



## การศึกษาภาพถ่ายรากพืชเพื่อวิเคราะห์หาความมั่นคงของลาดดิน

วรกมล ศรีสุข บรรพต กุลสุวรรณ\* และ วรากร ไม้เรียง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1406 5175 อีเมล: fengbpk@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.01.003

รับเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2564 แก้ไขเมื่อ 15 กุมภาพันธ์ 2565 ตอปรับเมื่อ 31 พฤษภาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 24 มกราคม 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

การสำรวจรากพืชเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการศึกษาแนวทางการป้องกันดินถล่มและวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โดยปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีภาพถ่ายอย่างแพร่หลายและเข้าถึงได้ง่าย จึงเหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลรากพืชแบบใหม่ โดยงานวิจัยนี้ทำการออกแบบวิธีการสำรวจโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภาพถ่าย วิเคราะห์ข้อมูล และทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากพืชในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะให้ได้ข้อมูลพิกัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง อัตราส่วนหน้าตัดรากต่อหน้าตัดดิน ค่าความยึดเหนี่ยวของรากพืช กำลังรับแรงของรากพืช และทำการวิเคราะห์หาความมั่นคงของลาดดิน ในกรณีที่มีรากพืชและไม่มีรากพืชพบว่า การวิเคราะห์ข้อมูลรากพืชจากภาพถ่ายสามารถวัดขนาดรากพืชได้เล็กที่สุดถึง 0.05 เซนติเมตร และมีความแม่นยำสูงถึง 95% ทั้งนี้ความแม่นยำในการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับารปรับแก้ภาพถ่าย และจากการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินพบว่า อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินที่มีรากพืชสูงกว่าลาดดินที่ไม่มีรากพืช 27% ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานสนามเนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัด และขนย้ายขึ้นสู่พื้นที่สูงชันได้ง่าย

**คำสำคัญ:** การสำรวจรากพืช การประมวลผลภาพ ความยึดเหนี่ยวของรากพืช ความมั่นคงของลาดดิน



## Root Investigation by Using Image Processing Method for Slope Stability

Wolakamol Srisook, Bunpoat Kunsuwan\* and Warakorn Mairiang

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Nakhon Pathom, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 08 1406 5175, E-mail: fengbpk@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.01.003

Received 17 November 2021; Revised 15 February 2022; Accepted 31 May 2022; Published online: 24 January 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

Root Investigation is one of the important factors to examine the guidelines for landslide prevention and slope stability analysis. Nowadays, digital image processing has wide applications and provides easy access to the image operations. Therefore, it is suitable for further use as a new method of root investigation. In this research, the plant root survey method was designed through the use of digital image processing. Sampling and tensile strength evaluation of roots were carried out in the laboratory. The data obtained from root investigation comprise root positioning, root diameter, root area ratio, root-soil adhesion, tensile strength, along with slope stability with and without root reinforcement. As results, image processing method was able to measure root size as small as 0.05 cm. with 95% accuracy. The accuracy of this method depended on the camera angle correction. The slope stability analysis found that the safety coefficient of vegetated slope stability was 27% greater than that on a bare slope. This method is deemed ideal for field applications due to its affordability while offering an easy, alternative transport mode over steep terrain.

**Keywords:** Root Investigation, Image Processing, Root Cohesion, Slope Stability

## 1. บทนำ

ดินถล่มเป็นภัยพิบัติที่ก่อให้เกิดความเสียหายเป็นจำนวนมาก สาเหตุส่วนหนึ่งเกิดจากการถ่างป่าสำหรับการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อการเกษตรและที่พักอาศัย ส่งผลให้การเสริมแรงของดินและรากพืชในบริเวณดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป [1] โดยแนวทางการป้องกันดินถล่มที่ยั่งยืนและประหยัดได้แก่ การใช้พืชพันธุ์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของลาดดิน เรียกว่า “ชีววิศวกรรมปฐพี (Bio-Engineering)” เนื่องจากรากพืชจะมีความยึดเหนี่ยว (Root Cohesion;  $C_r$ ) ที่สามารถช่วยเสริมกำลังของมวลดินได้ [2]–[5] โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความยึดเหนี่ยวของรากพืช ได้แก่ ความแข็งแรง (Root Strength) ขนาด ความหนาแน่นของรากพืช และอัตราส่วนหน้าตัดรากต่อหน้าตัดดิน (Root Area Ratio; RAR) ที่จะต้องทำการสำรวจพื้นที่หน้าตัดรากพืชในสนาม โดยในปัจจุบันมีวิธีการสำรวจรากพืชที่หลากหลาย เช่น การขุด การฝังท่อใส่เพื่อส่องกล้อง การสแกนด้วยรังสี X-ray ซึ่งการสำรวจรากพืชแต่ละวิธีมีข้อจำกัดที่แตกต่างกันดังตารางที่ 1 [2], [6], [7] ดังนั้นในการเลือกวิธีการสำรวจรากควรเลือกอย่างเหมาะสม ในประเทศไทยได้มีการสำรวจรากพืชทางวิศวกรรมที่แพร่หลายมากยิ่งขึ้นเพื่อศึกษาคุณสมบัติของรากพืชที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของลาดดินโดยใช้วิธี Mini-Rhizotron เพื่อเป็นการสำรวจพื้นที่หน้าตัดของรากพืชด้านข้าง (Side Root Area Ratio; %SRAR) วิธี 3D Scanner เพื่อศึกษารากพืชจากรูปทรง ระยะแผ่ราก ความหนาแน่นของรากซึ่งจะทำควบคู่กับการกำจัดหน้าดินด้วยวิธีสำรวจราก

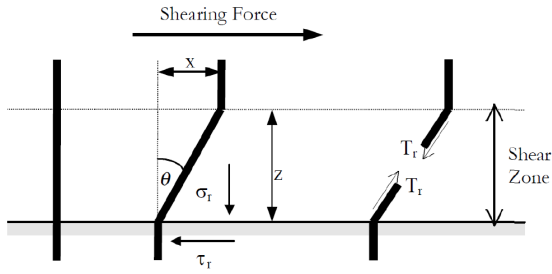
กำแพงแสวน (Root Observation-KPS; RO-KPS) เป็นวิธีฉีดน้ำแรงดันสูง [8] ซึ่งวิธี 3D Scanner เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการขนย้ายสู่พื้นที่ป่าหรือพื้นที่สูงชัน แต่มีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากอุปกรณ์และข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลไม่ครบถ้วน เนื่องจากการเก็บข้อมูลด้วย 3D Scanner ไม่สามารถเก็บข้อมูลที่มีขนาดเล็กได้จะต้องใช้ภาพถ่ายร่วมกับการแปลผล ซึ่งอาจจะความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการตัดสินใจของมนุษย์

ปัจจุบันการถ่ายภาพเป็นเทคโนโลยีที่ทุกคนสามารถเข้าถึงได้ง่าย มีการพัฒนาภาพถ่ายให้มีความชัดเจนละเอียดมากยิ่งขึ้น และยังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายได้ เทคโนโลยีนี้เรียกว่า “การประมวลผลภาพ (Image Processing)” โดยวัตถุประสงค์ของเทคโนโลยีภาพถ่ายคือปรับปรุงคุณภาพของรูปภาพ และจัดเตรียมรูปถ่ายเพื่อการตรวจวัด [9] ซึ่งเทคโนโลยีนี้ความแม่นยำค่อนข้างสูง โดยได้มีการประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ได้แก่ การตรวจสอบคุณภาพในโรงงานอุตสาหกรรม การอ่านข้อมูลลายนิ้วมือ เป็นต้น และยังมีการประยุกต์กับข้อมูลรากพืชเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลโครงสร้างสัญญาณรากต้นข้าว [10] และวิธี 3D Scanner ก็เป็นหนึ่งในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีประมวลผลภาพด้วย ดังนั้นการใช้การประมวลผลภาพจากภาพถ่ายจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลรากพืช เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถเก็บข้อมูลรากพืชที่มีขนาดเล็กได้ และมีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ต้องการความแม่นยำและรวดเร็ว

การเสริมแรงของดินด้วยรากพืชจะพิจารณาจากความยึดเหนี่ยวของรากพืชจากสมการของ Mohr-Coulomb คือ

ตารางที่ 1 ปัจจัยในการเลือกวิธีการสำรวจราก

วิธีการ	ขนาดของต้นไม้	ความลึก (เมตร)	ความลึกสูงสุด (เมตร)	จำนวนคน (คน)	ราคา (บาท)	ขนาดเล็กที่สุดของรากที่สำรวจได้	การทำลาย	การรบกวน
Excavation, Coring, Trenching	grass/herb	0.3–0.5	unlimited	1–2 คน	น้อยที่สุด	ไม่สามารถสำรวจรากขนาดเล็กได้	✓	✓
Mini-Rhizotron	tree	1–0.5	3	1–2 คน	มาก	หน่วยมิลลิเมตร	-	✓
Access Shafts	tree	1	5–10	1 คน	มาก	หน่วยมิลลิเมตร	-	✓
CAT-scanner	grass	0.5	-	1 คน	มากที่สุด	หน่วยมิลลิเมตร	-	✓
3D Scanner	tree	1–0.5	unlimited	2–4 คน	ปานกลาง	0.5 มิลลิเมตร	-	✓



รูปที่ 1 รากที่ตัดผ่านบริเวณที่เกิดแรงเฉือน

$\tau_{sr} = C_s + C_r + \sigma \tan \phi$  โดยค่า  $C_r$  คือ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงของรากพืช (Root Tensile Strength;  $t_r$ ) และพื้นที่หน้าตัดรากต่อหน้าตัดดิน (%RAR) โดยกำลังรับแรงดึงของรากพืชจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ตั้งฉากกับแนวเฉือนและขนานกับแนวเฉือนดังรูปที่ 1 ดังนั้นจะได้สมการดังนี้  $C_r = t_r (\cos \theta \tan \phi + \sin \theta)$  โดยที่ค่า  $\cos \theta \tan \phi + \sin \theta$  มีค่าประมาณ 1.2 [1] และค่ากำลังรับแรงดึงของรากพืชหาได้จากผลรวมแรงดึงสูงสุดของรากคูณกับอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดรากต่อหน้าตัดดินดังสมการ  $t_r = \sum_{i=1}^n Tr(RAR)$  [11], [12] ซึ่งสามารถหาค่า RAR ได้จากสมการที่ (1)

$$RAR = \frac{A_r}{A_s} \tag{1}$$

ดังนั้นสมการ  $C_r$  จึงถูกปรับเพื่อการหาค่ายึดเหนี่ยวของรากพืชในดินดังสมการที่ 2

$$C_r = 1.2 \sum T_r \left( \frac{A_r}{A_s} \right) \tag{2}$$

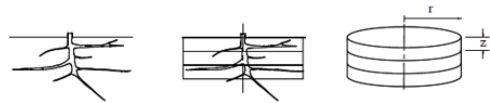
โดยที่  $C_r$  คือ ค่าความยึดเหนี่ยวของรากพืช (ตัน/ตร.ม)

$T_r$  คือ Root Tensile Strength (เมกะปาสคาล)

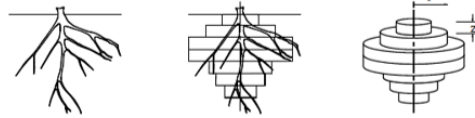
$A_r$  คือ พื้นที่หน้าตัดราก (ตารางเมตร)

$A_s$  คือ พื้นที่หน้าตัดดินทั้งหมด (ตารางเมตร)

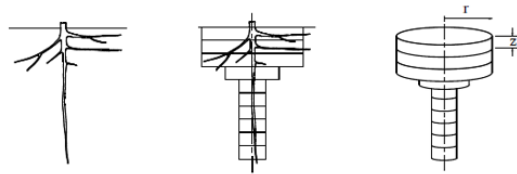
การวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินที่มีรากพืชสามารถทำได้โดยจลองรูปแบบการแผ่ขยายของรากพืชโดยแทนที่ดินด้วยทรงกระบอกที่มีความหนา  $z$  และรัศมี  $r$  วางเรียงซ้อนกันจากบนลงล่าง ค่ารัศมีจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความลึกเพื่อให้ใกล้เคียงกับลักษณะการแผ่ขยายจริงของ



(ก) รากส่วนใหญ่แผ่ขยายในแนวระดับ



(ข) รากส่วนใหญ่แผ่ขยายในแนวเฉียง



(ค) รากแผ่ขยายในแนวราบและมีรากแก้ว

รูปที่ 2 การใช้ทรงกระบอกจำลองการแผ่ขยายของรากพืชโดยทั่วไป

รากพืชดังรูปที่ 2 แล้ววิเคราะห์หาโอกาสการเกิดการพิบัติ โดยกำหนดขนาดพื้นที่โดยระบุเป็นจำนวนช่องพิจารณาทุกชั้นดินและเลื่อนพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดการพิบัติไปจนทั่วพื้นที่เป้าหมาย [13]

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลรากพืชที่ได้จากการถ่ายภาพ โดยประยุกต์ใช้การประมวลผลภาพ (Image Processing) เพื่อวิเคราะห์หาขนาดของรากพืช โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะถูกเปรียบเทียบกับขนาดของรากพืชจริงที่ได้จากการวัดในสนาม และเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการหาค่าความยึดเหนี่ยวของรากพืชและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของอิทธิพลของรากพืชที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของลาดดิน

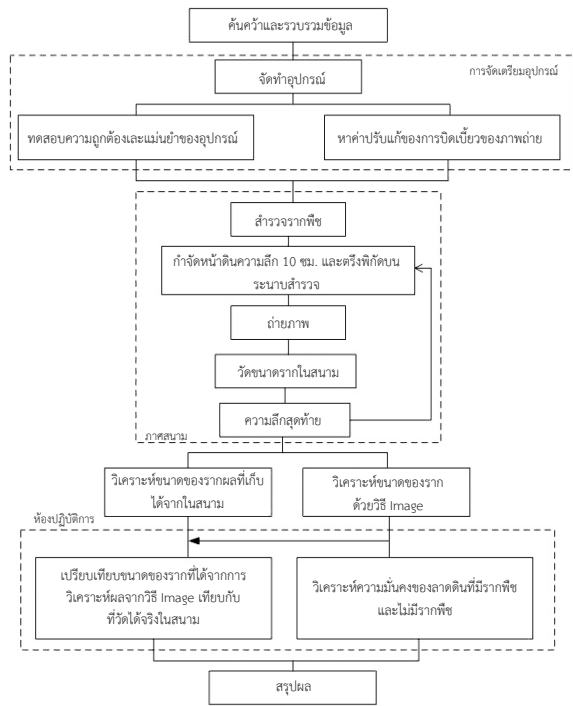
## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การดำเนินงานจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน (รูปที่ 3) ได้แก่

### 2.1 งานในห้องปฏิบัติการ

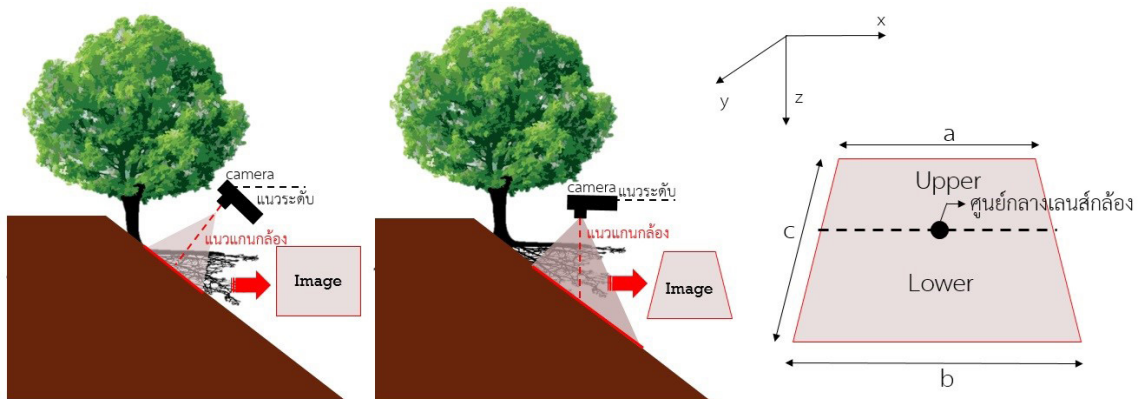
#### 2.1.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์สำรวจ

อุปกรณ์สำหรับการสำรวจรากพืชจะถูกออกแบบให้



รูปที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

มีความมั่นคง ง่ายต่อการติดตั้ง สะดวกในการปรับระดับ และเคลื่อนย้ายไปยังพื้นที่สูงชันหรือพื้นที่ป่าได้ง่าย จึงมีการออกแบบโดยใช้ขาตั้งกล้องเซอเวย์ แผ่นเพลทและรางอะลูมิเนียมโปรไฟล์ โดยในส่วนของ การเก็บข้อมูลภาพถ่ายสามารถใช้กล้องจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้นี้เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่เข้าถึงได้ง่าย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องมาก



รูปที่ 4 การติดตั้งกล้องสำหรับการถ่ายภาพ

ที่สุดควรที่จะติดตั้งกล้องในแนวขนานกับการวางตัวของวัตถุ [14] กล่าวคือ ให้แนวแกนกล้องตั้งฉากกับวัตถุตั้งรูปที่ 4 (ก) จะทำให้ได้ภาพที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส (อัตราส่วนภาพถ่ายคือ 1 : 1) แต่สำหรับงานในสนามการปรับมุมเอียงของกล้องให้เท่ากับมุมเอียงของวัตถุ นั้นสามารถทำได้ยาก การถ่ายภาพจึงกำหนดให้กล้องวางในแนวราบส่งผลให้ภาพถ่ายที่ได้จะมีลักษณะสี่เหลี่ยมคางหมูตั้งรูปที่ 4 (ข) ทำให้เกิดความบิดเบี้ยวเนื่องจากแนวเอียงของวัตถุจึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้การบิดเบี้ยวดังกล่าว

### 2.1.2 การจัดเตรียมการวิเคราะห์

การเก็บข้อมูลภาพถ่ายจะได้ข้อมูลในแนวแกน X และแกน Y เท่านั้นดังรูปที่ 4 (ค) ซึ่งไม่สามารถระบุความสูงของวัตถุได้ และจากการออกแบบอุปกรณ์เก็บข้อมูล ภาพถ่ายที่ได้จะมีความบิดเบี้ยว (Distorsion) เนื่องจากมุมเอียงของวัตถุ ดังนั้นต้องทำการปรับแก้เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง โดยก่อนการถ่ายภาพจะทำการตรึงพิกัดเพื่อเป็นระนาบอ้างอิง สำหรับการสอบเทียบราข้อมูลเพื่อการปรับแก้ ซึ่งมีการปรับแก้ดังต่อไปนี้

#### 1) การปรับแก้ความสูงของวัตถุ

ก่อนการถ่ายภาพจะทำการวัดความสูงระหว่างเลนส์กล้องจนถึงระนาบอ้างอิงเพื่อเป็นข้อมูลความลึกสำหรับการสอบเทียบ ซึ่งความเป็นจริงวัตถุจะมีความสูงแตกต่างจากระนาบอ้างอิง โดยวัตถุที่อยู่สูงกว่าระนาบอ้างอิง (ใกล้เลนส์กล้อง) จะมีขนาดใหญ่กว่าความเป็นจริงและวัตถุที่อยู่ต่ำกว่า



