

อิทธิพลของสถาปัตยกรรมระบบรากและชีวกลศาสตร์รากของหญ้าแฝกต่อการเสริมกำลังดิน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INFLUENCE OF ROOT SYSTEM ARCHITECTURE AND ROOT BIOMECHANIC OF VETIVER
ON SOIL REINFORCEMENT



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของสถาปัตยกรรมระบบรากและชีวกลศาสตร์ราก
	ของหญ้าแฝกต่อการเสริมกำลังดิน
โดย	นายณัฐพล วรรณมล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.วีรยุทธ โภมลวิลาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐิติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.วีรยุทธ โภมลวิลาศ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย อุกฤษฏ์ชน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภินิติ โชติสังกาศ)

ณัฐพล วรกมล : อิทธิพลของสถาปัตยกรรมระบบรากและชีวกลศาสตร์รากของหญ้าแฝกต่อการเสริมกำลังดิน. (INFLUENCE OF ROOT SYSTEM ARCHITECTURE AND ROOT BIOMECHANIC OF VETIVER ON SOIL REINFORCEMENT) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.วีรยุทธ โกมลวิลาศ

ในพื้นที่มรสุมเขตร้อน เช่น เอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมถึงประเทศไทย มีการใช้หญ้าแฝกอย่างแพร่หลายในฐานะที่เป็นวิธีประหยัดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับการเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินและป้องกันการกัดเซาะหน้าดิน ความแพร่หลายและยั่งยืนของการใช้หญ้าแฝกต่อวิศวกรรมนิเวศวิทยาเป็นผลมาจากระบบรากของหญ้าแฝกซึ่งสามารถหยั่งลึกลงไปในดินได้กว่า 3 เมตร หญ้าแฝกได้ถูกนำมาใช้หลากหลายงานในทางวิศวกรรมนิเวศวิทยาและการแก้ไขปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น เสถียรภาพของลาดดิน ป้องกันการกัดเซาะหน้าดิน ตลอดจน การบำบัดดิน งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของรากหญ้าแฝกต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน ตัวอย่างหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลาสามซึ่งเป็นหญ้าแฝกกลุ่มถูกเลือกมาใช้ในการศึกษา กล่องโรโซบลิ้อถูกนำมาใช้สังเกตระบบสถาปัตยกรรมรากของหญ้าแฝก โดยตัวอย่างหญ้าแฝกในกล่องโรโซบลิ้อจะถูกปลูกในเก้าอี้กลับสีดำเพื่อการสังเกตรากได้อย่างชัดเจน จากนั้นใช้กระบวนการภาพถ่ายในการหาค่าอัตราส่วนรากด้านข้าง สำหรับเรื่องกำลังของรากตัวอย่างหญ้าแฝกจะปลูกในดินลูกรังที่มักจะมีพบเจอในบริเวณที่ลาดชัน ดำเนินการทดสอบแรงดึงของรากหญ้าแฝกเพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึงและโมดูลัสของราก ในทางตรงข้ามการดำเนินการทดสอบแรงเฉือนทางตรงของตัวอย่างดินที่มีหญ้าแฝกในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำเพื่อหาผลการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของเนื้อจากรากหญ้าแฝก หลังจากดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการเสร็จสิ้น ผลการทดสอบทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างชีวกลศาสตร์กับสมบัติทางกายภาพของรากได้ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงหรือโมดูลัสกับเส้นผ่าศูนย์กลางและ/หรือความหนาแน่นของรากในสภาพแห้ง ตลอดจนการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนในดินเนื้อจากรากสามารถเชื่อมโยงไปที่ค่ากำลังรับดึงของราก อัตราส่วนรากด้านข้าง และชีวมวลของรากแห้ง ข้อมูลจากงานวิจัยนี้สามารถใช้สนับสนุนการใช้หญ้าแฝกสำหรับเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินได้

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6070172421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Root vetiver; Root tensile strength; Side root area ratio; Increase of soil shear strength due to root

Nathapon Vorakamon : INFLUENCE OF ROOT SYSTEM ARCHITECTURE AND ROOT BIOMECHANIC OF VETIVER ON SOIL REINFORCEMENT. Advisor: Prof. SUCHED LIKITLERSUANG, Ph.D. Co-advisor: Veerayut Komolvillas, D.Eng.

In tropical region such as Southeast Asian including Thailand, the use of vetiver grass has been largely promoted as cost-effective and environmentally friendly solution for slope stabilisation and erosion control. The popularity and suitability of vetiver grass as “ecological engineered” plant result from its extensive fibrous root system, which can reach 3 m depth. Vetiver grass can have multiple applications in eco-engineering and environmental restoration such as slope stabilisation, erosion control and phytoremediation. This research studies the influence of the vetiver grass roots on soil shear strength. The lowland type of vetiver named as Songkhla3 is used in this study. The root system architecture of vetiver grass is investigated using rhizobox. The vetiver specimens in rhizobox are planted in rice husk ash in order to clearly observe the root system architecture. The side root area ratio is calculated using image processing technique. For measuring the root strength, the vetiver specimens are planted in lateritic soils which are commonly found in slope area. Tensile test is carried out on vetiver roots to determine the tensile strength and modulus. On the other hand, direct shear test is conducted on saturated root-soil specimens to investigation the increase of soil shear strength due to root. The results from laboratory tests can be used to determine the relationships between root biomechanics and physical

properties of root. Relationships of tensile strength and modulus with root
Field of Study: Civil Engineering Student's Signature

Academic Year: 2019 Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางธรณีเทคนิคและธรณีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือทุนวิจัยในงานฉบับนี้ ขอขอบคุณนักวิจัยทางด้านสาขาพฤกษศาสตร์ที่ได้ให้คำแนะนำในการปลูกและบำรุงรักษาหญ้าแฝก ขอขอบคุณนิสิตระดับปริญญาตรีที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการติดตั้งอุปกรณ์และทดสอบ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้สถานที่ และเครื่องทดสอบ จึงทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ณัฐพล วรกมล



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.2.1 ศึกษาสถาปัตยกรรมระบบรากหญ้าแฝกใน 2 มิติ	2
1.2.2 ศึกษากำลังดึงของรากหญ้าแฝกโดยพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก	2
1.2.3 ศึกษากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากรากหญ้าแฝก.....	2
1.2.4 เสนอความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นกับสถาปัตยกรรมระบบ รากของหญ้าแฝกและกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา.....	2
1.3.1 ทางด้านสถาปัตยกรรมระบบราก (Root system architecture)	2
-ทราบการแผ่ขยายของระบบรากหญ้าแฝก ใน 2 มิติ เพื่อสังเกตรูปแบบ ว่ามีเหมาะสมต่อการ ป้องกันดินถล่มระดับต้น.....	2
-สามารถนำอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดรากเทียบกับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (Root area ratio, RAR) ไปใช้ในการคำนวณค่ากำลังรับดึง และกำลังรับแรงเฉือน	2
1.3.2 ทางด้านกำลังของราก (Root of strength)	2

-สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก.....	2
1.3.3 ทางด้านกำลังของดินที่ผสมหญ้าแฝก.....	2
-สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นกับค่ากำลังรับแรงดึงของรากอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดรากเทียบกับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4.1 ใช้รากหญ้าแฝกพันธุ์ลุ่ม	2
1.4.2 ใช้ดินแกลบสำหรับปลูกพืชใน Rhizobox เพื่อศึกษาสถาปัตยกรรมระบบราก	2
1.4.3 ใช้ดินลูกรังกันบ่อสำหรับปลูกในกระบอก PVC เพื่อศึกษากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของดินและเพื่อศึกษากำลังรับแรงดึงของราก.....	2
1.4.4 ระยะเวลาในการปลูก 3 เดือน	2
1.4.5 การทดสอบแรงเฉือน จะทำให้ตัวอย่างเป็นแบบอิมิตัวด้วยน้ำ.....	2
บทที่ 2	3
2.1 หลักชีววิศวกรรมปฐพี (Soil bioengineering).....	3
2.2 ไม้เบิกนำ (Pioneer plants).....	3
2.3 หญ้าแฝก (Vetiver grass)	4
2.4 การปรับปรุงดินสำหรับการปลูกพืช (Improvement of soil for plants).....	4
2.4.1 การปรับ pH ของดิน	4
2.4.2 การให้สารอาหารในดิน.....	5
2.5 ระบบของรากในกล่อง Rhizobox (Root system in Rhizobox).....	6
2.5.1 รูปแบบการแผ่ขยายของรากพืช (Root architecture)	6
2.5.2 แบบจำลอง Rhizobox.....	9
2.6 กำลังของราก (Strength of root).....	11
บทที่ 3	17
3.1 การศึกษาคุณสมบัติของดิน	17

3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของราก.....	17
3.2.1 ความหนาแน่นของรากแห้ง	17
3.2.2 การหาปริมาณความชื้นในราก	18
3.2.3 ชีวมวลของรากแห้งต่อปริมาตรดิน.....	18
3.3 การศึกษาสถาปัตยกรรมของราก.....	18
3.3.1 แบบจำลอง กล่อง Rhizobox.....	18
3.3.2 การเตรียมตัวอย่างดินใน Rhizobox.....	20
3.3.3 การประมวลผลทางภาพ (Image processing)	20
3.4 การศึกษากำลังรับแรงดึงของราก	26
3.4.1 อัตราความเครียดของการดึง.....	27
3.4.2 การวัดความยาว	27
3.4.3 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก	28
3.5 การศึกษากำลังรับแรงเฉือนของดิน	29
3.5.1 แบบจำลอง กล่อง PVC	29
3.5.2 การเตรียมตัวอย่างดินใน PVC	30
3.5.3 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test)	30
3.5.4 ขั้นตอนการตัดดินที่มีราก เพื่อนำมาทดสอบเฉือนโดยตรง	31
3.5.5 ขั้นตอนการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง.....	34
บทที่ 4	36
4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของดิน	36
4.2 ผลการศึกษาสถาปัตยกรรมของราก	37
4.2.1 การจัดวางตัวของราก (Root orientation).....	39
4.3 ผลการศึกษากำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก.....	40

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกกับเส้นผ่านศูนย์กลางของราก หญ้าแฝก.....	41
4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกกับความหนาแน่นรากหญ้าแฝก แห้ง.....	43
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกกับปริมาณความชื้นของราก ...	43
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดูลส์กับกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก	44
4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของราก	45
4.4 ผลการศึกษากำลังรับแรงเฉือนของดิน	45
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสถาปัตยกรรมระบบรากของหญ้าแฝก กำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก และกำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก	53
บทที่ 5	55
5.1 การศึกษาสถาปัตยกรรมระบบรากของหญ้าแฝก.....	55
5.2 กำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก.....	55
5.3 กำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก	56
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสถาปัตยกรรมระบบรากของหญ้าแฝก กำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก และกำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก	56
ภาคผนวก.....	57
บรรณานุกรม.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	62

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สารประกอบของสูตรอาหาร Hoagland.....	6
ตารางที่ 2 คำอธิบายของลักษณะของรูปแบบราก (Styczen et al., 2003).....	8
ตารางที่ 3 ลักษณะของรูปแบบการแผ่ขยายของรากที่ช่วยเสริมแรงในดิน.....	9
ตารางที่ 4 คุณสมบัติพื้นฐานและมาตรฐานการทดสอบของดิน	17
ตารางที่ 5 ผลการหาความแม่นยำของโปรแกรม Image J	26
ตารางที่ 6 ผลการหาความแม่นยำของโปรแกรม Image J	28
ตารางที่ 7 ผลการศึกษาคุณสมบัติของดินลูกรังกันบ่อ	36
ตารางที่ 8 ผลการศึกษาคุณสมบัติของเถ้าแกลบข้าว	36
ตารางที่ 9 สถาปัตยกรรมของรากหญ้าแฝกที่ปลูกในกล่อง Rhizobox.....	37
ตารางที่ 10 อัตราส่วนของรากของรากด้านข้างกับชีวมวลของรากแห้งต่อปริมาตรดิน	38
ตารางที่ 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก.....	40
ตารางที่ 12 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก	41
ตารางที่ 13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีราก และดินเปล่า	45
ตารางที่ 14 พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีรากและดินเปล่า.....	51
ตารางที่ 15 การเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีราก	52
ตารางที่ 16 ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากรากที่ระยะความลึกแตกต่างกัน.....	52
ตารางที่ 17 ปริมาณของราก หลังทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง ที่ได้จากการแยกรากและดินออกจากกัน	53
ตารางที่ 18 พารามิเตอร์การลดทอนกำลังรับแรงดึงของราก	54
ตารางที่ 19 พารามิเตอร์แบบจำลองของ (Schwarz et al., 2010).....	54

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 ค่าความเป็นกรดต่างของดินที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืช (Lake, 2000).....	5
รูปที่ 2 การศึกษาระบบรากเทียบกับเวลา (Bodner et al., 2017).....	6
รูปที่ 3 รูปแบบการแผ่ขยายตามลักษณะของรากที่ยึดเกาะดิน (Wilde, 1958).....	7
รูปที่ 4 รูปแบบการแผ่ขยายของระบบรากพืช (Yen, 1987).....	8
รูปที่ 5 แบบจำลอง Rhizobox เพื่อใช้สังเกตโครงสร้างของรากในห้องปฏิบัติการ.....	9
รูปที่ 6 แบบจำลอง Rhizobox เพื่อใช้สังเกตโครงสร้างของรากในห้องปฏิบัติการ.....	10
รูปที่ 7 ตัวอย่างภาพการแผ่ขยายของรากความลึก ใน 2 มิติ จาก Rhizobox.....	10
รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกำลังแรงดึงกับเส้นผ่านศูนย์กลาง (Bischetti, Chiaradia, Epis, & Morlotti, 2009).....	12
รูปที่ 9 การเลื่อนของรากที่บิดตัวไปมุม (θ) ที่เกิดจากการเลื่อนที่ระนาบเฉือน (Gray & Sotir, 1996)	14
รูปที่ 10 ค่ากำลังของรากที่เกิดขึ้นที่เกิดจากถ่ายโอนความเค้นเฉือน (Wu, St, & Swanston, 1979)	15
รูปที่ 11 Rhizobox ที่จะทำการศึกษารูปแบบการแผ่ขยายของราก.....	19
รูปที่ 12 รูปถ่ายการแผ่ขยายของรากในกล่อง Rhizobox.....	20
รูปที่ 13 ภาพถ่ายกล่อง Rhizobox ก่อนนำไปประมวลผลทางภาพ.....	21
รูปที่ 14 นำภาพไปประมวลผลด้วยโปรแกรม ImageJ.....	22
รูปที่ 15 การตั้งค่าขนาดของรูปภาพ.....	23
รูปที่ 16 การนำส่วนของภาพไปประมวลผล.....	23
รูปที่ 17 ภาพที่ถูกตัดให้เหลือส่วนที่ต้องการจะประมวลผล.....	24
รูปที่ 18 ภาพที่แปลงเป็นภาพระดับสีเทา (Grayscale).....	25

รูปที่ 19 ภาพขาว-ดำ โดยจะกำหนดค่าความเข้มข้นของสีด้วยโหมดค่าขีดแบ่ง (Threshold value)	25
รูปที่ 20 เครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ (Universal testing machine)	27
รูปที่ 21 รูปถ่ายของรากในการทดสอบกำลังแรงดึงของราก	29
รูปที่ 22 การปลูกพีซีในท่อ PVC สำหรับทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน	30
รูปที่ 23 เครื่องมือทดสอบการเฉือนโดยตรง (Direct Shear Machines)	31
รูปที่ 24 ดินที่ปลูกหญ้าแฝกในท่อ PVC เพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง	31
รูปที่ 25 หลังจากทำการตัดตัวอย่างดินในท่อ PVC	32
รูปที่ 26 ตัวอย่างดินที่ราก นำเข้าบรรจุในบล็อทดสอบกำลังรับแรงเฉือน	32
รูปที่ 27 ตัวอย่างที่ถูกใส่ในเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือน พร้อมใส่น้ำเพื่อแช่ตัวอย่าง	33
รูปที่ 28 หลังทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน และแยกรากออกจากตัวอย่างดิน	33
รูปที่ 29 อัตราการหลุดตัวของตัวอย่างดิน ณ กำลังรับแรงตั้งฉากต่างกัน	34
รูปที่ 30 ระยะเวลาที่ใช้ในการเฉือนจนถึงจุดวิบัติ ตามมาตรฐาน ASTM D2487-06	35
รูปที่ 31 การกระจายตัวของขนาดเม็ดดินทั้งแก้วกลบขาว และดินลูกรัง	36
รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรากด้านข้างกับความลึก	37
รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรากด้านข้างกับชีวมวลของรากแห่งต่อปริมาตรดิน	38
รูปที่ 34 การจัดวางตัวของกลุ่มราก (root orientation) ของกล่อง Rhizobox ที่ 1	39
รูปที่ 35 การจัดวางตัวของกลุ่มราก (root orientation) ของกล่อง Rhizobox ที่ 2	39
รูปที่ 36 การจัดวางตัวของกลุ่มราก (root orientation) ของกล่อง Rhizobox ที่ 3	40
รูปที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากกับเส้นผ่านศูนย์กลางของราก	42
รูปที่ 38 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากกับเส้นผ่านศูนย์กลางของราก	42
รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากกับความหนาแน่นของรากแห่ง	43
รูปที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกกับปริมาณความชื้นของราก	44

รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังโมดูลัสของรากับกำลังรับแรงดึงของราก.....	44
รูปที่ 42 ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของราก	45
รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับความเครียดเฉือนของดินที่มีรากกับดินเปล่าที่ระดับความลึก 25 เซนติเมตร.....	47
รูปที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับแนวราบของดินที่มีรากกับดินเปล่าที่ระดับความลึก 25 เซนติเมตร.....	48
รูปที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับความเครียดเฉือนของดินที่มีรากกับดินเปล่าที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร.....	48
รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับแนวราบของดินที่มีรากกับดินเปล่าที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร.....	49
รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับความเครียดเฉือนของดินที่มีรากกับดินเปล่าที่ระดับความลึก 75 เซนติเมตร.....	49
รูปที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับแนวราบของดินที่มีรากกับดินเปล่าที่ระดับความลึก 75 เซนติเมตร.....	50
รูปที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับกำลังรับแรงตั้งฉากของการเปรียบเทียบดินที่มีรากและดินเปล่า.....	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในงานของวิศวกรรมปฐพี การปรับปรุงดินให้ดีขึ้นเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างในงานหลายประเภท เช่น การก่อสร้างชั้นทาง การก่อสร้างตึก การตัดถนนบนภูเขา การป้องกันดินถล่มของลาด เป็นต้น โดยวัตถุประสงค์ของการปรับปรุงดินนั้น เพื่อเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผล หรือเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดิน หรือทั้งสองอย่าง ซึ่งในศาสตร์ของวิศวกรรมธรณีเทคนิค การปรับปรุงดินแบ่งได้เป็น 4 รูปแบบ คือ 1. การบดอัดดิน 2. การระบายน้ำออกจากดิน 3. การใช้สารเคมีฉีดเข้าไปในดิน 4. การนำวัสดุไปเสริมในดิน ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ เราได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพืชพันธุ์ที่ปลูกในดิน ซึ่งเป็นรูปแบบของการเสริมแรงในดินโดยการนำวัสดุไปเสริมในดิน โดยเป็นการนำหลักทางวิศวกรรมปฐพี ซึ่งผสมผสานระหว่างศาสตร์ธรณีเทคนิคและหลักวิศวกรรมนิเวศ มาประยุกต์รวมเพื่อเสริมความแข็งแรงในพื้นที่ลาดชัน ที่มักเกิดดินถล่ม ทำให้เกิดผลกระทบและความเสียหายต่อบ้านเรือนหรือผู้คนที่อาศัยอยู่บริเวณด้านล่างของลาด ซึ่งในหลักทางวิศวกรรม ดินถล่มเกิดจากการเคลื่อนตัวของมวลดิน โดยมีปัจจัยหลายสาเหตุ ทั้งปัจจัยที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์เองและปัจจัยทางธรรมชาติ ซึ่งปัจจัยที่เกิดจากมนุษย์ มักเกิดจาก การขุดดินเพื่อทำถนนบริเวณปลายของลาด หรืองานถมเพื่อปลูกสิ่งก่อสร้างบริเวณด้านบนของลาด และปัจจัยทางด้านธรรมชาติ มักเกิดจาก สภาพภูมิประเทศ ความชันของพื้นที่ ชนิดดินของลาด โครงสร้างพื้นระภายในดิน การทำปฏิกิริยาทางเคมีในดิน สภาพอากาศ ปริมาณน้ำฝน หรือแม้กระทั่งแผ่นดินไหว โดยประเด็นสำคัญก็คือ การป้องกันหรือซ่อมแซมลาดนั้น จะต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับรูปแบบและพฤติกรรมของลาดเสียก่อน เพื่อที่จะสามารถออกแบบหรือแก้ไขปัญหาได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น ล้วนเป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ต้านการเลื่อนไถลของลาดนั้นลดลง ทำให้เพิ่มความเสี่ยงในความปลอดภัยของลาดตามมา โดยทั้งนี้การนำพืชพันธุ์มาศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้ เพื่อศึกษาอิทธิพลของพันธุ์พืช ว่ามีการเสริมแรงในดินเป็นอย่างไร โดยพืชที่จะใช้การศึกษาค้นคว้าในครั้งนี้คือหญ้าแฝก ที่ถือว่าเป็นไม้เบิกนำชนิดหนึ่ง ที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ที่โทรม และเป็นโครงการอันเนื่องมาจากพระดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 9 ซึ่งเราจะมุ่งเน้นไปที่ส่วนของรากหญ้าแฝกเป็นหลัก โดยสังเกตพฤติกรรมการแผ่ขยายของรากที่แทรกเข้าไปในดิน และค่ากำลังของรากที่เสริมเข้ามาในดิน ซึ่งจะช่วยป้องกันการกัดเซาะที่ผิวดินและดินถล่มระดับตื้น แต่ก็ไม่เหมาะสมกับป้องกันการดินถล่ม

