยลดโอกาสในการเกิดการพังทลายของลาดดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินที่มีพืชเข้ามามีส่วนร่วมจึงจำเป็นต้องพิจารณาทั้งในแง่ของคุณสมบัติเชิงกลของดิน และคุณสมบัติของรากพืช เช่น กำลังรับแรงดึง มวลชีวภาพ และการกระจายตัวของราก การผสานข้อมูลเหล่านี้เข้ากับแบบจำลองทางกลศาสตร์ เช่น แบบจำลองลาดชัน (infinite slope model) จะช่วยให้สามารถประเมินค่าความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) ของลาดดินได้ โดยเนื้อหาในบทนี้ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลคุณสมบัติของรากพืชที่ได้จากการทดลอง มาวิเคราะห์ร่วมกับสมการทางกลศาสตร์เพื่อประเมินผลของรากพืชต่อค่าความมั่นคงของลาดดิน โดยมุ่งหวังให้ผลการศึกษาในส่วนนี้สามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบหรือปรับปรุงมาตรการป้องกันการพังทลายของลาดดินโดยอาศัยพืช โดยสมการสำหรับการพิจารณากำลังรับแรงเฉือนของดินอิ่มตัวน้ำที่มีการเสริมกำลังด้วยรากพืชสามารถเขียนได้ดังนี้ (Wu et al., 1979)

$$\tau = c_r + c' + \sigma' \tan \varphi'$$

$$c_r = t_r \left(\frac{A_r}{A}\right)(\sin\theta + \cos\theta \tan \varphi')$$

โดยที่ τ คือ Shear strength

c_r คือ root cohesion

c' คือ effective cohesion

σ' คือ effective stress

φ' คือ effective angle of shearing resistance

t_r คือ mobilized root tensile stress

$\frac{A_r}{A}$ คือ Ratio between root and total area

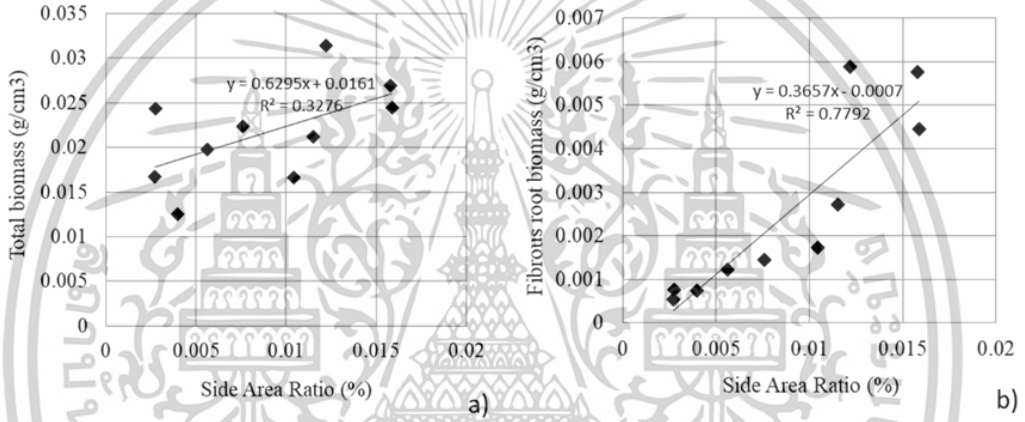
θ คือ shear distortion angle in the shear zone

และในการศึกษาของ Wu (2013) ได้แนะนำค่าสำหรับ $(\sin\theta + \cos\theta \tan \varphi')$ สามารถประมาณได้เท่ากับ 1.2

$$c_r = t_r \left(\frac{A_r}{A}\right) \times 1.2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษานี้ ข้อมูลที่มีอยู่เป็นข้อมูลมวลแห้งของรากพืชต่อหน่วยตัวอย่างดิน เพื่อประมาณค่าร้อยละพื้นที่ผิวด้านข้างของราก (Side Root Area Ratio) ได้ทำการอ้างอิงจากงานวิจัยของ Jotisankasa et al. (2018) ซึ่งได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพของรากพืช (Fibrous Root Biomass) กับร้อยละพื้นที่ผิวด้านข้าง โดยใช้กราฟจากงานวิจัยดังกล่าวเป็นพื้นฐานในการแปลงข้อมูล และในการวิเคราะห์ครั้งนี้ ได้มีการตั้งสมมติฐานว่ามวลของรากพืชต่อพื้นที่หน้าตัดของหญ้าเบอร์มิวดามีความใกล้เคียงกับของหญ้าแฝก อย่างไรก็ตาม ข้อสมมติฐานนี้อาจไม่ครอบคลุมความแปรผันที่เกิดจากปัจจัยอื่น เช่น อายุของราก หรือการเสื่อมสภาพของราก ดังนั้น ค่าร้อยละพื้นที่ผิวด้านข้างของรากที่ได้จากการแปลงข้อมูลนี้ควรได้รับการตีความอย่างระมัดระวัง และมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ในการคำนวณค่าปัจจัยความปลอดภัย (Factor of Safety: FOS) เท่านั้น



รูปที่ 7.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ปริมาณชีวมวลแห้งของพืช, (b) ปริมาณชีวมวลแห้งของรากพืชในช่วง ต่อร้อยละพื้นที่ผิวด้านข้าง