ระนาบอ้างอิง (ไกลเลนส์กล้อง) จะมีขนาดเล็กกว่าความเป็นจริงส่งผลให้ขนาดที่ทำการวัดในโปรแกรมมีความผิดพลาด ดังนั้นความสูงของวัตถุในภาพถ่ายจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการหาขนาดของวัตถุ จึงจะต้องปรับแก้ขนาดที่เกิดจากความผิดพลาดของความสูงดังกล่าว โดยในที่นี้จำเป็นที่จะต้องทราบค่าผลต่างของความสูงจริงกับความสูงบนระนาบ ( $\Delta Z$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3) แล้วนำผลต่างที่ได้มาคำนวณหาค่าปรับแก้ดังสมการที่ (4)

$$Z = Z_{real} - Z_{ref} \quad (3)$$

$$D_{AdjH} = D_m (1 + Z(0.05)) \quad (4)$$

โดย  $Z_{real}$  คือ ความสูงจากวัตถุจนถึงเลนส์กล้อง

$Z_{ref}$  คือ ความสูงของระนาบอ้างอิงจนถึงเลนส์กล้อง

$\Delta Z$  คือ ผลต่างของความสูงจริงกับความสูงบนระนาบ

$D_{AdjH}$  คือ ขนาดของวัตถุที่ได้จากการปรับแก้ความสูง

$D_m$  คือ ขนาดของวัตถุที่วัดจากโปรแกรมทาง Image Processing

2) การปรับแก้ขนาดจากการบิดเบี้ยวของภาพถ่าย

การบิดเบี้ยวของภาพถ่ายมีสาเหตุมาจากการที่ระนาบถ่ายภาพไม่ตั้งฉากกับแนวเลนส์กล้องซึ่งจะทำให้เกิดภาพที่

มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู ส่งผลให้ขนาดและพิกัดของวัตถุที่วัดได้จากภาพถ่ายเกิดความผิดเพี้ยนไป ซึ่งภาพที่อยู่บริเวณไกลเลนส์กล้องจะมีขนาดแคบกว่าภาพที่อยู่ไกลจากเลนส์กล้องดังรูปที่ 4 (ค) จึงจำเป็นที่จะต้องจะต้องทำการปรับแก้ความบิดเบี้ยวดังกล่าวนอกจากนี้ภาพถ่ายที่ได้จะมีขนาดที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2 ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

- มุมเอียงของวัตถุที่กระทำกับแนวกล้องหรือความลาดชันของวัตถุ

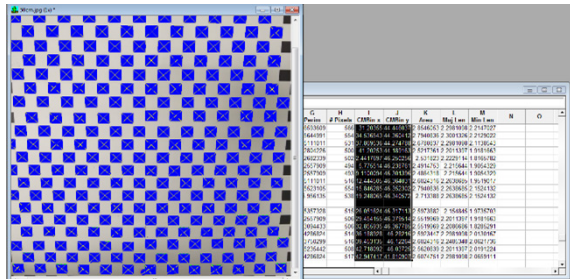
- ความสูงของกล้องและระยะห่างจากแนวแกนกล้อง

การปรับแก้ความบิดเบี้ยวของภาพถ่ายมีเทคนิคในการปรับแก้คือการใช้ระนาบที่มีลายเป็นตารางหมากรุกเพื่อหาค่าปรับแก้ได้และยังสามารถวิเคราะห์เป็นสมการพหุนามเพื่อใช้ในการปรับแก้ [14] ดังนั้นจึงทำการสอบเทียบภาพถ่ายตารางหมากรุกที่ทราบขนาดที่แน่ชัดโดยแปรผันตามความลาดชันของระนาบแนววัตถุที่ 0-40 องศา และแปรผันความสูงของกล้อง 20-60 เซนติเมตร แล้วนำมาวิเคราะห์ขนาดในโปรแกรมทาง Image Processing เพื่อหาค่าปรับแก้ (Correction Factor;  $K$ ) ดังรูปที่ 5 ขนาดและพิกัดของวัตถุในแต่ละตำแหน่งเพื่อให้ได้ขนาดที่ถูกต้องซึ่งการหาค่า Correction Factor จำเป็นต้องปรับแก้ทั้งในแนวราบ (แกน  $X$ ,  $k_x$ ) และแนวตั้ง (แกน  $Y$ ,  $k_y$ ) เนื่องจากการบิดเบี้ยวในแต่ละแนวแกนมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับระยะห่างจากเลนส์กล้อง เมื่อนำค่าปรับแก้ที่ได้จากโปรแกรมมาวิเคราะห์เชิงสถิติ

ตารางที่ 2 ขนาดภาพที่เปลี่ยนไปตามปัจจัยต่างๆ

องศา	ความสูงกล้อง (เมตร)	ขนาดภาพที่ถ่ายได้ (เมตร)	องศา	ความสูงกล้อง (เมตร)	ขนาดภาพที่ถ่ายได้ (เมตร)
10	0.20	0.18 × 0.19	30	0.20	0.14 × 0.21
	0.30	0.25 × 0.26		0.30	0.22 × 0.33
	0.40	0.35 × 0.37		0.40	0.30 × 0.42
	0.50	0.43 × 0.44		0.50	0.35 × 0.56
	0.60	0.52 × 0.53		0.60	0.42 × 0.60
20	0.20	0.15 × 0.19	40	0.20	0.12 × 0.18
	0.30	0.24 × 0.28		0.30	0.20 × 0.27
	0.40	0.33 × 0.40		0.40	0.28 × 0.43
	0.50	0.41 × 0.52		0.50	0.32 × 0.57
	0.60	0.50 × 0.64		0.60	0.35 × 0.62





รูปที่ 5 การหาค่าปรับแก้ Distorsion ของภาพถ่าย

เพื่อหาสมการปรับแก้ความบิดเบี้ยวของภาพถ่ายในแนวแกน X และแนวแกน Y โดยแปรผันตามความสูงกล้องและองศาของวัตถุที่แตกต่างกัน ได้ผลดังสมการที่ (5) และสมการที่ (6) ลำดับ โดยมีตัวแปรต้นคือ พิกัด ความสูงกล้อง องศาเอียงของลาดดิน ซึ่งสมการที่ 5 มีค่าความผันแปรของตัวแปร ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.874 และสมการที่ 6 มีค่าความผันแปรของตัวแปร ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.771

$$k_x = 1.065 + 0.008\theta - 0.005D + 0.012Y \quad (5)$$

$$k_y = 1.135 + 0.003\theta - 0.008D + 0.021Y \quad (6)$$

โดยที่  $k_x$  คือ ค่าปรับแก้ความบิดเบี้ยวภาพในแนวราบ  
 $k_y$  คือ ค่าปรับแก้ความบิดเบี้ยวภาพในแนวตั้ง  
 $Y$  คือ พิกัดของวัตถุในแนวตั้ง (เซนติเมตร)  
 $D$  คือ ความสูงของกล้องถึงวัตถุ (เซนติเมตร)  
 $\theta$  คือ มุมเอียงของลาดดิน/วัตถุ (องศา)