ขนาดใหญ่ จึงต้องประยุกต์ใช้ทั้งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและพืชพันธุ์เข้ามาผสมกัน เพื่อให้ได้ประโยชน์และความเหมาะสมสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาสถาปัตยกรรมระบบรากหญ้าแฝกใน 2 มิติ
- 1.2.2 ศึกษากำลังดึงของรากหญ้าแฝกโดยพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก
- 1.2.3 ศึกษากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากรากหญ้าแฝก
- 1.2.4 เสนอความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นกับสถาปัตยกรรมระบบรากของหญ้าแฝกและกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

- 1.3.1 ทางด้านสถาปัตยกรรมระบบราก (Root system architecture)
 - ทราบการแผ่ขยายของระบบรากหญ้าแฝก ใน 2 มิติ เพื่อสังเกตรูปแบบ ว่ามีเหมาะสมต่อการป้องกันดินถล่มระดับต้น
 - สามารถนำอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดรากเทียบกับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (Root area ratio, RAR) ไปใช้ในการคำนวณค่ากำลังรับดึง และกำลังรับแรงเฉือน
- 1.3.2 ทางด้านกำลังของราก (Root of strength)
 - สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก
- 1.3.3 ทางด้านกำลังของดินที่ผสมหญ้าแฝก
 - สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นกับค่ากำลังรับแรงดึงของราก อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดรากเทียบกับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1.4.1 ใช้รากหญ้าแฝกพันธุ์ลุ่ม
- 1.4.2 ใช้ดินแกลบสำหรับปลูกพืชใน Rhizobox เพื่อศึกษาสถาปัตยกรรมระบบราก
- 1.4.3 ใช้ดินลูกรังกันบ่อสำหรับปลูกในกระบอก PVC เพื่อศึกษากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของดินและเพื่อศึกษากำลังดึงของราก
- 1.4.4 ระยะเวลาในการปลูก 3 เดือน
- 1.4.5 การทดสอบแรงเฉือน จะทำให้ตัวอย่างเป็นแบบอ้อมตัวด้วยน้ำ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักชีววิศวกรรมปฐพี (Soil bioengineering)

ชีววิศวกรรมปฐพี (Soil bioengineering) คือ เทคโนโลยีที่ใช้หลักการปฏิบัติด้านวิศวกรรมร่วมกับหลักการทางนิเวศวิทยา เพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบก่อสร้าง และดูแลระบบพืชพรรณเพื่อซ่อมแซมส่วนที่เกิดความเสียหายจากการกัดเซาะและพังทลายของดิน พร้อมทั้งจะปกป้องอย่างมีประสิทธิภาพ (Sotir, 2002) ซึ่งบทบาทของพืชที่ใช้ปลูกบนลาดในงานวิศวกรรมนั้น มีอยู่ด้วยกัน 2 ประการ คือ 1. ช่วยป้องกันการกัดเซาะ 2. ช่วยป้องกันดินถล่ม (Coppin, Armstrong, Richards, Moorehead, & Ltd, 2007) โดย Gray & Sotir (1996) ได้นำเสนอเกี่ยวกับอภิทธิพลต้นไม้ต่อความเสถียรภาพของลาดและป้องกันการเกิดดินถล่ม โดยจะเกี่ยวข้องกับรากพืช ซึ่งหน้าที่รากพืชที่เกี่ยวข้องกับความเสถียรภาพของลาด ในด้านการป้องกันดินถล่มนั้น มีอยู่ด้วยกัน 2 ประการ ได้แก่ 1. รากจะช่วยเสริมแรงยึดดิน (Root reinforcement) 2. การดูดน้ำของราก (Root absorption) ที่ช่วยลดแรงดันน้ำในช่องว่าง เนื่องจากกระบวนการคายน้ำของพืช (Evapotranspiration) ซึ่งเหตุผลที่นำหลักชีววิศวกรรมมาใช้ นั่น คือ 1. พืชพรรณมีประสิทธิภาพในการป้องกันเพิ่มสูงขึ้น เมื่อมีอายุมากขึ้น โดยจะไม่เสื่อมสภาพไปตามกาลเวลา ซึ่งตรงกันข้ามกับโครงสร้างประเภทอื่น เช่น โครงสร้างที่ทำจากคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforcement concrete) หรือวัสดุสังเคราะห์ (Geosynthetic) เมื่ออายุใช้นานมากขึ้น ประสิทธิภาพก็จะเสื่อมไป 2. งบประมาณที่ใช้ถูกกว่า 3. เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช ได้กล่าวว่า ในปัจจุบันทรัพยากรป่าไม้ นั้นได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ และลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลกระทบต่อประชาชนที่อาศัยอยู่พื้นที่โดยรอบเป็นจำนวนมาก โดยทั้งนี้พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 9 ได้พระราชทานแนวพระราชดำริเป็นแนวคิด ทรงแนะนำให้ปลูกป่าทดแทนพื้นที่ป่าไม้ที่ถูกบุกรุกแผ้วถางและฟื้นฟูพื้นที่ป่าที่เสื่อมโทรม โดยให้ปลูกพันธุ์ไม้ดั้งเดิม บางพื้นที่อาจใช้ไม้โตเร็วเป็นไม้เบิกนำ และให้ราษฎรมีส่วนร่วมในการปลูกและดูแลรักษา

2.2 ไม้เบิกนำ (Pioneer plants)

ไม้เบิกนำ ในงานวิศวกรรมจะใช้ไม้เบิกนำมาปลูกในช่วงเริ่มต้น เพื่อฟื้นฟูสภาพธรรมชาติของพื้นที่เดิม (Gray & Sotir, 1996) อาจเป็นพืชล้มลุก ไปจนถึงไม้ต้น โดยไม้เบิกนำนี้เป็นพืชที่มีช่วงอายุ

ประมาณ 20 ปี มีข้อดีหลายประการ เนื่องจาก เป็นพืชที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่เสื่อมโทรม โตเร็วในกัน ดาน แห้งแล้ง ต้องการแสงแดดมาก มีความสามารถต่อการป้องกันการกัดเซาะและเสริมกำลังในดิน เพื่อเพิ่มความเสถียรภาพในระดับหนึ่งได้ (Norris et al., 2008) สามารถปลูกขึ้นได้ในดินที่ขาด สารอาหารและแร่ธาตุ และนำสารอินทรีย์ที่ประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืชลงสู่ดิน ทำให้ดินมี สารอาหารเพียงพอ ต่อการปลูกไม้เนื้ออ่อน หรือไม้ยืนต้นต่อไป เช่น หล้าคา สาบเสือ โปบาย และ หล้าแฝกซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้หญ้าแฝก ซึ่งเป็นไม้เบิกนำชนิดหนึ่ง โดยจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

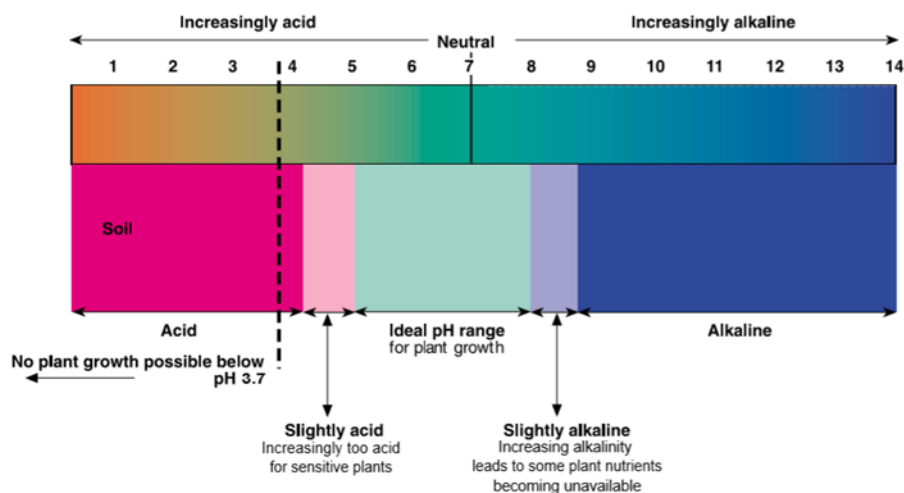
2.3 หญ้าแฝก (Vetiver grass)

หญ้าแฝก มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Vetiveria zizanioides* หรือ *Chrysopogon zizanioides* เป็นพืชตามแนวโครงการพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 9 โดยมีพระราชดำรัสว่า “ให้ใช้หญ้าแฝกในการพัฒนา ปรับปรุงบำรุงดิน พื้นฟูดินให้มีความอุดมสมบูรณ์ และแก้ปัญหาดินเสื่อมโทรม” เป็นพืชตระกูลหญ้า มีหลายสายพันธุ์ ซึ่งในประเทศไทยแบ่งเป็นสอง สายพันธุ์หลัก คือ พันธุ์หอมหรือลุ่ม และพันธุ์ดอน มีข้อดีหลายประการในต่อดิน เช่น การเพิ่มปริมาณ อินทรีย์วัตถุ, การเพิ่มอัตราการระบายน้ำและอากาศ, การเพิ่มของจุลินทรีย์ในดิน รักษาเพิ่มปริมาณ ความชื้นในดิน ซึ่งมีคุณสมบัติอยู่สองประการ คือประการแรกคือส่วนของกอแฝก ช่วยลดความเร็วน้ำ ในการกัดเซาะ และตักตะกอน ประการที่สอง คือส่วนของรากหญ้าแฝก ช่วยป้องกันดินถล่มระดับตื้น โดยในงานวิจัยฉบับนี้ จะใช้หญ้าแฝกลุ่ม ที่มีความยาวรากหยั่งลึกได้ถึง 1-3 เมตร ซึ่งในประเทศไทย นิยมใช้แฝกลุ่ม เพื่อป้องกันกัดเซาะและดินถล่ม เพราะแฝกลุ่มนี้ มีลักษณะที่ดีกว่าแฝกดอนอยู่หลาย ประการ เช่น ลักษณะกอ ใบ และราก และมีเปอร์เซ็นต์ในการรอดตาย ที่ดีกว่าแฝกดอน โดยลักษณะ รากของหญ้าแฝก จะโตในแนวตั้งมากกว่าแนวราบ จึงเหมาะสมต่อการเสริมแรงในดิน (Root reinforcement) โดยหญ้าแฝกจะเจริญเติบโตแตกกอชิดกันเป็นแนวรั้วหญ้าแฝกใช้เวลา 4-6 เดือน (กรมพัฒนาที่ดิน, n.d.)

2.4 การปรับปรุงดินสำหรับการปลูกพืช (Improvement of soil for plants)

2.4.1 การปรับ pH ของดิน

ก่อนที่จะทำความเข้าใจความเป็นกรดเป็นด่างของดิน เราต้องทำความเข้าใจกับ คุณสมบัติดินก่อนว่าเป็นดินทรายหรือดินเหนียว มีอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุหรือไม่ และมี อากาศและน้ำที่อยู่ในดินเท่าไร โดยคุณสมบัติของน้ำ มักจะขึ้นตรงกับ ค่า pH ของดินเป็น คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญเนื่องจากมีผลต่อการดูดซึมสารอาหารและจุลินทรีย์ของพืชที่อยู่ใน ดิน โดย pH ในดิน ที่เหมาะสมกับการปลูกพืชขึ้น อยู่ในช่วง 5-8 (Lake, 2000)



รูปที่ 1 ค่าความเป็นกรดต่างของดินที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืช (Lake, 2000)

2.4.2 การให้สารอาหารในดิน

สารอาหารที่เราใช้สำหรับปลูกพืชในถ้ำกลบข้าวนั้น เราเลือกใช้สูตรอาหารของ Hoagland โดย Hoagland & Arnon (1950) พบว่าพืชต้องการธาตุอาหารที่จำเป็นทั้งหมด 16 ธาตุ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ 1.ธาตุอาหารที่พืชต้องการปริมาณมาก 9 ธาตุ คือ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N), ฟอสฟอรัส (P), โพแทสเซียม (K), แคลเซียม (Ca), แมกนีเซียม (Mg) และกำมะถัน (S) 2.ธาตุอาหารที่พืชต้องการปริมาณน้อย 7 ธาตุ คือ แมกนีเซียม (Mn), เหล็ก (Fe), สังกะสี (Zn), ทองแดง (Cu), โบรอน (B), โมลิบดีนัม (Mo) และ คลอรีน (Cl) ซึ่งปกติสูตรอาหารนี้จะใช้สำหรับปลูกพืชในน้ำ แต่ในงายวิจัยฉบับนี้ เราจะใช้ผสมกับดินกลบข้าวที่ปลูกใน Rhizobox ซึ่งกลบข้าวอาจมีสารอาหารในดินที่จำเป็นต่อการปลูกพืชไม่เพียงพอ จึงต้องทำการใส่สารอาหารเพิ่มเติมเข้าไป ก่อนไปทำการבודัดใน Rhizobox ต่อไป โดยสูตรอาหารของ Hoagland จะประกอบไปด้วยสารประกอบต่อน้ำ 1 ลิตร ดังตารางที่ 1 (Botany @ Chula Laboratory, n.d.) ส่วนดินในท่อ PVC จะเป็นดินลูกรังก้นบ่อ ซึ่งเราจะใช้ปุ๋ยเคมี สูตร 13-13-13 ผสมกับดิน เพื่อเสริมสารอาหารในดิน

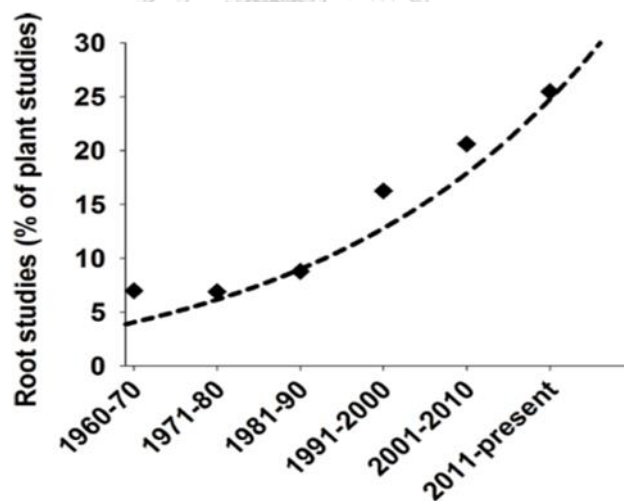
ตารางที่ 1 สารประกอบของสูตรอาหาร Hoagland

สารประกอบของสูตรอาหาร Hoagland	ปริมาณต่อน้ำ 1 ลิตร (ml/L)
KNO_3	1
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1
KH_2PO_4	1
Fe-EDTA	1
Micro-nutrient	0.25

2.5 ระบบของรากในกล่อง Rhizobox (Root system in Rhizobox)

2.5.1 รูปแบบการแผ่ขยายของรากพืช (Root architecture)

การศึกษาระบบของรากพืชนั้น เริ่มมีงานวิจัยเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จากผลการตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการ SCI โดยใช้คำไขหลัก (keyword) ว่า “พืช” หรือ “พืชและราก” (Bodner, Alsalem, Nakhforoosh, Arnold, & Leitner, 2017) ดังแสดงในรูปที่ 2



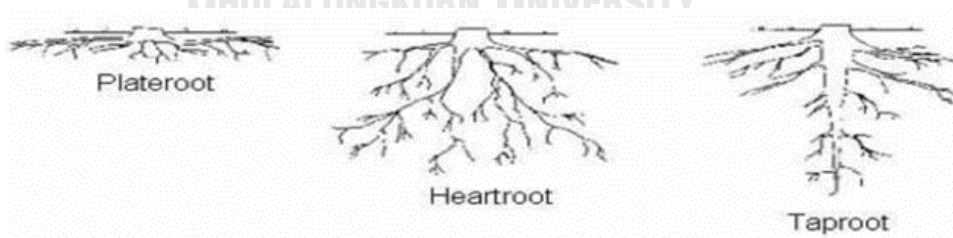
รูปที่ 2 การศึกษาระบบรากเทียบกับเวลา (Bodner et al., 2017)

โดยเหตุผลหลักที่ทำให้การศึกษามากขึ้นเกิดจาก 2 ประการ คือ 1. พืชที่อยู่บนโลกได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมมากขึ้น อันเนื่องมาจาก การเปลี่ยนแปลงของโลก ส่งผลให้เกิดการสูญเสียทรัพยากรอันจะส่งผลเสียต่อระบบนิเวศ 2. เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทางการตรวจวัดนั้น ทำให้มีความสนใจของรากพืชมากขึ้น โดยสมัยก่อนจะต้องแยกดินกับรากพืชออกจากกันด้วยวิธีการขุดแล้วฉีดย้ำน้ำออก เพื่อดูรูปแบบของราก ซึ่ง

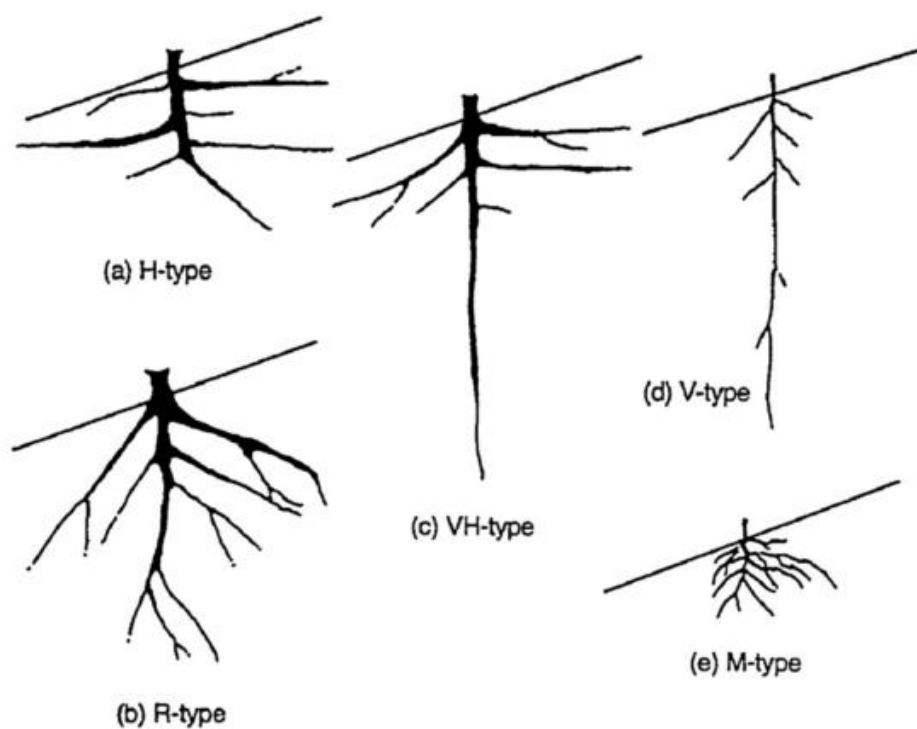
การแยกรากพืชออกจากดินนั้น จะรบกวนการจัดวางโครงสร้างของแกนราก และอาจได้รับความเสียหาย

ซึ่งคำว่าสถาปัตยกรรม ในหลักทางชีววิทยา หมายถึงการกำหนดค่าเชิงพื้นที่ โดยการรวมพื้นที่ที่ซับซ้อน ซึ่งมักถูกนำมาใช้อ้างอิงถึงลักษณะรูปทรงของระบบรากที่แตกต่างกันออกไป หรือความหมายอีกนัยหนึ่ง คือการกำหนดค่าเชิงพื้นที่ของระบบราก ซึ่งจะกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของแกนรากอย่างชัดเจน นอกจากนี้การศึกษาระบบราก จะได้การกระจายตัวของรากที่ปรากฏเด่นชัดในการไล่ระดับสีหรือตำแหน่งของราก โดยปกติการศึกษาการกระจายของรากมีความสัมพันธ์กับมวลชีวภาพรากหรือความยาวของรากตามลักษณะของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความยาวรากพืชจากลำต้นที่ยังลึกลงไปในดินและตำแหน่งระหว่างพืชใกล้เคียง โดยในธรรมชาติมักประกอบด้วยรากของพืชมากกว่าหนึ่งชนิดหรือมากกว่าหนึ่งชนิดที่อยู่ซ้อนทับกัน ปกติแล้วการศึกษาเกี่ยวกับสถาปัตยกรรมรากจะไม่รวมรายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างที่ละเอียด เช่น รากขน (Sinker root) แต่จะเกี่ยวข้องกับระบบรากขนาดใหญ่หรือทั้งหมด (Lynch, 1995)