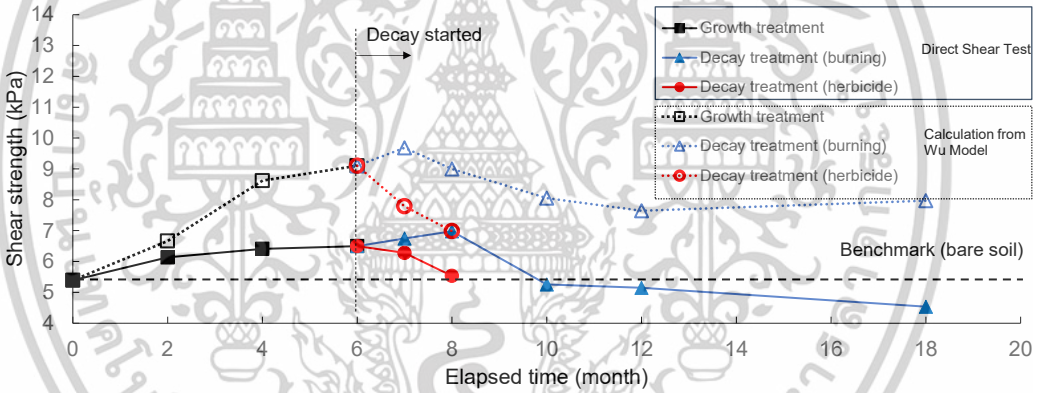
ประมาณค่าร้อยละพื้นที่ผิวด้านข้างของรากพืช (Side Root Area Ratio) โดยอ้างอิงจากกราฟในงานวิจัยของ Jotisankasa et al. (2018) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพของรากพืชกับพื้นที่ผิวด้านข้างของราก จากข้อมูลดังกล่าว จึงได้ทำการคำนวณค่า Root Cohesion และแสดงผลลัพธ์ไว้ในตารางที่ 7.1

จากนั้น ได้นำค่า root cohesion ที่ได้ไปใช้ในการพล็อตร่วมกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน shear strength โดยกำหนดให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเปล่าเป็นค่าตั้งต้น และทำการเพิ่มค่า root cohesion จากรากพืชเข้าไปตามลำดับ เพื่อประเมินผลของการเสริมกำลังของรากพืชต่อความแข็งแรงของดิน โดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการของ Wu (2013) กับผลที่ได้จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยแสดงไว้ในรูปที่ 7.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติของรากพืช และค่า Root cohesion ที่ได้จากการคำนวณ

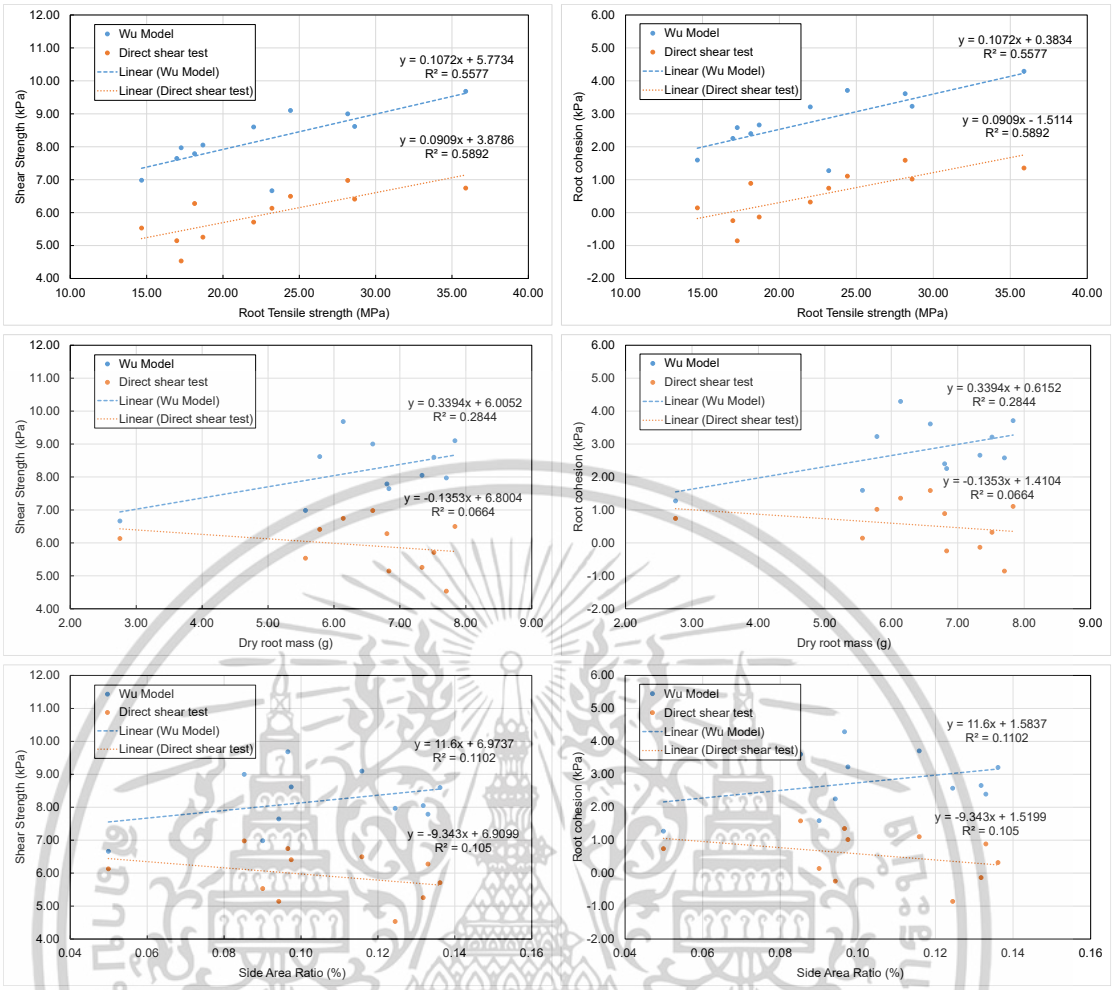
						Wu Model
Test series	Test ID	Dry root mass (g)	Tensile strength (MPa)	Root Biomass (g/cm3)	Side root area ratio	Root cohesion (kPa)
Growth	G2	2.75	23.21	0.02	0.05	1.27
	G4	5.78	28.62	0.03	0.10	3.23
	G6	7.83	24.42	0.04	0.12	3.71
Chemical decay	GC0.5	7.52	22.00	0.05	0.14	3.21
	GC1	6.80	18.14	0.05	0.13	2.40
	GC2	5.57	14.67	0.03	0.09	1.59
Burning decay	GB1	6.14	35.90	0.03	0.10	4.29
	GB2	6.59	28.17	0.03	0.09	3.61
	GB4	7.33	18.69	0.05	0.13	2.66
	GB6	6.83	16.98	0.03	0.09	2.26
	GB12	7.70	17.26	0.04	0.12	2.58



รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงเฉือน กับระยะเวลา

จากกราฟข้างต้น สามารถสังเกตได้ว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ประเมินโดยใช้โมเดลของ Wu มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าความแตกต่างตั้งแต่ 0.5 kPa ไปจนถึง 3.5 kPa หรือหากแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์จะมีค่าความแตกต่างตั้งแต่ 10% ไปจนถึงสูงสุดที่ประมาณ 75% ในช่วงเริ่มต้นของการเจริญเติบโตของพืช ค่าที่คำนวณได้จากโมเดล Wu มีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง อย่างไรก็ตาม เมื่อพืชมีการเจริญเติบโตมากขึ้น ค่าความแตกต่างก็เพิ่มขึ้นโดยอาจมีความคลาดเคลื่อนถึง 40% และในช่วงการเสื่อมสภาพของรากพืช โดยเฉพาะในช่วงเวลา 12 เดือนหลังจากการเผาไหม้ (ที่ 18 เดือน) ความแตกต่างดังกล่าวยิ่งปรากฏชัด โดยค่าที่คำนวณได้อาจสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองมากถึง 75%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

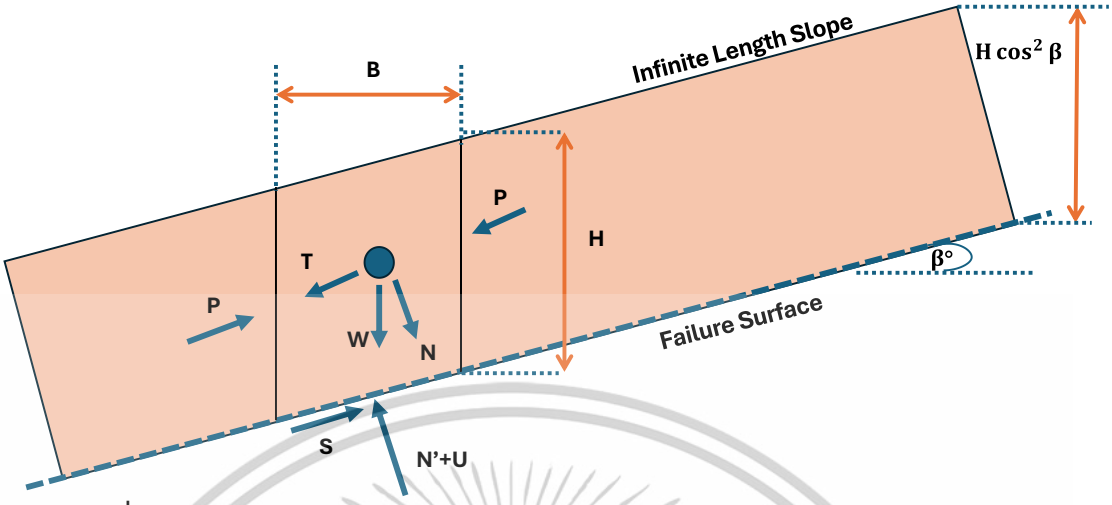


รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงเฉือน และ Root cohesion กับ กำลังรับแรงดึงของรากพืช ปริมาณชีวมวลแห้งของรากพืช และค่าร้อยละพื้นที่ผิวด้านข้างของราก

กราฟข้างต้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยรากพืช ตลอดช่วงการเจริญเติบโตและการเสื่อมสภาพของราก กับตัวแปรคุณสมบัติของรากพืช 3 ประเภท ได้แก่ ค่ากำลังรับแรงดึงของราก มวลแห้งของราก และร้อยละพื้นที่ผิวด้านข้างของราก โดยเปรียบเทียบทั้งค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโมเดลของ Wu และค่าที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในห้องปฏิบัติการ

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังรับแรงดึงของรากพืชมีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงเฉือนของดินมากที่สุด ทั้งนี้ โมเดลของ Wu แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนกับมวลแห้งของรากและร้อยละพื้นที่ผิวด้านข้างของราก ในขณะที่ผลการทดลองจากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงแสดงแนวโน้มในทางตรงกันข้าม โดยความไม่สอดคล้องนี้เกิดขึ้นในช่วงระยะของการเสื่อมสภาพของรากพืช แม้ว่ามวลแห้งของรากและพื้นที่ผิวด้านข้างอาจยังคงอยู่ในระดับสูง แต่ความแข็งแรงเชิงโครงสร้างของรากได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนของดินลดลงตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.4 ตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยวิธี infinite slope method

ความมั่นคงของลาดดินสามารถคำนวณได้โดยใช้วิธี Infinite Slope Method ตามสมการต่อไปนี้

$$F.S = \frac{c + (\gamma \cdot H\cos^2\beta) \cdot \tan\varphi'}{\gamma \cdot H \sin\beta \cdot \cos\beta}$$

โดยที่ $F.S$ คือ Factor of safety

c คือ cohesion

γ คือ the unit weight of the soil

H คือ Height of analyzed section

β คือ Inclination

φ' คือ friction angle of the soil

ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ กำหนดสมมติให้ลาดดินมีความชันเท่ากับ 30 องศา และดินอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำอย่างเต็มที่ โดยมีความหนาชั้นดิน (z) เท่ากับ 0.5 เมตร คุณสมบัติดินที่ใช้ในการวิเคราะห์อ้างอิงจากผลการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ซึ่งให้ค่า soil cohesion เท่ากับ 1.4 kPa และมุมแรงเสียดทานภายในเท่ากับ 31 องศา

ในการวิเคราะห์ ได้มีการเปลี่ยนแปลงค่า cohesion ของดินตามสองแนวทาง ได้แก่ (1) ค่าที่คำนวณได้จากสมการของ Wu และ (2) ค่าความแตกต่างของกำลังรับแรงเฉือนระหว่างดินเปล่ากับดินที่มีรากพืชเป็นตัวเสริมกำลัง โดยผลลัพธ์ของการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 7.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.2 ค่า root cohesion และสัดส่วนความปลอดภัยที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี infinite slope method โดยเปรียบเทียบค่าจาก Wu model และ ค่าจากการทดสอบแรงเฉือนตรง

		from Wu Model		from Direct shear test	
Test series	Test ID	Root cohesion (kPa)	FOS	Root cohesion (kPa)	FOS
Bare Soil	B	-	-	-	1.13
Growth	G2	1.27	1.52	0.74	1.36
	G4	3.23	2.12	1.02	1.44
	G6	3.71	2.26	1.11	1.47
Chemical decay	GC0.5	3.21	2.11	0.32	1.23
	GC1	2.40	1.86	0.89	1.41
	GC2	1.59	1.62	0.14	1.17
Burning decay	GB1	4.29	2.44	1.36	1.55
	GB2	3.61	2.23	1.59	1.62
	GB4	2.66	1.94	-0.13	1.09
	GB6	2.26	1.82	-0.24	1.06
	GB12	2.58	1.92	-0.86	0.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8
สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงทางชีวกลศาสตร์ของรากพืชที่มีต่อคุณสมบัติด้านแรงเฉือนของดิน โดยมุ่งเน้นทั้งช่วงการเจริญเติบโตและช่วงเสื่อมสภาพของรากจากการเผาไหม้และการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช โดยการศึกษาประกอบด้วยการวิเคราะห์กำลังรับแรงดึงของรากในแต่ละระยะของการเปลี่ยนแปลง เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของรากพืช ควบคู่กับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชเจริญเติบโตอยู่ภายในเนื้อดิน เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการเสริมเสถียรภาพของดินในเชิงวิศวกรรม ทั้งนี้ ได้มีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของรากพืชกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของรากโดยการใช้จุลินทรีย์กลุ่ม Arbuscular Mycorrhizal (AM) fungi ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถสร้างปฏิสัมพันธ์แบบพึ่งพากับรากพืช ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงของระบบราก และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการเสริมแรงภายในดินอย่างยั่งยืน