### 2.1.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบความถูกต้องจะจัดทำโดยถ่ายภาพวัตถุที่ทราบขนาดที่แน่นอนในห้องปฏิบัติการเพื่อจัดวางให้ทราบตำแหน่งของวัตถุ โดยวัตถุที่นำมาถ่ายภาพมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเพื่อให้มีลักษณะคล้ายกับรากพืชมากที่สุด แล้วนำข้อมูลภาพถ่ายมาวิเคราะห์ในโปรแกรมโดยทำการปรับแก้ความสูงและปรับแก้ขนาดที่เกิดจากความบิดเบี้ยวของภาพถ่าย นอกจากนี้จะต้องทำการวัดขนาดและตำแหน่งของวัตถุจริงสำหรับการเปรียบเทียบความถูกต้องข้อมูล



(ก)

(ข)

รูปที่ 6 การฉีดล้างและติดตั้งอุปกรณ์สำรวจรากพืช

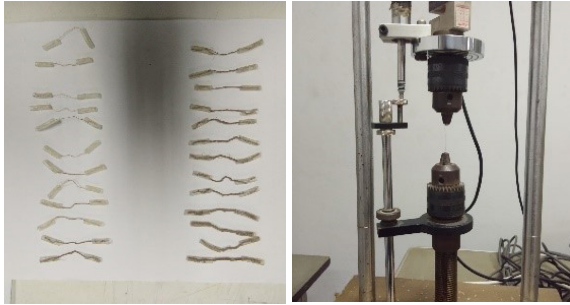
ที่วิเคราะห์ได้

## 2.2 งานในภาคสนาม

การสำรวจและเก็บข้อมูลรากพืชเริ่มจากการกำจัดหน้าดิน โดยเลือกใช้วิธีการ RO-KPS คือ การกำจัดหน้าดินด้วยการฉีดน้ำแรงดันสูงซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ไม่ทำลายรากพืชและยังคงสภาพในตำแหน่งเดิมได้ โดยเริ่มจากการกำจัดหน้าดินออกครั้งละ 10 เซนติเมตร โดยประมาณดังรูปที่ 6 แล้วทำการตรึงหมุดเพื่อเป็นระนาบอ้างอิงและทำให้ทราบถึงพิกัดที่ทำการเก็บข้อมูล แล้วจึงทำการถ่ายภาพ โดยการถ่ายภาพจะต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพให้อยู่ในแนวระดับเพื่อป้องกันความบิดเบี้ยวของภาพถ่ายที่เกิดจากอุปกรณ์ถ่ายภาพแล้วจึงทำการถ่ายภาพ โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้กล้องจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ให้ความละเอียด 12 ล้านพิกเซล และอัตราส่วนภาพถ่ายคือ 1 : 1

## 2.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึง

การหาค่าความแข็งแรงของรากพืชสามารถทำได้โดยการทดสอบกำลังรับแรงดึงในห้องปฏิบัติการในแต่ละหน้าตัดของราก ซึ่งจะต้องทำการเก็บตัวอย่างรากพืชตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดที่เครื่องทดสอบจะสามารถทำการทดสอบได้ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรากพืชขนาดไม่เกิน 1.5 เซนติเมตร โดยในการทดสอบจะทำการยึดบริเวณปลายรากด้วยท่อยางเพื่อป้องกันการขาดของรากพืชเนื่องจากการยึดจับของอุปกรณ์ซึ่งจะส่งผลต่อกำลังของรากพืชดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทดสอบกำลังรับแรงดึง

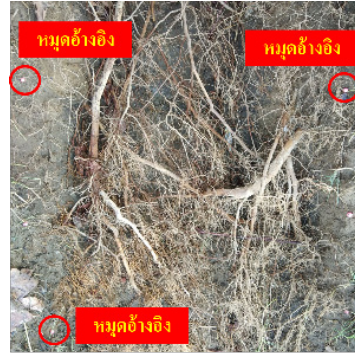
## 2.4 การวิเคราะห์ผล

### 2.4.1 การวิเคราะห์ขนาดของรากพืช

การหาขนาดของวัตถุจากภาพถ่ายทำโดยนำภาพถ่ายที่มีหมุดตรึงพิกัดอ้างอิง ดังรูปที่ 8 (ก) เข้าสู่กระบวนการประมวลผลภาพ (Image Processing) ด้วยโปรแกรมและสอบเทียบ (Calibrate) พิกัดของภาพถ่ายโดยตั้งค่าพิกัดหมุดอ้างอิงต่างๆ ในรูป แล้วทำการวัดขนาดของรากพืชด้วยการลากเส้นวัดขนาดในทิศทางตั้งฉากกับแนวของรากพืช ดังรูปที่ 8 (ข) โดยความยาวที่วัดออกมาได้ เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืชชิ้นๆ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวัดในโปรแกรมได้แก่ พิกัดของรากพืช และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืช

2.4.2 การวิเคราะห์ค่าความยึดเหนี่ยวของรากพืชและวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีภาพถ่ายสามารถนำ ข้อมูลขนาดและพิกัดของรากพืชมาวิเคราะห์พื้นที่หน้าตัดรากต่อหน้าตัดดิน ( $A/A_s$ , %RAR) และค่าความยึดเหนี่ยวของรากพืชที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินได้ โดยในการวิเคราะห์ %RAR จะทำการพล็อตพิกัดและขนาดของรากพืชและแบ่งกริดขนาด  $10 \times 10$  เซนติเมตร ตามชั้นความลึกแล้วจึงทำการหาพื้นที่หน้าตัดรากต่อหน้าตัดดินในกริดต่างๆ และวิเคราะห์ค่าความยึดเหนี่ยวของรากพืช ดังสมการที่ (3) สำหรับการวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินจะทำการวิเคราะห์ในโปรแกรม KUSlope 2.1 เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety; FS) โดยจะเปรียบเทียบระหว่างลาดดินที่ไม่มีเสริมแรงและมีการเสริมแรงด้วยรากพืช



(ก) ตำแหน่งหมุดอ้างอิง



(ข) ลักษณะการวัดขนาดรากพืช

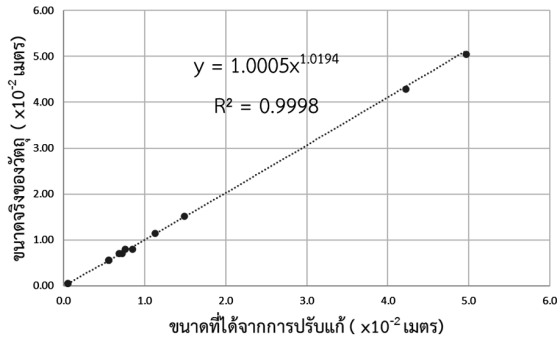
รูปที่ 8 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีภาพถ่าย

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 ผลการทดสอบความถูกต้องและแม่นยำ