โดยรูปแบบของรากที่ช่วยเสริมเสถียรภาพของลาดที่ดี ต้องมีส่วนประกอบรากในแนวตั้ง (Tap root) และรากแขนง (Sinker root) ที่สามารถหยั่งลึกลงผ่านระนาบเขื่อนไว้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งรากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก สามารถช่วยเสริมสร้างเสถียรภาพของลาดได้ดีกว่ารากที่มีเส้นขนาดใหญ่ เมื่อเทียบปริมาณรากเท่ากัน (C. B. Zhang, Chen, & Jiang, 2014)



รูปที่ 3 รูปแบบการแผ่ขยายตามลักษณะของรากที่ยึดเกาะดิน (Wilde, 1958)



รูปที่ 4 รูปแบบการแผ่ขยายของระบบรากพืช (Yen, 1987)

ตารางที่ 2 คำอธิบายของลักษณะของรูปแบบราก (Styczen et al., 2003)

จัดหมวดหมู่ ระบบราก (Yen, 1987)	คำอธิบายของรูปแบบราก (Styczen et al., 2003)
H-Type	รากส่วนใหญ่แผ่ขยายออกในแนวนอน และกว้างมาก
R-Type	รากส่วนใหญ่แผ่ขยายออกแนวทแยง และขยายออกด้านข้างมาก
VH-Type	มีรากแก้วยังลึกในแนวตั้ง และแตกแขนงออกด้านข้างกว้างมาก
V-Type	มีรากแก้วยังลึกในแนวตั้ง และแตกแขนงออกด้านข้างน้อย
M-Type	มีรากเป็นกลุ่มก้อน และแผ่ขยายออกด้านข้างน้อย

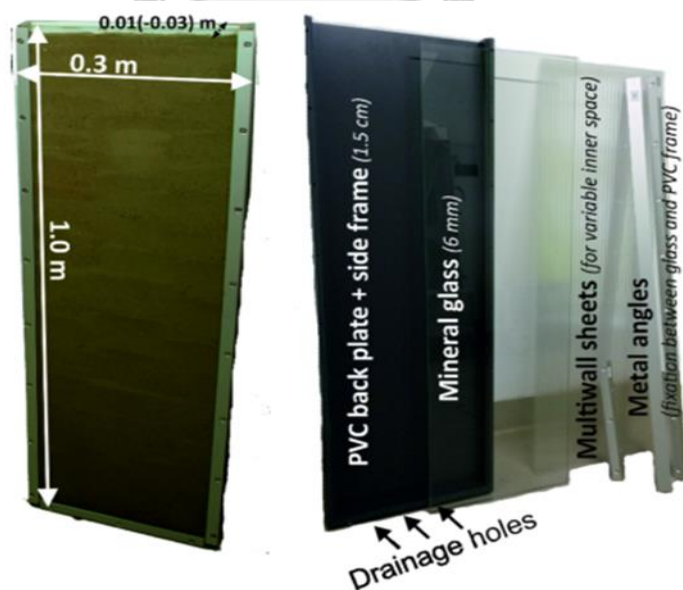
โดยงานวิจัยของ นิพนธ์, 2549 ได้กล่าวถึงประสิทธิภาพของรูปแบบการแผ่ขยายรากที่ช่วยเสริมแรงในดิน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะของรูปแบบการแผ่ขยายของรากที่ช่วยเสริมแรงในดิน

ลักษณะของราก	ประโยชน์ของการแผ่ขยายของรากที่ช่วยเสริมแรงในดิน
V-Type, R-Type, VH-Type, H-type	รากหยั่งลึก ช่วยเสริมเสถียรภาพของลาด และต้านแรงลม
H-Type, M-Type	รากหยั่งลึกปานกลางช่วยให้ดินจับตัวได้ดี

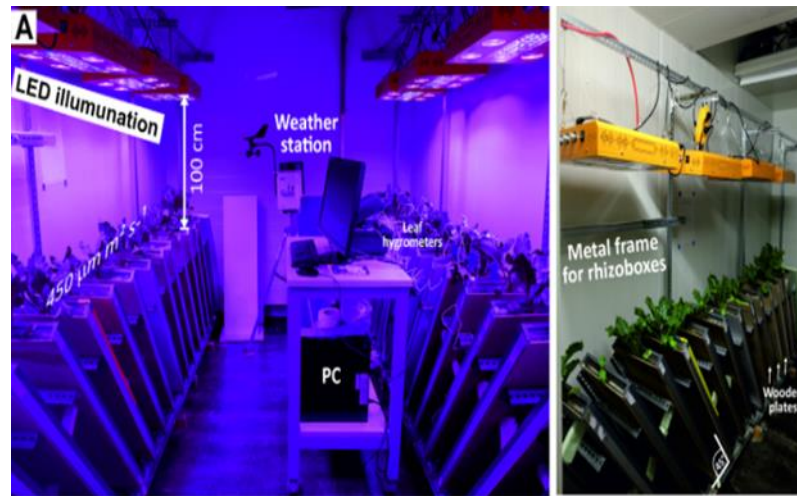
2.5.2 แบบจำลอง Rhizobox

W.Bohm (1979) ได้อธิบายในหนังสือเกี่ยวกับ การศึกษาระบบรากพืช (Root morphology) แบบไม่ทำลายรากพืชหรือรบกวนน้อย (Non-destructive) ซึ่งทำได้หลายวิธี หนึ่งในนั้นคือวิธีการศึกษารากพืช โดยการขุดหลุมแล้วฝังสังเกตผ่านทางด้านหลังของกระจก โดยเรียกชื่อไว้ว่า “Rhizotron” (Rogers, 1969) ซึ่งถือเป็นต้นแบบที่ในกันทั่วโลกใน ขณะนั้น จนในปัจจุบัน ได้ถูกพัฒนาให้สามารถศึกษาระบบรากในห้องปฏิบัติการได้ ซึ่งเรียกว่า “Rhizobox” (O. Adu et al., 2017) ดังแสดงในรูปที่ 5-7

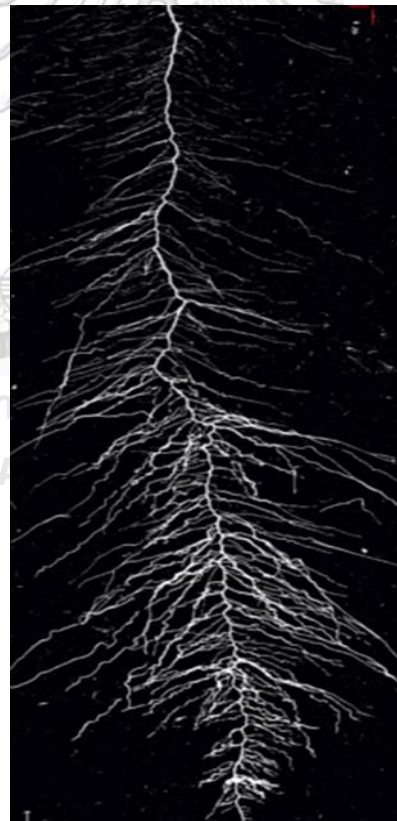


รูปที่ 5 แบบจำลอง Rhizobox เพื่อใช้สังเกตโครงสร้างของรากในห้องปฏิบัติการ

(Bodner et al., 2017)



รูปที่ 6 แบบจำลอง Rhizobox เพื่อใช้สังเกตโครงสร้างของรากในห้องปฏิบัติการ (Bodner et al., 2017)(ต่อ)



รูปที่ 7 ตัวอย่างภาพการแผ่ขยายของรากความลึก ใน 2 มิติ จาก Rhizobox (Bodner et al., 2017)

2.6 กำลังของราก (Strength of root)

การเสริมแรงทางกลของรากในดินนั้น จะขึ้นอยู่กับระบบราก (Root system) จำนวนราก (Number of roots) เส้นผ่านศูนย์กลางของราก (Root diameter) กำลังรับแรงดึง (Tensile strength) และค่าความแข็ง (Stiffness) โดยค่า Young's modulus (E) ในช่วงเริ่มต้นจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงของกราฟระหว่างความเค้นดึงกับความเครียดดึง (Tensile stress-strain curve) (Mickovski & van Beek, 2009; Stokes, Atger, Bengough, Fourcaud, & Sidle, 2009) และความยาวของราก ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ จะใช้ดินลูกรังกันบ่อที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 10 เพื่อปลูกหญ้าแฝกในท่อ PVC เพราะเป็นดินที่เหมาะสมต่อการปลูกพืช การซึมผ่านของน้ำ และมีสารอาหารเพียงพอต่อการปลูกพืช (Barton, 2013) โดยทั้งนี้งานวิจัยหลายฉบับได้ศึกษาความยาวของราก แล้วได้ข้อสรุปว่าความยาวของรากมีความสัมพันธ์กับอัตราการเติบโตของพืชและความสามารถของพืชในการรักษาเสถียรภาพของดิน (Stokes et al., 2009) จำนวนรากที่ใหญ่และเล็กมีบทบาทสำคัญในการรักษาเสถียรภาพของดินแตกต่างกันออกไป โดยรากขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลาง >10 มิลลิเมตร) อาจทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างในการยึดเกาะดิน ส่วนรากขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง <2 มิลลิเมตร) จะแทรกซึมอยู่ในดินเสมือนเป็นโครงสร้างเพื่อป้องกันการกัดเซาะบริเวณผิวดิน (Stokes et al., 2009) โดย Ghestem, Veylon, Bernard, Vanel, & Stokes., (2014) พบว่าผลรวมของความยาวรากขนาดใหญ่และความหนาแน่นของรากขนาดเล็กมีส่วนช่วยในการเสริมแรงของรากเพื่อเพิ่มความต้านทานแรงเฉือนของดิน

โดยงานวิจัยหลายฉบับได้ศึกษาการเสริมแรงทางกลของรากในดิน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นของรากและเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (Ghestem et al., 2014; Mickovski & van Beek, 2009) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$T_r = \alpha d^\beta \quad (1)$$

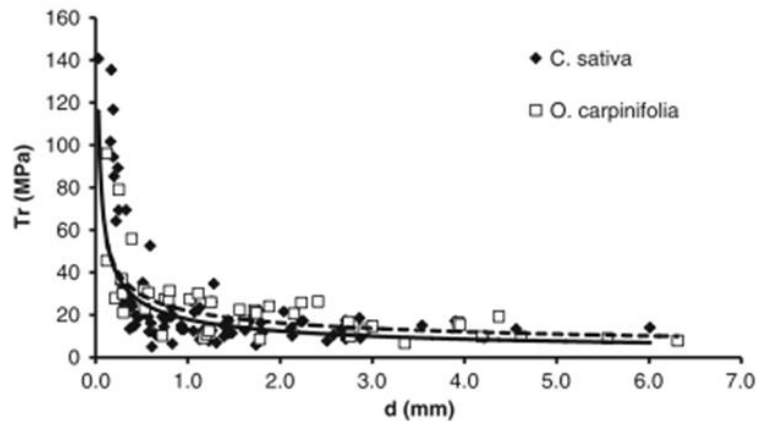
เมื่อ

T_r หมายถึง กำลังรับแรงดึงของราก

d หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลาง

α, β หมายถึง ค่าคงที่เอมพิริคัลที่ได้จากการทดลองพืชชนิดใดๆ โดยค่า β มัก

มีค่าน้อยกว่า 0 ตาม Negative power law (Mao et al., 2012)



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกำลังแรงดึงกับเส้นผ่านศูนย์กลาง (Bischetti, Chiaradia, Epis, & Morlotti, 2009)

โดยรากพืชที่ช่วยเพิ่มกำลังเฉือนในดินนั้น จะส่งความเค้นเฉือนในดินเข้าไปสู่รากพืชเอง (Fiber root tensile strength) และแรงเสียดทานระหว่างดินกับราก (Interaction soil-root) โดยทั้งนี้ได้พิจารณาถึงการวางตำแหน่งรากที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับระนาบเฉือน ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะพิจารณาเค้นแรงดึงของรากเอง โดยการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนในดินนั้น จะพิสูจน์จากแบบจำลองมอร์คูลอมบ์ (Mohr-coulomb) (Waldron, 1977; Waldron L.J. & Dakessian, 1981; Wu, St, & Swanston, 1979) ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2)$$

เมื่อ

τ_f หมายถึง ความเค้นเฉือน

c หมายถึง ค่าการยึดเกาะของดิน

σ_n หมายถึง ความเค้นตั้งฉากกับระนาบเฉือน

ϕ หมายถึง มุมแรงเสียดทานภายในดิน

ส่วนกำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีรากช่วยในการเสริมแรง ดังแสดงในสมการที่ 3

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi + \Delta \tau \quad (3)$$

เมื่อ

$\Delta\tau$ หมายถึง ค่ากำลังเฉือนที่เพิ่มขึ้นของดินเนื่องจากราก (Shear strength increment or Root cohesion)

โดยค่าแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก ดังแสดงในสมการที่ 4

$$\Delta\tau = T_r \left(\frac{A_r}{A} \right) \times \delta \quad (4)$$

เมื่อ

T_r หมายถึง กำลังแรงดึงของรากเฉลี่ย

A_r หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของราก ($\sum n_i a_i$)

A หมายถึง พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด

δ หมายถึง ค่าคงที่ซึ่งแปรผันตามการเลื่อนของระนาบเฉือน

เมื่อระนาบการเฉือนเกิดการเลื่อนไถล ทำให้รากเบนไปเป็นมุม θ จากแนวตั้ง ดังแสดงในสมการที่ 5

$$\Delta\sigma_n = \cos\theta \quad \text{และ} \quad \Delta t_t = \sin\theta \quad (5)$$

เมื่อ

$\Delta\sigma_r$ หมายถึง ค่าที่เกิดจากเปลี่ยนแปลงมุมของความเค้นดึง ราก ออกมาในแนวตั้งฉากกับแนวระนาบ

Δt_t หมายถึง ค่าที่เกิดจากเปลี่ยนแปลงมุมของความเค้นดึงราก ออกมาในแนวขนานกับแนวระนาบ

θ หมายถึง มุมที่รากเบนไป ตามรูปที่ 9 และ 10

ดังนั้นค่า δ สามารถคำนวณได้ ดังแสดงในสมการที่ 6

$$\delta = \Delta t_t + \Delta\sigma_n \tan\phi \quad (6)$$

แทนสมการ (5) ลงใน (6) ดังแสดงในสมการที่ 7

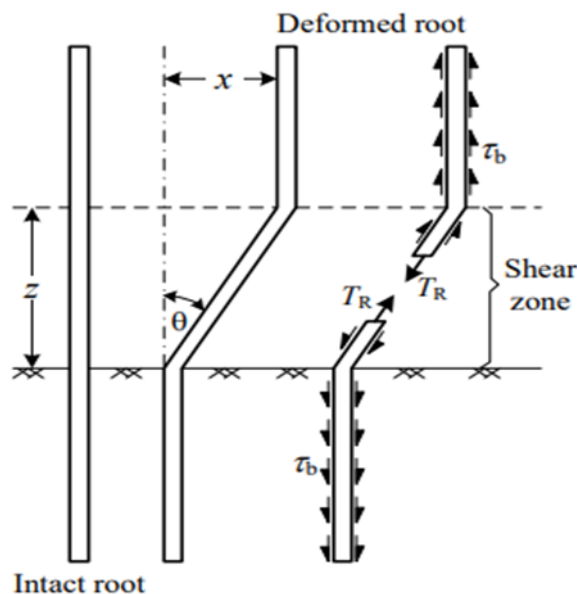
$$\delta = [\sin\theta + \cos\theta \tan\phi] \quad (7)$$

แทนสมการ (7) ลงใน (4) ดังแสดงในสมการที่ 8

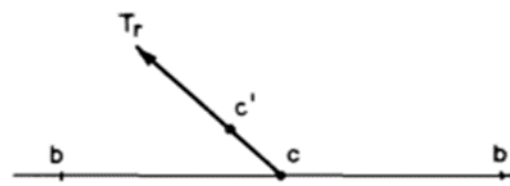
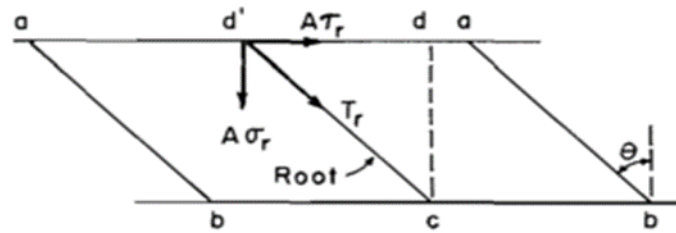
$$\Delta\tau = T_r \left(\frac{A_r}{A}\right) \times [\sin\theta + \cos\theta \tan\phi] \quad (8)$$

โดย American Society of Civil Engineers (1997) ได้รายงานผลงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับรากพืชที่ปลูกอยู่ในดิน พบว่ามุมเสียดทานภายในดิน (ϕ) มีผลต่อการวิเคราะห์กำลังของราก ซึ่ง Wu et al. (1979) ได้เสนอช่วงของมุมบิดของรากที่เกิดจากการเลื่อนไถลของระนาบเฉือน (θ) และมุมเสียดทานภายในดิน (ϕ) โดย $40^\circ < \theta < 90^\circ$ และ $25^\circ < \phi < 40^\circ$ ซึ่งโดยทั่วไปเป็นช่วงที่เกิดขึ้นมากที่สุด จะมีค่า $[\sin\theta + \cos\theta \tan\phi]$ เท่ากับ 1-1.3 ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ค่าเฉลี่ยอยู่ 1.2 เพราะฉะนั้นจึงสามารถลดรูปสมการความเค้นเฉือนที่เพิ่มจากราก ให้เป็นรูปแบบอย่างง่าย ดังแสดงในสมการที่ 9

$$\Delta\tau = 1.2 \times T_r \times \left(\frac{A_r}{A}\right) \quad (9)$$



รูปที่ 9 การเลื่อนของรากที่บิดตัวไปมุม (θ) ที่เกิดจากการเลื่อนที่ระนาบเฉือน (Gray & Sotir, 1996)



รูปที่ 10 ค่ากำลังของรากที่เกิดขึ้นที่เกิดจากถ่ายโอนความเค้นเฉือน (Wu, St, & Swanston, 1979)

โดยทั้งนี้ การที่จะทำให้ได้ค่ากำลังเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก ($\Delta\tau$) ตามสมการข้างต้น จะจำกัดรูปแบบการวิบัติให้เป็นแบบเส้นใยของรากขาด (Breaking root mode) ซึ่งจะแปรผันตามความยาวของราก ถ้าความยาวรากน้อยไปการวิบัติจะเป็นรูปแบบรากหลุดออกจากดิน (Pullout mode) ก่อนที่รากจะขาด (Gray & Ohashi, 1983) ดังแสดงในสมการที่ 10

$$L_{min} = \frac{T_r D}{4t_b} \quad (10)$$

เมื่อ

L_{min} หมายถึง ความยาวรากน้อยสุดที่ไม่ให้เกิดการดึงหลุดของราก

D หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางของราก

t_b หมายถึง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสรากกับดิน

ต่อมา Schwarz et al. (2010) กล่าวว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก และคุณสมบัติรากที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของรากแตกต่างกันไปด้วย ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงดึงของรากที่เกิดขึ้นจริง ในระหว่างการเลื่อนไถลนั้น จะมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ย

ของกำลังรับแรงดึงของรากสูงสุด จึงได้ปรับแก้สมการค่ากำลังเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก ของ Wu, St, & Swanston (1979) ดังแสดงในสมการที่ 11

$$\Delta\tau = m \times T_r \times [\sin\theta + \cos\theta \tan\phi] \times \left(\frac{A_r}{A}\right) \quad (11)$$

เมื่อ

m หมายถึง ตัวลดทอนกำลังรับแรงดึงสูงสุดของรากเฉลี่ย ซึ่งมีเท่ากับ 0.4

นอกจากนั้น Schwarz et al. (2010) ยังได้นำเสนอแบบจำลองมัดเส้นใยของราก (Fiber bundle model) สามารถเขียนเป็นสมการของค่ากำลังเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากรากใหม่ โดยการรวมพจน์ของ T_r และ $[\sin\theta + \cos\theta \tan\phi]$ เข้าด้วยกัน โดยจะแสดงสัมพันธของค่ากำลังเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากรากและอัตราส่วนราก ดังแสดงในสมการที่ 12

$$\Delta\tau = k_1 \left(\frac{A_r}{A}\right) + k_2 \quad (12)$$

เมื่อ

k_1, k_2 หมายถึง ค่าคงที่อิมพีริคัล ที่จัดอยู่ในเทอมสมการเส้นตรงของอัตราส่วนอัตราของรากและค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

และ Gray and Sotir., (1996) สามารถเขียนเป็นสมการของค่ากำลังเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากรากและชีวมวลของรากแห้งต่อปริมาตรดิน ดังแสดงในสมการที่ 13

$$\Delta\tau = a(\rho_R + b) \quad (13)$$

เมื่อ

a, b หมายถึง ค่าคงที่อิมพีริคัล ที่จัดอยู่ในเทอมสมการเส้นตรงของชีวมวลของรากแห้งต่อปริมาตรของดินและค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก

ρ_R หมายถึง ชีวมวลของรากแห้งต่อปริมาตรของดิน

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการดำเนินงานวิจัยและขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ ซึ่งจะกล่าวถึงหัวข้อด้านล่างต่อไปนี้

3.1 การศึกษาคุณสมบัติของดิน

งานวิจัย จะทำการศึกษาคูณสมบัติของดินลูกรังก้นบ่อ และเถ้าแกลบข้าว ซึ่งเป็นการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน ซึ่งจะดำเนินการทดสอบ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4 คุณสมบัติพื้นฐานและมาตรฐานการทดสอบของดิน

คุณสมบัติพื้นฐาน	มาตรฐาน
ความเป็นกรดต่าง (pH)	- (pH meter)
ความถ่วงจำเพาะของดิน (G_s)	ASTM D854 - 14
Classification of soil	ASTM D422 - 63

3.2 การศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพของราก

3.2.1 ความหนาแน่นของรากแห้ง

ความหนาแน่นของรากแห้ง คือ น้ำหนักของรากแห้งที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง เทียบกับพื้นที่หน้าตัด (Birouste, Zamora-Ledezma, Bossard, Pérez-Ramos, & Roumet, 2014) การหาค่าความหนาแน่นของรากแห้ง (Dry root density) สามารถแสดงดังสมการที่ 14

$$\text{Dry root density} = \frac{W_{oven}}{V_r} \quad (14)$$

เมื่อ

W_{oven} หมายถึง น้ำหนักของรากแห้งอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

V_r หมายถึง ปริมาตรของราก

3.2.2 การหาปริมาณความชื้นในราก

$$W(\%) = \frac{W_{s,r} - W_{oven}}{W_{oven}} \quad (15)$$

เมื่อ

$W(\%)$ หมายถึง ปริมาณความชื้นในราก

$W_{s,r}$ หมายถึง น้ำหนักของรากที่แช่น้ำไว้ 1 ชั่วโมง

W_{oven} หมายถึง น้ำหนักของรากหลังอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.3 ชีวมวลของรากแห้งต่อปริมาตรดิน

$$\rho_R = \frac{W_{d,r}}{V_s} \quad (16)$$

เมื่อ

ρ_R หมายถึง ชีวมวลของรากแห้งต่อปริมาตรดิน

$W_{d,r}$ หมายถึง น้ำหนักของรากแห้งที่ทำการแยกออกจากดินบริเวณนั้น

V_s หมายถึง ปริมาตรของดินบริเวณที่มีรากแทรก

3.3 การศึกษาสถาปัตยกรรมของราก

3.3.1 แบบจำลอง กล่อง Rhizobox

กล่อง Rhizobox เป็นแผ่นอะคริลิกใส มีขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร มีรูเจาะระบายที่ฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เซนติเมตร โดยขนาด Rhizobox มีความใกล้เคียงกับวิจัยของ (Ghestem et al., 2014) ซึ่งแผ่นอะคริลิกไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของราก (Withington et al., 2003) ดังแสดงในรูปที่ 11



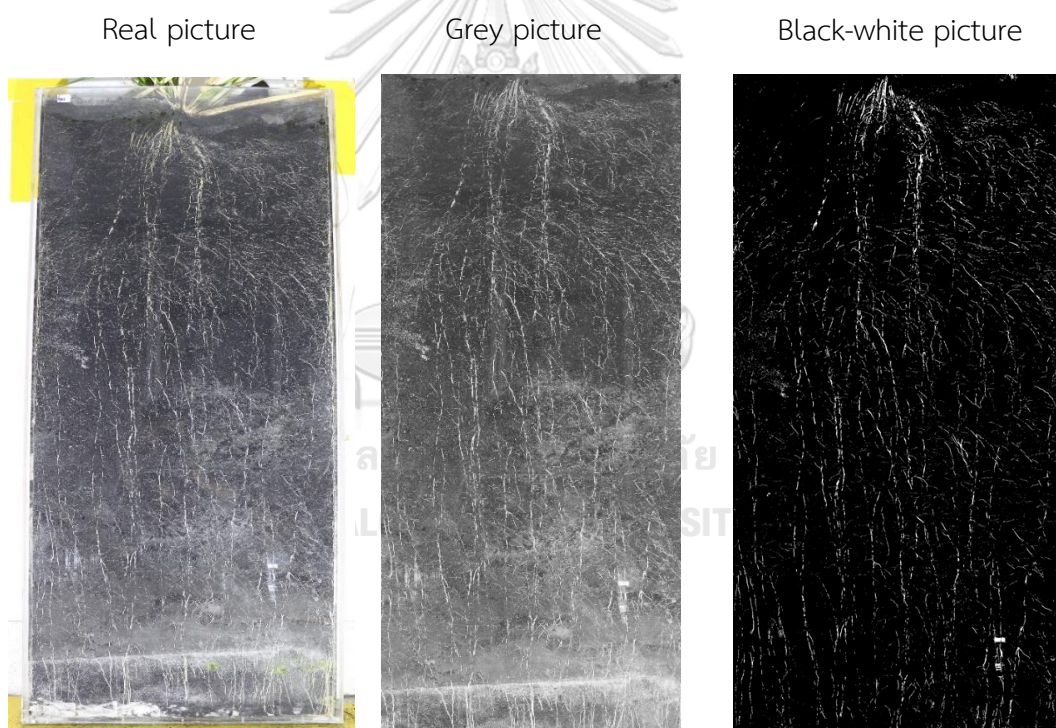
รูปที่ 11 Rhizobox ที่จะทำการศึกษารูปแบบการแผ่ขยายของราก

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างดินใน Rhizobox

สำหรับการศึกษาสถาปัตยกรรมของราก การศึกษานี้ใช้เถ้าแกลบข้าวเป็นดินในการปลูกพืชใน Rhizobox โดยนำเถ้าแกลบข้าวมาคัดแยกให้เหลือแต่สีดำ เพื่อให้ได้สีที่แตกต่างกับของรากพืช ซึ่งจะช่วยให้สามารถสังเกตสถาปัตยกรรมระบบรากได้อย่างชัดเจน โดยการบดอัดเถ้าแกลบข้าวในกล่อง Rhizobox จะต้องทำการควบคุมให้ความหนาแน่นของเถ้าแกลบข้าวมีค่าใกล้เคียงกัน

3.3.3 การประมวลผลทางภาพ (Image processing)

การศึกษาระบบสถาปัตยกรรมของรากของหญ้าแฝกที่ปลูกในกล่อง Rhizobox เพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนของรากด้านข้างผ่านกระบวนการประมวลผลทางภาพ (Image processing) ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยค่าความแม่นยำของโปรแกรม จะแสดงในตารางที่ 5



รูปที่ 12 รูปถ่ายการแผ่ขยายของรากในกล่อง Rhizobox

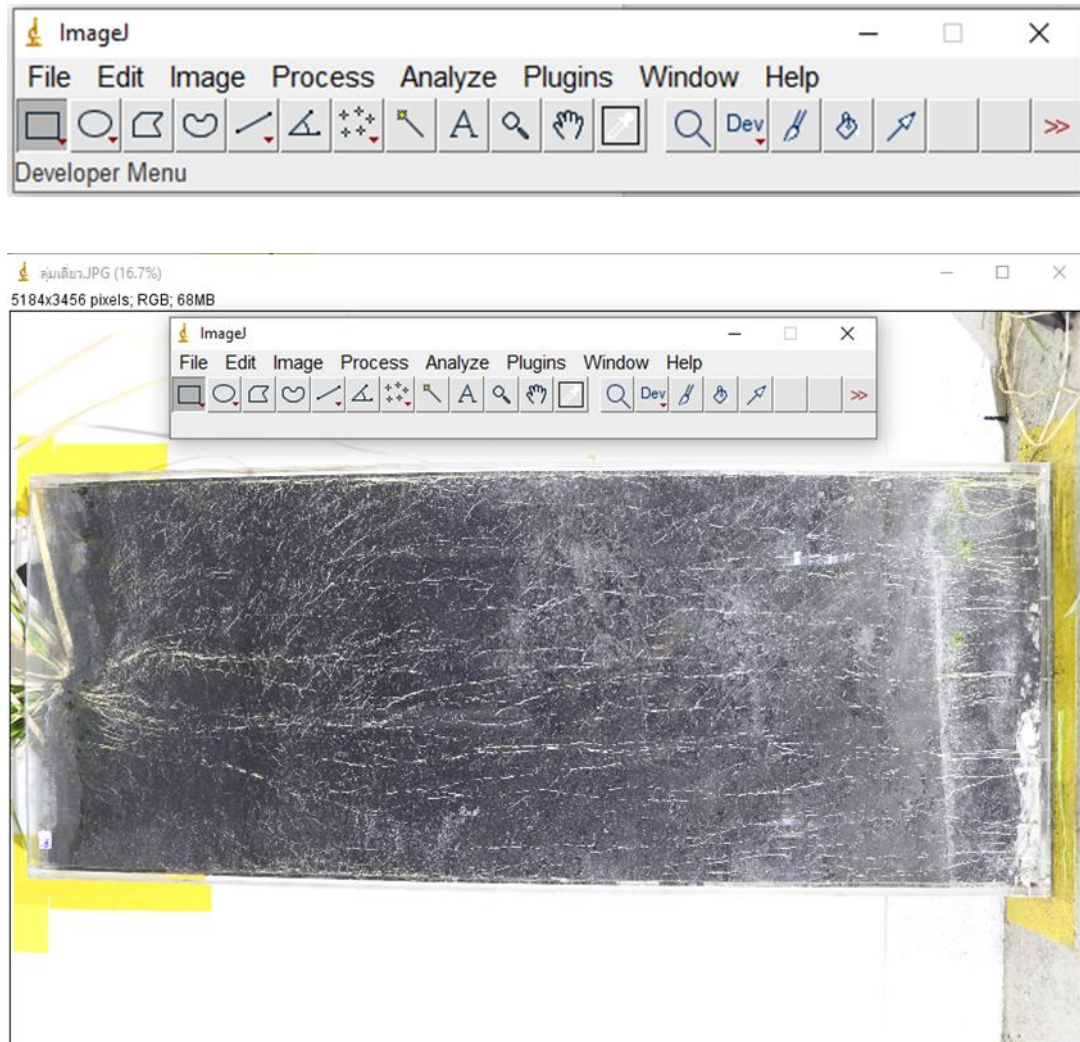
การวิเคราะห์หาอัตราส่วนของรากด้านข้างจากสถาปัตยกรรมของราก จะทำจากขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำกล้อง Rhizobox ที่ปลูกหญ้าแฝกในแก้วแกลบข้าว นำมาถ่ายภาพ โดยมีการตั้งค่ากล้อง (Mode: AV; ISO: AUTO; Focus length: 6.3-9.0; Speed shutter: AUTO) ดังแสดงในรูปที่ 13



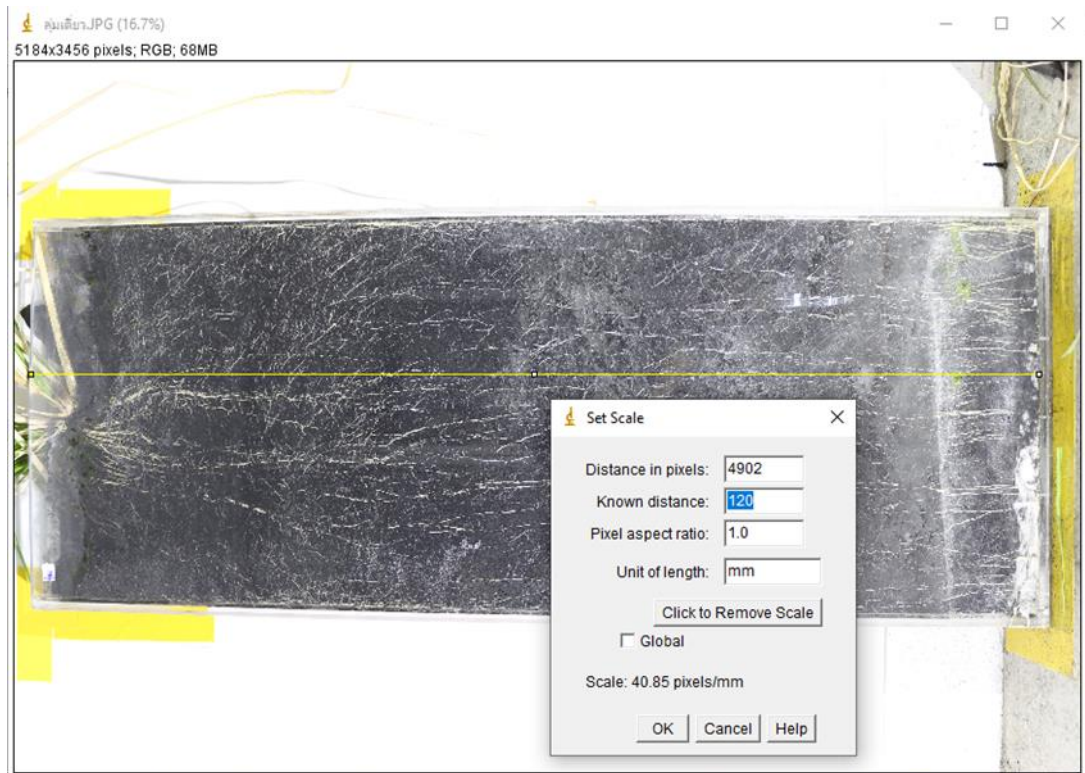
รูปที่ 13 ภาพถ่ายกล้อง Rhizobox ก่อนนำไปประมวลผลทางภาพ

2. นำภาพไปประมวลผลทางภาพ (image processing) ด้วยโปรแกรม ImageJ ดังแสดงในรูปที่ 14



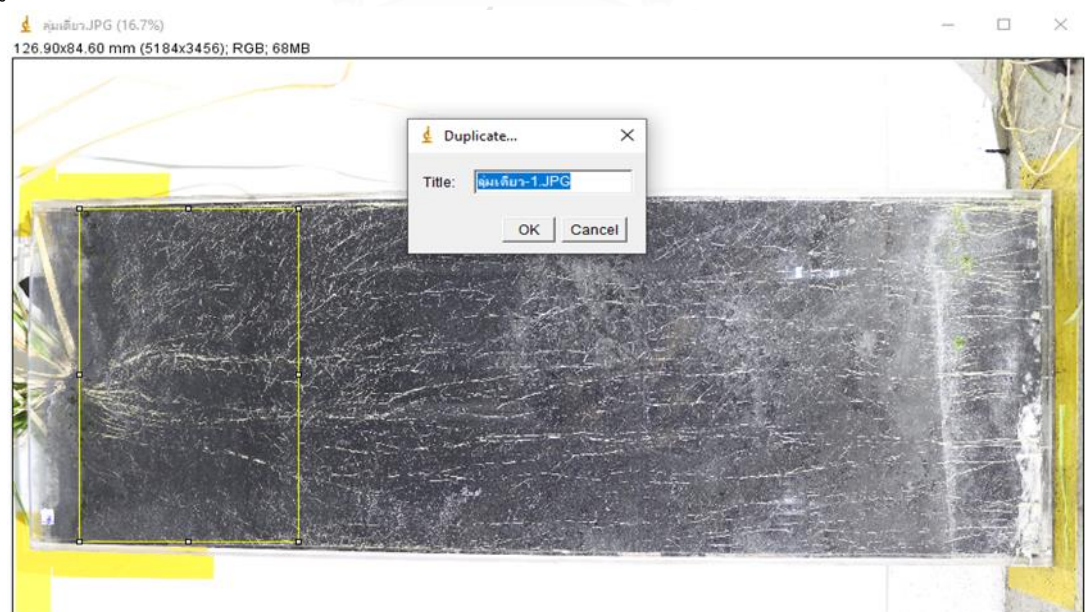
รูปที่ 14 นำภาพไปประมวลผลด้วยโปรแกรม ImageJ

3. ตั้งค่าขนาดระยะความกว้างและความยาวของกล่อง Rhizobox ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 การตั้งค่าขนาดของรูปภาพ

4. สร้างภาพซ้ำที่เกิดจากการกำหนดขนาดความกว้างและความยาวที่ได้กำหนดไว้ (duplicate) ดังแสดงในรูปที่ 16 และ 17

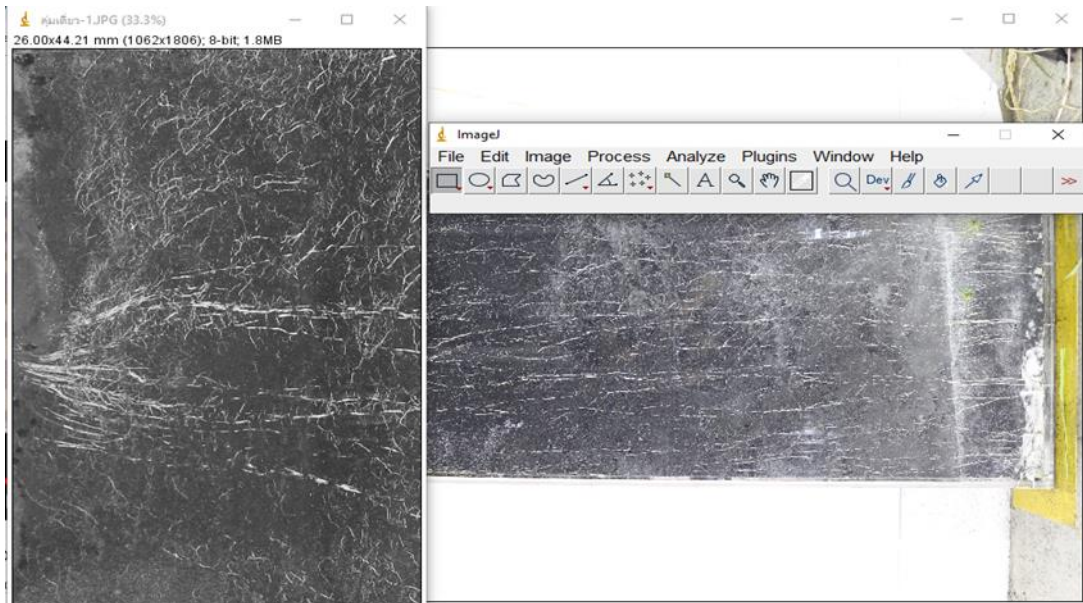


รูปที่ 16 การนำส่วนของภาพไปประมวลผล



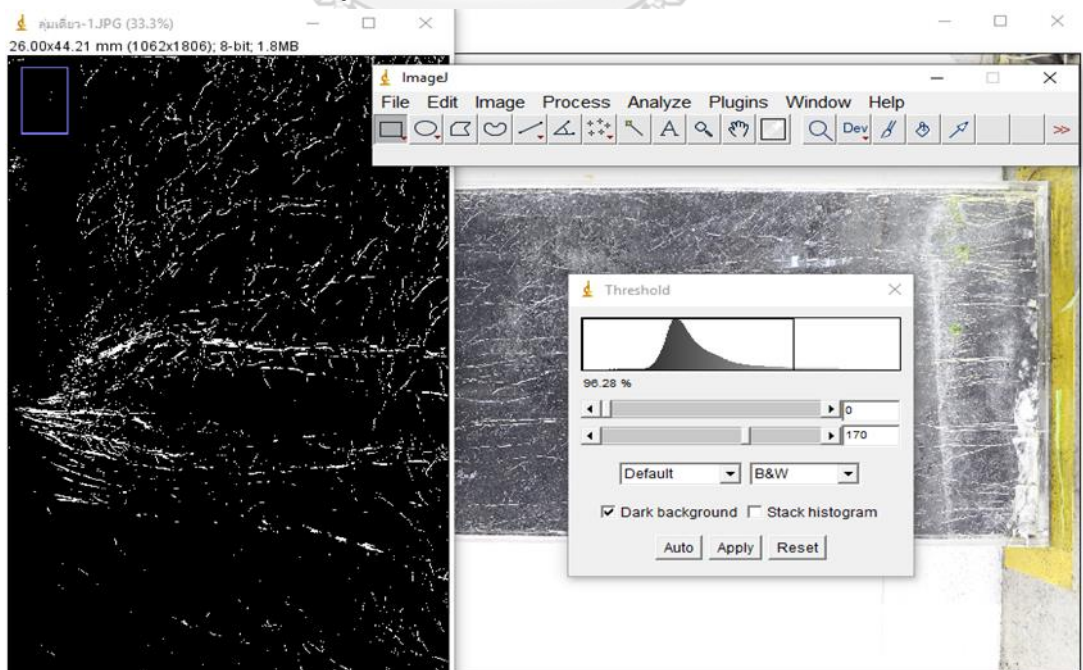
รูปที่ 17 ภาพที่ถูกตัดให้เหลือส่วนที่ต้องการจะประมวลผล

5. นำภาพที่ได้จากการ Duplicate ที่อยู่ในรูปแบบ RGB เปลี่ยนเป็นภาพ 8-bit เพื่อให้ภาพเปลี่ยนเป็นระดับสีเทา (Grayscale) ซึ่งสามารถประมวลผลทางภาพได้ง่าย เพราะภาพระดับสีเทามีความเข้มข้นของสีในแต่ละจุดเหลือแค่ 0 ถึง 255 (มโนทัศน์ วารณประพันธ์, 2556) ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 ภาพที่แปลงเป็นภาพระดับสีเทา (Grayscale)