โดยผลของการศึกษาในช่วงของการเจริญเติบโต รากพืชมีลักษณะทางชีวกลศาสตร์ที่เด่นชัด เช่น ค่ากำลังรับแรงดึงสูง รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีในรากที่มีการสะสมสารชีวภาพต่าง ๆ และค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชแทรกอยู่มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับดินเปล่าหรือดินที่ไม่มีพืชพรรณ โดยพบว่ารากพืชในระยะเจริญเติบโตสามารถช่วยเพิ่มความหนาแน่นเชิงโครงสร้างและลดการเคลื่อนตัวของอนุภาคดินภายใต้แรงเฉือน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความมั่นคงของโครงสร้างดินในบริบทของงานวิศวกรรมโยธา เช่น งานลาดดิน เขื่อน หรือโครงสร้างพื้นฐานในพื้นที่ลาดชัน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อรากพืชเริ่มเข้าสู่ช่วงเสื่อมสภาพ โดยเฉพาะภายใต้ผลกระทบจากการเผาไหม้และการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืช คุณสมบัติของรากพืชทั้งทางกลและเคมีจะค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ ในกรณีของการเผาไหม้ พบว่าหลังจากเวลาผ่านไป 4 เดือน รากพืชที่เคยมีส่วนช่วยในการรับแรงเฉือนของดินจะสูญเสียสมรรถภาพลงจนกระทั่งค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงมาเทียบเท่ากับดินเปล่าที่ไม่มีรากพืชเลย สาเหตุหลักมาจากการสลายตัวของเนื้อเยื่อพืช การสูญเสียกำลังรับแรง รวมถึงการย่อยสลายของสารเคมีชีวภาพที่เคยมีอยู่ในราก ขณะที่ในกรณีของการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืช การเสื่อมถอยของรากพืชเกิดขึ้นเร็วกว่ามาก โดยค่ากำลังรับแรงเฉือนลดลงถึงระดับดินเปล่าภายในเวลาเพียง 2 เดือนเท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของสารเคมีต่อกระบวนการทางชีวภาพของพืชในระดับโครงสร้างอย่างชัดเจน และจากผลดังกล่าว การเสื่อมสภาพของรากพืชส่งผลลดทอนศักยภาพในการเสริมแรงของดิน ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการดำเนินการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพิจารณาวิธีการปรับปรุงคุณภาพของรากพืชภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีแนวโน้มจะก่อให้เกิดการเสื่อมโทรม โดยเฉพาะการใช้จุลินทรีย์ในกลุ่ม Arbuscular Mycorrhizal (AM) fungi ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถสร้างความสัมพันธ์แบบพึ่งพากับรากพืช ช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโต เพิ่มการดูดซึมธาตุอาหาร และเสริมสร้างความแข็งแรงของโครงสร้างรากในระยะยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองในดินที่มี AM fungi พบว่ารากพืชมีค่ากำลังรับแรงดึงที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม และยังสามารถคงค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินได้ในระดับที่สูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ แม้จะอยู่ในช่วงเวลาที่มีแนวโน้มเกิดการเสื่อมสภาพ นอกจากนี้ ยังพบว่ารากพืชที่มีการพึ่งพาจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถคงสภาพทางโครงสร้างได้ยาวนานขึ้น มีเส้นใยที่หนาแน่น และความยืดหยุ่นที่สูงขึ้น ซึ่งทั้งหมดนี้ล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบรากในการทำหน้าที่เป็นโครงสร้างเสริมแรงในดินตามธรรมชาติ

แต่อย่างไรก็ตาม แนะนำให้มีการตรวจสอบเสถียรภาพและคุณสมบัติอื่นๆเพิ่มเติมอีก ทั้งการศึกษาในแบบจำลองคันดินขนาดจริง หรือในแบบจำลอง และแนะนำแนวทาง หากเกิดการเผาไหม้หรือการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืชบนลาดดิน ควรมีการเข้าตรวจสอบความสมบูรณ์และเสถียรภาพของลาดดินนั้นภายในช่วง 2 เดือน และ 4 เดือน สำหรับกรณีการได้รับสารเคมีกำจัดวัชพืชและเกิดการเผาไหม้ตามลำดับ เนื่องจากผลในการศึกษานี้บ่งชี้ถึงกำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีรากพืชในช่วงเสื่อมสภาพจะมีกำลังรับแรงเฉือนที่ลดลง จนกระทั่งมีค่าต่ำกว่าดินเปล่าที่ไม่มีพืชอยู่

ข้อมูลจากการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบเสริมแรงดินแบบยั่งยืนในงานวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะในบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการพังทลาย การทรุดตัว หรือการเสียเสถียรภาพของโครงสร้าง เช่น งานป้องกันดินถล่ม การฟื้นฟูพื้นที่ป่าเสื่อมโทรม หรือการพัฒนาแนวลาดเขาให้สามารถรองรับน้ำหนักของโครงสร้างพื้นฐานได้อย่างปลอดภัยมากขึ้น การบูรณาการองค์ความรู้จากชีววิทยาของพืชและวิศวกรรมปฐพีจึงนับว่าเป็นแนวทางใหม่ที่มีศักยภาพสูงในการสร้างสมดุลระหว่างการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

Ajtahed, S., Rezaei, A. and Hosseini Tafreshi, S., 2021. Identifying superior drought-tolerant Bermudagrass accessions and their defensive responses to mild and severe drought conditions. Euphytica, 217(5).

Ammann, M., Böll, A., Rickli, C., Speck, T. and Holdenrieder, O., 2009. Significance of tree root decomposition for shallow landslides. Forest Snow and Landscape Research, 82(1), pp.79-94.

Barthélémy, D., and Caraglio, Y., 2007. Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. Ann Bot, 99(3), 375-407. https://doi.org/10.1093/aob/mcl260

Bell, A. D., and Bryan, A., 2008. Plant form: an illustrated guide to flowering plant morphology. Timber press.

Bischetti, G. B., Chiaradia, E. A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P., and Zocco, A. 2005. Root Strength and Root Area Ratio of Forest Species in Lombardy (Northern Italy). Plant and Soil, 278(1), 11-22. https://doi.org/10.1007/s11104-005-0605-4

Boldrin, D., Bengough, A., Lin, Z. and Loades, K., 2021. Root age influences failure location in grass species during mechanical testing. Plant and Soil, 461(1-2), pp.457-469.

Boldrin, D., Leung, A. and Bengough, A., 2017. Root biomechanical properties during establishment of woody perennials. Ecological Engineering, 109, pp.196-206.

Boldrin, D., Leung, A. and Bengough, A., 2018. Effects of root dehydration on biomechanical properties of woody roots of Ulex europaeus. Plant and Soil, 431(1-2), pp.347-369.

Certini, G., Moya, D., Lucas-Borja, M. and Mastrolonardo, G., 2021. The impact of fire on soil-dwelling biota: A review. Forest Ecology and Management, 488.

Charles-Dominique, T., Mangenet, T., Rey, H., Jourdan, C., and Edelin, C., 2009. Architectural analysis of root system of sexually vs. vegetatively propagated yam (Dioscorea rotundata Poir.), a tuber monocot. Plant and Soil, 317(1), 61-77.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chen, X. W., Kang, Y., So, P. S., Ng, C. W. W., and Wong, M. H., 2018. Arbuscular mycorrhizal fungi increase the proportion of cellulose and hemicellulose in the root stele of vetiver grass. Plant and Soil, 425(1), 309-319.

Comino, E., Marengo, P., and Rolli, V., 2010. Root reinforcement effect of different grass species: A comparison between experimental and models results. Soil and Tillage Research, 110(1), 60-68.

Cornelissen, J., Lavorel, S., Garnier, E., Diaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D., Reich, P., ter Steege, H., Morgan, H., Van der Heijden, M., Pausas, J., and Poorter, H., 2003. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. Australian Journal of Botany, 51, 335-380.

Danjon, F., Barker, D. H., Drexhage, M., and Stokes, A., 2008. Using three-dimensional plant root architecture in models of shallow-slope stability. Ann Bot, 101(8), 1281-1293.

De Baets, S., Poesen, J., Reubens, B., Wemans, K., De Baerdemaeker, J., and Muys, B., 2008. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. Plant and Soil, 305(1), 207-226.

D'Souza, D., Choudhary, A., Basak, P. and Shukla, S., 2019. Assessment of vetiver grass root reinforcement in strengthening the soil. Ground Improvement Techniques and Geosynthetics, pp.135-142.

Dyanat Nejad, H., and Neville, P., 1972. Etude du mode d'action du méristème radical orthotrope dans le contrôle de la plagiotropie des racines chez Theobroma cacao L. Rev Générale Bot, 79, 319-340.

Eissenstat, D. M., WELLS, C. E., YANAI, R. D., and WHITBECK, J. L., 2000. Building roots in a changing environment: implications for root longevity. New Phytologist, 147(1), 33-42.

Elham Karimzadeh Jafari, Hamed Naghavi, Kamran Adeli., Hooman Latifi., 2020. A Nondestructive, Remote Sensing-Based Estimation of the Economic Value of Aboveground Temperate Forest Biomass (Case Study: Hyrcanian Forests, Nowshahr-Iran), Journal of Sustainable Forestry, 39:7, 750-770, DOI: 10.1080/10549811.2020.1723645

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Francour, P., and Semroud, R., 1992. Calculation of the root area index in Posidonia oceanica in the western Mediterranean. Aquatic Botany, 42(3), 281-286.

Garg, A., Leung, A. K., and Ng, C. W. W., 2015. Transpiration reduction and root distribution functions for a non-crop species Schefflera heptaphylla. CATENA, 135, 78-82.

Garfield, S.M., 2008. "Improved Correlation between Texas Cone Penetrometer Blow Count and Undrained Shear Strength of Soft, Shallow Clays," thesis submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Master of Science in engineering, The University of Texas, Austin, TX.

Genet, M., Kokutse, N., Stokes, A., Fourcaud, T., Cai, X., Ji, J., and Mickovski, S., 2008. Root reinforcement in plantations of Cryptomeria japonica D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability. Forest Ecology and Management, 256(8), 1517-1526.

Genet, M., Stokes, A., Salin, F., Mickovski, S., Fourcaud, T., Dumail, J. and van Beek, R., 2005. The Influence of Cellulose Content on Tensile Strength in Tree Roots. Plant and Soil, 278(1), pp.1-9.

Giadrossich, F., Schwarz, M., Cohen, D., Cislaghi, A., Vergani, C., Hubble, T., Phillips, C., and Stokes, A., 2017. Methods to measure the mechanical behaviour of tree roots: A review. Ecological Engineering, 109, 256-271.

Hamza, O., Bengough, A. G., Bransby, M. F., Davies, M. C. R., and Hallett, P. D., 2006. Biomechanics of Plant Roots: estimating Localised Deformation with Particle Image Velocimetry. Biosystems Engineering, 94(1), 119-132.

Jackson, R. B., Mooney, H. A., and Schulze, E.-D., 1997. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. Proceedings of the National Academy of Sciences, 94(14), 7362-7366.

Jolly, W., Cochrane, M., Freeborn, P., Holden, Z., Brown, T., Williamson, G. and Bowman, D., 2015. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. Nature Communications, 6(1).

Jordan, T., 1997. Effects of Temperature and Relative Humidity on the Toxicity of Glyphosate to Bermudagrass (Cynodon dactylon). Weed Science, 25(5), pp.448-451.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jotisankasa, A. and Sirirattanachat, T., 2017. Effects of grass roots on soil-water retention curve and permeability function. Canadian Geotechnical Journal, 54(11), pp.1612-1622.

Jotisankasa, A., Taworn, D., Chumchey, N., and Sukolrat, J., 2018. Quantification of root reinforcement in bio-slope stabilization: laboratory and field studies. *MATEC Web Conf.*, *195*, 03002.

Kamchoom, V. and Jotisankasa, A., 2019. Effect of root growth on slope hydrology and stability during early plant establishment. 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, Taipei, Taiwan.

Kamchoom, V. and Leung, A., 2018. Hydro-mechanical reinforcements of live poles to slope stability. Soils and Foundations, 58(6), pp.1423-1434.

Kamchoom, V. and Leung, K., 2018. Effects of Plant Removal on Slope Hydrology and Stability. 9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, London, UK.

Kamchoom, V., Leung, A. K., Boldrin, D., Sakolpanya, T., Wu, Z., and Likitlersuang, S., 2022. Shearing behaviour of vegetated soils with growing and decaying roots. Canadian Geotechnical Journal, 59(12), 2067-2084.