การทดสอบความถูกต้องและแม่นยำถูกจัดทำขึ้นในห้องปฏิบัติการโดยถ่ายภาพวัตถุทรงกระบอกที่ทราบขนาดที่แน่ชัด เพื่อเป็นการจำลองลักษณะของรากพืชโดยวางสุ่มจำนวน 13 ชิ้น แล้วทำการวิเคราะห์ขนาดของวัตถุในแนวตั้งฉากเพื่อให้ได้เป็นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง แล้วทำการปรับแก้ความบิดเบี้ยวของภาพถ่าย และทำการวัดขนาดของวัตถุจริงโดยใช้เวอเนียคาลิเปอร์เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความถูกต้อง ซึ่งผลที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์กับขนาดที่วัดจริง พบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยไม่เกิน 5% หรือมีค่าความแม่นยำคือ 95% เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดที่วัดจริงจากการทดลอง ดังรูปที่ 9 พบว่า ค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 0.9998 แสดงว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยเมื่อเทียบกับค่าขนาดจริงโดยพบว่าวัตถุที่มีขนาดเล็กมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าวัตถุขนาดใหญ่





รูปที่ 9 การเปรียบเทียบขนาดที่วัดจริงกับขนาดที่วัดจากภาพถ่าย

โดยวัตถุที่มีขนาด 0.005 เซนติเมตร มีความผิดพลาดมากที่สุด โดยจากการทดสอบมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุด คือ 5% และสามารถทำการเก็บข้อมูลขนาดของวัตถุได้เล็กสุด เท่ากับ 0.05 เซนติเมตร

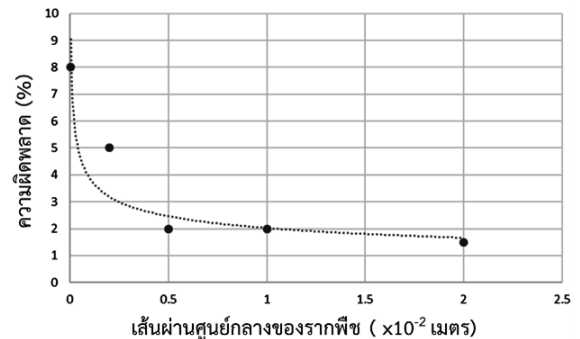
### 3.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลรากพืช

ข้อมูลรากพืชที่ได้จากภาพถ่ายเมื่อทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับขนาดรากพืชที่วัดจริงในสนามและพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนดังรูปที่ 10 ซึ่งจะพบว่า รากที่มีขนาดเล็กกว่า 0.001 เมตร มีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงซึ่งเกิดจากความละเอียดของภาพถ่ายหากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องที่มีความละเอียดค่อนข้างสูงจะส่งผลให้ค่าความผิดพลาดน้อยลงได้ และผลการเก็บข้อมูลในสนามยังสอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ว่าวัตถุที่มีขนาดเล็กจะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าวัตถุที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้การเก็บข้อมูลรากพืชด้วยวิธีการถ่ายภาพยังสามารถนำข้อมูลที่ได้ออกมาวิเคราะห์นำมาวิเคราะห์หาพื้นที่รากต่อพื้นที่ดิน

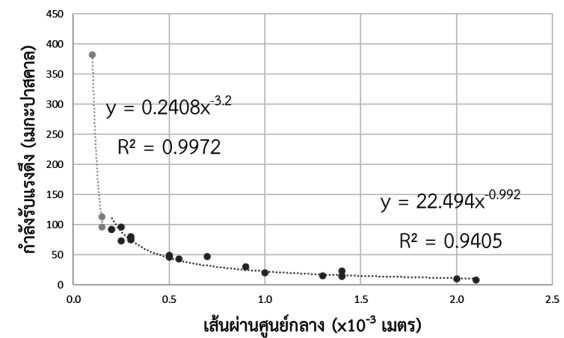
### 3.3 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

#### 1) การทดสอบแรงดึง (Tensile Strength)

การทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากพืชพบว่า กำลังรับแรงดึงของรากพืชสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ รากพืชที่มีขนาด 0.1–0.2 มิลลิเมตร และ 0.2–2.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 10 %ERROR ที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับขนาดของรากพืช

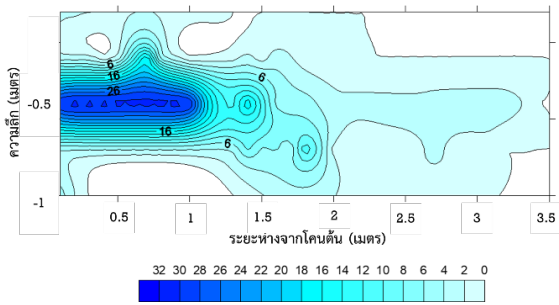


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับกำลังรับแรงดึงของรากพืช

ดังรูปที่ 11 จากการทดสอบพบว่า หน่วยแรงดึงของรากพืชจะมีค่าลดลงเมื่อรากพืชมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อหน่วยแรงดึงขนาดของรากพืช คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืช ซึ่งเป็นผลมาจากในรากพืชที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยคือ พืชที่มีอายุน้อยโดยเนื้อไม้จะมีปริมาณเส้นใยไฟเบอร์มากกว่าพืชที่มีอายุมาก [15]–[18] โดยผลการวิเคราะห์ในรูปแบบสมการเพื่อทำการทำนายค่ากำลังรับแรงดึงได้ดังนี้ รากพืชที่มีขนาด 0.1–0.2 มิลลิเมตร มีสมการคือ  $y = 0.2408x^{-3.2}$  และรากที่อยู่ในช่วง 0.2–2.0 มิลลิเมตร มีสมการคือ  $y = 22.494x^{-0.992}$  และรากที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตรไม่สามารถทำการทดสอบได้เนื่องจากจะเกิดการหลุดออกจากหัวจับจึงส่งผลให้ไม่สามารถวัดกำลังรับแรงดึงได้

#### 2) ผลการวิเคราะห์ค่าความยืดหยุ่นของรากพืช

ข้อมูลรากพืชที่ได้จากวิเคราะห์นำมาพล็อตแล้ว โดย

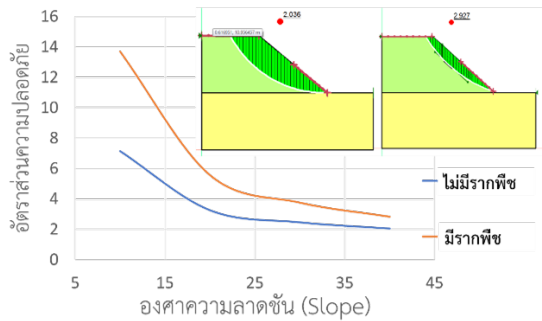


รูปที่ 12 ความหนาแน่นของรากพืช

แบ่งกริดขนาด 10 × 10 เซนติเมตร เพื่อหาอัตราส่วนพื้นที่หน้ารากตัดต่อหน้าตัดดิน (%RAR) และค่าความยึดเหนี่ยวของรากพืช โดยอ้างอิงค่ากำลังรับแรงดึงจากรูปที่ 9 พบว่าบริเวณที่มี %RAR สูงสุด คือ บริเวณ 10 เซนติเมตร จากโคนต้น มีค่า 32% และบริเวณที่มีค่าความยึดเหนี่ยวสูงสุด คือ บริเวณ 100 เซนติเมตร จากโคนต้นและที่ความลึก 30 เซนติเมตร มีค่า 0.72 ตัน/ตารางเมตร ดังรูปที่ 12 ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องการการสำรวจรากพืชป่าในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่พร่อง-แม่พูล พบว่า ความค่ายึดเหนี่ยวของรากพืชป่ามีค่าสูงสุดที่ความลึก 20-40 เซนติเมตร [2]

3) การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดิน

การวิเคราะห์ความมั่นคงของลาดดินในบริเวณพื้นที่ป่าหรือที่มีต้นไม้ ความยึดเหนี่ยวของดินจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีค่าความยึดเหนี่ยวของรากพืชและความแข็งแรงของรากพืชในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่พร่อง-แม่พูล จังหวัดอุดรธานีซึ่งในพื้นที่ดังกล่าวมีค่าความยึดเหนี่ยวของดิน (Cohesion) เท่ากับ 1.55 ตัน/ตารางเมตร และค่า Friction Angle เท่ากับ 22.5 องศา [19] โดยค่าความยึดเหนี่ยวของรากพืชในแต่ละชั้นความลึกจะมีค่าที่แตกต่างกันโดยในการจำลองการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในกรณีลาดดินที่มีรากพืชกับลาดดินที่ไม่มีรากพืช ดังรูปที่ 13 พบว่าลาดดินที่มีการเสริมกำลังของรากพืชมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่สูงกว่าลาดดินที่ไม่มีรากพืชโดยในบริเวณความลาดชัน 10 องศา มีอัตราส่วนความปลอดภัยสูงขึ้น 47.8% ความลาดชัน 20 และ 30 องศา มีอัตราส่วนความปลอดภัยสูงขึ้นใกล้เคียงกันคือ 37% และความชัน 40 องศา อัตราส่วน



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบค่าความปลอดภัยบริเวณที่มีรากพืชและไม่มีรากพืช

ความปลอดภัยสูงขึ้น 28%

3.4 ข้อกำหนดและข้อจำกัดของวิธีการถ่ายภาพ

วิธีการวิเคราะห์ขนาดรากพืชจากถ่ายภาพมีข้อกำหนดและข้อจำกัดสำหรับการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลดังนี้

- การวัดขนาดรากในภาพถ่าย ต้องทำการวัดในแนวตั้งฉากกับแนวราก
- กำหนดลักษณะของวัตถุให้เป็นทรงกระบอก
- การปรับแก้ขนาดในแนวแกน X และแกน Y เนื่องจากมุมเอียงและความสูง
- การติดตั้งกล้องถ่ายภาพ กล้องจะต้องอยู่ในแนวระนาบ
- ความละเอียดของผลการสำรวจขึ้นอยู่กับความละเอียดของกล้อง

4. อภิปรายและสรุปผล

การออกแบบอุปกรณ์สำรวจรากพืชสำหรับวิธีการถ่ายภาพจะต้องทำควบคู่กับการฉีดยาเปิดหน้าดินด้วยวิธี RO-KPS แล้วเก็บข้อมูลด้วยกล้องหรือโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยภาพถ่ายดังกล่าวต้องมีการปรับแก้เนื่องจากความบิดเบี้ยวก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ ซึ่งการทดสอบความถูกต้องและแม่นยำของการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายต้องปฏิบัติตามการพบว่า สามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่มีขนาดเล็กที่สุดได้ถึง 0.05 เซนติเมตร และขนาดของวัตถุที่วัดได้มีความถูกต้องเฉลี่ย

95% ซึ่งถ้าพิจารณาจากความผิดพลาดตามขนาดของวัตถุ พบว่า วัตถุที่มีขนาดเล็กมีโอกาสเกิดความผิดพลาดมากกว่า วัตถุที่มีขนาดใหญ่ สาเหตุเนื่องจากความละเอียดของกล้อง หากกล้องที่มีความละเอียดสูงจะส่งผลให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

การสำรวจรากพืชของต้นตะแบก (กลุ่มพืชป่า) ในสนาม ด้วยวิธีการถ่ายภาพในพื้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน และเก็บตัวอย่างรากพืชดังกล่าวนำไปทดสอบ กำลังรับแรงดึงพบว่า ข้อมูลรากพืชในสนามสามารถเก็บ ข้อมูลได้ขนาดเล็กที่สุด 0.05 เซนติเมตร โดยรากพืชที่มี ขนาดเล็กกว่า 0.1 เซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่า รากพืชที่มีขนาดใหญ่ (> 0.1 เซนติเมตร) ซึ่งผลการวิเคราะห์ รากพืชในสนามสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ปริมาณรากพืชที่มากที่สุดอยู่บริเวณระยะห่างจากโคนต้น 10 เซนติเมตร ซึ่งเมื่อนำข้อมูลปริมาณและขนาดของ รากพืชมาวิเคราะห์อัตราส่วนหน้าตัดรากต่อหน้าตัดดิน (%RAR) โดยทำการแบ่งกริดของพื้นที่ที่ความลึกตั้งแต่ 0–30 เซนติเมตร พบว่าค่า %RAR ที่ระยะ 10 เซนติเมตร จาก โคนต้น โดยมีความหนาแน่นของรากพืชในบริเวณดังกล่าว 32% โดยจะลดลงตามระยะห่างจากโคนต้นและการวิเคราะห์ กำลังรับแรงดึง พบว่ารากพืชที่มีขนาดในช่วง 0.1–0.2 มิลลิเมตร มีหน่วยแรงดึงมากกว่าขนาดในช่วง 0.2–2.0 มิลลิเมตร เนื่องจากรากพืชที่มีขนาดเล็กคือพืชที่มีอายุน้อย โดยในเนื้อไม้จะมีปริมาณเส้นใยไฟเบอร์มากกว่าพืชที่มี อายุมากซึ่งช่วยในการยึดตัวและไม่เปราะแตกหักง่ายกว่าราก พืชที่มีขนาดใหญ่ [2], [5], [16], [17] ข้อมูลรากพืชที่ได้จาก วิธีการถ่ายภาพและกำลังรับแรงของรากพืชสามารถนำมาหาค่า ความยืดหยุ่นของรากพืช และเสถียรภาพของลาดดินได้

เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดิน โดยอ้างอิงข้อมูลดินจากงานวิจัยอื่นก่อนหน้า [19] พบว่าลาดดิน ที่มีการเสริมแรงด้วยรากพืชมีค่าความปลอดภัยมากกว่า ลาดดินที่ไม่มีการเสริมแรงด้วยรากพืช โดยบริเวณที่มีความชัน ต่ำมีความแตกต่างของ Factor of Safety 47.8% แต่ใน บริเวณที่มีความชันสูงความแตกต่างของ Factor of Safety เท่ากับ 27% นอกจากนี้รากไม้ในบริเวณพื้นที่ลาดชัน

ยังสามารถชะลอความเร็วของน้ำฝนที่ไหลบ่าและยังลดการ กัดเซาะที่ผิวหน้าของลาดดินที่ยึดเกาะมวลดินได้อีกด้วย [18]

วิธีการถ่ายภาพเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ กับการเก็บข้อมูลรากพืชในสนามเนื่องจากเป็นวิธีที่รวดเร็ว ใช้เวลาเพียง 5–10 นาที ในการเก็บข้อมูล 1 ชั้นความลึก อุปกรณ์ได้ง่ายและขนย้ายได้ง่ายในกรณีที่ต้องขึ้นไปบนพื้นที่ สูงชัน แต่จะมีข้อเสียคือการวิเคราะห์ข้อมูลในโปรแกรมทาง Image Process อาจจะต้องใช้เวลานาน และอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ในการวัดขนาดของรากพืชขึ้นอยู่กับ ความละเอียดของกล้องถ่ายภาพ ในปัจจุบันวิธีการเก็บข้อมูล รากพืชส่วนมากจะมีการทำลายรากแต่วิธีนี้ไม่ทำลายราก แต่อาจจะทำให้การเจริญเติบโตของต้นไม้หยุดให้ผลผลิต 1 ปี [8] นอกจากนี้การเก็บข้อมูลรากพืชด้วยวิธีการถ่ายภาพ ยังสามารถประยุกต์ใช้กับงานทางด้านเกษตรได้อีกด้วย ในอนาคตผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะพัฒนาอุปกรณ์การเก็บข้อมูล รากพืชให้มีความแม่นยำ ง่ายต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น และสามารถนำข้อมูลที่วิเคราะห์จากวิธีการถ่ายภาพไปขึ้นแบบ จำลองสามมิติ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์พื้นที่หน้าตัดราก ต่อพื้นที่หน้าตัดดิน และนอกจากนี้การสำรวจรากพืชด้วย วิธีการถ่ายภาพยังสามารถนำภาพถ่ายมาคำนวณหาค่าพื้นที่ หน้าตัดรากด้านข้างต่อหน้าตัดดิน สามารถนำมาประยุกต์ใช้ กับงานทางเกษตรกรรมได้ เช่น การตรวจสอบขนาดของ รากพืชในบริเวณต่างๆ ที่จะส่งผลต่อการดูดซึมน้ำแร่ธาตุเพื่อ การเจริญเติบโต

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน ที่ช่วยสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในงาน วิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] T. H. Wu, W. P. McKinnell III, and D. N. Swanston, "Strength of tree roots and landslides on Prince



- of Wales Island, Alaska,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 19–33, 1979.
- [2] M. Aekjit, W. Mairaing, B. Kulsuwan, and M. Pansatan, “Root distribution in landslide area, Mae Phrong-Mae Phun Watershed, Uttaradit Province,” *Naresuan University Engineering Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 156–162, 2018 (in Thai).
- [3] A. Jotisankasa, *Soil-bioengineering: Use of vegetation and soil engineering for erosion control and slope stabilization*. 1st ed. Bangkok: Faculty of Engineering. Department of Civil Engineering. Kasetsart University, Bangkok, 2013 (in Thai).
- [4] N. J. Coppin and I. G. Richards, *Use of vegetation in civil engineering. Construction Industry Research & Information Association London*. Butterworths: Ciria, 1990.
- [5] N.S. Nilaweera and P. Nutalaya, “Role of tree roots in slope stabilisation,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 57, no. 4, pp. 337–342, 1999.
- [6] B. Wolfgang, *Methods of studying root systems*, 33th ed. Springer, Science & Business Media, 2012.
- [7] J. L. Maeght, B. Rewald, and A. Pierret. “How to study deep roots—and why it matters,” *Frontiers in plant science*, vol. 4, pp. 299, 2013.
- [8] D. Amishev, L. R. Basher, C. J. Phillips, S. Hill, M. Marden, M. Bloomberg, and J. R. Moore, *New forest management approaches to steep hills*, Ministry for Primary Industries, 2014.
- [9] J. C. Russ, *The Image Processing Handbook*, 6th ed. Raleigh, North Carolina, 2011.
- [10] S. Klinsawang, T. Sumranwanich, A. Wannaro, and P. Saengwilai, “Effects of root hair length on potassium acquisition in rice (*Oryza sativa* L.).” *Applied Ecology and Environmental Research*, vol. 16, no. 2, pp. 1609–1620, 2018.
- [11] F. T. Y. Leung, W.M.Yan, B. C. H. Hau, and L. G. Tham, “Root systems of native shrub and tree in Hong Kong and their effect on enhancing slope stability,” *Catena*, vol. 125, pp. 102–110, 2015.
- [12] Z. Mao, L. Saint-Andre, M. Genet, F. X. Mine, C. Jourdan, H. Rey, B. Courbaud, and A. Stokes, “Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: choosing cohesion models,” *Ecological Engineering*, vol. 45, pp. 55–69, 2012.
- [13] R. Isaroranit and W. Mairaing, “Generalized Limit Equilibrium Development for Slope Stability Program by Generalized Limit Equilibrium,” in *Proceeding the 8th National Convention on Civil Engineering*, 2004, pp.178–183 (in Thai).
- [14] J. C. Russ, *The image processing handbook*, 7th ed. Boca Raton, 2016.
- [15] T. H. Wu, *Investigation of Landslides on Prince of Wales Island*, Ratrived from Columbus, Ohio, USA, 1976.
- [16] D. H. Gray and H. Ohashi, “Mechanics of fiber reinforcement in sand,” *Journal of geotechnical engineering*, vol. 109, no. 3, pp. 335–353, 1983.
- [17] E. Comino and P. Marengo, “Root tensile strength of three shrub species: *Rosa canina*, *Cotoneaster dammeri* and *Juniperus horizontalis*: Soil reinforcement estimation by laboratory tests,” *Catena*, vol. 82, no. 3, pp. 227–235, 2010.



- [18] T. Phantachang, D. Kwawtong, P. Roongan, and S. Nuanwongin, "Assessing the tensile strength of vetiver [*Vetiveria Zizanioides*] Root and soil reinforcement vetiver roots in slope stabilization," *UBU Engineering Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 99–111, 2018 (in Thai).
- [19] P. Budaum and W. Mairaing, "Density and Dominance of Plants on Landuse in Landslide Areas," in *Proceeding of 14th KU KPS National Conference*, 2017, pp. 420–429 (in Thai).