6. นำภาพระดับสีเทา (Grayscale) เปลี่ยนเป็นภาพขาว-ดำ โดยจะกำหนดค่าความเข้มข้นของสีด้วย โหมดค่าขีดแบ่ง (Threshold value) (เมนูคัตกดี วรรณประพันธ์, 2556) โดยแบ่งอัตลักษณ์ของสีขาว เป็นสีของราก ส่วนอัตลักษณ์ของสีดำเป็นสีของเถาแกบลบขาว โดยให้ภาพที่ได้ทำการวิเคราะห์ มีความใกล้เคียงกับภาพดั้งเดิมมากที่สุด ซึ่งจะสามารถหาอัตราส่วนของรากด้านข้าง ที่เกิดจากอัตราส่วนสีขาวต่อพื้นที่ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 ภาพขาว-ดำ โดยจะกำหนดค่าความเข้มข้นของสีด้วยโหมดค่าขีดแบ่ง (Threshold value)

หลังจากทำการทดสอบแล้วเสร็จ จะนำตัวอย่างมาแยกรากและเก็บกลับข้าว ออกจากกัน แล้วนำรากมาอบ และชั่งน้ำหนักรากแห้ง เพื่อนำไปหาชีวมวลของรากแห้งต่อปริมาตรดิน (Dry root biomass per volume of soil, ρ_R (kg/m³) (Gray & Sotir, 1996)

ตารางที่ 5 ผลการหาความแม่นยำของโปรแกรม Image J

รูปภาพ (1 เซนติเมตร เท่ากับ 40 พิกเซล)	ผลการวัด (Side root area ratio)
	ภาพสีดำ = 0 % เปลี่ยนเป็นสีขาวหมด = 0.1 %
	ภาพสีขาว = 100% เปลี่ยนเป็นสีดำหมด = 0 %

3.4 การศึกษากำลังรับแรงดึงของราก

การศึกษานี้กำหนดค่ากำลังรับแรงดึงของรากจากรูปแบบการวิบัติของรากที่เป็นแบบรากขาด (Breaking root mode) (Bischetti et al., 2009; Genet et al., 2005; Giadrossich et al., 2017; Mickovski & van Beek, 2009; C. Zhang, Chen, Jiang, & Zhou, 2012) โดยดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ (Universal testing machine) ที่สามารถวัดแรงได้ละเอียดถึง 0.01 นิวตัน และสามารถวัดการเคลื่อนตัวได้ละเอียดถึง 0.001 มิลลิเมตร ซึ่งเครื่องทดสอบสามารถบันทึกค่าแรงและระยะการเคลื่อนที่โดยอัตโนมัติ ผ่านอุปกรณ์การตรวจวัดน้ำหนัก (Load cell) และเซนเซอร์วัดระยะเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 20 เครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ (Universal testing machine)

3.4.1 อัตราความเครียดของการดึง

สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงดึงของราก เรากำหนดการทดสอบเป็นแบบอัตราความเครียดในการดึงคงที่ โดย Y. Yang, Chen, & Li. (2016) พบว่าอัตราความเร็วในการดึงราก จะมีอิทธิพลต่อค่ากำลังรับแรงดึงของราก ซึ่ง Giadrossich et al. (2017) ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยที่ใช้อัตราความเครียดในการดึงราก พบว่ารากที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก อยู่ในอยู่ช่วง 0.1 ถึง 5 มิลลิเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก จะใช้อัตราการดึงอยู่ที่ 1 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที ดังนั้น เราจึงทำการเลือกอัตราความเครียดที่ 5 มิลลิเมตรต่อนาที เพราะเนื่องจากหญ้าแฝก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากที่ค่อนข้างเล็ก จึงต้องใช้อัตราความเร็วในการดึงที่ช้า เพื่อป้องกันไม่ให้กำลังรับแรงดึงของรากสูงจนเกินไป

3.4.2 การวัดความยาว

ทำการเลือกความยาวรากโดย Giadrossich et al. (2017) ได้กล่าวถึงประเด็นสำคัญของการทดสอบแรงดึงคือการยึดรากไว้กับเครื่องทดสอบ หลายงานวิจัยได้พัฒนาอุปกรณ์ปากหนีบรากเพื่อป้องกันรากลื่นไถลและเสียความหาย (Mickovski & van Beek, 2009;

Nilaweera & Nutalaya, 1999) โดยระหว่างการทำทดสอบแรงดึงของราก รากอาจขาดใกล้บริเวณกับปากหนีบ เนื่องจากรากอาจเกิดการเลื่อนไปในทิศทางเดียวไว้ โดยมีระยะทดสอบ (gauge length) ที่ 10 เซนติเมตร ขึ้นไป (De Baets et al., 2008; Genet et al., 2005) ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงทำการเลือกความยาวของชิ้นตัวอย่างรากที่ประมาณ 20 เซนติเมตร โดยกำหนดให้มีระยะทดสอบ (gauge length) ที่ 10 เซนติเมตร ส่วนที่เหลือเป็นส่วนที่ยึดกับด้ามจับกับตัวเครื่องทดสอบ

3.4.3 การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก

การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก เริ่มจากการถ่ายภาพราก แล้วนำไปประมวลผลทางภาพ (image processing) ด้วยโปรแกรม ImageJ เพื่อวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก ดังแสดงในรูปที่ 21 ซึ่งความแม่นยำของโปรแกรม จะแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งการวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของราก จะเป็นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรากปรากฏ (Nominal value) โดยทั้งนี้จะวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากจากจุดที่เกิดการขาดของการทดสอบแรงดึงราก เพื่อเป็นตัวแปรในการหาค่ากำลังรับแรงดึงของราก ($D_{at failure}$) และวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากเฉลี่ยของทั้งเส้น (D_{avg}) เพื่อเป็นตัวแปรในการหาความหนาแน่นของรากแห้งต่อไป

ตารางที่ 6 ผลการหาความแม่นยำของโปรแกรม Image J

ความยาว 1 มิลลิเมตร เท่ากับ 38 พิกเซล	
ครั้งที่	ผลการวัด (มิลลิเมตร)
1	0.974
2	1.000
3	1.000
4	0.982
5	1.053
6	1.000
7	1.000
8	0.974
9	1.105
10	1.000
ผล Accuracy (%)	99.91%



รูปที่ 21 รูปถ่ายของรากในการทดสอบกำลังแรงดึงของราก

3.5 การศึกษากำลังรับแรงเฉือนของดิน

3.5.1 แบบจำลอง กล่อง PVC ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัย

ท่อ PVC มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร ซึ่งแบ่งเป็น 4 ชั้น
ชั้นละ 25 เซนติเมตร โดยแบ่งบรรจุดินลึก 75 เซนติเมตร และชั้นบนสุดเป็นท่อเปล่าสูง 25
เซนติเมตร เพื่อทำการกักเก็บน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 22



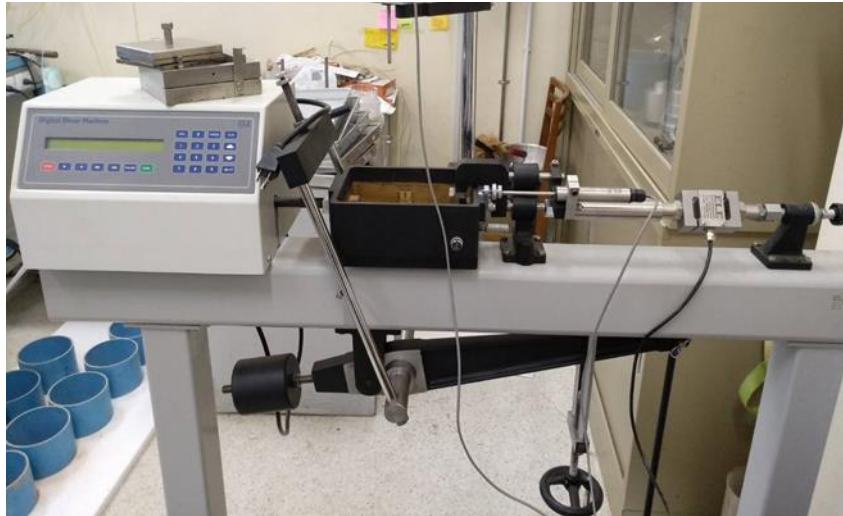
รูปที่ 22 การปลูกพืชในท่อ PVC สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน

3.5.2 การเตรียมตัวอย่างดินใน PVC

สำหรับการศึกษากำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีราก การศึกษานี้ใช้ดินลูกรังก้อนบ่อที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 แล้วนำมาเตรียมตัวอย่างในท่อ PVC โดยการปล่อยดินให้ตกอย่างอิสระลงในท่อ PVC อ้างอิงตามวิธีการทดสอบหาอัตราส่วนของดินที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (“ASTM D2049 - 69 Test Method for Relative Density of Cohesionless Soils (Withdrawn 1983),” n.d.)

3.5.3 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test)

เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการหาคุณลักษณะค่าแรงเฉือนของดิน เราจะทำการทดสอบโดยเครื่องมือ Large direct shear โดยต้องมีขนาดตัวอย่าง กว้าง 9.97 เซนติเมตร ยาว 9.97 เซนติเมตร สูง 2.4 เซนติเมตร โดยใช้ความเร็วในการเฉือน 0.5 มิลลิเมตร/นาที ในเงื่อนไขสามารถระบายน้ำได้ (Drained condition) (“ASTM D3080 / D3080M - 11 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions,” n.d.) โดยจะทำการทดสอบโดยใช้เครื่องมือทดสอบการเฉือนตรงขนาดใหญ่ (Large direct shear machines) ดังแสดงรูปที่ 23



รูปที่ 23 เครื่องมือทดสอบการเฉือนโดยตรง (Direct Shear Machines)

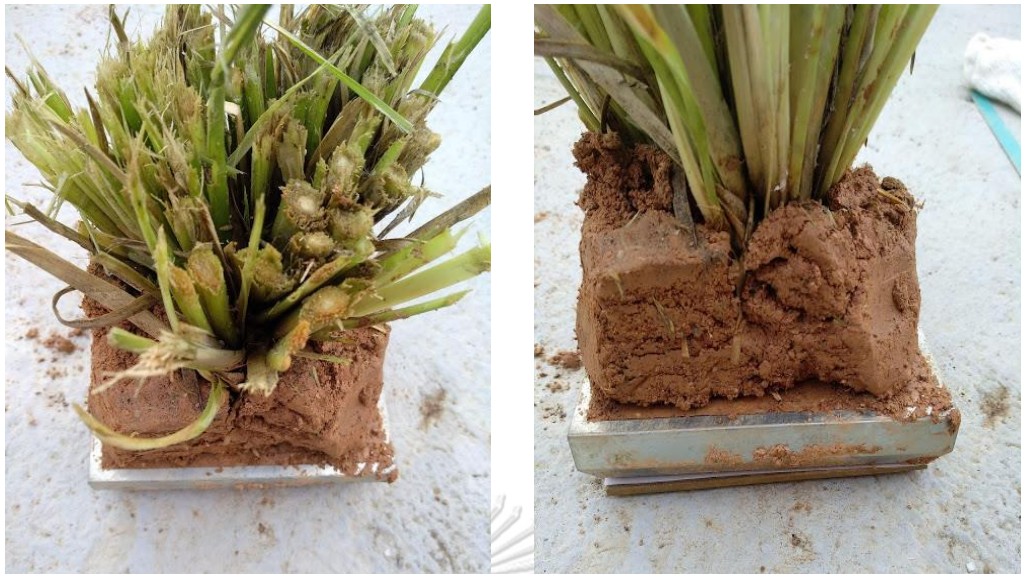
3.5.4 ขั้นตอนการตัดดินที่มีราก เพื่อนำมาทดสอบเฉือนโดยตรง

1. นำท่อ PVC ที่ได้ทำการแบ่งเป็นท่อนละ 25 เซนติเมตร ออก และนำอุปกรณ์ตัดดินพร้อมราก ดังแสดงรูปที่ 24



รูปที่ 24 ดินที่ปลูกหญ้าแฝกในท่อ PVC เพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง

2. นำดินพร้อมรากที่ได้ทำการตัดเรียบร้อยแล้ว นำมาใส่ในบล็อกการทดสอบ เพื่อให้ได้ขนาดสี่เหลี่ยมตามบล็อกทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ดังแสดงรูปที่ 25



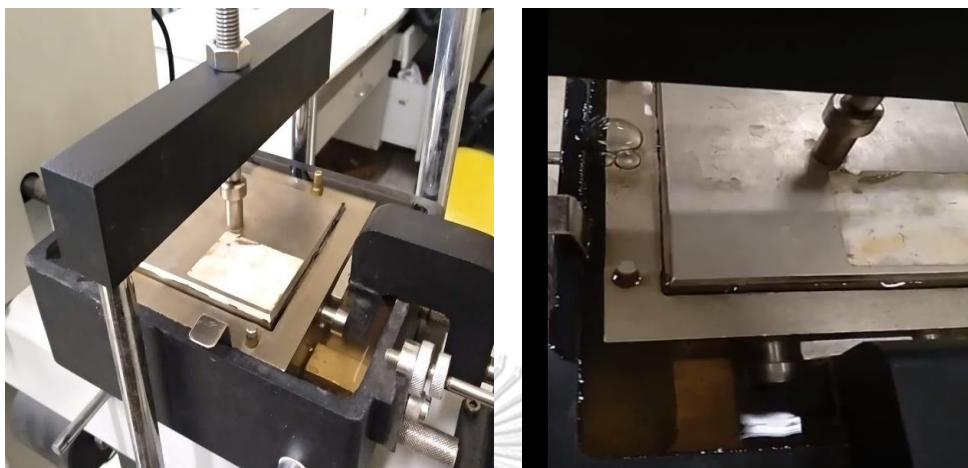
รูปที่ 25 หลังจากทำการตัดตัวอย่างดินในท่อ PVC

3. นำดินพร้อมรากที่ใส่บล็อกทดสอบแรงเฉือนโดยตรง เข้าเครื่องทดสอบ ดังแสดงรูปที่ 26



รูปที่ 26 ตัวอย่างดินที่ราก นำเข้าบรรจุในบล็อกทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

4. ใส่น้ำลงในกล่องทดสอบ เพื่อทำการแช่น้ำตัวอย่างดิน (Soaked conditions) ดังแสดงในรูปที่ 27



รูปที่ 27 ตัวอย่างที่ถูกใส่ในเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือน พร้อมใส่น้ำเพื่อแช่ตัวอย่าง

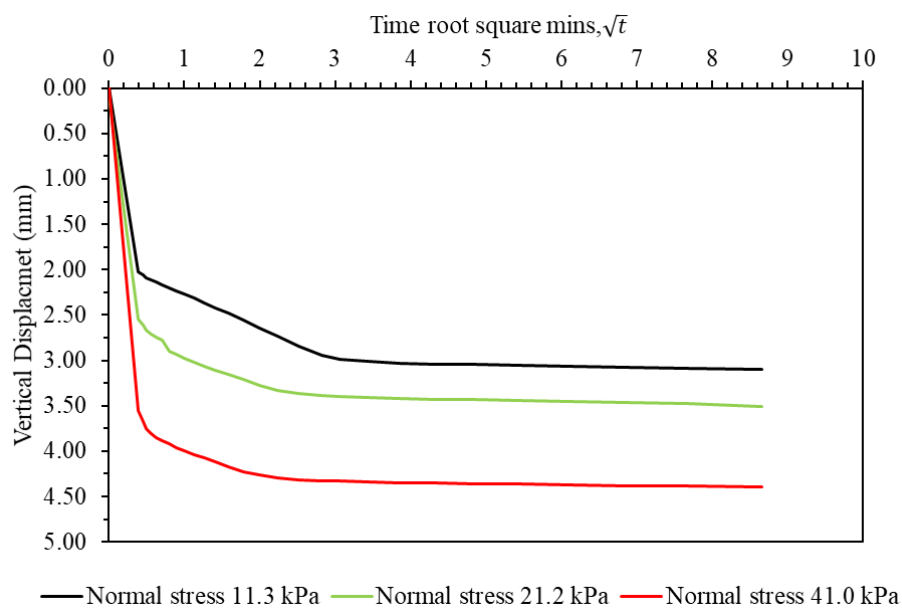
5. หลังจากทำการทดสอบแล้วเสร็จ จะนำตัวอย่างมาแยกรากและดิน ออกจากกัน แล้วนำรากมาอบ และชั่งน้ำหนักรากแห้ง เพื่อนำไปหาชีวมวลของรากแห้งต่อปริมาตรดิน (Dry root biomass per volume of soil, ρ_R (kg/m³) (Gray & Sotir, 1996) ดังแสดงรูปที่ 28



รูปที่ 28 หลังทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน และแยกรากออกจากตัวอย่างดิน

3.5.5 ขั้นตอนการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง

หลังจากทำการตัดตัวอย่างดินจากกระบอกลง เพื่อนำมาทำการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง หลังจากนั้นจะทำการเทใส่น้ำลงในบล็อทดสอบแรงเฉือนโดยตรง ให้ดินอยู่ในสภาพแช่น้ำ (Soak conditions) เพื่อเพิ่มความชื้นในดิน พร้อมทั้งปล่อยความเค้นตั้งฉาก (σ_n) เพื่อให้ดินมีการทรุดตัว ซึ่งทำให้ช่องว่างในดิน (e) มีค่าลดลง ซึ่งจะใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ในกระบวนการอัดตัวคายน้ำ จนไม่มีการทรุดตัวของดินอีกต่อไป (Alawaji, 2001; อธิจิต สุขปัญญา และ อภินิติ โชติสังกาศ, 2556) ดังแสดงในรูปที่ 29 โดยขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ เพื่อให้ค่าความอิ่มตัวของดิน (S) มีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งทำให้ค่าติดลบของแรงดันน้ำในดิน หรือ ค่าแรงดูดของดิน (Soil suction) ไม่มีผลต่อการค่ากำลังของเฉือนของดิน โดยหลังจากนั้น จะทำการทดสอบแรงเฉือนต่อไป



รูปที่ 29 อัตราการทรุดตัวของตัวอย่างดิน ณ กำลังรับแรงตั้งฉากต่างกัน

หลังจากทำกระบวนการอัดตัวคายน้ำเสร็จแล้ว จะทำการทดสอบแรงเฉือนของดินโดยตรง ในภายใต้เงื่อนไขการทดสอบแบบยอมให้ตัวอย่างดินยุบตัว แบบคายน้ำออกไปได้ (Consolidated drained test, CD-test) ซึ่งตัวอย่างของดินที่นำมาทำการทดสอบนี้ จำแนกดินอยู่ในประเภท Poorly graded sand (SP) อ้างอิงมาตรฐานตาม ASTM D2487-06 ซึ่งมาตรฐานการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงภายใต้เงื่อนไขการทดสอบแบบยอมให้ตัวอย่างดินยุบตัวแบบคายน้ำออกไปได้ (ASTM D3080/D3080M) กำหนดการทดสอบเป็นแบบอัตราการ

เคลื่อนที่ในการเขื่อนคงที่ ซึ่งได้แนะนำอัตราการเคลื่อนที่ระหว่างการเขื่อนในประเภทของดินชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในสมการที่ 17

$$R_f = \frac{d_f}{t_f} \quad (17)$$

เมื่อ

R_f หมายถึง อัตราการเคลื่อนที่ระหว่างการเขื่อน

d_f หมายถึง ระยะสิ้นสุดของการเคลื่อนตัวของตัวอย่างทดสอบในระหว่างการเขื่อน กำหนดไว้ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของขนาดความกว้างของตัวอย่าง = 10 มิลลิเมตร

t_f หมายถึง ระยะเวลาที่ใช้ในการเขื่อนจนถึงจุดวิบัติ แบ่งตามการจำแนกประเภทของดินตามมาตรฐาน ASTM D2487-06 ดังแสดงในรูปที่ 30

USCS Classification (D2487)	Minimum Time to Failure, t_f
SW, SP (<5% fines)	10 min
SW-SM, SP_SM, SM (>5% fines)	60 min
SC, ML, CL, SP-SC	200 min
MH, CH	24 h

รูปที่ 30 ระยะเวลาที่ใช้ในการเขื่อนจนถึงจุดวิบัติ ตามมาตรฐาน ASTM D2487-06

บทที่ 4

ผลวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติของดิน

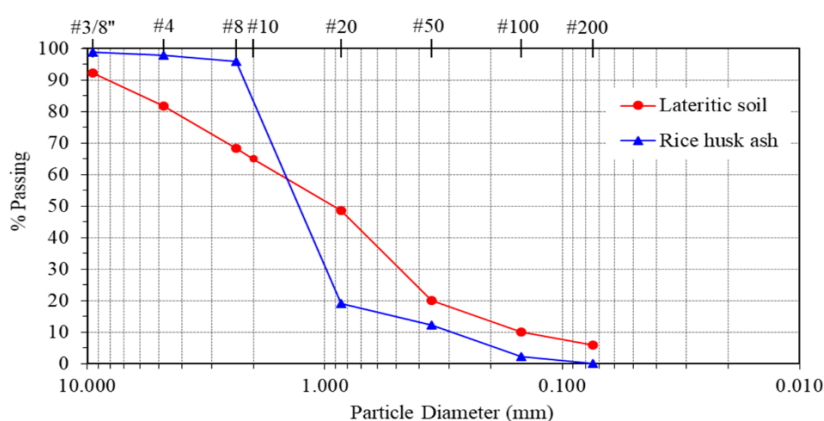
ผลการศึกษาคุณสมบัติของดินลูกรังก้นบ่อ และเถ้าแกลบข้าว ดังแสดงในตารางที่ 7-8 โดยแสดงการกระจายตัวของเม็ดดิน ดังแสดงในรูปที่ 31