Kamchoom, V., Boldrin, D., Leung, A., Sookkrajang, C. and Likitlersuang, S., 2021. Biomechanical properties of the growing and decaying roots of Cynodon dactylon. Plant and Soil,.

Kamchoom, V., Leung, A. and Ng, C., 2014. Effects of root geometry and transpiration on pull-out resistance. Géotechnique Letters, 4(4), pp.330-336.

Kamchoom, V., Chen, X. W., Leung, A. K., Sakolpanya, T., and Srinil, C., 2023. Dynamic changes in cellulose content and biomechanical properties of mycorrhizal roots during growth and decay. Plant and Soil.

Khuder, H., Stokes, A., Danjon, F., Gouskou, K., and Lagane, F., 2007. Is it possible to manipulate root anchorage in young trees? Plant and Soil, 294(1), 87-102.

Kokutse, N., Temgoua, A. and Kavazović, Z., 2016. Slope stability and vegetation: Conceptual and numerical investigation of mechanical effects. Ecological Engineering, 86, pp.146-153.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Leavitt, S. and Danzer, S., 1993. Method for batch processing small wood samples to holocellulose for stable-carbon isotope analysis. Analytical Chemistry, 65(1), pp.87-89.

Leung, A., Boldrin, D., Karimzadeh, A. and Bengough, A., 2019. Role of hydromechanical properties of plant roots in unsaturated soil shear strength. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 7(2), pp.133-138.

Leung, A., Boldrin, D., Liang, T., Wu, Z., Kamchoom, V. and Bengough, A., 2018. Plant age effects on soil infiltration rate during early plant establishment. Géotechnique, pp.646-652.

Leung, A., Garg, A. and Ng, C., 2015. Effects of plant roots on soil-water retention and induced suction in vegetated soil. Engineering Geology, 193, pp.183-197.

Leung, A., Kamchoom, V. and Ng, C., 2017. Influences of root-induced soil suction and root geometry on slope stability: a centrifuge study. Canadian Geotechnical Journal, 54(3), pp.291-303.

Leung, F., Yan, W., Hau, B. and Tham, L., 2015. Root systems of native shrubs and trees in Hong Kong and their effects on enhancing slope stability. Catena, 125, pp.102-110.

Liang, T., Bengough, A. G., Knappett, J. A., MuirWood, D., Loades, K. W., Hallett, P. D., Boldrin, D., Leung, A. K., and Meijer, G. J., 2017. Scaling of the reinforcement of soil slopes by living plants in a geotechnical centrifuge. Ecological Engineering, 109, 207-227.

Liang, T., Knappett, J., Leung, A., Carnaghan, A., Bengough, A. and Zhao, R., 2019. A critical evaluation of predictive models for rooted soil strength with application to predicting the seismic deformation of rooted slopes. Landslides, 17(1), pp.93-109.

Loades, K., Bengough, A., Bransby, M. and Hallett, P., 2015. Effect of root age on the biomechanics of seminal and nodal roots of barley (Hordeum vulgare L.) in contrasting soil environments. Plant and Soil, 395, pp.253-261.

Mahannopkul, K. and Jotisankasa, A., 2019. Influences of root concentration and suction on Chrysopogon zizanioides reinforcement of soil. Soils and Foundations, 59(2), pp.500-516.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mahannopkul, K. and Jotisankasa, A., 2019. Influence of root suction on tensile strength of Chrysopogon zizanioides roots and its implication on bioslope stabilization. Journal of Mountain Science, 16, pp.275-284.

Mandal, A., Dheebakaran, G., Banik,, M., Kumar, A. and Prasad, S., 2017. Response of Bermuda grass (Cynodon dactylon) growth under elevated temperature and moisture stress condition. The Pharma Innovation Journa, [online] 6(12), pp.83-87.

Mao, Z., Yang, M., Bourrier, F., and Fourcaud, T., 2014. Evaluation of root reinforcement models using numerical modelling approaches. Plant and Soil, 381(1), 249-270.

Mickovski, S. B., and van Beek, L. P. H., 2009. Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (Vetiveria zizanioides) plants grown in semi-arid climate. Plant and Soil, 324(1), 43-56.

Ng, C., Kamchoom, V. and Leung, A., 2015. Centrifuge modelling of the effects of root geometry on transpiration-induced suction and stability of vegetated slopes. Landslides, 13(5), pp.925-938.

Ng, C. W. W., Leung, A. K., and Ni, J. J., 2018. Bioengineering for Slope Stabilisation Using Plants: Hydrological and Mechanical Effects. In W. Wu and H.-S. Yu, Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering Cham.

Ng, C., Leung, A. and Ni, J., 2019. Plant–Soil Slope Interaction (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781351052382

Ng, C., Leung, A., Yu, R. and Kamchoom, V., 2017. Hydrological Effects of Live Poles on Transient Seepage in an Unsaturated Soil Slope: Centrifuge and Numerical Study. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 143(3).

Phan, T., Likitlersuang, S., Kamchoom, V. and Leung, A., 2021. Root biomechanical properties of Chrysopogon zizanioides and Chrysopogon nemoralis for soil reinforcement and slope stabilisation. Land Degradation and Development, 32(16), pp.4624-4636.

Nghia, P., Likitlersuang, S., Kamchoom, V. and Leung, A., 2021. Root biomechanical properties of Chrysopogon zizanioides and Chrysopogon nemoralis for soil reinforcement and slope stabilisation. Land Degradation and Development, 32(16), pp.4624-4636.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ni, J., Leung, A. and Ng, C., 2019. Modelling effects of root growth and decay on soil water retention and permeability. Canadian Geotechnical Journal, 56(7), pp.1049-1055.