ตารางที่ 7 ผลการศึกษาคุณสมบัติของดินลูกรังก้นบ่อ

คุณสมบัติพื้นฐานของดินลูกรังก้นบ่อ	มาตรฐาน	ผลการทดสอบ
ความเป็นกรดต่าง (pH)	- (pH meter)	6.53
ความถ่วงจำเพาะของดิน (G_s)	ASTM D854 - 14	2.65
Classification of soil	ASTM D422 - 63	SP
C_u		5
C_c		0.8

ตารางที่ 8 ผลการศึกษาคุณสมบัติของเถ้าแกลบข้าว

คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าแกลบข้าว	มาตรฐาน	ผลการทดสอบ
ความเป็นกรดต่าง (pH)	- (pH meter)	6.92
ความถ่วงจำเพาะของดิน (G_s)	ASTM D854 - 14	2.65
Classification of soil	ASTM D422 - 63	SP
C_u		1.88
C_c		0.88

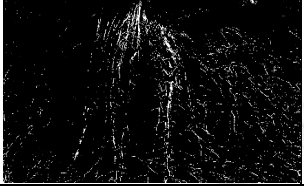
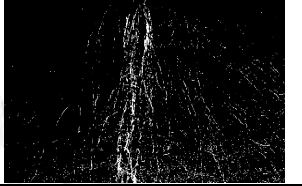
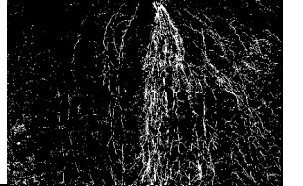



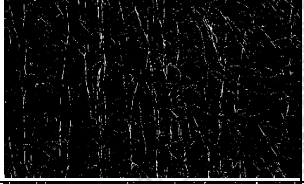




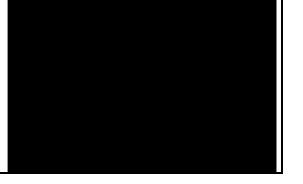


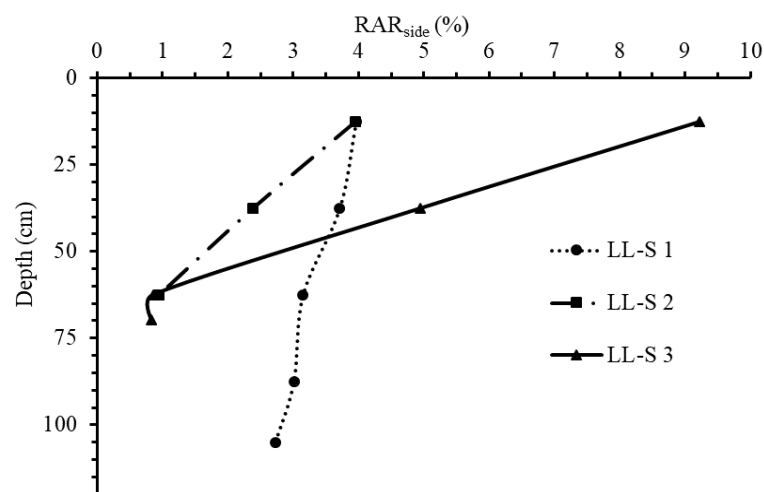
รูปที่ 31 การกระจายตัวของขนาดเม็ดดินทั้งเถ้าแกลบข้าว และดินลูกรัง

4.2 ผลการศึกษาสถาปัตยกรรมของราก

ผลการศึกษาสถาปัตยกรรมของราก จะสามารถหาค่าอัตราส่วนของรากด้านข้าง (Side root area ratio) ของรากหญ้าแฝกกลุ่มเดียว ที่แสดงเป็นภาพขาวดำของรากที่เทียบกับความลึก ดังแสดงในตารางที่ 9 โดยความสัมพันธ์อัตราส่วนของรากกับความลึก แสดงในรูปที่ 32

ตารางที่ 9 สถาปัตยกรรมของรากหญ้าแฝกที่ปลูกในกล่อง Rhizobox

ความลึก	Rhizobox ตัวที่ 1	Rhizobox ตัวที่ 2	Rhizobox ตัวที่ 3
25			
50			
75			
100			

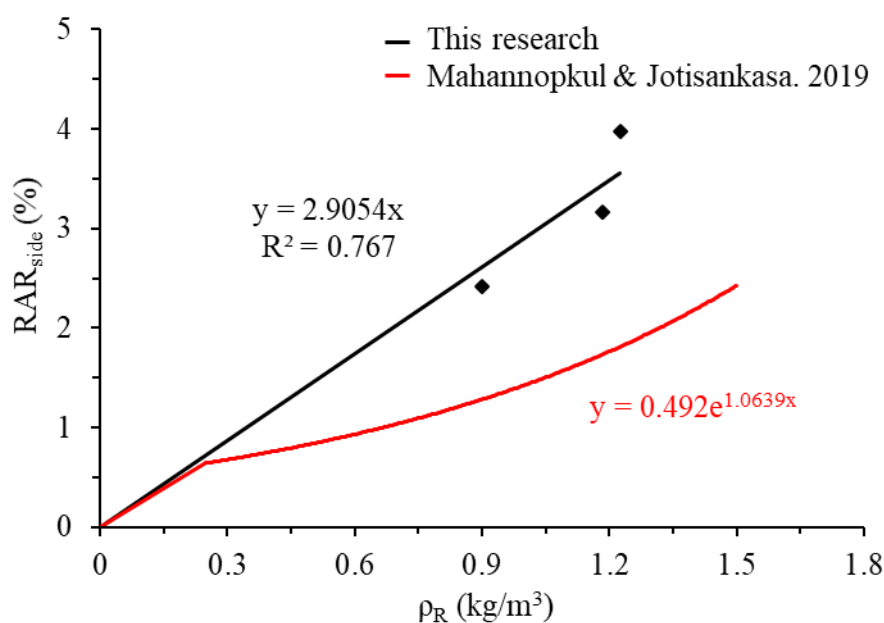


รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรากด้านข้างกับความลึก

โดยความสัมพันธ์อัตราส่วนรากด้านข้าง (RAR_{side}) กับชีวมวลของรากแห้งต่อปริมาตรดิน (Dry root biomass per volume of soil, ρ_R (kg/m³) ดังแสดงในตารางที่ 10 ของรากหญ้าแฝก ที่ปลูกใน Rhizobox เพื่อนำไปหาความสัมพันธ์ของรากหญ้าแฝก ที่ปลูกอยู่ในท่อ เพราะใช้หญ้าแฝก ลุ่มพันธุ์เดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 33

ตารางที่ 10 อัตราส่วนของรากของรากด้านข้างกับชีวมวลของรากแห้งต่อปริมาตรดิน

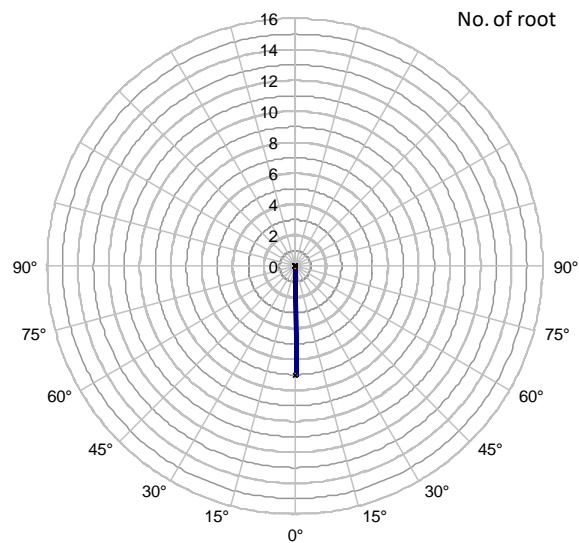
Rhizobox No.	Side root area ratio, RAR_{side} (%)	Dry root biomass per volume soil, ρ_R (kg/m ³)
	0	0
1	3.16	1.183
2	2.42	0.899
3	3.97	1.226



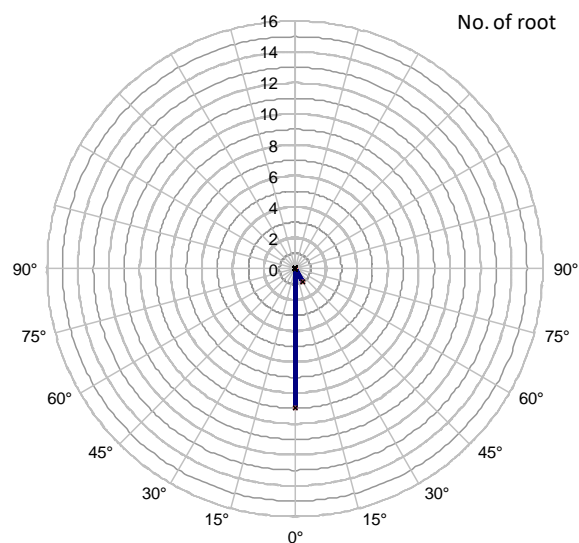
รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรากด้านข้างกับชีวมวลของรากแห้งต่อปริมาตรดิน

4.2.1 การจัดวางตัวของราก (Root orientation)

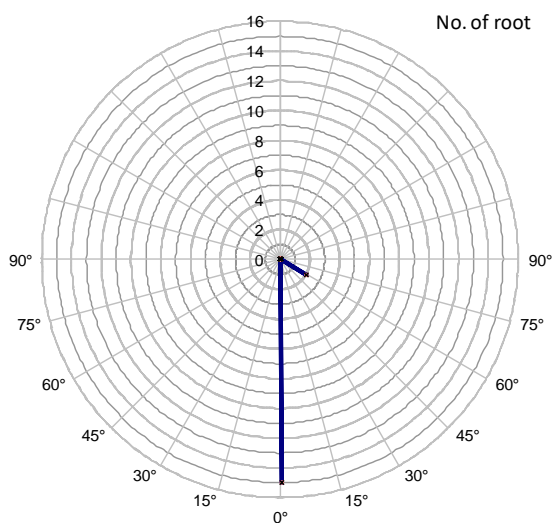
หญ้าแฝก จัดอยู่ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยว โดยรากประกอบไปด้วย รากหลัก (Adventitious root) และรากในแนวนอน (Lateral root) ซึ่งผลการจัดวางตัวของรากหญ้าแฝกใน Rhizobox พบว่ารากหลักของหญ้าแฝกจะกระจายลงแนวตั้งเป็นส่วนมาก และรากกระจายในแนวนอนเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 34-36



รูปที่ 34 การจัดวางตัวของกลุ่มราก (root orientation) ของกล่อง Rhizobox ที่ 1



รูปที่ 35 การจัดวางตัวของกลุ่มราก (root orientation) ของกล่อง Rhizobox ที่ 2



รูปที่ 36 การจัดวางตัวของกลุ่มราก (root orientation) ของกล่อง Rhizobox ที่ 3

4.3 ผลการศึกษากำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก จากราก 19 ตัวอย่าง ได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 11 และ 12

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก

No.	D_{avg} (mm)	$D_{at failure}$ (mm)	Root water content (%)	Dry Root Density (mg/mm^3)	Tensile Strength (MPa)	Elongation	Young's modulus (MPa)
1	1.35	1.04	362.79	0.150	7.798	0.85	9.53
2	1.46	0.93	424.00	0.150	9.785	0.67	13.45
3	1.46	1.63	350.77	0.194	6.606	2.07	5.18
4	2.01	1.95	265.48	0.133	4.413	3.00	2.88
5	1.02	1.31	577.78	0.219	4.941	1.35	4.80
6	1.27	1.09	201.75	0.226	9.377	0.93	10.95
7	1.54	1.45	400.00	0.124	5.523	1.66	4.84
8	1.62	1.21	388.89	0.132	9.205	1.15	9.70
9	1.23	1.26	115.09	0.223	9.671	1.24	9.78
10	0.94	0.83	1106.25	0.114	6.180	0.54	9.46

No.	D _{avg} (mm)	D _{at failure} (mm)	Root water content (%)	Dry Root Density (mg/mm ³)	Tensile Strength (MPa)	Elongation	Young's modulus (MPa)
11	1.88	1.50	168.49	0.132	7.622	0.99	7.78
12	1.23	1.13	441.18	0.144	5.435	1.00	6.12
13	1.03	0.83	1026.92	0.157	6.511	0.54	9.96
14	1.60	1.43	1052.63	0.119	3.464	1.60	3.09
15	0.90	0.83	541.67	0.148	8.899	0.54	13.70
16	1.16	1.33	507.89	0.180	8.283	1.40	7.91
17	1.28	1.32	620.59	0.132	6.370	1.38	6.13
18	1.24	1.19	694.29	0.146	7.314	1.10	7.85
19	1.00	1.15	442.86	0.177	6.100	1.05	6.73

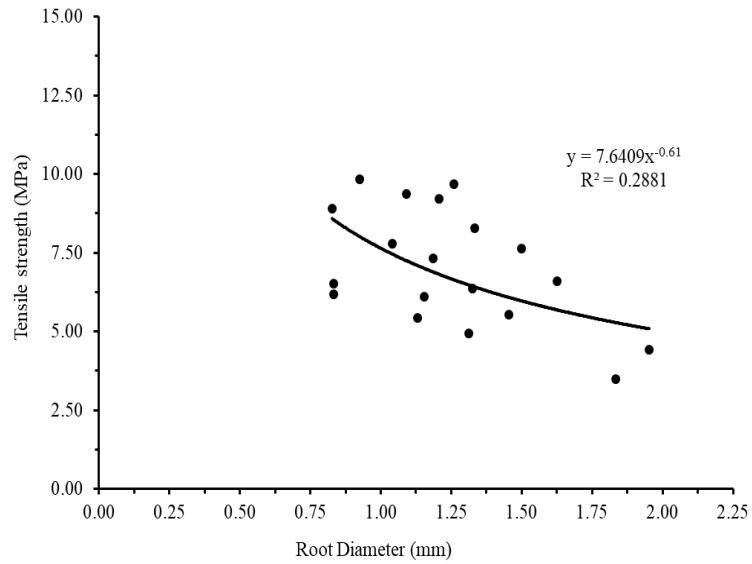
ตารางที่ 12 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก

Number of root	statistic	Average diameter of root (mm)	Diameter of root at failure (mm)	Root water content (%)	Dry Root Density (mg/mm ³)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
19	Means ± SD	1.35±0.29	1.24±0.29	509.96±287.40	0.150±0.036	7.32±2.73	8.18±3.97
	Min-Max	0.90-2.01	0.83-1.95	115-1106	0.08-0.23	3.46-9.78	2.00-16.20

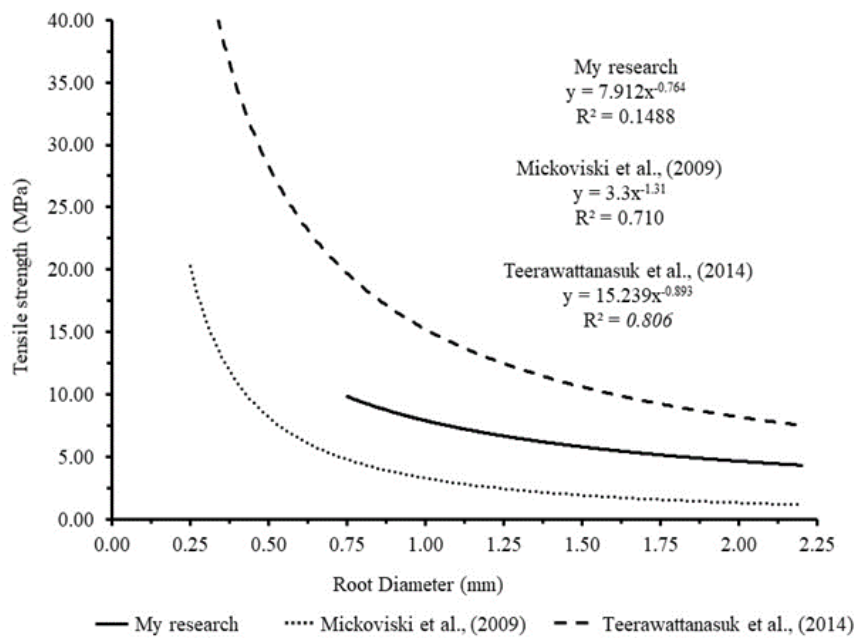
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก

กำลังรับแรงดึงของราก ได้จากการทดสอบตัวอย่างรากทั้งหมด 19 ตัวอย่าง พบว่าค่ากำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Jotisankasa & Mahannopkul. (2015) และ Mickovski & van Beek. (2009) เมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากเดียวกัน โดยพบว่าค่ากำลังรับแรงดึงของราก จะกระจายอยู่ในช่วง 3.464 เมกะปาสคาล ถึง 13.718 เมกะปาสคาล ซึ่งค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.319 เมกะปาสคาล และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากที่จุดวิบัติ จะกระจายอยู่ในช่วง 0.83 มิลลิเมตร ถึง 1.95 มิลลิเมตร ซึ่งมี

ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.24 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 37 และเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ดังแสดงในรูปที่ 38



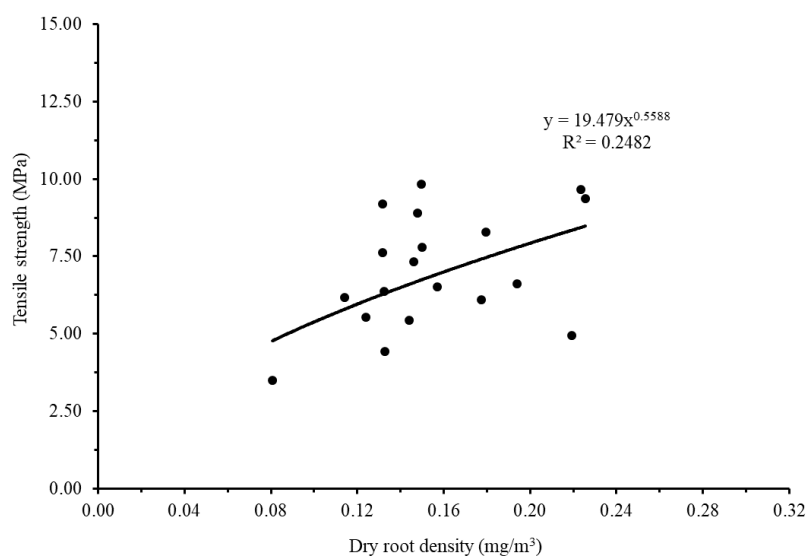
รูปที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากกับเส้นผ่านศูนย์กลางของราก



รูปที่ 38 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากกับเส้นผ่านศูนย์กลางของราก

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกกับความหนาแน่นรากหญ้าแฝกแห้ง

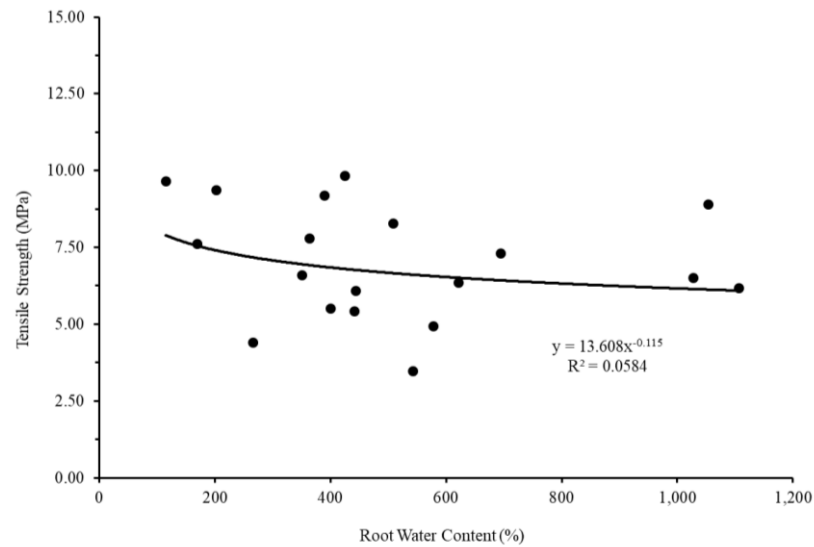
พบว่าชีวมวลของรากจะแปรผันตรงกับกำลังรับแรงดึงของราก ดังแสดงในรูปที่ 39 มีค่าความหนาแน่นรากหญ้าแฝกแห้งกระจายอยู่ในช่วง 0.08 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร ถึง 0.225 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากเฉลี่ย จะกระจายอยู่ในช่วง 0.90 มิลลิเมตร ถึง 2.01 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.35 มิลลิเมตร



รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากกับความหนาแน่นของรากแห้ง

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกกับปริมาณความชื้นของราก

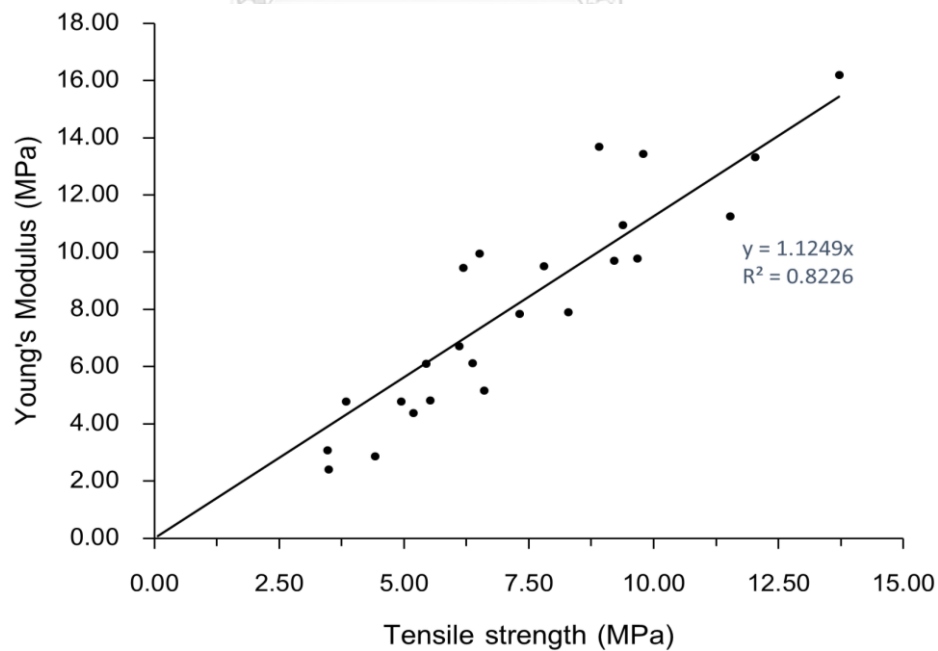
พบว่าปริมาณความชื้นของรากจะแปรผกผันกัน ดังแสดงในรูปที่ 40 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang, Chen, Li, & Zhang. (2016) ซึ่งพบว่าปริมาณความชื้นในรากจะแปรผกผันกับกำลังรับแรงดึงของราก มีค่ากระจายปริมาณความชื้นของรากอยู่ในช่วง 115 เปอร์เซ็นต์ ถึง 1106 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝกกับปริมาณความชื้นของราก

4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus กับกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก

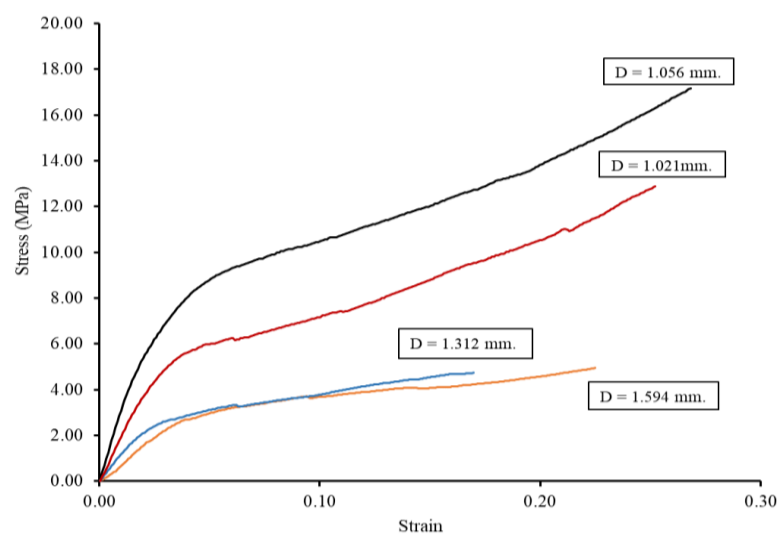
ค่า Young's Modulus ของรากจะแปรผันตรงกับกำลังรับแรงดึงของราก ดังแสดงในรูปที่ 41 ซึ่งสอดคล้องกับวิจัย ของ Boldrin, Leung, & Bengough. (2017) จะกระจายอยู่ในช่วง 2.00 เมกะปาสคาล ถึง 16.02 เมกะปาสคาล



รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของรากกับกำลังรับแรงดึงของราก

4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของราก

ความสัมพันธ์กราฟความเค้นและความเครียดของราก เป็นแบบวัสดุอีลาสโตพลาสติก (Elastoplastic) ดังแสดงในรูปที่ 42 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Yang, Chen, Li, & Zhang. (2016) ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์กราฟความเค้นและความเครียดของราก ในช่วงแรกจะอยู่ในช่วงอีลาสติก คือมีสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ต่อมาจะเกิดจุดคราก ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวของรากอย่างถาวร และช่วงเกิดพลาสติก โดยมีพฤติกรรมเป็นแบบความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Strain-hardening)



รูปที่ 42 ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของราก

4.4 ผลการศึกษากำลังรับแรงเฉือนของดิน

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน 30 ตัวอย่าง ซึ่งเป็นดินลูกรังก้นบ่อ ที่มีคุณสมบัติ ดังแสดงในตารางที่ 7 โดยแบ่งการทดสอบเป็นดินที่มีราก 21 ตัวอย่างและดินเปล่า 9 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีราก และดินเปล่า

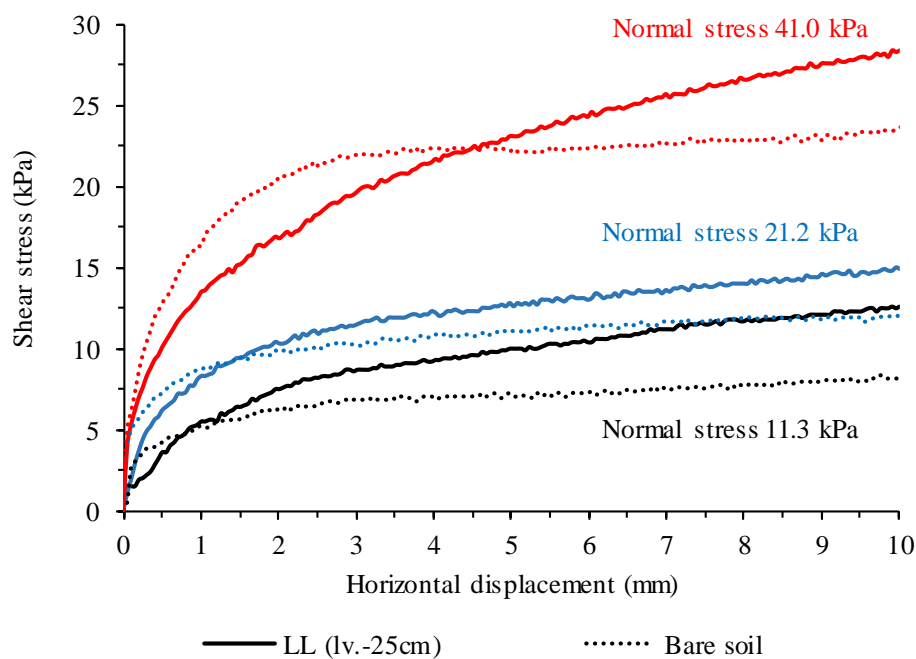
Conditions	No	Depth (cm)	Plant growing period (day)	Dry biomass per volume soil, ρ_R (kg/m ³)	Side root area ratio, RAR_{side} (%)	Normal stress, σ_n' (kPa)	Peak Shear Stress, τ_f (kPa)
bare soil	1	N/A	N/A	0	0	11.3	8.250
	2	N/A	N/A	0	0	11.3	7.970

Conditions	No	Depth (cm)	Plant growing period (day)	Dry biomass per volume soil, ρ_R (kg/m ³)	Side root area ratio , RAR_{side} (%)	Normal stress, σ_n' (kPa)	Peak Shear Stress, τ_f (kPa)	
Bare soil	3	N/A	N/A	0	0	11.3	7.820	
	4	N/A	N/A	0	0	21.2	12.110	
	5	N/A	N/A	0	0	21.2	12.540	
	6	N/A	N/A	0	0	21.2	12.080	
	7	N/A	N/A	0	0	41.0	23.660	
	8	N/A	N/A	0	0	41.0	22.860	
	9	N/A	N/A	0	0	41.0	23.430	
	Saturated/root reinforcement 6/03/62	1	25	98	7.856	29.986*	11.3	12.600
		2	25	123	0.649	1.747	11.3	9.460
3		25	99	10.126	38.995*	21.2	19.040	
4		25	147	1.382	4.293*	21.2	15.560	
5		25	122	3.308	11.935*	41.0	28.540	
6		25	148	0.400	1.078	41.0	27.440	
7		50	138	0.406	1.093	11.3	9.200	
8		50	152	0.178	0.479	11.3	8.060	
9		50	104	0.489	1.317	21.2	14.570	
10		50	139	0.398	1.071	21.2	15.440	
11		50	105	0.201	0.541	41.0	28.120	
12		50	152	0.347	0.934	41.0	24.600	
13		75	106	0.431	1.159	11.3	7.400	
14		75	141	0.172	0.464	11.3	9.840	
15		75	154	0.096	0.259	11.3	8.480	
16		75	107	0.167	0.450	21.2	16.580	
17		75	142	0.264	0.712	21.2	15.300	

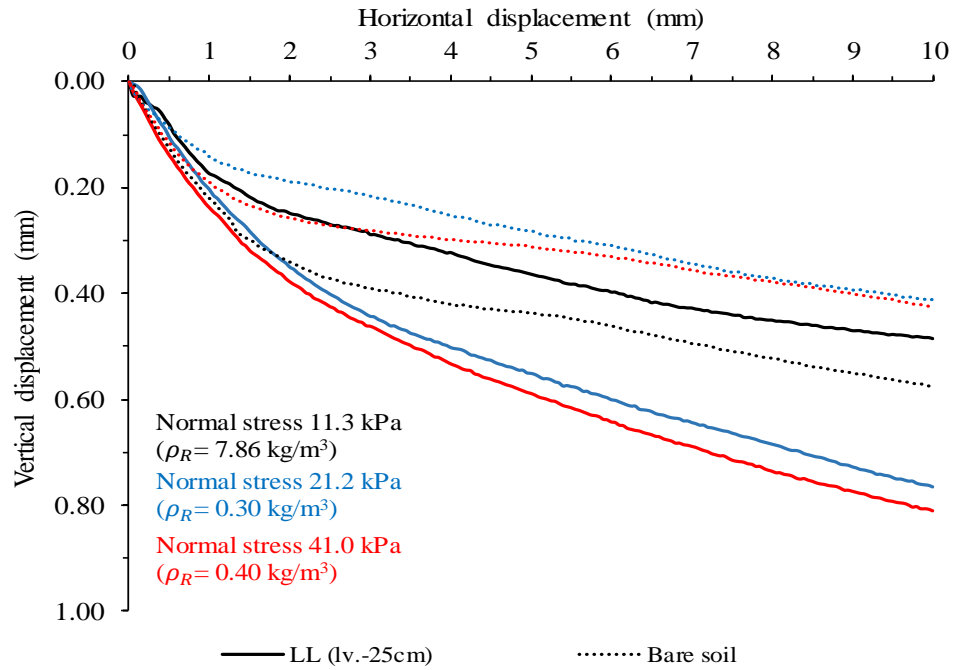
Condition	No	Depth (cm)	Plant growing period (day)	Dry biomass per volume soil, ρ_R (kg/m ³)	Side root area ratio , RAR_{side} (%)	Normal stress, σ_n' (kPa)	Peak Shear Stress, τ_f (kPa)
Saturated/root reinforcement 6/03/62	18	75	153	0.390	1.049	21.2	16.280
	19	75	108	0.284	0.765	41.0	26.910
	20	75	140	0.059	0.159	41.0	27.250
	21	75	154	0.218	0.587	41.0	24.100

*อัตราส่วนรากด้านข้าง (Side root area ratio) มีความคาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

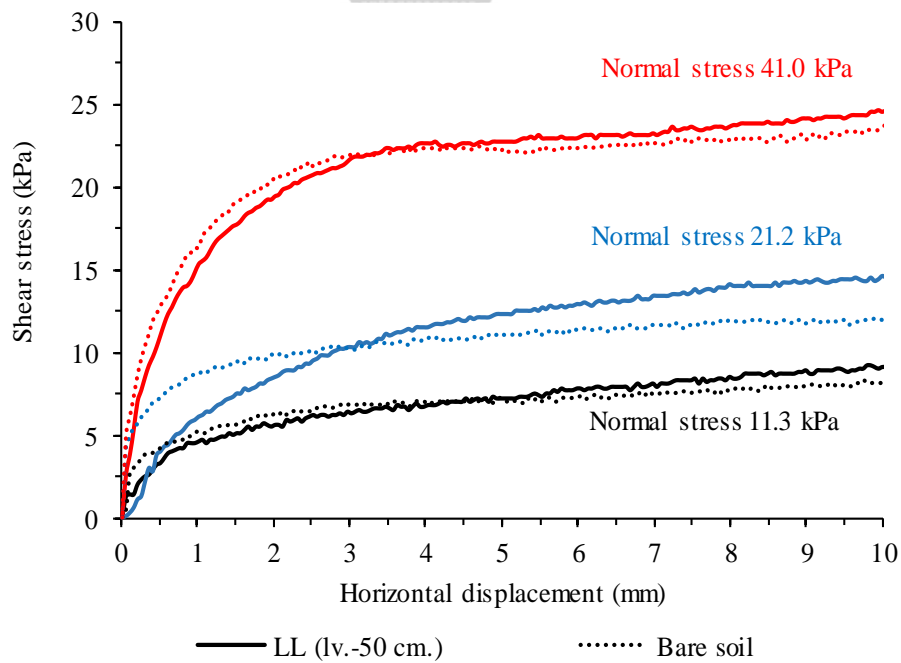
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินกับความเครียดเฉือน และความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ในแนวตั้งกับแนวนอน ในขณะที่การเฉือนตัวอย่าง ของดินที่มีรากเทียบกับดินเปล่า ในความลึกที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 44-48



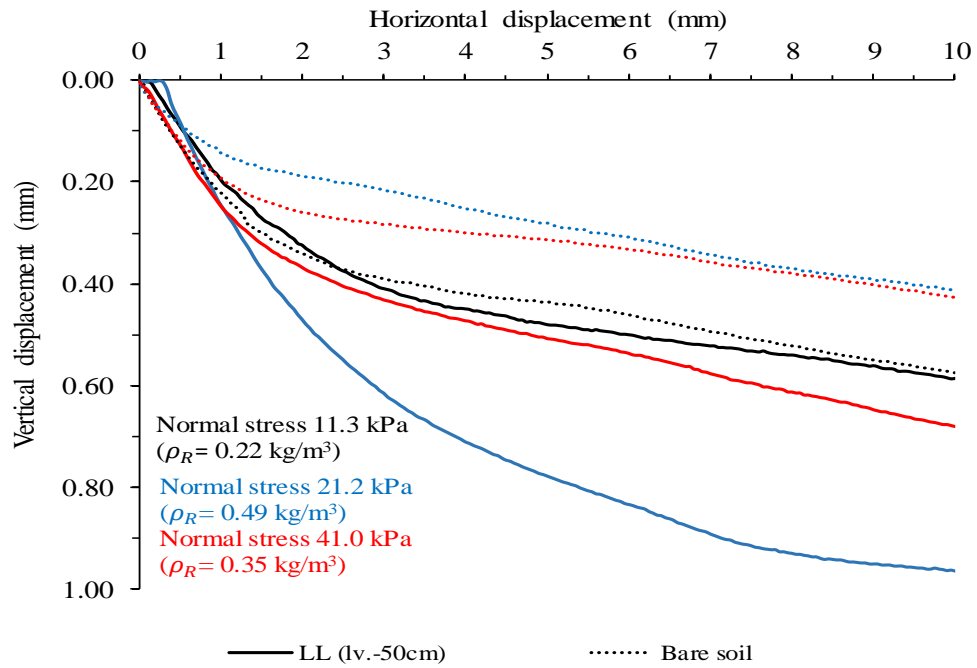
รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับความเครียดเฉือนของดินที่มีรากกับดินเปล่าที่ระดับความลึก 25 เซนติเมตร



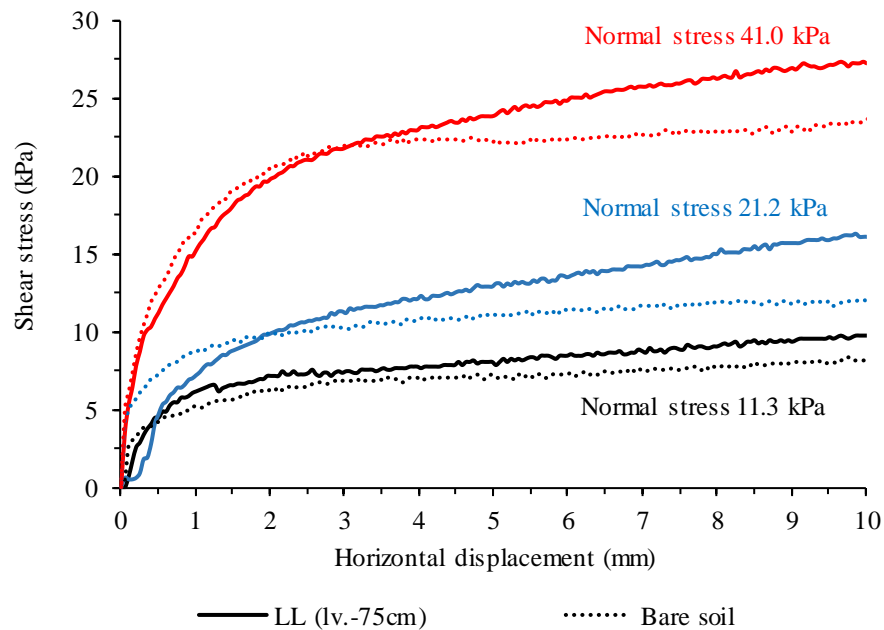
รูปที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับแนวราบของดินที่มีรากกับดินเปล่าที่ระดับความลึก 25 เซนติเมตร



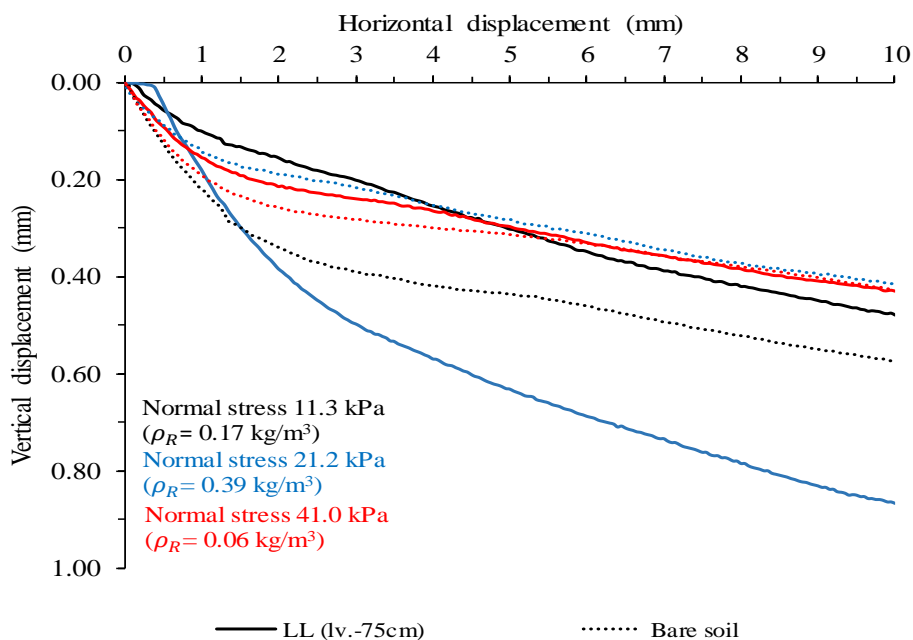
รูปที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับความเครียดเฉือนของดินที่มีรากกับดินเปล่าที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร



รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับแนวราบของดินที่มีรากกับดินเปล่าที่ระดับความลึก 50 เซนติเมตร