Nilaweera, N. and Nutalaya, P., 1999. Role of tree roots in slope stabilisation. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57(4), pp.337-342.

Operstein, V., and Frydman, S., 2000. The influence of vegetation on soil strength. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 4(2), 81-89.

Poorter, H., and Remkes, C., 1990. Leaf area ratio and net assimilation rate of 24 wild species differing in relative growth rate. Oecologia, 83(4), 553-559.

Roumet, C., Birouste, M., Picon-Cochard, C., Ghestem, M., Osman, N., Vrignon-Brenas, S., Cao, K. and Stokes, A., 2016. Root structure–function relationships in 74 species: evidence of a root economics spectrum related to carbon economy. New Phytologist, 210(3), pp.815-826.

Schmidt, R. and Blaser, R., 1969. Effect of Temperature, Light, and Nitrogen on Growth and Metabolism of 'Tifgreen' Bermudagrass (Cynodon spp.) 1. Crop Science, 9(1), pp.5-9.

Schwarz, M., Cohen, D. and Or, D., 2011. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: Experiments and modeling. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 116(F2).

Segal, E., Kushnir, T., Mualem, Y., and Shani, U., 2008. Water Uptake and Hydraulics of the Root Hair Rhizosphere. Vadose Zone Journal, 7(3), 1027-1034. https://doi.org/https://doi.org/10.2136/vzj2007.0122

Smucker, A. J. M., McBurney, S. L., and Srivastava, A. K. 1982. Quantitative Separation of Roots from Compacted Soil Profiles by the Hydropneumatic Elutriation System. Agronomy Journal, 74(3), 500-503.

Sonnenberg, R., Bransby, M. F., Hallett, P. D., Bengough, A. G., Mickovski, S. B. and Davies, M. C. R., 2010. Centrifuge modelling of soil slopes reinforced with vegetation. *Canadian Geotechnical Journal*, *47*(12), 1415-1430.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sonnenberg, R., Bransby, M., Bengough, A., Hallett, P. and Davies, M., 2012. Centrifuge modelling of soil slopes containing model plant roots. Canadian Geotechnical Journal, 49(1), pp.1-17.

Stokes, A., Atger, C., Bengough, A. G., Fourcaud, T. and Sidle, R. C., 2009. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and Soil*, *324*(1), 1-30.

Swezy, D. and Agee, J., 1991. Prescribed-fire effects on fine-root and tree mortality in old-growth ponderosa pine. Canadian Journal of Forest Research, 21(5), pp.626-634.

Vergani, C., Schwarz, M., Soldati, M., Corda, A., Giadrossich, F., Chiaradia, E., Morando, P. and Bassanelli, C., 2016. Root reinforcement dynamics in subalpine spruce forests following timber harvest: a case study in Canton Schwyz, Switzerland. CATENA, 143, pp.275-288.

Vergani, C., Werlen, M., Conedera, M., Cohen, D. and Schwarz, M., 2017. Investigation of root reinforcement decay after a forest fire in a Scots pine (Pinus sylvestris) protection forest. Forest Ecology and Management, 400, pp.339-352.

Waldron, L., 1977. The Shear Resistance of Root-Permeated Homogeneous and Stratified Soil. Soil Science Society of America Journal, 41(5), pp.843-849.

Waldron, L. J. and Dakessian, S., 1981. SOIL REINFORCEMENT BY ROOTS: CALCULATION OF INCREASED SOIL SHEAR RESISTANCE FROM ROOT PROPERTIES. *Soil Science*, *132*(6), 427-435.

Watson, A., Phillips, C. and Marden, M., 1999. Root strength, growth, and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability. Plant and Soil, 217(1), pp.39-47.

Wright, I. J., and Westoby, M., 1999. Differences in seedling growth behaviour among species: trait correlations across species, and trait shifts along nutrient compared to rainfall gradients. Journal of Ecology, 87(1), 85-97.

Wu, T. H., III, W. P. M. and Swanston, D. N., 1979. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*, *16*(1), 19-33.

Wu, T. H., 2013. Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design. Canadian Geotechnical Journal, 50(3), 259-274.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wu, T. H., III, W. P. M., and Swanston, D. N., 1979. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. Canadian Geotechnical Journal, 16(1), 19-33.

Wu, Z., Leung, A., Boldrin, D. and Ganesan, S., 2021. Variability in root biomechanics of Chrysopogon zizanioides for soil eco-engineering solutions. Science of The Total Environment, 776.

Yildiz, A., Graf, F., Rickli, C. and Springman, S., 2018. Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus. CATENA, 166, pp.98-113.

Zhang, C., Chen, L. and Jiang, J., 2014. Why fine tree roots are stronger than thicker roots: The role of cellulose and lignin in relation to slope stability. Geomorphology, 206, pp.196-202.

Zhu, J., Wang, Y., Wang, Y., Mao, Z. and Langendoen, E., 2019. How does root biodegradation after plant felling change root reinforcement to soil?. Plant and Soil, 446(1-2), pp.211-227.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายฐาปกรณ์ สากลปัญญา
ปีเกิด	พ.ศ. 2540 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา:

2562	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (เกียรตินิยมอันดับ 2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ทุนการศึกษา

2559 – 2562	ทุนจุฬภฏ-พันธุ์ทิพย์
2562 – 2567	ทุน KMITL Doctoral Scholarship

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้