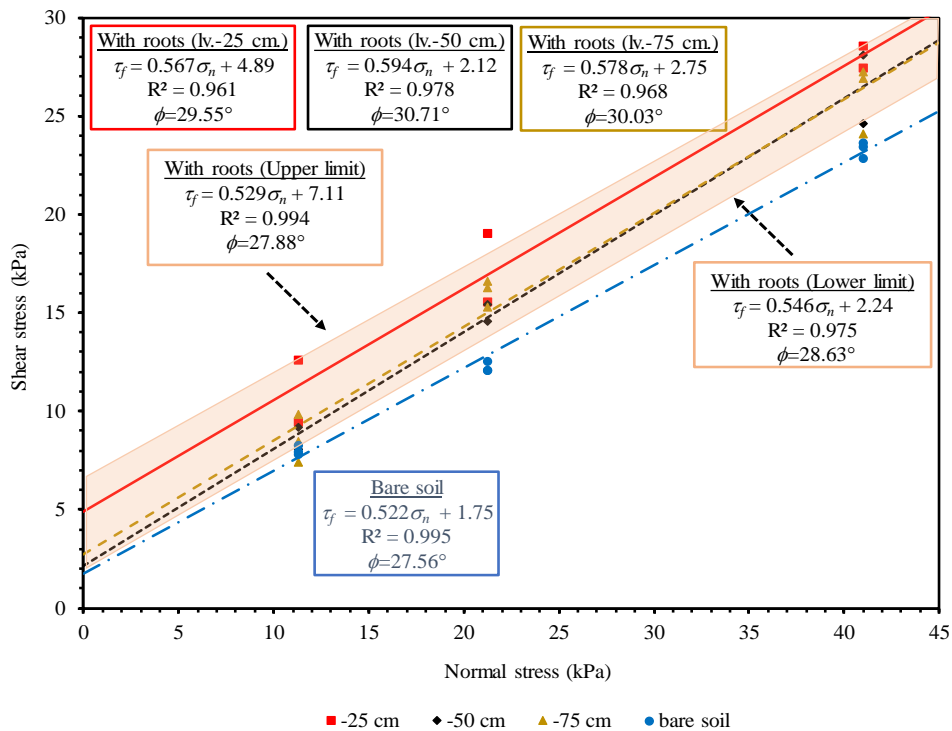


รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับความเครียดเฉือนของดินที่มีรากกับดินเปล่าที่ระดับความลึก 75 เซนติเมตร



รูปที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับแนวราบของดินที่มีรากกับดินเปล่าที่ระดับความลึก 75 เซนติเมตร

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนของดินกับความเครียดเฉือน พฤติกรรมเป็นแบบความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Strain-hardening) ซึ่งสอดคล้องกับวิจัยของ Mahannopkul & Jotisankasa (2019) โดยพบว่าความเครียดในช่วง 2 เปอร์เซ็นต์แรก ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเปล่า จะมีค่าสูงกว่าดินที่มีราก ซึ่งจากตารางที่ 12 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนของดิน (Shear stress) กับความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) ของดินที่มีราก เทียบกับดินเปล่า ในความลึกที่แตกต่างกัน เพื่อหาค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดิน ดังแสดงในรูปที่ 46 จากผลการทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง ตาม ASTM D3080/D3080M-11 ในเงื่อนไขแบบแช่น้ำ (Soaked conditions) พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนสูงสุดกับความเค้นตั้งฉาก จะมีพารามิเตอร์ของดินที่มีราก (Root reinforced soil) ที่ระดับความลึกที่แตกต่างกัน และดินเปล่า (Bare soil) ดังแสดงในรูปที่ 46 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Maffra, Sousa, Sutuli, & Pinheiro, (2019) พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลูกรังที่มีราก จะเพิ่มค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion) ให้แก่ดินเป็นหลัก และเพิ่มค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) เล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 14 เพราะเนื่องจากดินลูกรัง จำแนกดินอยู่ในประเภท SP ซึ่งมีความเป็นทรายสูง จึงมีค่ามุมภายในสูงอยู่แล้ว



— Envelop with roots (lv.-25 cm) — Envelop with roots (lv.-50 cm) — Envelop with roots (lv.-75 cm) — Envelop without roots

รูปที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับกำลังรับแรงตั้งฉากของการเปรียบเทียบดินที่มีราก และดินเปล่า

พารามิเตอร์ของดิน แสดงตารางที่ 13 โดยเมื่อเทียบการเพิ่มขึ้นของพารามิเตอร์ของดินที่มีราก (Root reinforced soil) ที่ระดับความลึกที่แตกต่างกัน และดินเปล่า (Bare soil) ดังแสดงตารางที่ 14

ตารางที่ 14 พารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีรากและดินเปล่า

Conditions	Depth	Equations Form	Parameter	Standard Deviation
relationships between τ_f and σ_n'				
bare soil	N/A	$\tau_f = 0.522 \sigma_n + 1.75$ $R^2 = 0.995$	$c' = 1.75$ kPa $\phi' = 27.54^\circ$	0.35 kPa 0.68°
Saturated/ root reinforced soil	25	$\tau_f = 0.567 \sigma_n + 4.89$ $R^2 = 0.961$	$c' = 4.89$ kPa $\phi' = 29.51^\circ$	3.14 kPa 2.33°
Saturated/ root reinforced soil	50	$\tau_f = 0.594 \sigma_n + 2.12$ $R^2 = 0.978$	$c' = 2.12$ kPa $\phi' = 30.65^\circ$	0.85 kPa 3.01°
Saturated/ root reinforced soil	75	$\tau_f = 0.578 \sigma_n + 2.75$ $R^2 = 0.968$	$c' = 2.75$ kPa $\phi' = 30.00^\circ$	0.03 kPa 1.29°

ตารางที่ 15 การเพิ่มขึ้นของค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีราก

Depth	Increase of cohesion, $\Delta c'$ (kPa)	Increase of friction angle, $\Delta \tan \phi'$	$\Delta c'$ (%)	$\Delta \tan \phi'$ (%)
25 cm	3.14	0.04	179.43	8.43
50 cm	0.37	0.07	21.14	13.41
75 cm	1.00	0.06	57.14	10.46




จากตารางที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนสูงสุดกับความเค้นตั้งฉาก เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เพิ่มกำลังรับแรงเฉือนเนื่องจากราก ($\Delta \tau$) ชีวมวลของรากแห้งต่อปริมาตรดิน (ρ_R) และอัตราส่วนรากด้านข้าง (RAR_{side}) ที่ระดับความลึกที่แตกต่างกัน ดังแสดงตารางที่ 15 และปริมาณของราก ดังแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากรากที่ระยะความลึกแตกต่างกัน

Depth (cm)	Normal stress, σ_n' (kPa)	Conditions	Peak shear stress, τ_f (kPa)	$\Delta \tau$ (kPa)	Avg $\Delta \tau$ (kPa)	Avg ρ_R (kg/m ³)	Avg* RAR_{side} (%)
25	11.3	soil+root	11.29	3.65	4.25	3.95	14.67
		bare soil	7.64				
	21.2	soil+root	16.90	4.10			
		bare soil	12.80				
	41	soil+root	28.12	4.99			
		bare soil	23.13				
50	11.3	soil+root	9.28	1.64	2.38	0.34	0.91
		bare soil	7.64				
	21.2	soil+root	15.00	2.19			
		bare soil	12.80				
	41	soil+root	26.44	3.31			
		bare soil	23.13				
75	11.3	soil+root	8.83	1.19	2.14	0.23	0.62
		bare soil	7.64				
	21.2	soil+root	14.71	1.90			
		bare soil	12.80				
	41	soil+root	26.46	3.33			
		bare soil	23.13				

*อัตราส่วนของรากจะหาได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของรากกับน้ำหนักรากแห้งต่อปริมาตรดิน

ตารางที่ 17 ปริมาณของราก หลังทำการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนโดยตรง ที่ได้จากการแยกรากและดินออกจากกัน

Depth (cm)	Quantity of roots
25	
50	
75	

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสถาปัตยกรรมระบบรากของหญ้าแฝก กำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก และกำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก

แบบจำลองของ Schwarz et al. (2010) ดังแสดงในสมการที่ 11 แสดงค่าตัวลดทอนกำลังรับแรงดึงสูงสุดของรากเฉลี่ย (m) เท่ากับ 0.4 สำหรับตัวลดทอนกำลังรับแรงดึงสูงสุดของรากเฉลี่ยของงานวิจัยนี้ที่คำนวณจากการเฉลี่ยของความลึกทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 0.006 ดังแสดงในตารางที่ 18 ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแบบจำลองของ Schwarz et al. (2010) สาเหตุเกิดจากการทดสอบแรงเฉือนโดยตรง มีข้อจำกัดของความสูงตัวอย่าง ทำให้เกิดรูปแบบเส้นใยของรากเลื่อนหลุด (Fiber slip mode) ดังนั้นค่ากำลังรับแรงดึงของรากเฉลี่ยที่เกิดขึ้นนั้น (Mobilized tensile stress) จึงมีค่าน้อยมาก ทำให้เกิดการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของดินเนื่องจากรากเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 18 พารามิเตอร์การลดทอนกำลังรับแรงดึงของราก

Conditions	$\Delta\tau$ (kPa)	Average tensile strength (kPa)	Average Side Root area ratio* (%)	Parameter m	Standard Deviation (kPa)
Saturated/ reinforced soil	2.92	7420±2730	5.40	$m =$ 0.006	0.97

* อัตราส่วนของรากในแบบจำลองของ Wu, St, & Swanston (1979) เป็น cross-section ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ side-section อาจทำให้ตัวลดทอนกำลังรับแรงดึงสูงสุดของรากเฉลี่ย (m) มีความคลาดเคลื่อน

ต่อมา แบบจำลองมัดเส้นใยของรากของ Schwarz et al. (2010) อ้างอิงใน (Mahannopkul & Jotisankasa, 2019) อธิบายว่าสามารถเขียนเป็นสมการของค่ากำลังเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากรากของ Wu, St, & Swanston. (1979) โดยการรวมพจน์ของ T_r และ $[\sin\theta + \cos\theta \tan\phi]$ เข้าด้วยกัน โดยจะแสดงสัมพันธของค่ากำลังเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากรากและอัตราส่วนราก และสามารถเขียนเป็นสมการของค่ากำลังเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากรากและชีวมวลของรากต่อปริมาตรดิน ซึ่งแสดงในตารางที่ 19 พบว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น จะแปรผันตรงกับอัตราส่วนของราก และชีวมวลของรากต่อปริมาตรดิน

ตารางที่ 19 พารามิเตอร์แบบจำลองของ (Schwarz et al., 2010)

Equations Form relationships between $\Delta\tau$ and ρ_R	Parameter a (kPa/kg/m ³)	Equations Form relationships between $\Delta\tau$ and RAR_{side}	Parameter k_1 (kPa/%)	Standard deviation (kPa)
$\Delta\tau = 0.377\rho_R$ + 2.48, $R^2 = 0.3842$	$a = 0.377$	$\Delta\tau = 0.0975RAR_{side}$ + 2.52, $R^2 = 0.3834^*$	$k_1 =$ 0.0975*	1.66

*ความสัมพันธ์ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก กับอัตราส่วนรากด้านข้าง (Side root area ratio) และพารามิเตอร์ k_1 มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

บทที่ 5

บทสรุป

จากการศึกษาสถาปัตยกรรมระบบรากของหญ้าแฝก ที่มีอิทธิพลต่อการเสริมกำลังของดิน ซึ่งบรรจุดินที่ใช้ในการปลูก 2 ชุด คือ เถ้าแกลบข้าว และดินลูกรัง โดยผลการศึกษา จะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ คือ 1.กำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก 2.การศึกษาสถาปัตยกรรมระบบรากของหญ้าแฝก 3. กำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก โดยนำมาหาความสัมพันธ์ ในแต่ละหัวข้อที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสรุปไว้ด้านล่าง ดังนี้

5.1 การศึกษาสถาปัตยกรรมระบบรากของหญ้าแฝก

5.1.1 อัตราส่วนของรากหญ้าแฝกด้านข้าง (Side root area ratio, RAR_{side}) จะมีค่าที่ลดลงตามความลึก ซึ่งอัตราส่วนรากด้านข้าง กับน้ำหนักรากแห้งต่อปริมาตรราก (ρ_R) จะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรงกัน

5.1.2 หญ้าแฝกจัดอยู่ในประเภทพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ซึ่งประกอบไปด้วย รากหลัก (Adventitious root) และรากในแนวนอน (Lateral root) ซึ่งการจัดวางตัวของรากหญ้าแฝก (Root orientation) พบว่ารากหลักของหญ้าแฝกจะกระจายลงแนวดิ่งเป็นส่วนมาก และรากกระจายในแนวนอนเล็กน้อย

5.2 กำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก

5.2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงดึงของราก คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก, ชีวมวลของราก และปริมาณความชื้นของราก โดยกำลังรับแรงดึงของรากแปรผกผันกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากและปริมาณความชื้นของราก ส่วนชีวมวลของรากและค่ายังโมดูลัสของรากจะแปรผันตรงกัน

5.2.2 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของรากหญ้าแฝก เป็นแบบวัสดุอีลาสโตพลาสติก (Elastoplastic) คือจะเกิดช่วงอีลาสติก หลังจากนั้นจะเกิดช่วงพลาสติก ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Strain-hardening)

5.3 กำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก

5.3.1 กำลังรับแรงเฉือนของดินลูกรังที่มีราก จะเพิ่มค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion) ให้แก่ดินเป็นหลัก และเพิ่มค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ) เล็กน้อย เพราะเนื่องจากดินลูกรัง จำแนกดินอยู่ในประเภท SP ซึ่งเป็นดินที่มีความเป็นทรายสูง จึงมีค่ามุมภายในสูงอยู่แล้ว

5.3.2 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก (Increase shear strength due to root, $\Delta\tau$) จะลดลงตามความลึก เพราะปริมาณของรากหญาแผกลดลงตามความลึก

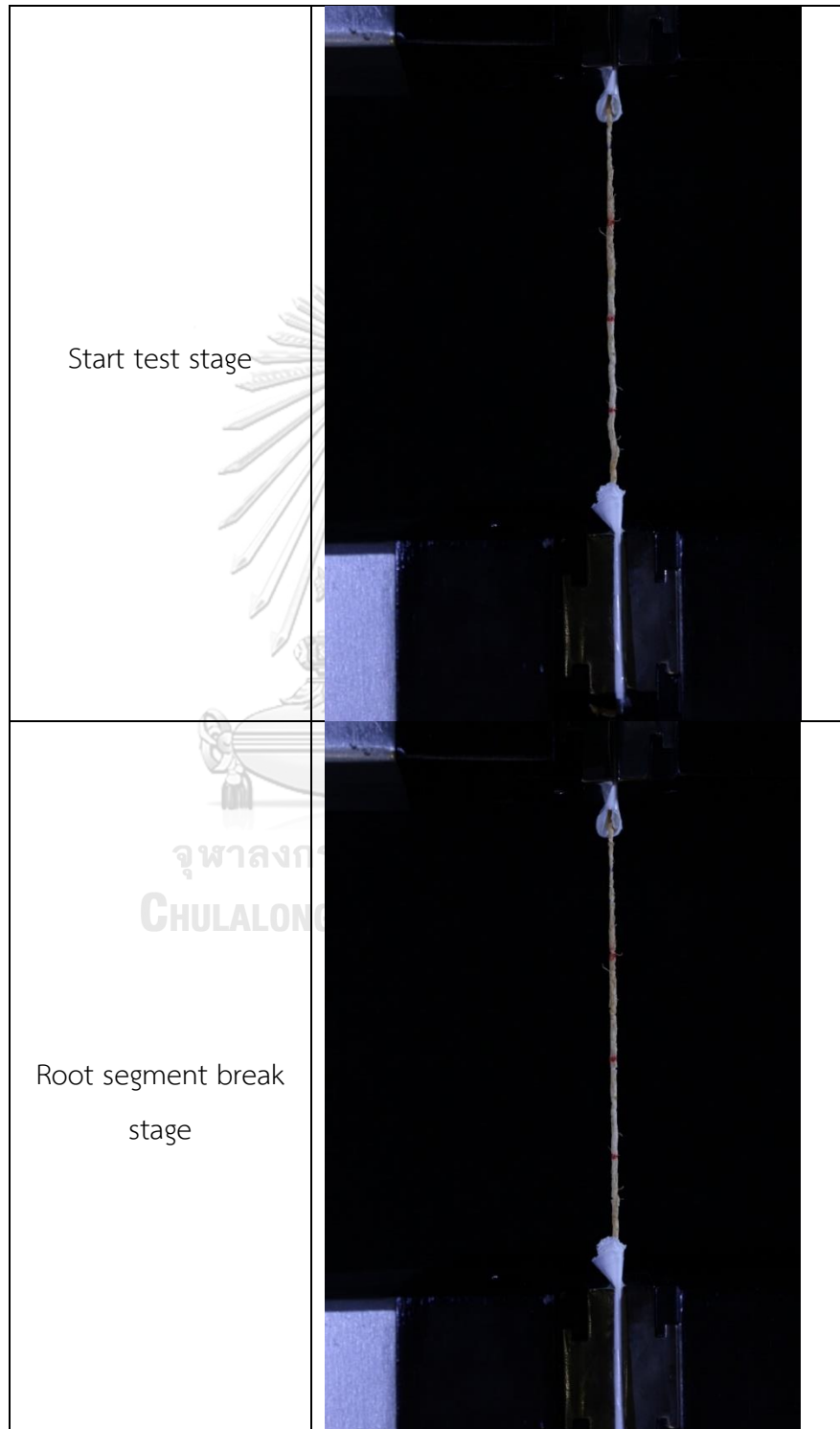
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสถาปัตยกรรมระบบรากของหญาแผก กำลังรับแรงดึงของรากหญาแผก และกำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากราก

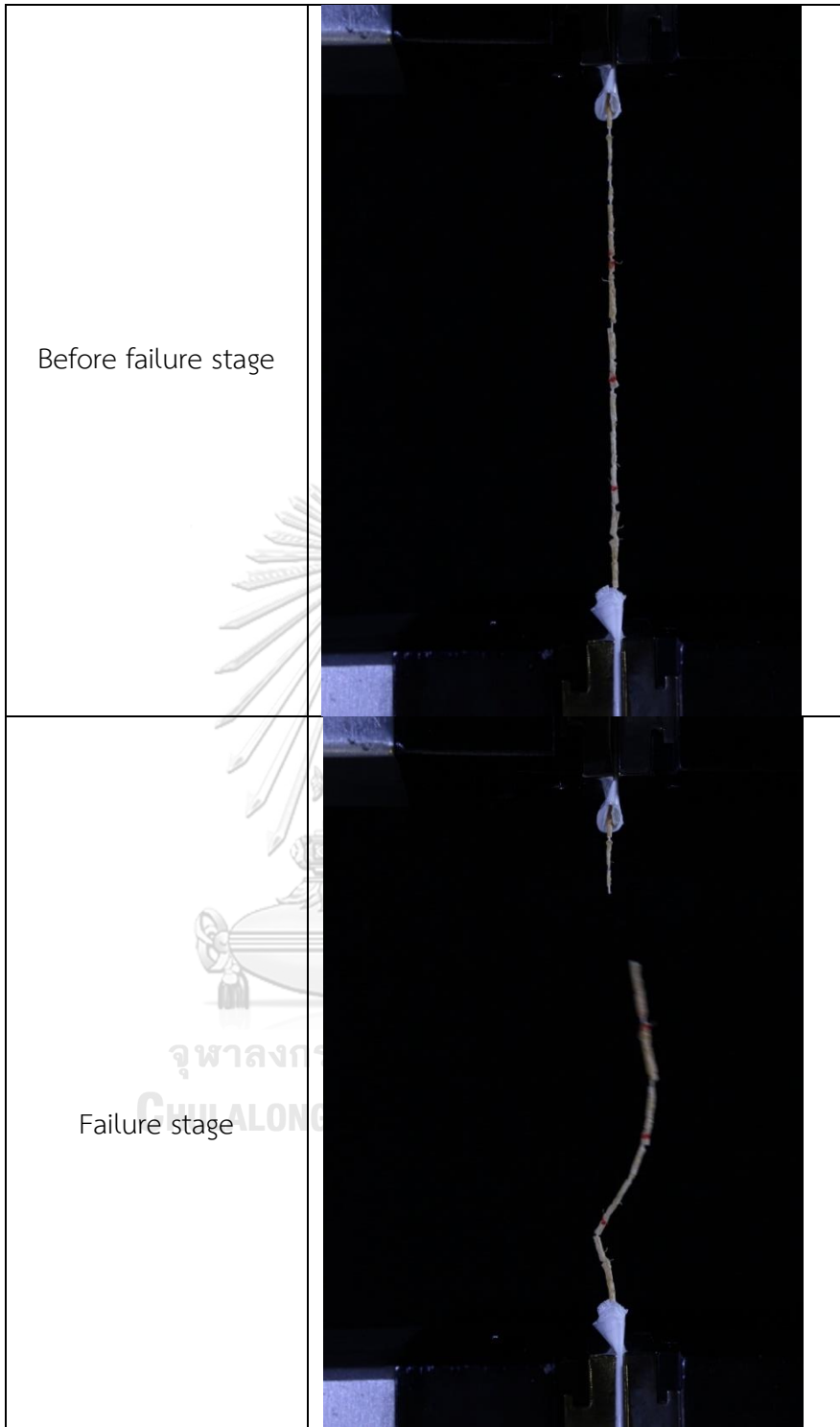
5.4.1 ค่ากำลังรับแรงดึงของรากหญาแผกช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเพียงเล็กน้อย หากเกิดการวิบัติของรากหญาแผกแบบสั่นไยของรากเลื่อนหลุด (Fiber slip mode)

5.4.2 ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากรากแปรผันตามอัตราส่วนของรากด้านข้าง และชีวมวลของรากแห่งต่อปริมาตรดิน

ภาคผนวก

ภาพถ่ายของราก ณ ขณะทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงของราก







จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

ณัฐพล วรรณกุล

วัน เดือน ปี เกิด

3 เมษายน 2538



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY