



รายงานการวิจัย  
การประยุกต์ใช้วิศวกรรมชีวภาพในโครงสร้างพื้นฐานเพื่อปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลง  
สภาพภูมิอากาศ

Enhancing climate adaptability of earthen infrastructure using  
bioengineering solutions

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ คำชุม และคณะ  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

พ.ศ. 2564



รายงานการวิจัย  
การประยุกต์ใช้วิศวกรรมชีวภาพในโครงสร้างพื้นฐานเพื่อปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลง  
สภาพภูมิอากาศ

Enhancing climate adaptability of earthen infrastructure using  
bioengineering solutions

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิรุฬห์ คำชุม และคณะ  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ

พ.ศ. 2564

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563

## บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (เช่น ความแห้งแล้งและปริมาณฝนในแต่ละฤดูที่มากขึ้น) นำไปสู่ผลกระทบทั้งด้านความปลอดภัยและการใช้งานของโครงสร้างพื้นฐาน เพื่อหลีกเลี่ยงความสูญเสียทางเศรษฐกิจและสังคม จึงมีความจำเป็นเร่งด่วนในการพิจารณาโครงสร้างพื้นฐานที่ยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการทางวิศวกรรมชีวภาพโดยใช้พืชร่วมกับโครงสร้างพื้นฐาน ในแง่ของการเคลื่อนตัวและเสถียรภาพของโครงสร้าง รวมถึงความสามารถในการรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่รุนแรงในอนาคตได้ เพื่อเพิ่มความมั่นใจของผู้ที่จะนำวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้

โครงการนี้เกิดขึ้นโดยความร่วมมือของทีมิวิจัยเงิน-ไทยแบบสหสาขา ในส่วนงานแรกเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศซึ่งนำโดยทีมิวิจัยเงิน เพื่อคาดการณ์การเกิดฝนและการระเหยในอนาคต ส่วนที่สองนำโดยทีมิวิจัยไทยที่จะสร้างคันดินขนาดจริงและติดตั้งเครื่องมือเพื่อตรวจสอบอุทกวิทยาดินและการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืช ที่เปลี่ยนแปลงตามสภาพอากาศแต่ละฤดูกาล โดยทีมงานของจีนจะเริ่มงานส่วนที่สามคือการพิจารณาผลกระทบสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงต่อคันดินด้วยการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง แบบจำลองนี้ทำให้วิศวกรสามารถทราบพฤติกรรมระยะยาวของคันดินภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สุดท้ายจะเป็นการสร้างและสอบเทียบแบบจำลองเชิงทฤษฎีและเชิงตัวเลขของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและพืชเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ โดยโมเดลที่สอบเทียบกับข้อมูลในสนามและแบบจำลองแล้วจะนำไปใช้เพื่อการพัฒนาแนวทางเบื้องต้นสำหรับการจัดการพืช เพื่อเพิ่มความสามารถในการปรับตัวตามสภาพภูมิอากาศของโครงสร้างพื้นฐาน ผลการวิจัยส่วนของทีมิวิจัยไทยในปีแรกช่วงฤดูร้อนพบว่า พืชสามารถลดปริมาณน้ำในดินและสามารถลดการเปลี่ยนแปลงของน้ำในดินได้ รากพืชมีอิทธิพลต่อเส้นโค้งการกักเก็บน้ำของดินมากกว่าผลของความเค็มของดิน อีกทั้งบริเวณที่มีการปลูกหญ้าพบการเคลื่อนตัวและการทรุดตัวที่น้อยกว่าบริเวณที่ไม่มีการปลูกหญ้าอย่างชัดเจน

**คำสำคัญ:** คันดินโครงสร้างพื้นฐาน; การปรับตัวต่อสภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง; วิศวกรรมชีวภาพ; การตรวจสอบภาคสนาม; แบบจำลองหมุนเหวี่ยง; แบบจำลองเชิงตัวเลข; การหดและขยายตัวตามฤดูกาล; การทรุดตัวไม่เท่ากัน; การวิบัติแบบต่อเนื่อง

## Abstract

With a vast investment of infrastructure, engineers should be prepared to face the great design challenges associated with more extreme weather conditions. Under extreme drought and precipitation, earthen infrastructure is subjected to amplified seasonal shrinkage-swelling. It has been a long discussion that bioengineering method using vegetation can potentially be an eco-friendly, low carbon-embodied solution to slope stabilisation. The project aims to critically evaluate the effectiveness of the bioengineering method in terms of slope deformation and failure mechanisms and to enhance practitioners' confidence in applying this method to make our critical transport assets more climatically adaptable.

The proposed project will form a multi-disciplinary China-Thailand research team, applying all-round methodologies to tackle the challenging research questions. Task A is a study of climate change, led by the Chinese team, to make prediction of future precipitation and evaporation. Task B led by the Thai team who will build a new, full-scale, heavily-instrumented vegetated embankment in Thailand to simultaneously monitor the site weather, soil hydrological and plant physiological response. In parallel, the Chinese team will conduct comprehensive centrifuge modelling of the climate effects on embankments in Task C. Thanks to the scaling law, engineers can foresee, for the first time, how an embankment will behave in long-term with and without vegetation under the influences of climate change. The final Task D will be theoretical and numerical modelling of soil-climate-vegetation interaction. The outcome from Thai team during the first summer confirmed the plants can reduce the amount and fluctuation of water in the soil. Plant roots have a greater influence on soil water retention curves than on soil stress itself. In addition, the vegetated slopes showed less displacement and settlement than the bare area.

**Keywords:** Earthen Infrastructure; Climate Change Adaptation; Bioengineering; Field monitoring; Centrifuge Modelling; Numerical Modelling; Seasonal shrinkage-swelling; Differential Settlement; Progressive Failure

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
บทคัดย่อ	ii
สารบัญ	iv
สารบัญตาราง	v
สารบัญภาพ	vi
1. บทนำ	1
2. การทบทวนวรรณกรรม	3
3. ระเบียบวิธีวิจัย	11
4. ผลการวิจัย และอภิปรายผล	32
5. ความก้าวหน้าโครงการและข้อเสนอแนะ	51
บรรณานุกรม	viii
คณะนักวิจัย	xii

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1. สรุปเส้นผ่านศูนย์กลางรากเฉลี่ยและกำลังรับแรงดึง	32
ตารางที่ 2. สรุปค่าตัวแปรสอบเทียบเส้นโค้งการกักเก็บน้ำของดิน	45
ตารางที่ 3. สรุปและกำหนดการของกิจกรรมการวิจัยในส่วนงาน B	56

## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1. แผนผังของชีวิวิศวกรรมดินเพื่อเพิ่มความปลอดภัยของคันดินอย่างยั่งยืน	9
รูปที่ 2. แผนการวิจัยในโครงการ	11
รูปที่ 3. ขอบเขตงานวิจัยของทีมนักวิจัยไทย	12
รูปที่ 4. การงอกของรากจากต้นกล้าแฝก	13
รูปที่ 5. กล้าแฝกในมูลไส้เดือนและการดูแลรักษา	14
รูปที่ 6. ตัวอย่างทดสอบสำหรับการดึงราก	15
รูปที่ 7. ภาพรวมของตำแหน่งคันดินและสถานที่ใกล้เคียง	16
รูปที่ 8. ภาพรวมของทางเข้าหน้างาน	16
รูปที่ 9. การขุดดินเพื่อเตรียมก่อสร้างคันดิน	17
รูปที่ 10. แผนผังการปลูกพืชพันธุ์และการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด	19
รูปที่ 11. การเตรียมพื้นที่ก่อนสร้างคันดิน	20
รูปที่ 12. พังทลายของคันดินที่ลาด 1:1.5	20
รูปที่ 13. การบดอัดคันดิน	21
รูปที่ 14. คันดินหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ	22
รูปที่ 15. รูปแปลงการทดสอบในคันดิน	22
รูปที่ 16. รูปพื้นที่ข้างเคียง	23
รูปที่ 17. การตีแนวการปลูกแฝกตามแนวลาดดิน	24
รูปที่ 18. รูปหญ้าแฝกหลังจากการปลูกลงคันดิน	24
รูปที่ 19. รูปหญ้าแฝกหลังจากการปลูกลงคันดิน 3 สัปดาห์	25
รูปที่ 20. รูปหญ้าแฝกหลังจากการปลูกลงคันดิน 3 เดือน	25
รูปที่ 21. ภาพรวมของแปลงทดสอบในคันดิน	26
รูปที่ 22. เครื่องมือวัดพฤติกรรมของดินและหญ้า	28
รูปที่ 23. ตัวเก็บข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต	28
รูปที่ 24. การติดตั้งเครื่องวัดความเอียงที่คันดินและการคำนวณการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและราบ	29



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 25. การติดตั้งเครื่องหมายสำรวจ และ การรังวัดคันดิน	30
รูปที่ 26. การสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายทางอากาศ	30
รูปที่ 27. สถานีตรวจอากาศในบริเวณคันดิน	31
รูปที่ 28. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและกำลังรับแรงดึงของรากในช่วงการเจริญเติบโต	33
รูปที่ 29. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงและเส้นผ่านศูนย์กลางของราก	34
รูปที่ 30. ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินของรากในช่วงการเจริญเติบโต	35
รูปที่ 31. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลลูโลส (a), ลิกนิน (b) และเส้นผ่านศูนย์กลางของราก	36
รูปที่ 32. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดินตามระดับความลึกในโซน 1 – 3	39
รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดินตามระดับความลึกในโซน 4 – 6	40
รูปที่ 34. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดินตามระดับความลึก	41
รูปที่ 35. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดินช่วงกลางวันตามระดับความลึกในโซน 4 – 6	42
รูปที่ 36. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดินช่วงกลางคืนตามระดับความลึกในโซน 4 – 6	43
รูปที่ 37. แสดงเส้นโค้งการกักเก็บน้ำของดินระหว่างบริเวณที่มีการปลูกและไม่มีการปลูกหญ้า	45
รูปที่ 38. แบบจำลองสามมิติเทียบกับภาพถ่ายทางอากาศ	46
รูปที่ 39. รูปมุมมองใกล้ของแบบจำลองสามมิติที่แสดงรอบแตกและรอยกัดเซาะ	47
รูปที่ 40. รูปตัดการเคลื่อนตัวของคันดินในบริเวณโซน 1 และ 4	48
รูปที่ 41. รูปตัดการเคลื่อนตัวของคันดินในบริเวณโซน 2 และ 5	48
รูปที่ 42. รูปตัดการเคลื่อนตัวของคันดินในบริเวณโซน 3 และ 6	49
รูปที่ 43. การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศขณะทำการทดลองในช่วงฤดูร้อน	50
รูปที่ 44. การเคลื่อนตัวของคันดินขณะทำการทดลองในช่วงฤดูร้อน	50
รูปที่ 45. ที่ตั้งของกลุ่มน้ำหยวนเจียงและสถานีอุตุนิยมวิทยา	52
รูปที่ 46. ผลลัพธ์ของแบบจำลองการดูดซึมน้ำรากด้วยแรงโน้มถ่วงปกติ	53
รูปที่ 47. อุปกรณ์ระบบจำลองภูมิอากาศสำหรับแบบจำลองหมุนเหวี่ยง	53
รูปที่ 48. การทดสอบแบบจำลองฟลูม (a) แผนผังแผนผังของโครงสร้างแบบจำลองการทดสอบ (b) วัสดุเชื่อม	54
รูปที่ 49. รูปทั่วไปของแบบจำลองเชิงตัวเลขโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	59
รูปที่ 50. ขั้นตอนการคำนวณเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองสำหรับแบบจำลองเชิงตัวเลข	59

# บทที่ 1 บทนำ

## 1.1. หลักการเหตุผลและสาเหตุที่ต้องดำเนินการวิจัย

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ประเทศไทยและสาธารณรัฐประชาชนจีนประสบกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (เช่น ความแห้งแล้งและปริมาณฝนในแต่ละฤดูที่มากขึ้น) ซึ่งนำไปสู่ผลกระทบทั้งด้านความปลอดภัยและการใช้งานของโครงสร้างพื้นฐาน เพื่อหลีกเลี่ยงความสูญเสียทางเศรษฐกิจและสังคม จึงมีความจำเป็นเร่งด่วนในการพิจารณาโครงสร้างพื้นฐานที่ยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถรับมือกับสภาพอากาศที่รุนแรงในอนาคตได้ วิธีการการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรมแบบดั้งเดิม เช่น การพ่นคอนกรีตคลุมลาดดิน หรือ การตอกเสาเข็มเสริมลาดดิน ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มากขึ้น ชีววิศวกรรมดินคือการปรับปรุงดินโดยใช้พืชพันธุ์ถั่วถือว่าเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแทน พืชพันธุ์สามารถใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือกที่สามารถส่งเสริมโครงสร้างพื้นฐานที่ยั่งยืนและสร้างสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้น เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศไม่รุนแรงขึ้นไปอีก

จึงจำเป็นต้องพิจารณาว่า วิธีการชีววิศวกรรมดินสามารถตอบสนองความต้องการทั้งด้านความปลอดภัยและความสามารถในการใช้งาน ภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้หรือไม่ และจำเป็นต้องมีการศึกษาทดลองเพื่อให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับอุทกวิทยาของพืชและดินที่มีต่อพฤติกรรมลาดชันโดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ผลที่ได้รับจะมีประโยชน์ต่อวิศวกร นักวางแผน และผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เพื่อเพิ่มความมั่นใจในการออกแบบและการจัดการโครงสร้างพื้นฐานที่ยั่งยืนโดยใช้วิธีชีววิศวกรรมดิน และเพื่อเพิ่มความสามารถในการปรับสภาพภูมิอากาศของโครงสร้างพื้นฐานในอนาคต

## 1.2. วัตถุประสงค์

โครงการนี้มีจุดมุ่งหมายในการประเมินวิธีการชีววิศวกรรมดิน เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยศึกษาผลของการปรับปรุงดินด้วยพืชพันธุ์ต่อความปลอดภัยและการใช้งานของโครงสร้างพื้นฐาน โดยที่มิววิจัยของไทยจะรับผิดชอบในส่วนการตรวจวัดการตอบสนองของดินและพืชในคันดินขนาดจริง (full-scale) ภายใต้สภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกันตามฤดูกาล จุดประสงค์ของงานในส่วนนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น

1.2.1. การศึกษาเพิ่มความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงของดิน (เช่น ความชื้นในดิน และ แรงดันน้ำในดิน) และการเปลี่ยนแปลงของพืช (เช่น ชีวมวลของราก พื้นที่และอุณหภูมิของใบ) ภายใต้การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

1.2.2. เพื่อทำความเข้าใจการเจริญเติบโตและผลกระทบจากการสลายตัวของราก ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของดิน (เช่น อัตราค้ำของน้ำในดิน และอัตราการไหลของน้ำในดิน)

1.2.3. เพื่อสร้างชุดข้อมูลใหม่สำหรับการออกแบบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง (เพื่อศึกษาความปลอดภัยและความสามารถในการใช้งานของลาดดินในระยะยาว) รวมทั้งเพื่อประกอบการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขต่อไป

## บทที่ 2 ทบพทวนวรรณกรรม

### 2.1 ชนิดดินในประเทศไทย สำหรับงานก่อสร้าง

ดินในประเทศไทยส่วนใหญ่ที่ใช้ในงานก่อสร้างจะมีประมาณ 3 ชนิด โดยชนิดแรกคือดินลูกรัง ดินชนิดนี้เกิดจากการผุพังของหิน สีของดินลูกรังมักจะมีสีแดงหรือสีแดงเข้ม ขึ้นกับปริมาณน้ำและแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบหลักของดินเอง เช่น ออกไซด์เหล็ก อลูมิเนียม ไททาเนียม และแมกนีเซียม ในประเทศไทยจะพบดินลูกรังในลักษณะของกรวดทรายดินตะกอน และดินเหนียวที่มีออกไซด์ของเหล็กปนอยู่ในปริมาณสูง ลูกรังที่จับเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ไม่ค่อยพบบ่อยนัก ดินลูกรังที่ใช้ในการก่อสร้างทางหลวงมักจะได้จากการขุดและการบดอัดดินดิน อันประกอบด้วยดินตะกอน และดินเหนียวที่มีเหล็กออกไซด์ปริมาณสูงผสมรวมกันเป็นลูกรังซึ่งมีความแข็งต่างกัน

ดินอีกชนิดที่มักจะใช้ในการก่อสร้างคือดินทราย ดินชนิดนี้มีแร่ซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลัก มีแร่อื่นเป็นมลทิน ปะปนฝังอยู่ในเม็ดทราย ทำให้ทรายมีสีเหลืองและน้ำตาลอ่อน สำหรับทรายหยาบและทรายละเอียด มักจะถูกนำไปใช้ในการผสมคอนกรีต เพื่อทำโครงสร้างคอนกรีต หรืองานก่อฉาบ ส่วนทรายที่มีสิ่งเจือปนส่งผลให้คอนกรีตที่ผสมด้วยคุณภาพ เช่น ทรายขี้เป็ด มักจะนำมาใช้ในการถมที่ที่มีพื้นที่ไม่มาก หรือ ปรับระดับพื้นที่เป็นส่วนใหญ่

เนื่องจากดินลูกรังและดินทรายนั้นอาจจะหาได้ยากในหลายๆพื้นที่ ดินเหนียวซึ่งเป็นดินในพื้นที่จึงได้ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างด้วยเช่นกัน ดินเหนียว เช่นดินเหนียวกรุงเทพฯเป็นดินเม็ดละเอียด จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์พบว่าประกอบด้วย แร่มอนโมริลโลไนต์ถึง 60% แร่เคโอลิไนต์ 25% และแร่อิไลไรต์ 15% มีน้ำปนอยู่ในเนื้อดิน 24-30% มีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 5.5 มีความเหนียวนำกระแสไฟฟ้าสูง เป็นดินที่มีปริมาณมากที่สุดในกรุงเทพมหานคร โดยปกติแล้วจะใช้งานรองกันหลุมฝังกลบ รองบ่อน้ำ งานเขื่อนดิน และคันดิน ดินชนิดนี้มีมีลักษณะที่บ่งชี้ให้น้ำซึมผ่านได้ช้า และมีกำลังรับแรงที่ต่ำกว่าดินสองชนิดข้างต้น อีกทั้งมีค่าดัชนีพลาสติกสูง จึงสามารถหดตัวและขยายตัวได้มากเมื่อปริมาณน้ำในดินมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นดินชนิดนี้มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดปัญหาภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเมื่อเทียบกับดินที่ใช้ก่อสร้างชนิดอื่นๆ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาทำความเข้าใจ และมีการออกแบบอย่างรอบคอบในการใช้งาน

## 2.2 ปัญหาด้านเสถียรภาพและการใช้งานของโครงสร้างพื้นฐานที่เกิดจากสภาพภูมิอากาศ

คันดินโครงสร้างพื้นฐาน โดยเฉพาะ คันดินถนน ทางรถไฟ ต้องได้รับการออกแบบให้เป็นไปตามข้อกำหนดด้านความปลอดภัยและความสามารถในการให้บริการสำหรับการบรรทุกและความเร็วรถไฟที่ระบุ (Perry, 2003) การเสถียรภาพของคันดินทางรถไฟอาจมีตั้งแต่ความเสียหายอย่างรุนแรงต่อโครงสร้าง หรือการหลุดตัวที่แตกต่างกันซึ่งขัดขวางรถไฟจากความเร็วในการทำงาน (ก่อให้เกิดปัญหาในการให้บริการ) เพื่อป้องกันปัญหานี้คันดินจำเป็นต้องมีกำลังรับแรงเฉือนเพียงพอที่จะทนต่อแรงเฉือนแบบกระทำซ้ำที่เกิดจากการบรรทุกของรถไฟ รางรถไฟและการสั่นสะเทือนของพื้นดินได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางโดยใช้วิธีการแก้ปัญหาเชิงวิเคราะห์หรือตัวเลข (Kaynia et al. 2000; Takemiya และ Bian 2005) ทางวิ่งและคันดินพื้นฐานได้รับการออกแบบให้มีความทนทานเพียงพอต่อการโหลดเชิงกลแบบกระทำซ้ำ อย่างไรก็ตามสาเหตุการเสถียรภาพของคันดินพบว่าเกี่ยวข้องกับ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในดินด้วยเช่นกัน (Hughes et al., 2009; O'Brien, 2013) ซึ่งมีผลกระทบสำคัญจากสภาพภูมิอากาศ แบ่งได้เป็น (i) การเสถียรภาพของคันดินที่เกิดจากปริมาณน้ำฝน (ii) ความผิดปกติของการหดตัวตามฤดูกาลและ (iii) เสถียรภาพแบบต่อเนื่อง

### 2.2.1. การเสถียรภาพของคันดินที่เกิดจากปริมาณน้ำฝน

การซึมของน้ำฝนในขณะและหลังจากฝนตกสามารถเพิ่มแรงดันน้ำในช่องว่างของเม็ดดิน และด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความเค้นประสิทธิผลมีค่าลดลง ที่บริเวณใกล้พื้นผิวลาดชัน (Zhang et al. 2011; Rahardjo et al. 2013) ทำให้ความต้านทานแรงเฉือนของดินลดลงตาม และนำไปสู่การเสถียรภาพของลาดชันตื้น (Fredlund et al. 1978; Ng and Pang, 2000) การเสถียรภาพของลาดชันตื้นที่เกิดจากฝนตกดังกล่าวได้พบได้ ในหลากหลายประเทศรวมทั้งในสหราชอาณาจักร ฮองกงและไทย (Leroueil, 2001; Zhang et al., 2011) การเพิ่มขึ้นของแรงดันน้ำ โดยทั่วไปบรรเทาได้โดยใช้การระบายน้ำหรือการเพิ่มการซึมผ่านของน้ำในดิน เป็นการเอาน้ำออกหรือลดการแทรกซึมไปที่คันดิน

มีการศึกษาอิทธิพลของการบดอัดและความสามารถในการซึมผ่านของคันดินทางรถไฟในคันดินขนาดจริง (Toll et al., 2013; Glendinning et al., 2014; Gunn et al., 2015) คันดินสร้างขึ้นจากดินถมที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันและมีชั้นผิวดินที่แตกต่างกัน (หินทิ้งหรือยางมะตอย) การทดลองแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการซึมผ่านและพฤติกรรมการกักเก็บน้ำในดินของวัสดุถม มีอิทธิพลอย่างสำคัญต่อปริมาณและการกระจายของแรงดันน้ำในดิน ในการตอบสนองต่อสภาพอากาศและสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญใน

พฤติกรรมแรงดันน้ำในดิน ระหว่างคันดินที่มีการบดอัดอย่างดี (1.7 มก. / ลบ.ม. ) กับชั้นปิดผิวแอสฟัลต์ (เช่น มีการซึมผ่านต่ำ) และคันดินที่มีการบดอัดไม่ดี (1.6 มก. / ลบ.ม. ) ที่มีชั้นปกคลุมหยาบ (เช่นหินทั้งมีการซึมผ่านสูง) แรงดันน้ำในดินพบว่ามีค่ามากที่ชั้นดินตื้นๆ (เช่น น้อยกว่า 1.5 ม.) ของคันดินทั้งสอง

## 2.2.2 การหดและขยายตัวของคันดินตามฤดูกาล

การเปลี่ยนรูปและการเคลื่อนตัวของคันดินมีความสัมพันธ์อย่างมากกับสภาพอากาศตามฤดูกาล คันดินถมส่วนใหญ่มีความสามารถในการซึมผ่านในช่วง  $1 \times 10^{-7}$  เมตร / วินาที ทำให้เส้นทางรถไฟมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำในดิน และทำให้เกิดการหดตัวและขยายตัวตามฤดูกาล (O'Brien, 2007; Loveridge et al., 2010; Briggs et al., 2013b; Smethurst et al. 2015) Loveridge et al. (2010) แสดงให้เห็นว่าการล่าช้าของรถไฟจำนวนหนึ่งเนื่องจากการหดตัวและขยายตัวของคันดิน ส่วนใหญ่พบได้จากคันดินที่ทำจากดินละเอียดและมีความเป็นพลาสติกสูง การหดตัวถึงค่าต่ำสุดในช่วงฤดูร้อนในขณะที่การบวมตัวของดินมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูหนาว (Scott et al. 2007) การศึกษาที่มีอยู่ได้ดำเนินการตรวจสอบคันดินขนาดจริง เพื่อตรวจสอบสภาพอากาศตามฤดูกาลปริมาณน้ำในดินและการเคลื่อนตัวของเขื่อน (Scott et al., 2007; O'Brien, 2013; Glendinning et al., 2014; Smethurst et al., 2015). การเปลี่ยนรูปตามฤดูกาลของเขื่อนถมดินเหนียวที่มีความยืดหยุ่นสูงพบว่ามีค่าสัมพันธ์อย่างมากกับปริมาณน้ำในดินและแรงดันน้ำในดิน (Smethurst et al., 2006; Scott et al. 2007) การบวมตัวของคันดินในฤดูหนาวเกิดขึ้นในช่วงที่มีแรงดันน้ำในดินสูงในขณะที่การหดตัวของเขื่อนเกิดขึ้นในช่วงที่มีแรงดันน้ำในดินต่ำในช่วงฤดูร้อน

การเคลื่อนที่ของทางวิ่งในแนวตั้งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลอาจสูงถึง  $\pm 50$  มม. ในเขื่อนดินถมพบว่าการบวมตัวในแนวตั้งและการเคลื่อนที่ด้านข้างได้ถึง 68 และ 63 มม. ตามลำดับ (Smethurst et al., 2015) การเคลื่อนตัวและการเปลี่ยนรูปของคันดินดังกล่าว สามารถส่งผลกระทบต่อความสามารถในการให้บริการ เพื่อรักษาคุณภาพการขับขี่และความปลอดภัยของผู้โดยสาร การเสีรูปร่างดังกล่าวอาจทำให้รถไฟทั่วไปวิ่งด้วยความเร็วที่ลดลง สำหรับรถไฟความเร็วต่ำการหดตัวที่แตกต่างกันถูก จำกัด ไว้ที่  $\pm 20$  มม. ตามระยะทาง 10 ม. (Perry et al., 1999) คันดินถมที่ทำจากดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกสูง สามารถเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้อย่างมีนัยสำคัญเกินขีดจำกัด การหดตัวที่เกิดขึ้นก่อให้เกิดทำให้การจราจรทางรถไฟล่าช้า และต้องใช้ความระมัดระวังสำหรับกรณีรถไฟความเร็วสูง (Loveridge et al., 2010)

### 2.2.3 การพังทลายอย่างต่อเนื่องของคันดิน

ความผิดปกติของคันดินที่หดตัวและขยายตัวตามฤดูกาลอาจทำให้เกิดการสะสมความเครียดแบบพลาสติก (plastic strain) ที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ ส่งผลให้ความต้านทานแรงเฉือนของดินลดลงและเกิดการพังทลายอย่างต่อเนื่อง (Potts and Zdravkovic, 1999; Kovacevic et al., 2001) มีการพบการพังทลายอย่างต่อเนื่องในลาดชันตามธรรมชาติในบริเวณที่อ่อนแอหรือการเคลื่อนตัวมาก (Cooper et al., 1998; Leroueil, 2001). การพังทลายอย่างต่อเนื่องจากการอ่อนตัวของคันดินได้รับการยืนยันโดยการทดสอบแบบจำลองแบบหมุนเหวี่ยงของคันดินขาว โดย Take and Bolton (2011) ทำการศึกษาการอ่อนตัวของคันดินในแบบจำลองมาตราส่วน 1/60 ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรระหว่างช่วงเปียกและช่วงแห้ง ทางผู้วิจัยได้พบการอ่อนตัวและการพังทลายของคันดินโดยเริ่มที่บริเวณฐานคันดิน การศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนไหวของคันดินเนื่องจากวัฏจักรระหว่างช่วงเปียกและช่วงแห้ง นอกจากส่งผลต่อการใช้งานแล้ว ยังสามารถนำไปสู่การพังทลายอย่างต่อเนื่องได้

อย่างไรก็ตาม การพังทลายอย่างต่อเนื่องของคันดินอาจแตกต่างกันไปในทางลาดธรรมชาติหรือลาดที่มนุษย์สร้างขึ้น เนื่องจากสภาพความเครียดเริ่มต้นที่แตกต่างกันและความเครียดที่สะสมในแต่ละปี ตัวอย่างเช่นคันดินถมจะมีความเครียดของพลาสติกเริ่มต้นที่ฐานคันดินน้อยกว่าลาดดินขุด เนื่องจากลาดดินขุดจะมีการเคลื่อนตัวที่มากกว่านั่นเอง อีกทั้งคันดินถมเชื่อมบางแห่ง (เช่นเชื่อมแกนดินเหนียว) จะมีความสามารถในการซึมน้ำมากกว่าลาดธรรมชาติและทางลาดที่ตัดแล้วซึ่งนำไปสู่การแปรผันของแรงดันน้ำในดินตามฤดูกาลที่มากขึ้น

จากการทบทวนข้อมูลดินที่ใช้ในการก่อสร้างในประเทศไทย พบว่าดินส่วนใหญ่ในพื้นที่เมือง เช่น กรุงเทพมหานคร และพื้นที่เขตเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก เช่น ชลบุรี และระยอง ประกอบด้วยดินที่เป็นลักษณะดินเหนียว เป็นส่วนใหญ่ และจากการศึกษาปัญหาทางด้านเสถียรภาพและการใช้งานของโครงสร้างพื้นฐานที่เกี่ยวข้องเนื่องจากสภาพภูมิอากาศ สามารถแบ่งประเด็นใหญ่ออกเป็นสามเรื่องจากหัวข้อที่ 3.2 แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นในดินลูกรังและดินทราย จะมีเพียงการเสถียรภาพจากปริมาณน้ำฝน เนื่องจากดินชนิดนี้มีมีความเป็นพลาสติกต่ำและการหดและขยายตัวน้อย เทียบกับดินเหนียวที่มีค่าพลาสติกสูงกว่า ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาทั้งในด้านการหดและขยายตัวของคันดินตามฤดูกาล และ การพังทลายแบบต่อเนื่อง ในทางกลับกัน ดินเหนียวที่พบมากในพื้นที่ชุมชนเมืองนั้น สามารถเกิดปัญหาได้ทั้งสามประเด็นข้างต้น และจากข้อ 3.2.3 จะเห็นได้ว่าคันดินถมนั้นมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมากกว่าคันดินขุดเนื่องจากมีการแปรผันของแรงดันน้ำในดินตามฤดูกาลที่มาก ในการศึกษานี้จะมุ่งเน้นเป็นการใช้ดินเหนียวอ่อนในพื้นที่ และศึกษากับคันดินถมขนาดจริง เพื่อการศึกษาปัญหาที่รอบด้าน ครอบคลุมปัญหาทางด้านเสถียรภาพและการใช้งานของโครงสร้างพื้นฐานที่เกี่ยวข้องจากสภาพภูมิอากาศ

### 2.3. พรรณพืชเพื่อป้องกันลาดดินถล่มและการกัดเซาะ

ปัญหาข้างต้นในข้อ 3.2 สามารถทวีความรุนแรงขึ้นภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ กล่าวคือ โอกาสการเสถียรภาพของคันดินมีมากขึ้นถ้าหากปริมาณฝนทวีความรุนแรงขึ้น ปัญหาความแห้งแล้ง และปริมาณน้ำฝนที่แตกต่างกันมากนั้น ก็ส่งผลให้เกิดการหดและขยายตัวของคันดินที่มากขึ้นตามไปด้วย ทำที่สุด การหดและขยายตัวที่มากขึ้นนี้จะส่งผลในแต่ละปี ทำให้เกิดการพังทลายอย่างต่อเนื่องในคันดินไวขึ้นนั่นเอง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างเร่งด่วน ที่จะต้องคำนึงถึงวัสดุทดแทนในการก่อสร้าง ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และช่วยชะลอการเกิดสภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ในการศึกษาจะมุ่งเน้นการศึกษาประสิทธิภาพของพืชพรรณในการบรรเทาปัญหาต่อโครงสร้างพื้นฐานขั้นต้น โดยการศึกษาจะเน้นจากพืชพรรณเดิมที่เริ่มมีการนำมาใช้ควบคู่กับการก่อสร้าง ตัวอย่างเช่น

#### 2.3.1 หญ้าแฝก

หญ้าแฝก (ชื่อวิทยาศาสตร์: *Chrysopogon zizanioides*) เป็นหญ้าเขตร้อนและกึ่งเขตร้อนที่ขึ้นอยู่ตามธรรมชาติกระจายอยู่ทั่วไป เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวตระกูลหญ้าชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับข้าวโพด ข้าวฟ่าง อ้อย ซึ่งพบกระจายอยู่ทั่วไปหลายพื้นที่ตามธรรมชาติ ประกอบด้วย 12 ชนิดย่อยที่แตกต่างกันทั่วโลก และสำรวจพบในประเทศไทย 2 ชนิด ได้แก่ กลุ่มพันธุ์หญ้าแฝกกลุ่ม และตอน หญ้าแฝกสามารถโตได้ดีในทุกสภาพแวดล้อม โตได้ดีในทุกสภาพดิน มีความทรหดสูง ในช่วงแรกมีความต้องการน้ำสูง สามารถปลูกในพื้นที่น้ำท่วมได้ รากลงลึกได้ถึง 3 เมตร และมีปริมาณที่หนาแน่น ลักษณะโดยทั่วไปของหญ้าแฝก มีการแตกหน่อรวมเป็นกอ เปียกกันแน่น ไม่แผ่ขยายด้านข้าง มีใบยาว ตัดและแตกใหม่ง่าย ระบบรากยาว สานกันแน่นเป็นที่อาศัยของจุลินทรีย์ ปรับตัวกับสภาพต่าง ๆ ได้ดี ทนทานต่อโรคพืชทั่วไป เหตุผลเหล่านี้ ทำให้เป็นที่นิยมใช้ในการเสริมความแข็งแรงของคันดิน ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ ผลการทดสอบแรงดึงของรากหญ้าแฝกด้วยการทดสอบกำลังรับแรงดึง (tensile strength test) จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Hengchaovanich (1998); Sungwornpatansakul & Rajani (2006); Jotisankasa et al., 2015; etc.) พบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของหญ้าแฝกประมาณ 0.1 - 0.3 ซม. มีค่าหน่วยแรงดึงเฉลี่ย เท่ากับ 40 - 150 kPa ตามลำดับ และการพัฒนาหน่วยแรงดึงของรากหญ้าแฝก จะมีค่าลดลงตามอายุการปลูก เนื่องจากขนาดพื้นที่หน้าตัดในการคำนวณพื้นที่รับแรงที่ใช้ในการคำนวณคือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก แต่เมื่อรากหญ้าแฝกเจริญมีอายุเพิ่มขึ้นทำให้ส่วนเปลือกผิวภายนอก(sponge shell) ของรากมีขนาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ส่วนที่รับแรงคือแกนของเนื้อรากภายใน (fiber core) จะมีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลง ขนาดเส้น



ผ่านศูนย์กัลยาณอกที่วัดจึงเป็นส่วนเปลือกที่มีขนาดความหนาเพิ่มขึ้นตามอายุ จึงเป็นเหตุผลที่ค่ากำลังรับแรงดึงของรากหญ้ามีค่าที่ลดลง

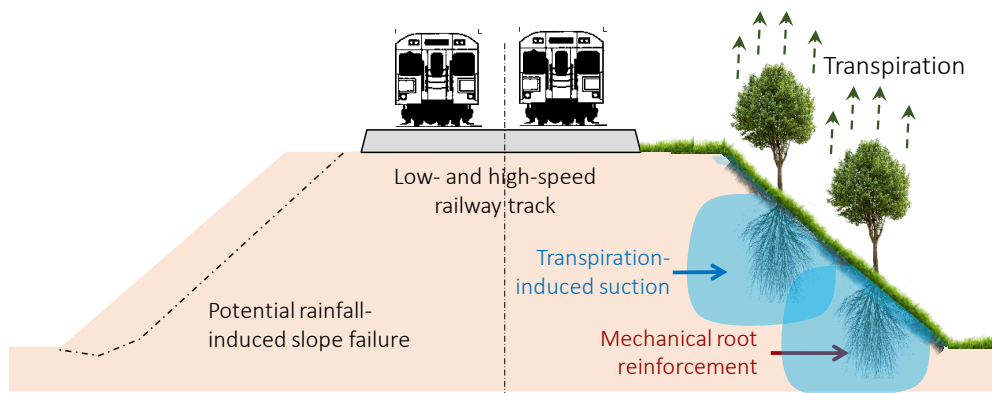
### 2.3.1 หญ้าแพรก

หญ้าแพรก (ชื่อวิทยาศาสตร์: *Cynodon dactylon*) เป็นพืชพื้นเมืองในทวีปแอฟริกา ทวีปเอเชีย ทวีปออสเตรเลีย และยุโรปใต้ ซึ่งหญ้าแพรกนิยมใช้ในการปลูกเพื่อคลุมดินในงานหลุมฝังกลบกันไม่ให้น้ำไหลเข้าสู่ขยะในหลุมฝังกลบ ปลูกเพื่อป้องกันการกัดเซาะที่ผิวดินจากปริมาณน้ำฝน หญ้าแพรกเป็นพืชล้มลุก ระบบรากฝอย เส้นผ่านศูนย์กลางรากประมาณ 0.1 - 0.3 ซม. ความลึกรากประมาณ 40 ซม. ลำต้นหญ้าแพรกนั้นมีขนาดเล็ก แผ่กิ่งก้านปกคลุมพื้นดินไปได้เรื่อยๆ บางส่วนที่ชูขึ้นมาเหนือพื้นดินจะสูงราวๆ 10-30 เซนติเมตร ลำต้นมีข้อปล้อง และมีรากแทงออกมาขยายพันธุ์ได้ง่าย เจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว อดทนต่อสภาพแวดล้อมที่เลวร้าย สามารถขึ้นได้เองในสภาพแวดล้อมหลายรูปแบบเช่น พื้นที่แห้งแล้ง พื้นที่น้ำท่วมขัง พื้นที่ดินเค็ม ที่ว่างตามสนามหญ้าหรือริมถนน เป็นต้น ใบเรียวยาวออกเป็นกระจุกตามข้อ มีลักษณะเป็นเส้นเรียวยาวแหลมคล้ายหอก โดยจะออกตรงข้ามกัน ก้านใบเป็นกาบหุ้มลำต้นเอาไว้ โคนใบมีขน ขอบใบเรียบ ปลายใบแหลม หญ้าแพรกโตได้ดีในสภาพอากาศอุ่นชื้น Song et al., (2017) พบว่าหญ้าแพรกทำให้อัตราการไหลของน้ำในดินลดลง และทำให้น้ำซึมผ่านจากผิวดินลงสู่ดินได้ยากขึ้น จึงเหมาะสมแก่การนำไปใช้คลุมดินเพื่อลดการกัดเซาะหน้าดิน คลุมหลุมฝังกลบเพื่อลดการซึมของน้ำเข้าสู่หลุมฝังกลบ

## 2.4 วิธีการชีววิศวกรรมโดยใช้พืชพรรณ

ด้วยหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่เพิ่มมากขึ้นเกี่ยวกับเหตุการณ์สภาพภูมิอากาศที่รุนแรง ในหลากหลายประเทศจึงได้พัฒนาการดำเนินการร่วมกันเพื่อแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ บางประเทศมีการออกแผนชะลอการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ร่วมกับแผนปฏิบัติการพัฒนาของชาติ โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (UNEP) เสนอแนวทางเศรษฐกิจสีเขียวในปี 2554 เพื่อส่งเสริมสุขภาพของมนุษย์และความเสมอภาคทางสังคม ในขณะที่เดียวกันก็รักษาทรัพยากรระบบนิเวศและลดความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อหลีกเลี่ยงความสูญเสียทางสังคมและเศรษฐกิจ จึงมีความจำเป็นเร่งด่วนในการก่อสร้างและโครงสร้างพื้นฐานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและยั่งยืนซึ่งสามารถรับมือกับสภาพอากาศที่รุนแรงในอนาคตได้

วิธีการวิศวกรรมชีวภาพในดินโดยใช้พืชได้รับการพิจารณาว่าเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแทนวิธีการทางวิศวกรรมแบบดั้งเดิม เช่นการพ่นคอนกรีต การตอกเสาเข็ม ในคันดิน ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้วัสดุที่มีคาร์บอนสูงส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทำให้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเลวร้ายลงไปอีก อีกทั้งการขาดการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องส่งผลให้โครงสร้างดังกล่าวมีประสิทธิภาพที่ลดลง พืชพันธุ์อาจเป็นวัสดุก่อสร้างใหม่ที่สามารถส่งเสริมโครงสร้างพื้นฐานที่ยั่งยืนและสร้างสภาพแวดล้อมที่ดีขึ้น วิธีการชีววิศวกรรมโดยใช้พืชพรรณนั้นถูกนำมาใช้ในการรักษาเสถียรภาพของความลาดชันมานานแล้วตั้งแต่สมัยโบราณ ในระหว่างการขยายตัวของอาณาจักรกรีก เกษตรกรมักจะปลูกต้นมะกอกตามแนวลาดชันเนื่องจากรากสามารถชอนไชลงไปได้ลึกมากขึ้น การใช้หญ้าแฝก เพื่อป้องกันการเสถียรภาพของลาดชัน ในประเทศไทยเองก็มีโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช (Howeler et al., 2004; Rossi 2012) วิธีนี้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในฐานะวิธีแก้ปัญหาที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสำหรับการรักษาเสถียรภาพของความลาดเอียงในระดับตื้น (เช่นภายใน 1 ถึง 2 เมตร Barker 1995; Nakamura et al., 2007; Wu et al., 2014; Boldrin et al., 2017)



รูปที่ 1. แผนผังของชีววิศวกรรมดินเพื่อเพิ่มความปลอดภัยของคันดินอย่างยั่งยืน

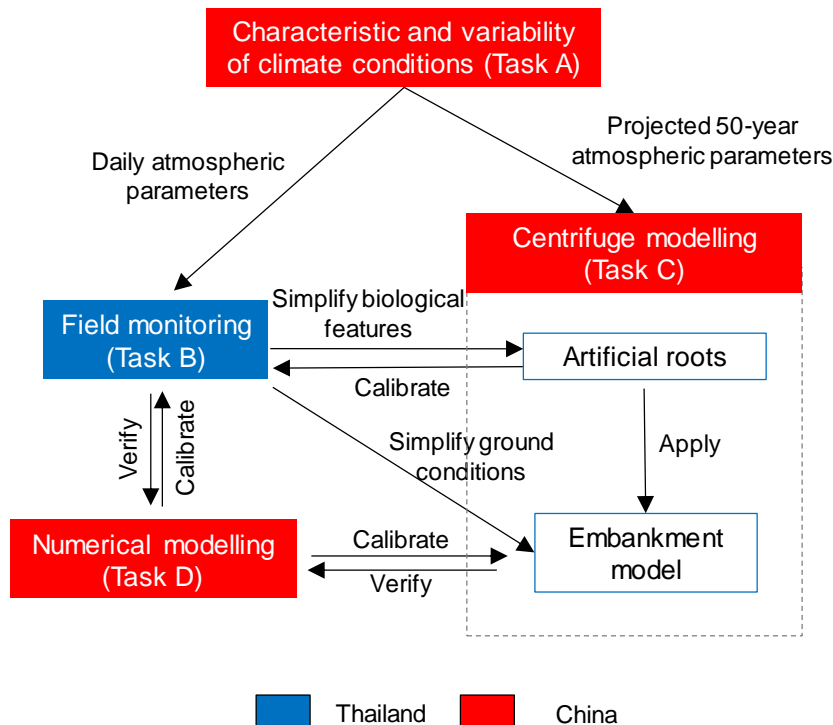
รูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าพืชสามารถปรับปรุงความปลอดภัยบนทางลาดชันได้ พืชพรรณสามารถให้การ  
รักษาเสถียรภาพของความลาดชันได้โดยการเสริมรากเชิงกล (Barker 1995; Wu et al., 2014) ต่อมาเมื่อระบบ  
รากมีการดูดซึมน้ำ จากผลของการคายน้ำของพืช ช่วยให้แรงดันน้ำในดินลดลงและเพิ่มความต้านทานแรงเฉือน  
ของดิน (Ng and Leung 2012; Ng et al., 2014; Ng et al. 2016; Leung et al., 2017; Kamchoom et al.,  
2017) วิธีการวิศวกรรมชีวภาพในดินโดยใช้พืชพันธุ์ก็จะทำให้ดิน "ซ่อมแซมตัวเองได้" เช่นกันซึ่งพืชจะตอบสนอง  
ต่อความเสียหายหรือการเสื่อมสภาพโดยการงอกใหม่ ทำให้ฟื้นฟูความสามารถในการรับแรงและดูดน้ำได้

อย่างไรก็ดี พืชพันธุ์อาจส่งผลทางลบต่อโครงสร้างพื้นฐานด้วยเช่นกัน การดูดและคายน้ำที่มากขึ้นจากผล  
ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อาจทำให้เกิดการหดตัวและขยายตัวที่มากขึ้น รวมถึงการเคลื่อนตัวของคัน  
ดินที่มากขึ้น (Lee et al., 2013) ยิ่งไปกว่านั้นการเสียหายของรากพืชจากการตายหรือการสลายตัวของราก ก็  
ส่งผลให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนไป (Culbertson et al., 2008; Ceotto และ Di Candilo 2010) ดังนั้นจึงเป็น  
เรื่องสำคัญที่จะต้องประเมินประสิทธิภาพของวิธีการชีววิศวกรรมดิน เพื่อเพิ่มความมั่นใจของผู้ออกแบบและใช้งาน  
ที่จะนำกระบวนการนี้ไปปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานที่ยั่งยืนและสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพอากาศได้มากขึ้น

### บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.1 ภาพรวมโครงการ

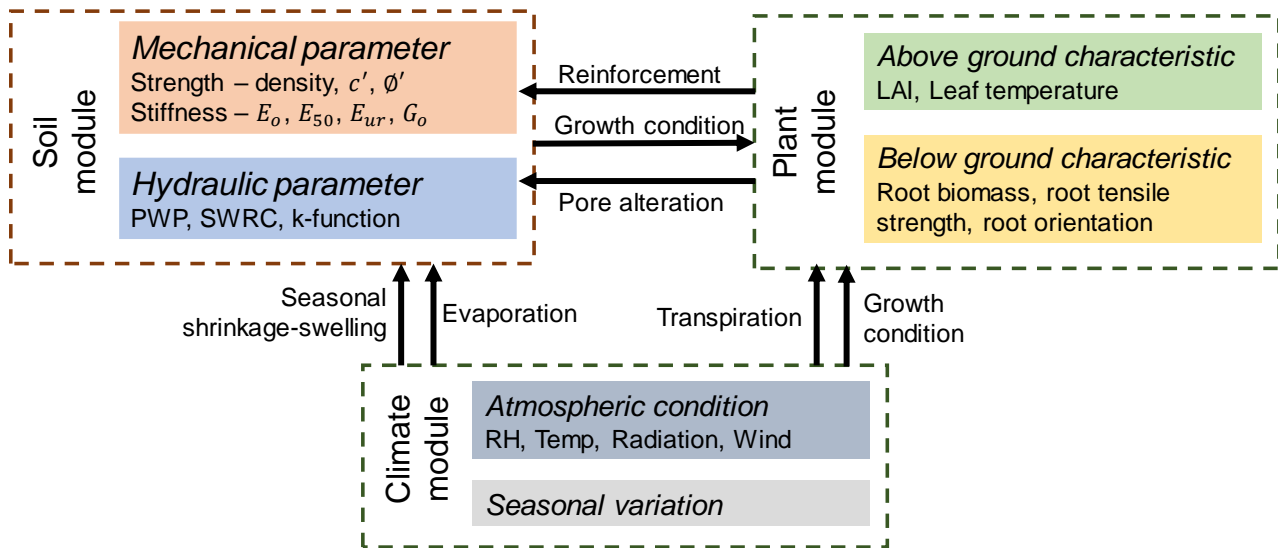
โครงการนี้ประกอบด้วยการศึกษาวิจัยร่วมระหว่างนักวิจัยไทยและจีน โดยใช้วิธีการแบบบูรณาการเพื่อตอบ โจทย์วิจัย และเพื่อบรรลุจุดมุ่งหมายของโครงการ รูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงแผนการวิจัยที่นำเสนอซึ่งแบ่งออกเป็น 4 งานหลัก (A, B, C และ D) ในส่วนงาน A เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศซึ่งนำโดยทีมวิจัย จีนเพื่อคาดการณ์การเกิดฝนและการระเหยในอนาคต ส่วนงาน B นำโดยทีมวิจัยไทยที่จะสร้างแบบจำลองคันดิน ขนาดจริงและการติดตั้งเครื่องมือเพื่อตรวจสอบสภาพอากาศ อุทกวิทยาดินและการตอบสนองทางสรีรวิทยาของ พืช ภายใต้ภูมิอากาศที่แตกต่างกัน โดยทีมวิจัยจีนจะเริ่มงานส่วน C คือการพิจารณาผลกระทบสภาพอากาศ เปลี่ยนแปลงต่อคันดินด้วยการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง แบบจำลองนี้ทำให้วิศวกรสามารถทราบพฤติกรรม ระยะเวลาของคันดินภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สุดท้ายจะเป็นการสร้างและสอบเทียบ แบบจำลองเชิงทฤษฎีและเชิงตัวเลขของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและพืชเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ โดยโมเดลที่สอบเทียบ กับข้อมูลในสนามและแบบจำลองแล้วจะนำไปใช้เพื่อการพัฒนาแนวทางเบื้องต้นสำหรับการจัดการพืชเพื่อเพิ่ม ความสามารถในการปรับตัวตามสภาพภูมิอากาศของโครงสร้างพื้นฐาน



รูปที่ 2 แผนการวิจัยในโครงการ

### 3.2 ขอบเขตงานวิจัยของทีมนักวิจัยไทย

ภายใต้ส่วนของโครงการวิจัยร่วมระหว่างนักวิจัยไทยและจีน งานวิจัยส่วนในประเทศไทยนั้นเป็นการตรวจวัดและสอบเทียบพฤติกรรมของพืชและคั้นดินภายใต้สภาวะภูมิอากาศที่แตกต่างกัน คือ ฤดูร้อนและฤดูฝน เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ของส่วนงานนี้ มีแบ่งการทำงานเป็นสามส่วนใหญ่ดังในรูปที่ 3 คือ ส่วนแรกคือส่วนของพืช เช่น ทดสอบคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ของรากที่มีผลต่อการเสริมกำลังของดิน และการเติบโตและการเสื่อมสลายของราก ส่วนที่สองคือส่วนของดิน เช่น การหาอัตราค้ำของน้ำในดินทั้งดินเปล่าและดินที่มีราก โดยคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของรากด้วย ส่วนสุดท้ายคือสภาพภูมิอากาศตามฤดูกาลที่ทำการตรวจวัด โดยแบ่งการศึกษาเป็น ฤดูร้อนและฤดูฝน โดยมุ่งเน้นศึกษาความสัมพันธ์ของแต่ละส่วน และความสัมพันธ์ระหว่างสามส่วนนี้ อีกทั้งยังใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง โดยทั้งสามส่วนจะถูกนำมาจำลองในการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง (ส่วนงาน C) และแบบจำลองเชิงตัวเลข (ส่วนงาน D)



รูปที่ 3 ขอบเขตงานวิจัยของทีมนักวิจัยไทย

### 3.4 รายละเอียดของส่วนงานวิจัยไทย

#### 3.4.1. การเตรียมพืชพันธุ์

หญ้าแฝกเป็นพืชที่เติบโตอย่างรวดเร็ว และกระจายอยู่ทั่วไปในประเทศเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน ในโครงการนี้ได้เลือกพันธุ์ สงขลา 3 ในการศึกษา พันธุ์นี้มีใบและรากยาวกว่าหญ้าแฝกตอน เนื้อใบเกลี้ยงมีไขมาก สามารถเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่มีความชื้นสูงหรือบริเวณที่มีระดับน้ำใต้ดินไม่ลึกมากเหมือนพื้นที่ในโครงการนี้ มีการจัดหาหญ้าจากผู้ขายในพื้นที่โดยได้รับในรูปแบบต้นกล้า ซึ่งในช่วงแรกจะต้องทำการจุ่มรากให้อยู่ใต้น้ำเป็นเวลา 5 วัน (รูปที่ 4) เป็นการเสริมการเจริญเติบโตของรากของต้นกล้าก่อนปลูกลงในคันดิน หลังจากงอกของรากใหม่แล้ว ต้นกล้าจะย้ายไปปลูกในมูลไส้เดือน ซึ่งอุดมไปด้วยสารอาหารและเป็นประโยชน์ต่อการขยายรากอ่อน (รูปที่ 5) ในช่วงเวลานี้จะต้องมีการให้น้ำในปริมาณมาก ทั้งในตอนเช้าและตอนเย็น เมื่อสังเกตเห็นใบใหม่จากการปักชำ (เช่น หลังจากผ่านไปสองสัปดาห์) หญ้าจะถูกนำไปยังไซต์และพร้อมสำหรับการปลูก



รูปที่ 4. การงอกของรากจากต้นกล้าแฝก



รูปที่ 5. กล้าแฝกในมูลไส้เดือนและการดูแลรักษา

### 3.4.2 การทดสอบคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ของราก

ทีมวิจัยได้แบ่งหญ้าแฝกบางส่วนเพื่อนำไปปลูกในกระบอก Polyvinyl chloride (PVC) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 ซม. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ของรากรวม 30 ตัวอย่าง แบ่งเป็นการศึกษาช่วงเจริญเติบโตของราก 9 ตัวอย่าง และสำหรับการสลายตัวของราก 21 กระบอก โดยวางตัวอย่างทั้งหมดไว้ในเรือนเพาะชำที่มีการถ่ายเทอากาศ (ดังรูปที่ 6) ตัวอย่างทั้งหมดได้รับแสงแดดอย่างต่อเนื่องประมาณ 10 ชั่วโมงต่อวัน และมีการรดน้ำสัปดาห์ละสองครั้ง มีการปลูกตัวอย่างเพื่อการเจริญเติบโตของรากเป็นเวลา 60, 120 และ 180 วัน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2563 ถึงมกราคม 2564 (แสดงเป็น G60, G120 และ G180) ซึ่งเป็นฤดูฝนในประเทศไทย ในช่วงเวลานี้อุณหภูมิเฉลี่ยต่อวันอยู่ที่ 33 °C

เมื่อครบกำหนดจะมีการรวบรวมรากจากตัวอย่าง เพื่อวัดกำลังรับแรงดึงของราก รากถูกแยกออกจากดินโดยการร่อนแบบเปียกผ่านตระแกรง และรากเปล่าจะแช่อยู่ในน้ำเป็นเวลากว่า 12 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ จากนั้นจึงนำรากไปหาปริมาณส่วนประกอบของราก คือ เซลลูโลสและลิกนิน



รูปที่ 6 ตัวอย่างทดสอบสำหรับการดิ่งราก

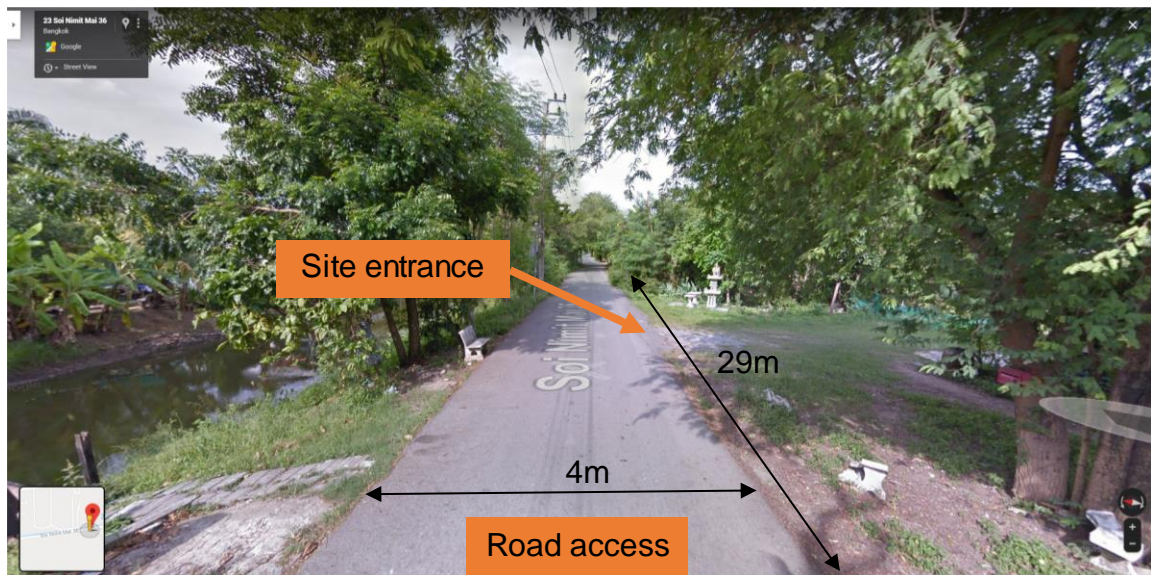
#### 3.4.3. ที่ตั้งของคันดิน และ สภาพภูมิอากาศทั่วไป

ทางทีมวิจัยได้ทำการเลือกสถานที่ตั้งของคันดินที่ซอยนิมิตรใหม่ 36 เขตคลองสามวา ทางตะวันออกของ กรุงเทพมหานคร (รูปที่ 7) เพื่อทำการศึกษาในส่วนงาน B เนื่องจากการเดินทางทำได้สะดวก และสภาพดินที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ทางเข้าหน้างานมีความกว้าง 29 ม. พร้อมทางเข้าถนนสาธารณะ (ตามรูปที่ 8) และมีพื้นที่จอดรถ ระยะทางระหว่างที่ตั้งคันดินและสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังมีระยะทางประมาณ 18 กม. โดยใช้เวลาเดินทางประมาณ 30-45 นาที จากที่ตั้งคันดินบริเวณใกล้กันยังมีประตูระบายน้ำ (สถานีคลองสามวา) ที่ระยะ 2.7 กม. สถานีนี้ติดตั้งมาตรวัดระดับน้ำและมาตรวัดปริมาณน้ำฝน นอกจากนี้ยังมีสถานีตรวจอากาศที่สำนักงานเขตคลองสามวาซึ่งอยู่ห่างจากที่ตั้ง 4.6 กม



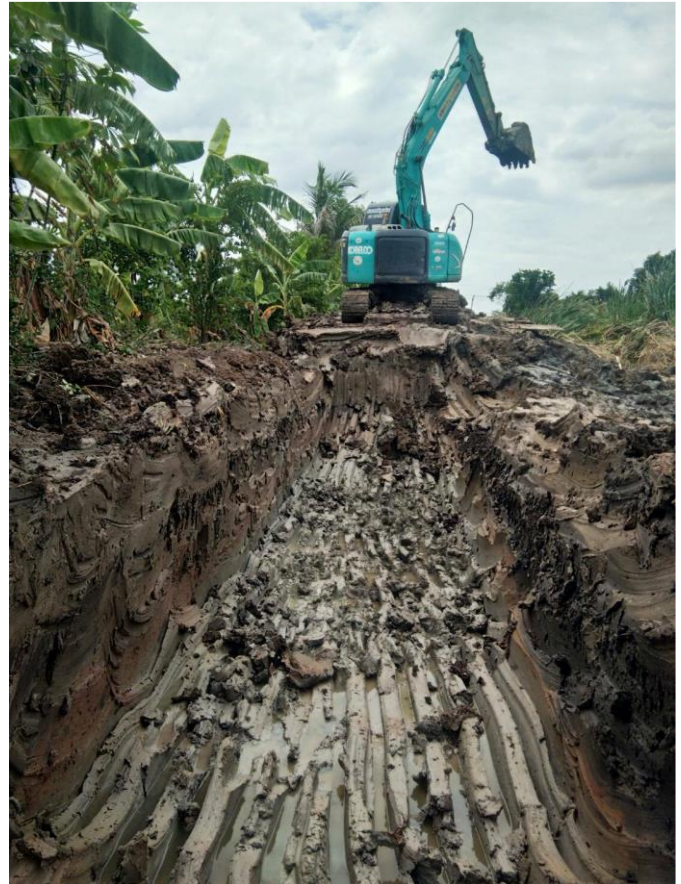


รูปที่ 7. ภาพรวมของตำแหน่งคันดินและสถานที่ใกล้เคียง



รูปที่ 8. ภาพรวมของทางเข้าหน้างาน

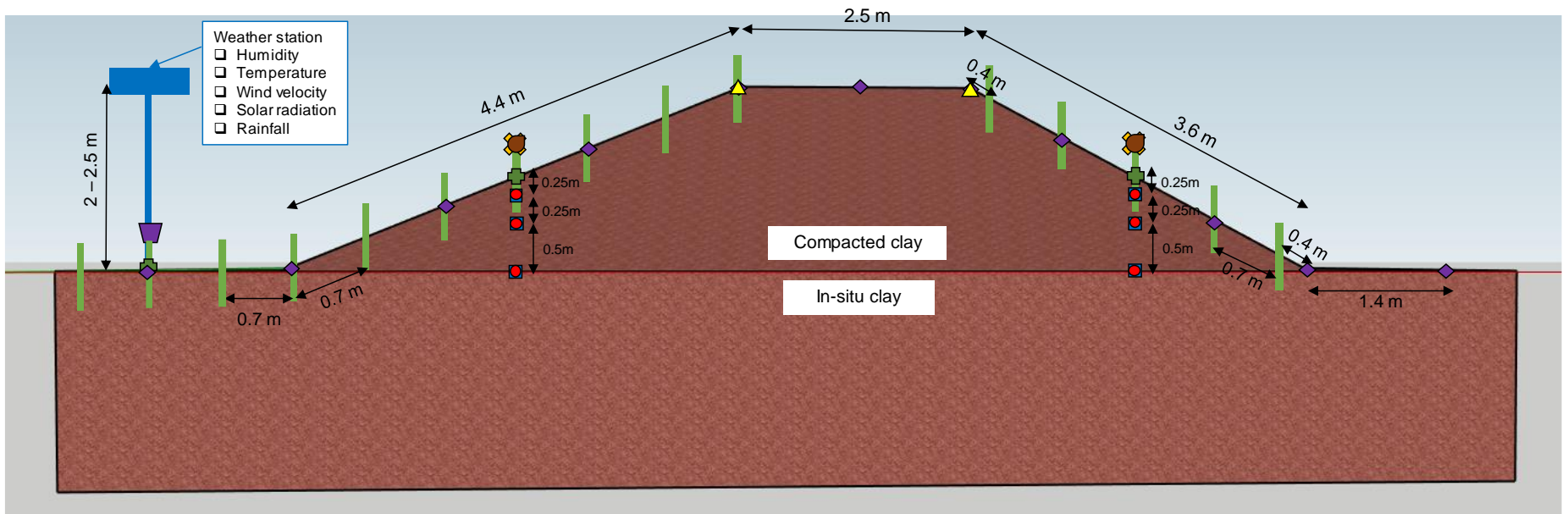
การศึกษาชั้นดินเบื้องต้นในสนาม พบว่าเป็นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลาง ลึกประมาณ 17 ม. พบดินเหนียวแข็งที่ความลึกตั้งแต่ 17 ม. ถึง 26 ม. ก่อนที่จะถึงชั้นทรายที่อยู่ถัดไป การก่อสร้างคันดินเริ่มขึ้นในช่วงเดือนกรกฎาคม ถึงสิงหาคม 2563 โดยการใช้ดินเหนียวบดอัดก่อสร้างเป็นคันดิน โดยดินเหนียวนั้นทำการขุดมาจากพื้นที่ใกล้เคียง จากรูปที่ 9 ช่วงสองเมตรของหลุมขุดพบว่า ดินที่ผิวดินมีลักษณะเป็นดินปลูกรองด้วยทรายถม ซึ่งมีความไม่สม่ำเสมอและไม่เหมาะสมในการก่อสร้าง การก่อสร้างจึงใช้ดินขุดที่ความลึก 2 - 4 ม. เพื่อหลีกเลี่ยงความไม่สม่ำเสมอของวัสดุดินเหนียว



รูปที่ 9. การขุดดินเพื่อเตรียมก่อสร้างคันดิน

ฤดูกาลในเขตกรุงเทพมหานคร ออกเป็น 3 ฤดูดังนี้ ฤดูหนาว เริ่มตั้งแต่กลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งเป็นฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือบริเวณความกดอากาศสูงจากประเทศจีนที่เย็นและแห้งจะแผลงมาปกคลุม ในส่วนของ ฤดูร้อน เริ่มเมื่อมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือสิ้นสุดลง คือประมาณกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคม ในระยะนี้จะมีหย่อมความกดอากาศต่ำเนื่องจากความร้อนปกคลุม ทำให้มีอากาศร้อนอบอ้าวทั่วไป สุดท้าย ฤดูฝน จะเริ่มตั้งแต่กลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม เป็นช่วงที่ฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งปนลมที่พัดจากมหาสมุทรอินเดียนำฝนและความชื้นเข้ามายังประเทศไทย ในเขตพื้นที่นี้ เนื่องจากเป็นชุมชนเมือง จึงมีอุณหภูมิค่อนข้างสูงและอากาศร้อนอบอ้าวในฤดูร้อน ส่วนในฤดูหนาวไม่หนาวจัดมากนัก มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปี 28-30 องศาเซลเซียส พื้นที่ส่วนใหญ่ของกรุงเทพมหานครมีปริมาณฝนรวมปกติอยู่ระหว่าง 1,400 - 1,600 มิลลิเมตร จำนวนวันที่ฝนตก 120 -130 วัน กรุงเทพมหานครตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร มีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดปี 72-74 เปอร์เซ็นต์ และจะลดลงเหลือ 62-69 เปอร์เซ็นต์ในช่วงฤดูร้อน โดยการศึกษาจะมุ่งเน้นศึกษาผลการตรวจวัดจาก ฤดูร้อน (กุมภาพันธ์ - เมษายน 2564) และ ฤดูฝน (พฤษภาคม - ตุลาคม 2564) เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินมากที่สุดและอาจจะเกิดปัญหาการเคลื่อนตัวและเสถียรภาพของคันดินในช่วงสองฤดูกาลนี้

โดยทั่วไป อุณหภูมิ ปริมาณฝน และ ความชื้นสัมพัทธ์ ของกรุงเทพมหานคร พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปี 28 องศาเซลเซียส พื้นที่ส่วนใหญ่ของเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออกมีปริมาณฝนรวมเฉลี่ย 1,400 มิลลิเมตร จำนวนวันที่ฝนตก 120 วัน ดังนั้นการเลือกที่ตั้งไซต์งานในพื้นที่คลองสามวา จึงถือว่าเป็นตัวแทนของสภาพภูมิอากาศในชุมชนเมืองที่มีโครงสร้างพื้นฐานหนาแน่นทั้งในกรุงเทพและเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก



	Sensor	Number	Frequency
Soil response	Pore pressure transducers	18	Every 10 mins
	Water content sensor	18	Every 10 mins
	Ring infiltrometer	2	Every month
Plant response	Root observer	6	Every month
	Thermal camera (leaf temp)	6	Every month
	Camera (leaf area)	6	Every month
Slope movement	Inclinometer	6	Every 10 mins
	Surface movement	33	Every month

รูปที่ 10. แผนผังการปลูกพืชพันธุ์และการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด

#### 3.4.4. ค้นดินขนาดจริง (full-scale)

ค้นดินขนาดจริง ได้ทำการก่อสร้างในพื้นที่ทดสอบ รูปที่ 10 แสดงภาพตัดขวางของค้นดิน ซึ่งประกอบด้วยลาดดินสองแบบคือ 1:1.5 และ 1:2 โดยรายละเอียดของเครื่องมือวัดจะแสดงในหัวข้อ 4.5 พีชพันธุ์ที่มีอยู่เดิมในบริเวณนั้นส่วนใหญ่เป็นหญ้า ดอกไม้หรือพุ่มไม้ขนาดเล็กสูงน้อยกว่า 1 ม. โดยในการก่อสร้างค้นดิน ในช่วงแรกจะเป็นการจัดการพื้นที่ให้พร้อมทำการก่อสร้าง มีการย้ายพีชพันธุ์ทั้งหมดที่อยู่ในพื้นที่ค้นดินและห่างออกไปประมาณ 2 ม. (รูปที่ 11) ในระหว่างการก่อสร้างมีฝนตกชุกหลายครั้งและมีการสังเกตพบการพังทลายของค้นดินระดับตื้นดังที่วงในรูปที่ 12 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าค้นดินมีความเสถียรเพียงเล็กน้อย และต้องใช้มาตรการทางวิศวกรรม (เช่น พีชพันธุ์ในโครงการนี้) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของค้นดิน



รูปที่ 11. การเตรียมพื้นที่ก่อนสร้างค้นดิน



รูปที่ 12 พังทลายของค้นดินที่ลาด 1:1.5

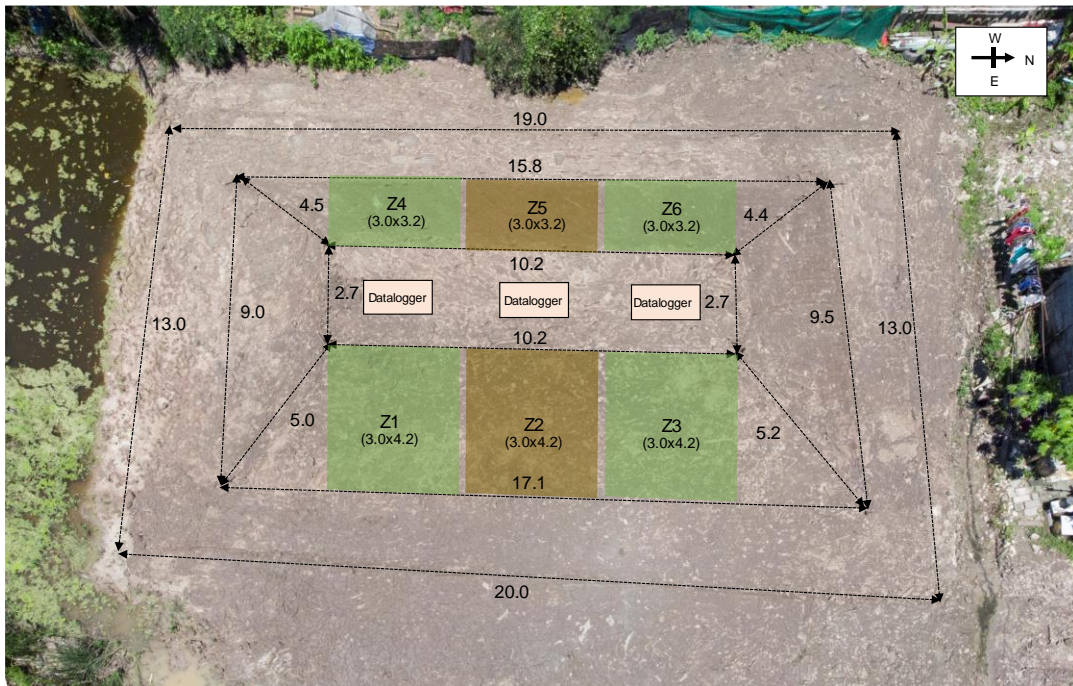


รูปที่ 13. การบดอัดคันดิน

ดังนั้นคันดินจึงได้รับการปรับปรุงใหม่และบดอัดใหม่อีกครั้ง โดยทำการบดอัดทีละชั้น ชั้นละประมาณ 0.3 ม. โดยใช้น้ำหนักกดของรถแบ็คโฮกลิ้งในแต่ละชั้น (รูปที่ 13) หลังจากนั้นปรับแต่งลาดคันดินให้เข้ากับมุมลาด ตามที่กำหนดโดยใช้ถังที่ปลายแขนของรถทำการเกลี่ยลาดดิน คันดินแล้วเสร็จในเดือนสิงหาคม 2563 ดังแสดงใน รูปที่ 14 และ 15 มีการขุดร่องระบายน้ำรูปตัววีลึกประมาณ 0.2 ม. มีระยะห่างจากตัวคันดินประมาณ 2 ม. จากฐานของคันดิน โดยวางระบายนี้เชื่อมต่อเป็นระยะ และไหลลงทางที่ค้ำไค้ของคันดินซึ่งเป็นที่ตั้งของหนองน้ำ ขนาดของพื้นที่คันดินโดยประมาณเท่ากับ 260 ตรม. ในบริเวณคันดินมีพื้นที่รอบข้าง (รูปที่ 16) ทำให้คันดินนี้แยกจากพื้นที่ใกล้เคียงและลดผลกระทบจากปัจจัยภายนอกที่ควบคุมไม่ได้



รูปที่ 14. ค้นดินหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ



รูปที่ 15. รูปแปลนการทดสอบในค้นดิน



รูปที่ 16. รูปพื้นที่ข้างเคียง

ในการปลูกหญ้านั้น ทางทีมวิจัยได้เลือกหญ้าแฝก (*Chrysopogon zizanioides*) ซึ่งเป็นหญ้าชนิดโตเร็ว โดยปลูกตามความลาดดินและพื้นที่ราบใกล้บริเวณปลายเท้าของความลาดดิน 1:2 หญ้าชนิดนี้มีระบบรากลึกและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการรักษาเสถียรภาพลาดดินในประเทศไทย โดยจะทำการปลูกเป็นแถวตามแนวลาดดิน โดยแต่ละบริเวณจะมีการปลูกหญ้าแฝกทั้งหมด 6 แถว โดยแต่ละแนวจะมีหญ้าแฝกห่างกันประมาณ 10 เซนติเมตร โดยงานวิจัยนี้อ้างอิงแนวการปลูกมาจากหลักการปลูกที่เป็นที่นิยมใช้ในการเสริมเสถียรภาพลาดดิน และจะมุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพของวิธีที่เป็นที่นิยมใช้นี้ต่อการเคลื่อนตัวของคันดินตามฤดูกาล ในการปลูกจะมีการตีแนวเพื่อให้ปลูกได้ตรงตามจุดที่ต้องการ ดังรูปที่ 17 โดยเมื่อได้จุดที่ต้องการปลูกแฝกแล้วนั้น จะทำการเจาะรูขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางหญ้าแฝกเล็กน้อย และทำการใส่ดินดำพร้อมหญ้าแฝกลงในรูที่เจาะขึ้นมา เพื่อให้รากหญ้าสามารถเจริญเติบโตต่อไปดังรูปที่ 18 เมื่อเวลาผ่านไปสามสัปดาห์ สามารถเห็นใบอ่อนที่แซมขึ้นมาจากรากหญ้าแฝกดังรูปที่ 19 โดยอัตราการรอดชีวิตพบว่าประมาณ 98% โดยจะมีการปลูกแซมส่วนที่ไม่มาสามารถโตต่อไปได้ หลังจากการปลูกสามเดือนหญ้าแฝกมีการเติบโตดีดังรูป 20 และพร้อมสำหรับการตรวจวัดในช่วงฤดูร้อน





รูปที่ 17. การตีแนวการปลูกแฝกตามแนวลาดดิน



รูปที่ 18. รูปหญ้าแฝกหลังจากการปลูกลงคันดิน

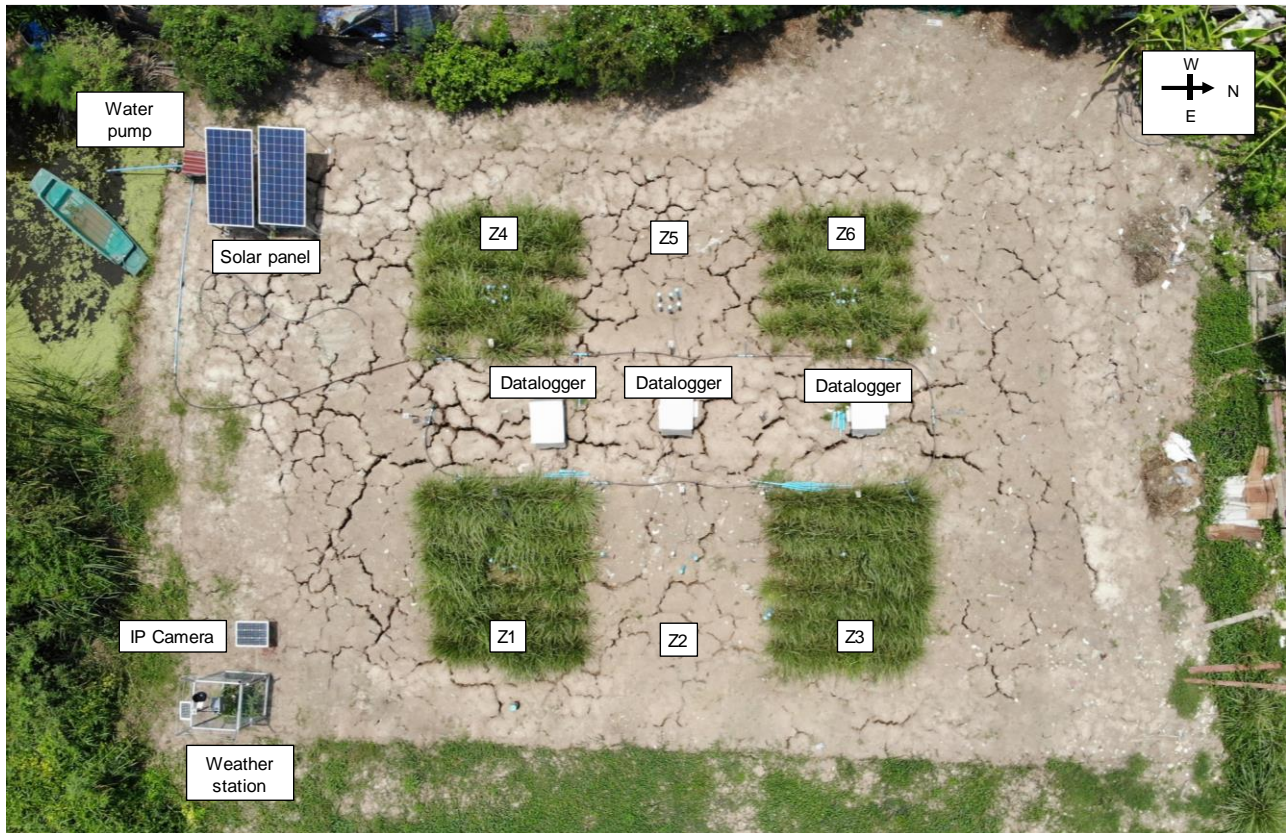


รูปที่ 19. รูปหญ้าแฝกหลังจากการปลูกลงคันดิน 3 สัปดาห์



รูปที่ 20. รูปหญ้าแฝกหลังจากการปลูกลงคันดิน 3 เดือน

รูปที่ 21 แสดงภาพรวมของแปลงทดสอบในคันดินหลังจากการปลูกหญ้าและติดตั้งเครื่องมือตรวจวัด ในระหว่างการอนุบาลหญ้าแฝกในคันดินนั้นทางทีมวิจัยได้ทำการปลูกหญ้าแฝกในช่วงฤดูฝน (กันยายน – พฤศจิกายน 2563) ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้น้ำจำนวนมากและหญ้าแฝกมีการเติบโตที่แข็งแรง ในช่วงหลังจากฤดูฝน ทางทีมวิจัยมีการติดตั้งปั้มน้ำและแผงโซล่าเซลล์ (รูปที่ 21) เพื่อทำการสูบน้ำจากบ่อข้างเคียงในการบำรุงรักษาหญ้าแฝกก่อนการตรวจวัดจะเริ่มขึ้นในฤดูร้อน ทีมวิจัยได้ทำการเจาะสำรวจระดับน้ำใต้ดินผ่านทางหลุมตรวจวัดระดับน้ำที่ฐานคันดินในบริเวณโซน 1 (รูปที่ 21) และพบว่าระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าระดับฐานคันดินประมาณ 2.2 เมตร



รูปที่ 21. ภาพรวมของแปลงทดสอบในคันดิน

### 3.4.5. เครื่องมือวัดในสนาม

#### เครื่องมือวัดพฤติกรรมของดินและหญ้า

รูปที่ 22 แสดงเครื่องมือวัดทั้งหมดที่ใช้ในโครงการนี้ การวัดการตอบสนองของดินภายใต้สภาพอากาศที่แตกต่างกันประกอบด้วย การวัดปริมาณน้ำและแรงดันน้ำในดิน เครื่องมือวัดค่าคงที่ของอิเล็กทริก (dielectric constant) คือเครื่องมือวัดที่สามารถวัดค่าผลรวมการเป็นฉนวน (Total dielectric permittivity) ของดินและน้ำ เนื่องจากน้ำมีความเป็นฉนวนสูง การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำจึงมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าอิเล็กทริกทั้งหมด ดังนั้นจึงสามารถใช้เครื่องมือตัวนี้วัดความเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำได้ด้วยวิธีที่ทางอ้อม โดยสามารถวัดปริมาณน้ำได้ตั้งแต่ 0 - 100% โดยมีความแม่นยำ  $\pm 2\%$  เครื่องมือวัดยังสามารถวัดอุณหภูมิของดินได้ตั้งแต่ 0 - 80 °C องศาด้วยความแม่นยำ  $\pm 1\%$  ตัววัดแรงดันน้ำในดิน (Tensiometers) เป็นเครื่องมือวัดสำหรับการวัดแรงดันน้ำในช่องว่างของดิน ความดันน้ำในช่องว่างของดินที่เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันของน้ำภายในตัวกรองเซรามิก ดังนั้นเครื่องมือวัดจะตรวจวัดแรงดันน้ำในช่องว่างของดินเป็นค่าลบ (เช่น การดูดของน้ำในดินเหนือระดับน้ำ) ได้ถึง -90 kPa นอกจากนี้ยังสามารถวัดความดันด้านบวก (เช่น ใต้ระดับน้ำ) ได้ถึง 700 kPa ความแม่นยำของการวัดนี้อยู่ที่ประมาณ 0.5 kPa ในช่วงฤดูแล้งพบว่าดินที่ระดับความลึก 0.25 และ 0.5 ม. มีค่าแรงดึงของน้ำในดินมาก จึงมีการติดตั้งเครื่องมือวัด MPS-6 (หรือ TERO21) สำหรับการวัดแรงดูดที่สูงกว่า 90kPa ในบริเวณโซน 5 และ 6

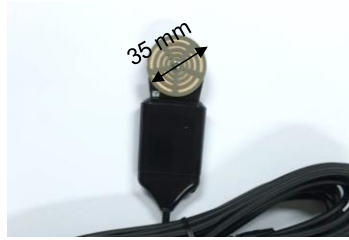
สำหรับการตอบสนองของพืชการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ของมวลชีวภาพรากและพื้นที่ใบสามารถสังเกตได้ผ่านกล้องส่องรากและภาพถ่ายด้วยกล้องดิจิทัลในแต่ละเดือน กล้องส่องรากสามารถให้การวัดอัตราส่วนพื้นที่รากด้านข้าง (RAR) และด้วยเหตุนี้ ชีวมวลของรากในช่วงการเจริญเติบโตและระยะการสลายตัว สามารถคำนวณได้จาก RAR ด้านข้าง โดยใช้กล้องเพื่อสังเกตรากผ่านท่อโปร่งใสที่ติดตั้งในคันดิน การถ่ายภาพความร้อนในภาคสนาม (ตรวจจับอินฟราเรดความร้อน) สามารถให้การตรวจสอบความสัมพันธ์ของพืชกับการเปลี่ยนแปลงของน้ำในดินได้ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของใบสามารถบ่งบอกถึงการคายน้ำ เนื่องจากการคายน้ำทำให้ผิวใบเย็นลง จากการใช้พลังงาน (เช่น ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ) เพื่อเปลี่ยนน้ำเหลวให้เป็นไอน้ำ เครื่องมือวัดเฉพาะจุดทั้งปริมาณน้ำและแรงดึงของน้ำในดินข้างต้นสามารถทำการตรวจวัดค่าเหล่านี้ได้แม่นยำ แต่ก็มีข้อจำกัดเรื่องจำนวนของเครื่องมือตรวจวัด การวัดโดยการถ่ายภาพความร้อนถือเป็นวิธีใหม่ที่จะช่วยในการตรวจสอบข้อมูลในสนามแบบคลุมพื้นที่ทำได้สะดวกขึ้น เครื่องมือวัดที่ติดตั้งในคันดินจะทำงานจากแบตเตอรี่และแผงโซลาร์เซลล์ (รูปที่ 23) เพื่อให้การตรวจวัดกระทำอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุดชะงักจากกรณีไฟฟ้าดับ และมีการเชื่อมต่อข้อมูลเพื่ออัปเดตข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตจากระบบเครือข่ายมือถือที่ติดตั้งครอบคลุมบริเวณคันดิน



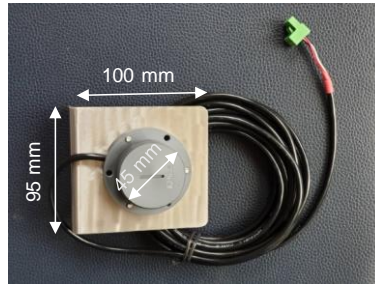
**Suction probe (total of 18)**  
Soil Water Potential: +700 to -90 kPa,  $\pm 0.5$  kPa



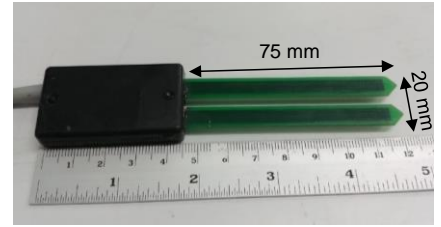
**Thermal camera (total of 1)**  
Resolution 120  $\times$  90 pixels  
Object Temperature: -20° to 250° C,  $\pm 2$ ° C



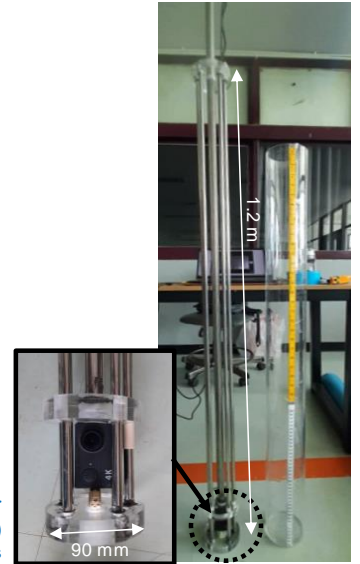
**MPS-6 (total of 6)**  
Soil Water Potential: -9 to -100,000 kPa,  $\pm 10\%$   
Soil Temperature: -40° to 60° C,  $\pm 1$ ° C



**Inclinometer (total of 6)**  
Inclination +15 to -15 degree,  $\pm 0.1$  degree

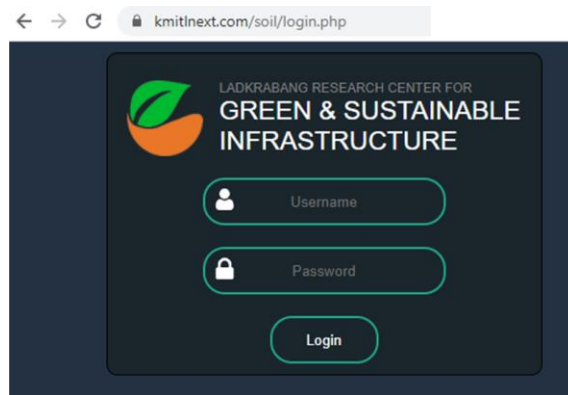


**Soil moisture probe (total of 18)**  
Soil Water content: 0 to 100 %,  $\pm 2\%$   
Soil Temperature: 0° to 80° C,  $\pm 1\%$



**Root/Crack observer (total of 1)**  
Resolution 6000 x 4000 pixels

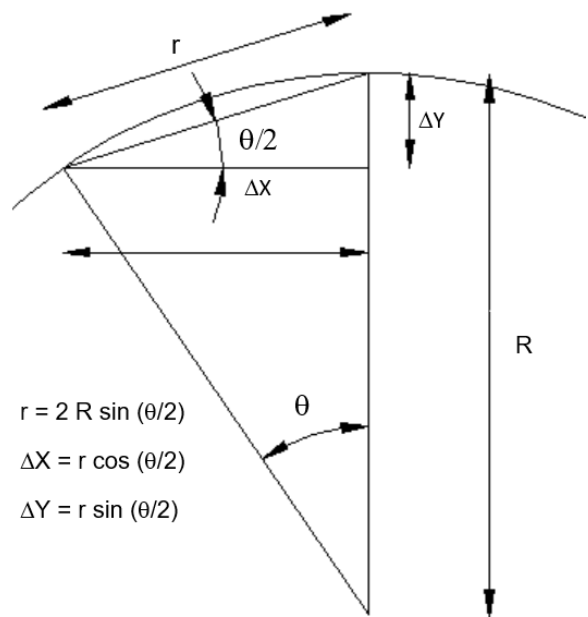
รูปที่ 22. เครื่องมือวัดพฤติกรรมของดินและหญ้า



รูปที่ 23. ตัวเก็บข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต

### เครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของคันดิน

การเคลื่อนตัวของคันดินในระหว่างการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลนั้น มีการใช้เครื่องวัดความเอียง (Inclinometer) เป็นตัวตรวจวัด โดยติดตั้งที่กึ่งกลางของแต่ละลาดดิน เครื่องวัดความเอียงเป็นเครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดขนาดของมุมเอียง เมื่อยึดกับแท่งเหล็กตรงและติดตั้งเข้ากับคันดินแล้ว การเคลื่อนที่ของผิวดินสามารถคำนวณได้จากมุมเอียงและความยาวของแท่งเหล็กตรง (รูปที่ 24) นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งเครื่องหมายสำรวจตามแนวลาดดิน เพื่อทำการหาตำแหน่งปัจจุบันของคันดินจากการสำรวจ (รูปที่ 25) ที่มิววิจัยยังได้ทำการเช่นอุปกรณ์ถ่ายภาพทางอากาศแบบไร้คนขับ (Unmanned aerial vehicle; UAV) เพื่อทำการเก็บภาพการเปลี่ยนแปลงรายเดือน รวมถึงการนำภาพมาสร้างแบบจำลองสามมิติโดยอาศัยหลักการรังวัดด้วยภาพดิจิทัล (Digital photogrammetry) ในโปรแกรม Meshroom (AliceVision) (รูปที่ 26)



รูปที่ 24. การติดตั้งเครื่องวัดความเอียงที่คันดิน และการคำนวณการเคลื่อนตัวในแนวตั้งและราบ



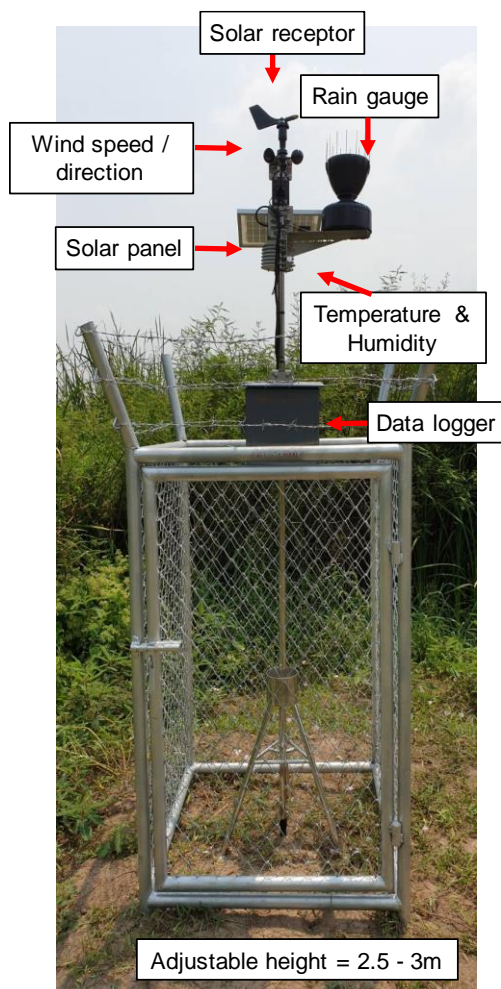
รูปที่ 25. การติดตั้งเครื่องหมายสำรวจ และการรังวัดคันดิน



รูปที่ 26. การสร้างแบบจำลองสามมิติจากถ่ายภาพทางอากาศ

## เครื่องมือวัดสภาพภูมิอากาศ

สำหรับสภาพภูมิอากาศ จะมีการติดตั้งสถานีตรวจอากาศ (รูปที่ 27) ติดกับคันดิน เพื่อบันทึกอุณหภูมิอากาศ ความชื้น ความเร็วลม รั้งสีดวงอาทิตย์ ค่าเหล่านี้ใช้ในการประมาณการระเหยที่อาจเกิดขึ้น เครื่องมือวัดทั้งหมดข้างต้นจะเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูลด้วยการเชื่อมต่อโมเด็ม GSM ซึ่งใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ 12 V และชาร์จใหม่ด้วยแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 10 วัตต์



Weather station

รูปที่ 27. สถานีตรวจอากาศในบริเวณคันดิน



## บทที่ 4 ผลการวิจัย และอภิปรายผล

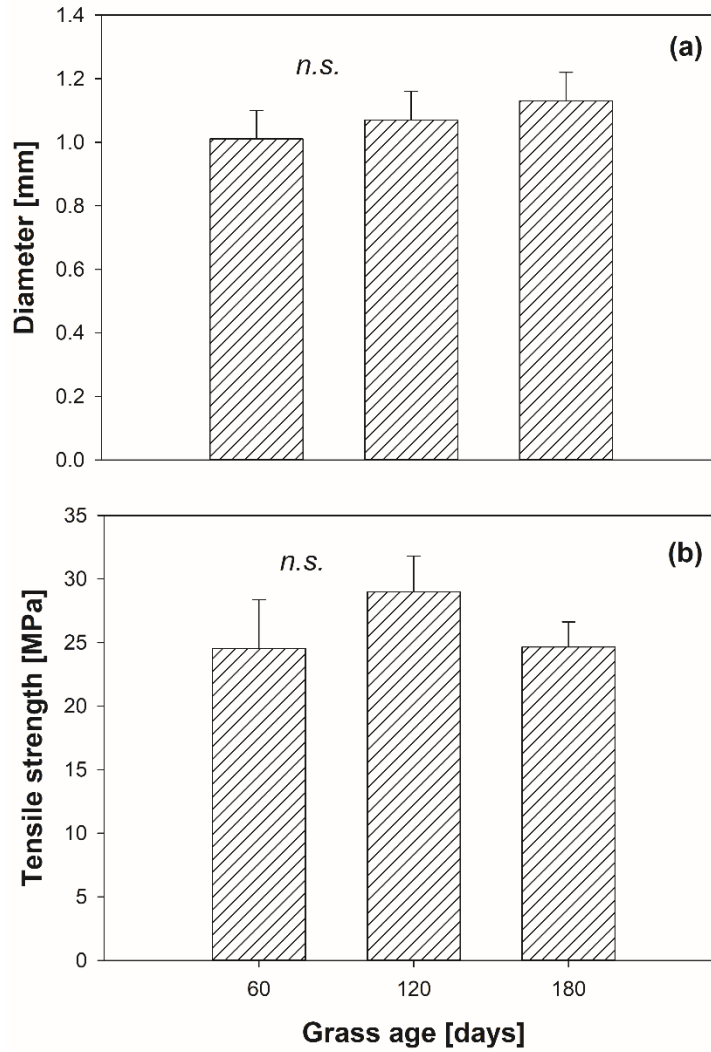
### 4.1. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ของราก

ภายในช่วงการเจริญเติบโต 180 วัน เส้นผ่านศูนย์กลางรากเฉลี่ยและกำลังรับแรงดึงคือ  $2.14 \pm 0.10$  มม. และ  $26.05 \pm 1.71$  MPa ตามลำดับ (ตารางที่ 1) แม้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางรากเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอายุของหญ้า (รูปที่ 28a) ทั้งเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและกำลังรับแรงดึงไม่ได้แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในช่วงการเจริญเติบโตทั้งหมด (เช่น 60, 120 และ 180 วันรูปที่ 28a, b) . สำหรับช่วงการเจริญเติบโตใด ๆ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงและเส้นผ่านศูนย์กลางของรากจะเป็นไปตามกฎกำลังเชิงลบ ( $R^2 > 0.60$ ; รูปที่ 29 และ ตารางที่ 1)

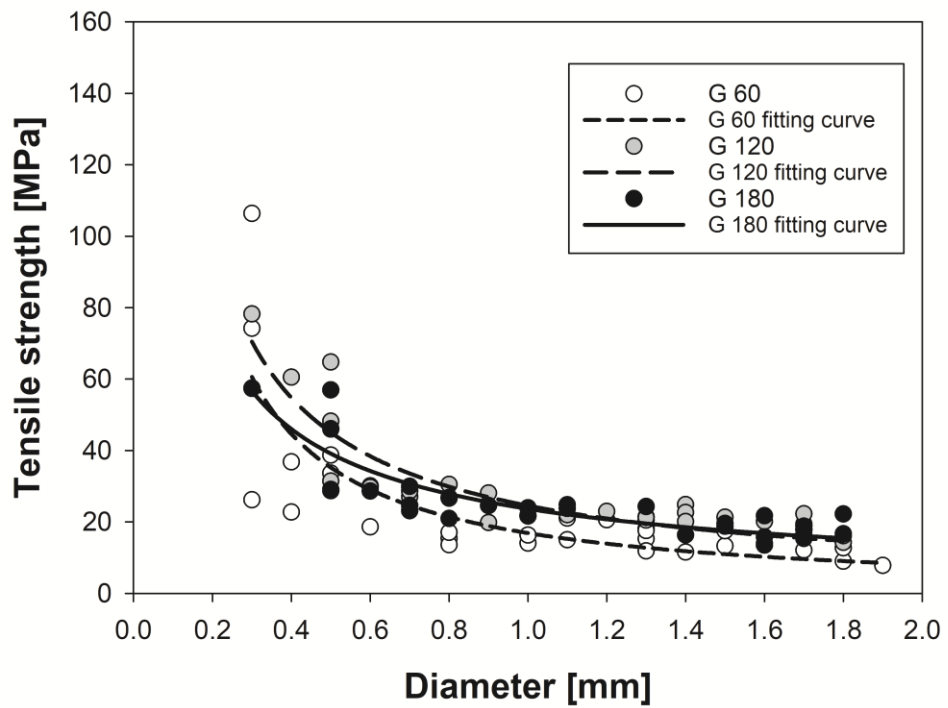
ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินของหญ้า อยู่ระหว่าง 17.5% - 70.6% และ 1.0% - 37.2% ตามลำดับ แตกต่างจากเส้นผ่านศูนย์กลางของรากและความแข็งแรงของราก ระยะเวลาการเจริญเติบโตมีผลกระทบต่อปริมาณเซลลูโลสและลิกนินระหว่าง 60 ถึง 120 วันของการเจริญเติบโตของหญ้า (ค่า  $p < 0.001$ ; รูปที่ 30a, b) อย่างไรก็ตามไม่มีความแตกต่างทางสถิติหลังจากผ่านไป 120 วัน รูปที่ 31 แสดงให้เห็นว่าปริมาณเซลลูโลสมีความสัมพันธ์เชิงลบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (รูปที่ 31a) ในทางตรงกันข้ามปริมาณลิกนินไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (รูปที่ 31b)

ตารางที่ 1. สรุปเส้นผ่านศูนย์กลางรากเฉลี่ยและกำลังรับแรงดึง

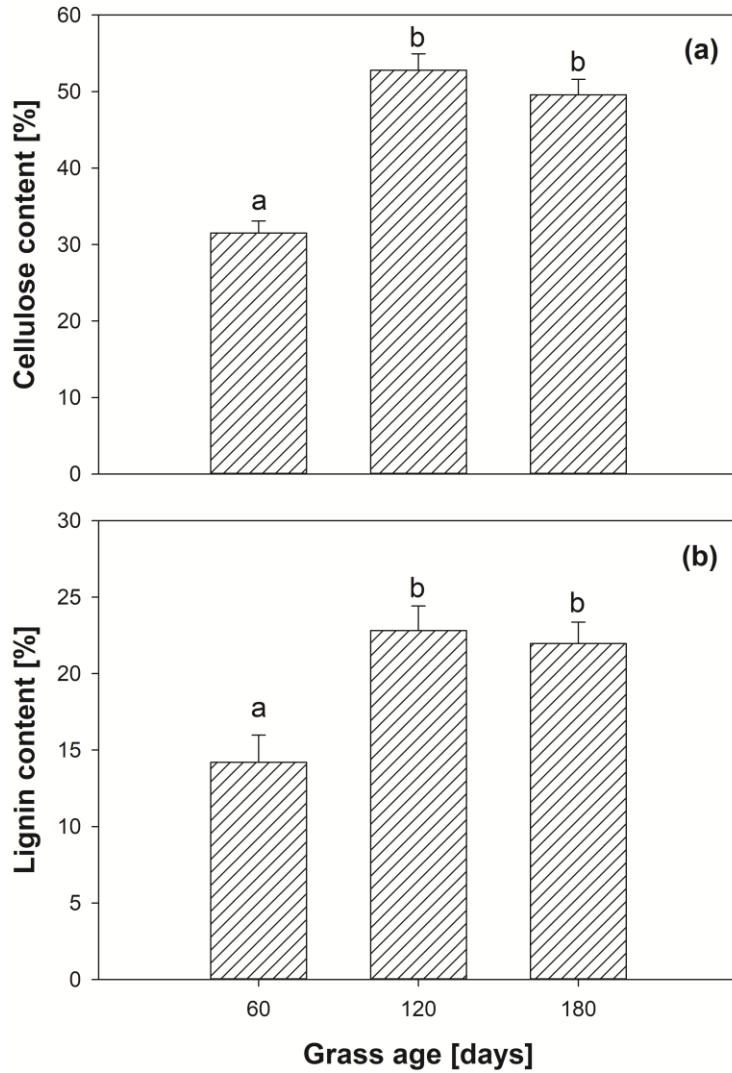
Treatment	Range of $d$ , mm	n	$T_r$ , MPa	Fitting equation	$p$ -value	$R^2$
G60	0.1 – 1.9	30	$24.54 \pm 3.84$	$T_r = 16.85d^{-1.06}$	$< 0.001$	0.64
G120	0.3 – 1.8	30	$28.98 \pm 2.82$	$T_r = 24.52d^{-0.88}$	$< 0.001$	0.80
G180	0.3 – 1.8	30	$24.64 \pm 1.99$	$T_r = 23.66d^{-0.73}$	$< 0.001$	0.77



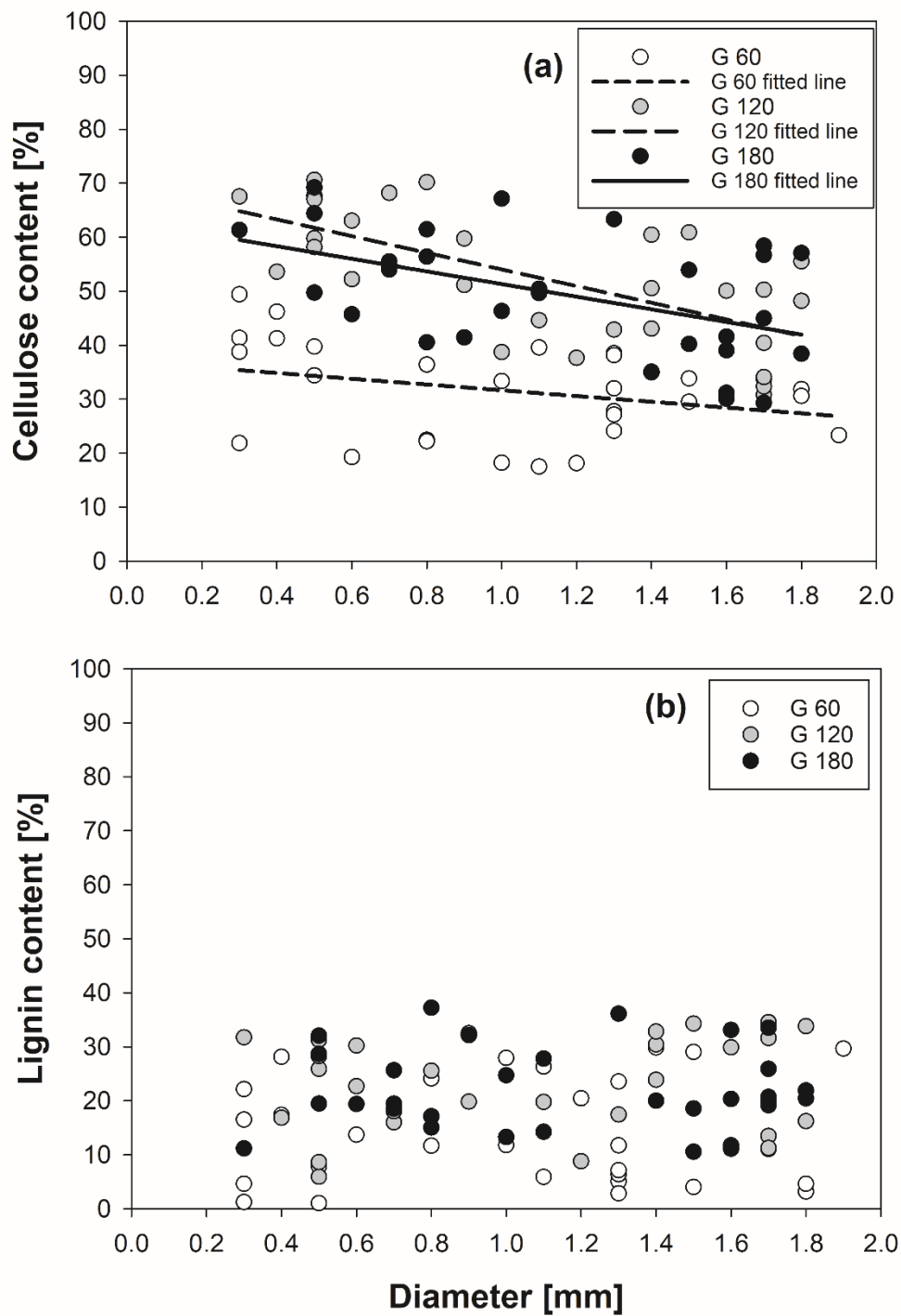
รูปที่ 28. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและกำลังรับแรงดึงของรากในช่วงการเจริญเติบโต



รูปที่ 29. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงและเส้นผ่านศูนย์กลางของราก



รูปที่ 30. ปริมาณเซลลูโลสและลิกนินของรากในช่วงการเจริญเติบโต



รูปที่ 31. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเซลลูโลส (a), ลิกนิน (b) และเส้นผ่านศูนย์กลางของราก

จากการทดสอบกำลังรับแรงดึงของราก (ตารางที่ 1) นั้น พบว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วงกำลังรับแรงดึงที่มักพบในงานวิจัยที่ผ่านมาที่ทดสอบกับหญ้าที่มีระบบรากฝอย (Comino et al 2010; Loades et al 2013; Boldrin et al. 2021, Wu et al. 2021) อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงสูงสุดส่วนใหญ่จะแตกต่างกันไปแต่ละพันธุ์ของหญ้า ตัวอย่างเช่นในขณะที่ Boldrin et al. (2021) รายงานค่ากำลังรับแรงสูงสุดที่น้อยกว่า 40 MPa ในหญ้าชนิดที่พบได้ทั่วไปในยุโรป, Comino et al (2010) รายงานค่าความแข็งแรงสูงถึง 365 MPa สำหรับสายพันธุ์ที่คล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตามควรสังเกตว่าช่วงของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ทดสอบของหญ้าต่างๆที่รายงานในเอกสารนั้นแตกต่างกันมาก เมื่อพิจารณาช่วงเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกัน (เช่น 0.1 - 1.9 มม.) รากที่ทดสอบในการศึกษาปัจจุบันโดยทั่วไปจะมีค่าความแข็งแรงสูงสุดใกล้เคียงกับที่รายงานโดย Boldrin et al (2021)

อายุหญ้า (เช่น 60 ถึง 180 วัน) มีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่อความต้านทานแรงดึงของราก แม้ว่าค่ามัธยฐานของความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นตามอายุหญ้า (เช่น 17.5 MPa หลังจาก 60 วัน 22.3 MPa หลังจาก 120 วัน 22.7 MPa หลังจาก 180 วัน) แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างตัวอย่างรากจากหญ้าที่มีอายุต่างกัน อย่างไรก็ตามรากจากตัวอย่างเดียวกัน อาจมีอายุแตกต่างกัน (เช่น ทั้งส่วนรากแก่และส่วนอ่อน) แนวโน้มของความแข็งแรงของรากตามอายุของพืช อาจอธิบายได้จากจำนวนรากที่มีอายุมากขึ้น ซึ่งมีปริมาณเซลลูโลสและลิกนินมากกว่า อันที่จริงการศึกษาก่อนหน้านี้เกี่ยวกับรากฝอยพบว่ามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมากอันเป็นผลมาจากอายุของราก (Dumlao et al. 2015, Loades et al. 2015, Boldrin et al. 2021) การศึกษาเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของรากเมื่ออายุมากขึ้นเป็นผลมาจากการสะสมของเซลลูโลสและลิกนิน ในการศึกษาปัจจุบันพบว่าการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณเซลลูโลสและลิกนินตามอายุหญ้า (รูปที่ 30) สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่ากลางของความต้านทานแรงดึงและยังสอดคล้องกับสมมติฐานก่อนหน้านี้ในงานวิจัยที่ผ่านมา (Dumlao et al. 2015, Loades et al. 2015, Boldrin et al. 2021)

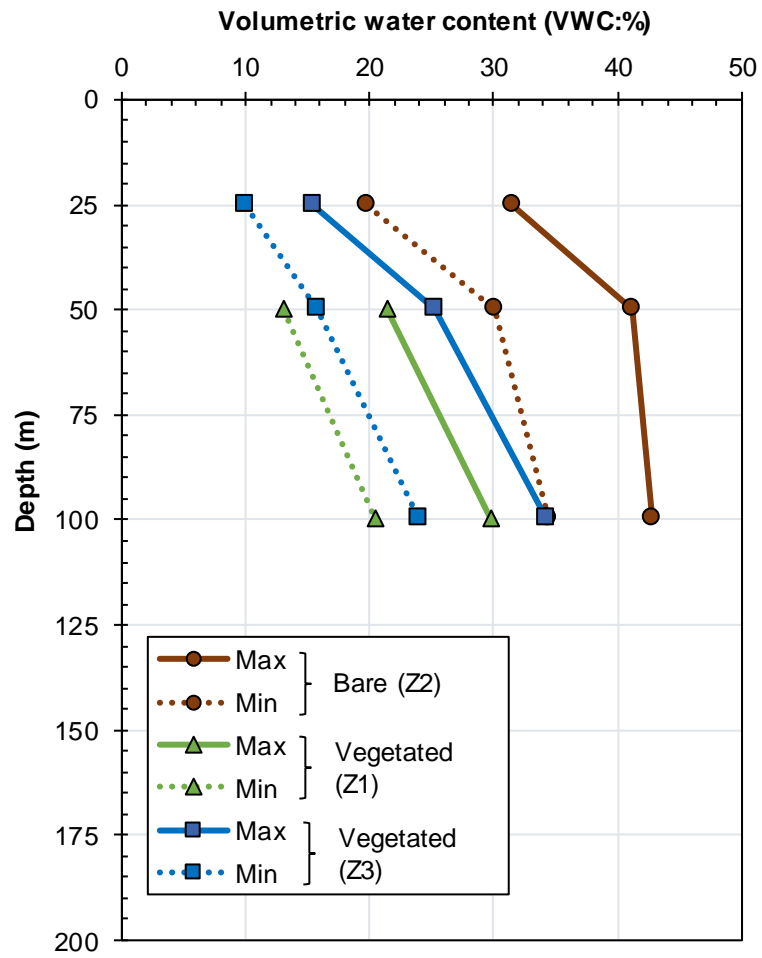
นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรง - เส้นผ่านศูนย์กลางของรากยังใกล้เคียงค่าที่พบได้ทั่วไปในงานวิจัยที่ทดสอบจากรากที่มีระบบรากฝอย (Mao et al. 2012) ความสัมพันธ์แบบนี้เกิดเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อเยื่อรากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน (Genet et al. 2005 Zhang et al. 2014) โดยในรากขนาดเล็กจะมีองค์ประกอบของเซลลูโลสในสัดส่วนที่มากกว่า ทำให้ผลของกำลังรับแรงมีค่ามากขึ้นเป็นสัดส่วนกันไป Zhang et al. (2014) อธิบายความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางและกำลังรับแรงด้วยการลดลงของอัตราส่วนลิกนิน - เซลลูโลสกับความหนาของราก สำหรับรากเส้นใยในการศึกษานี้ พบว่าทั้งกำลังรับแรงดึงและปริมาณการเซลลูโลสลดลงอย่างสม่ำเสมอโดยการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (รูปที่ 31a) สอดคล้องกับ Genet et al (2548). ในทางตรงกันข้ามปริมาณลิกนินไม่มีสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางรากที่ชัดเจน (รูปที่ 31b) ควรสังเกตว่ารากหญ้าไม่มีไซเลม ดังนั้นจึงไม่มีเนื้อเยื่อที่อุดมด้วยลิกนินเช่นรากไม้ของต้นไม้ (Cutler et al. 2009, Roumet et al. 2016)

## 4.2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน

### การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินตามความลึก

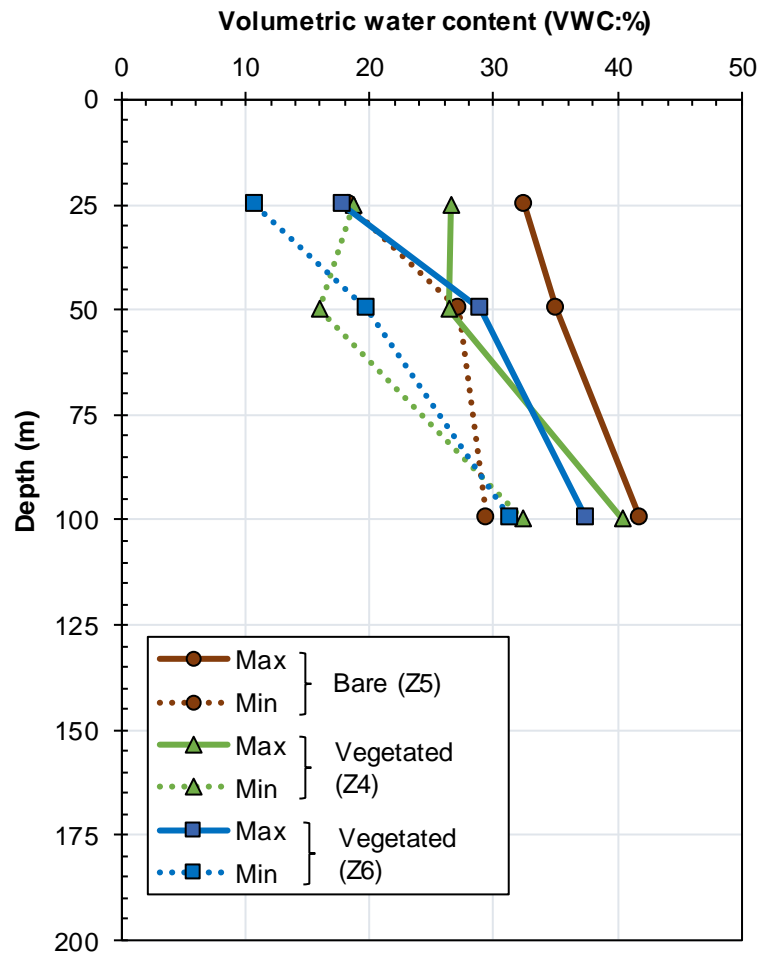
จากการทดสอบในสนาม มีการติดตั้งเครื่องมือวัดปริมาณน้ำในดินตามลาดดิน ที่มีทั้งบริเวณที่มีการปลูกหญ้าและไม่ได้ปลูกหญ้าเปรียบเทียบกัน ความก้าวหน้าในปัจจุบัน ทางที่มิวิจัยได้ทำการตรวจวัดผลในช่วงฤดูร้อนที่ผ่านมาเป็นเวลา 3 เดือน คือช่วง กุมภาพันธ์ ถึง เมษายน 2564 โดยที่ไม่มีการให้น้ำแก่คันดิน พบว่าปริมาณน้ำในดินมีค่าเปลี่ยนแปลงในรอบวัน รูปที่ 32 แสดงผลของปริมาณน้ำในดินที่มีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดในรอบสามเดือน ตามระดับความลึกของลาดดินแต่ละโซน เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา จากรูปจะเห็นได้ว่า ปริมาณน้ำในดินบริเวณที่มีการปลูกหญ้าโดยทั่วไปจะมีปริมาณน้อยกว่าบริเวณที่ไม่ได้ปลูกหญ้าทั้งในระดับต้นและระดับที่ลึกลงไปในช่วงสามเดือนของการตรวจวัด โดยปริมาณน้ำในดินเฉลี่ยในระดับที่ตื้นที่สุดของบริเวณที่ปลูกหญ้าและไม่ได้ปลูกหญ้าจะมีค่าประมาณ 13% และ 16% ตามลำดับ ทั้งนี้อาจจะเกิดเนื่องจากต้นหญ้าได้มีการดูดคายน้ำ ทำให้ปริมาณน้ำในดินลดลงมากกว่าการระเหยของน้ำจากผิวดินเพียงอย่างเดียวในบริเวณที่ไม่มีการปลูกหญ้า จากรูปยังแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ปริมาณน้ำในดินบริเวณที่ไม่ปลูกหญ้าจะมีค่ามากกว่า แต่การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำจากค่าสูงสุดและต่ำสุดของบริเวณนี้ก็มีความใกล้เคียงกัน โดยค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมากกว่า 12% เมื่อเทียบกับบริเวณที่มีการปลูกหญ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย น้อยกว่า 5% ทั้งนี้อาจจะเกิดเนื่องจากปริมาณความชื้นที่รากกักเก็บไว้เองสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่รุนแรงในดิน อีกทั้งส่วนใบของรากยังมีพื้นที่ปกคลุมผิวดิน ช่วยลดอัตราการระเหยที่เกิดขึ้นอีกด้วย

และเมื่อทำการเปรียบเทียบลาดดินที่มีความแตกต่างกัน (รูปที่ 33) ไม่ว่าจะคันดินจะมีความชันมากหรือน้อย จะพบว่าผลการตรวจวัดมีค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ปริมาณและการเปลี่ยนแปลงของน้ำในดินบริเวณที่มีการปลูกหญ้าจะมีค่าน้อยกว่าบริเวณที่ไม่มีการปลูกหญ้า เมื่อความชันเพิ่มขึ้น (Z4 – Z6) ความแตกต่างของปริมาณน้ำในดินทั้งที่ปลูกและไม่ปลูกหญ้าก็จะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากผลของการไหลแบบสองมิติมีผลเด่นชัดขึ้นในลาดดินที่มีความชันมากขึ้นนั่นเอง และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจากงานวิจัยในสหราชอาณาจักร (รูปที่ 34) งานวิจัยนี้มีการตรวจวัดจากบริเวณที่มีหญ้าและไม่ยืนต้นปกคลุมบนดินเหนียวลอนดอน พบว่าปริมาณน้ำในบริเวณที่ปลูกหญ้ามีค่าต่ำกว่าบริเวณที่ไม่ได้ปลูกหญ้าเช่นเดียวกัน โดยปริมาณน้ำในค่าอยู่ระหว่าง 25 – 45% ในช่วงฤดูร้อน ซึ่งสูงกว่าที่พบในการศึกษานี้ประมาณเกือบเท่าตัว ทั้งนี้ดินที่ใช้ในงานวิจัยดังกล่าวเป็นดินที่มีเม็ดละเอียดมาก ดังนั้นปริมาณน้ำในดินเฉลี่ยจะมากกว่าดินเหนียวกรุงเทพฯที่ใช้ในโครงการนี้ ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน พบว่าบริเวณที่มีการปลูกพืชมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำมากกว่าในระดับต้น และความแตกต่างจะลดลงในระดับที่ลึกขึ้นไป ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากปริมาณความต้องการน้ำที่แตกต่างกันไปของหญ้าและต้นไม้แต่ละสายพันธุ์ และหญ้าที่อยู่ในงานวิจัยนี้มีลักษณะรากที่สั้นกว่าหญ้าแฝก จึงทำให้ผลกระทบของการดูดคายน้ำมีเฉพาะในระดับต้น

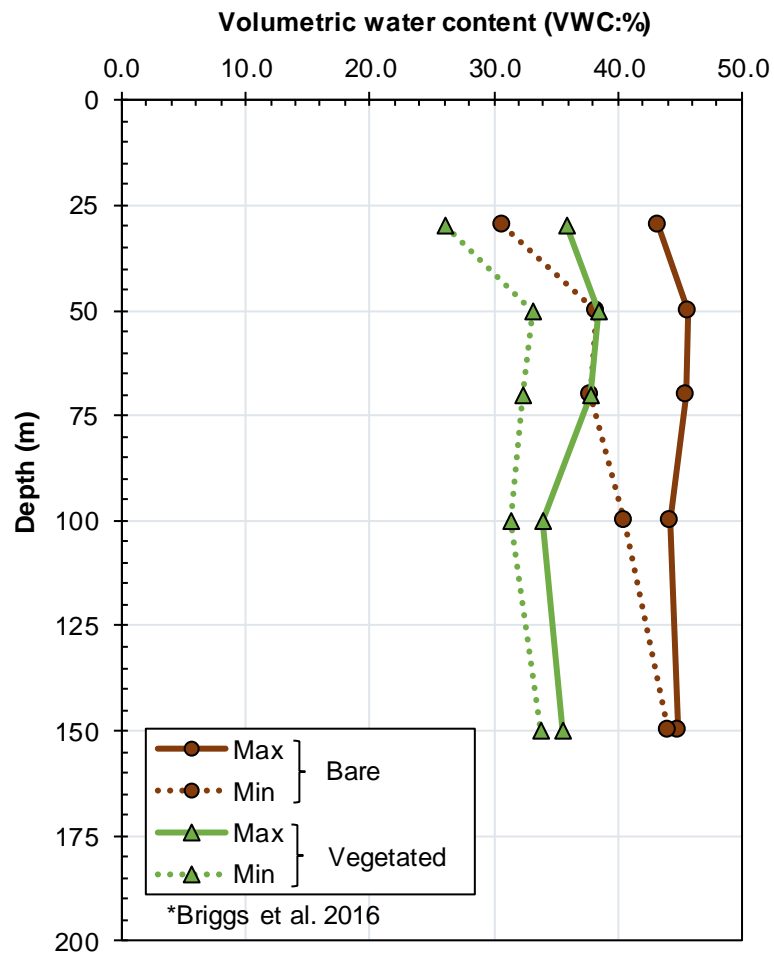


รูปที่ 32. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดินตามระดับความลึกในโซน 1 - 3



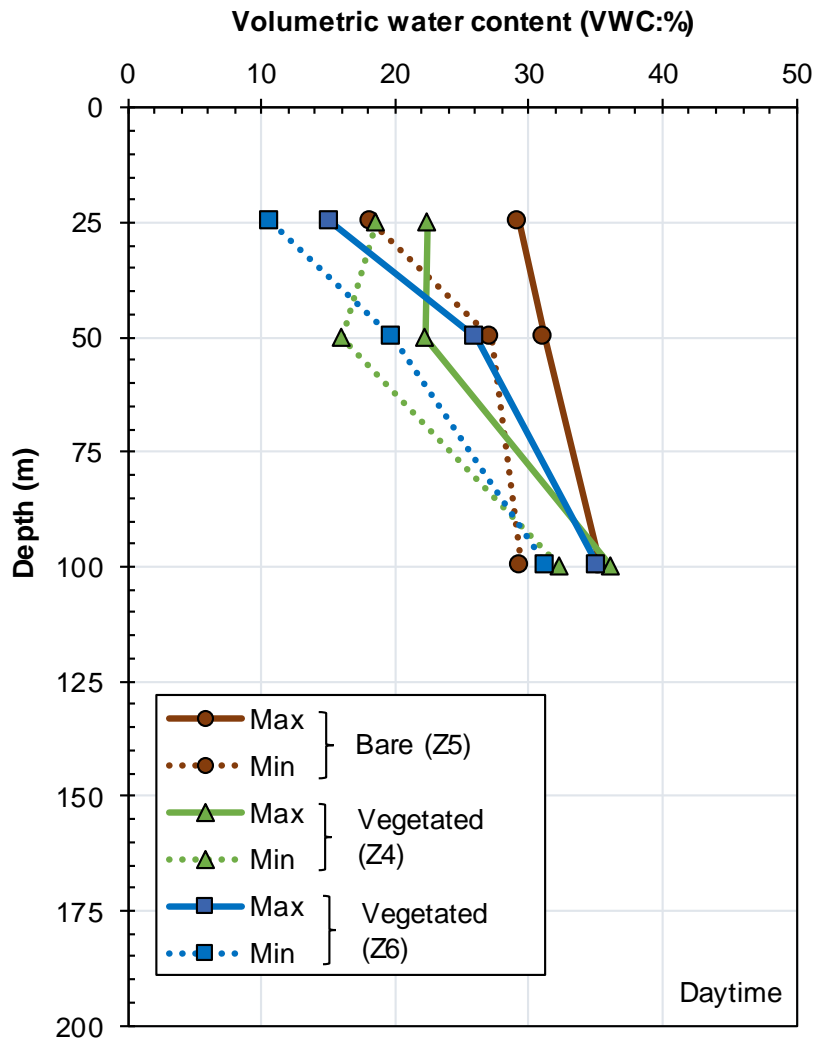


รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดินตามระดับความลึกในโซน 4 - 6

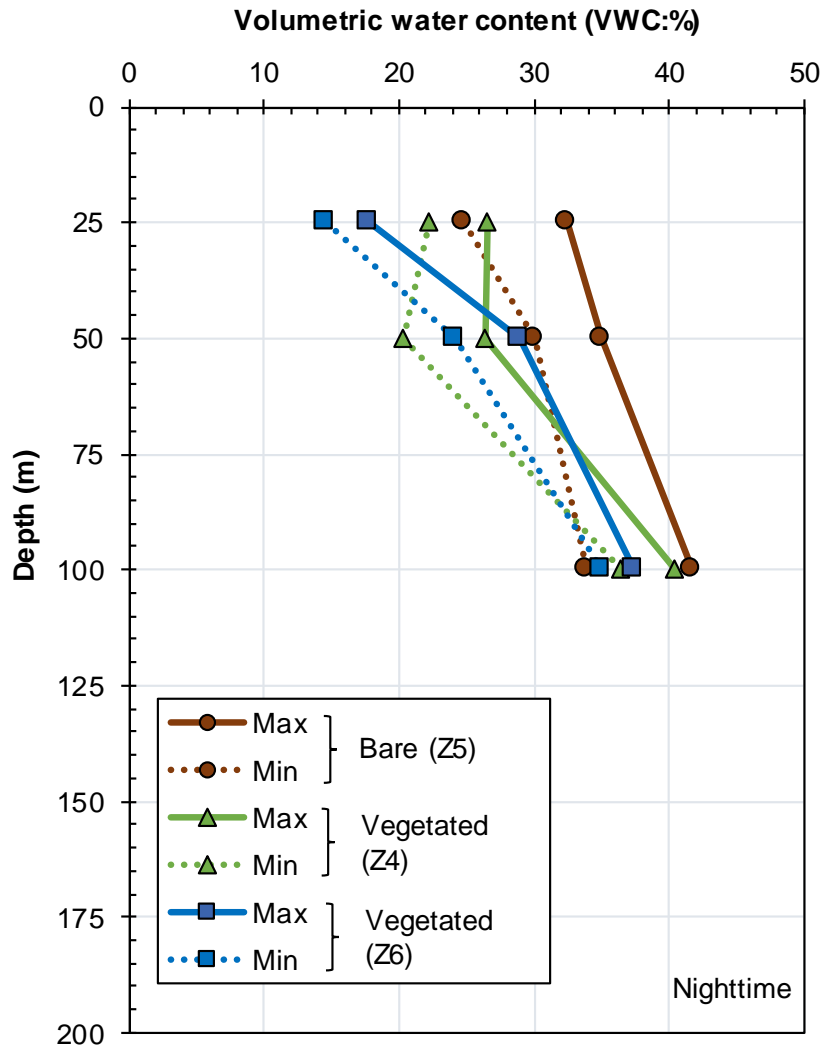


รูปที่ 34. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดินตามระดับความลึกจากงานวิจัยของ Briggs et al. (2016)

การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินช่วงกลางวันและกลางคืน



รูปที่ 35. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดินช่วงกลางวันตามระดับความลึกในโซน 4 - 6



รูปที่ 36. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดินช่วงกลางคืนตามระดับความลึกในโซน 4 – 6

จากผลการตรวจวัดช่วงกลางวันและกลางคืน ดังรูปที่ 35 และ 36 บริเวณที่มีการปลูกและไม่ปลูกหญ้ามีปริมาณความชื้นโดยรวมมากขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงเวลากลางวัน แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำในดินที่ต่ำลงในช่วงกลางวันนั้น ขึ้นอยู่กับอัตราการระเหย รวมถึงการคายน้ำในบริเวณที่มีการปลูกพืชที่เกิดในช่วงกลางวัน เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นตามระดับความลึก เช่นในบริเวณดินเปล่า ที่มีความลึกน้อยกว่า 0.5 เมตรขึ้นไป จะเห็นว่าปริมาณน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากโดยเฉพาะในช่วงกลางวัน แสดงให้เห็นว่าผลของระเหยจากผิวดินมีผลมากในช่วงบริเวณความลึกนี้ แต่เมื่อเทียบกับบริเวณปลูกหญ้า จะเห็นว่าปริมาณน้ำในดินมีการเปลี่ยนแปลงเท่าๆกันทั้งช่วงกลางวันและกลางคืน และมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าบริเวณที่ไม่มีการปลูกพืช ดังนั้นถึงแม้ว่าผลของการคายน้ำจากรากพืชชั้นนั้นมีผลในการลดปริมาณน้ำ แต่พืชก็ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในดินไม่ให้มากเกินไปเหมือนเช่นการระเหย

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้เสนอแนะว่าหญ้าแฝกมีประโยชน์ในการเพิ่มกำลังรับแรงของดินโดยการหยั่งรากลึกสู่ผิวดิน จากผลการตรวจวัดในช่วงที่ผ่านมา ซึ่งให้เห็นถึงความสำคัญของหญ้าแฝกที่นอกเหนือจากงานวิจัยที่ผ่านมา ผลการตรวจวัดชี้ให้เห็นว่า หญ้าแฝกยังสามารถช่วยลดปริมาณน้ำในดินให้อยู่ในระดับเฉลี่ยที่ต่ำกว่า และมีผลถึงระดับความลึกที่มากกว่า เมื่อเทียบกับบริเวณที่ไม่มีการปลูกหญ้า ปริมาณน้ำในดินที่น้อยลงจะช่วยเพิ่มแรงดึงของน้ำในดินที่มากขึ้นและส่งผลดีต่อการเพิ่มกำลังรับแรงของดิน อีกทั้งยังชี้ให้เห็นถึงเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินที่ลดลงด้วยเมื่อเทียบกับบริเวณที่ไม่มีการปลูกหญ้า ทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืน ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบต่อการหดและขยายตัว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดินจากคันดินโครงสร้างพื้นฐาน โดยเฉพาะคันดินที่สร้างจากวัสดุที่มีค่าความเป็นพลาสติกมาก เช่น ดินเหนียว

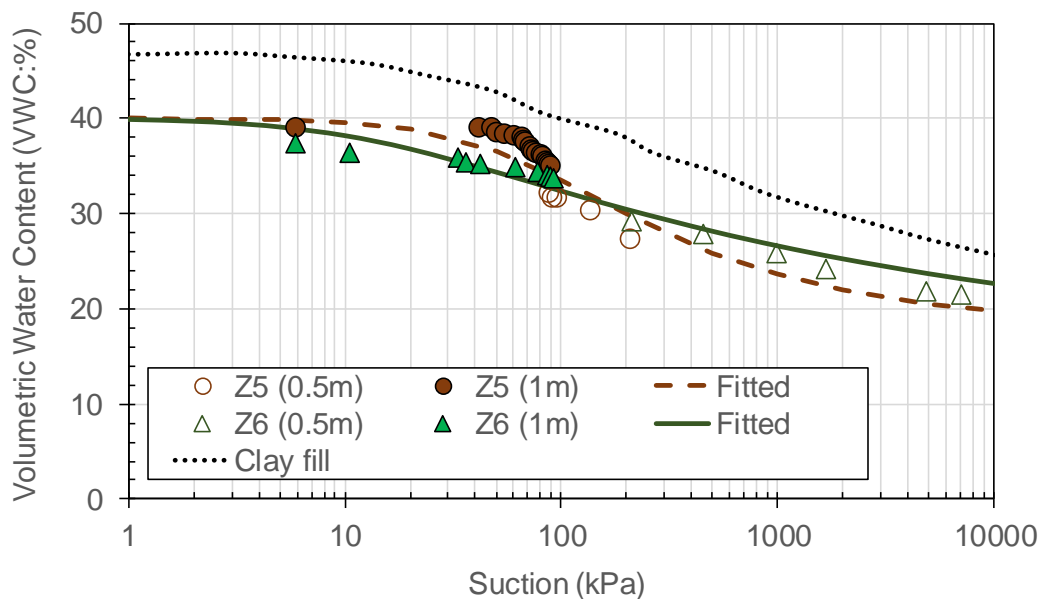
### เส้นโค้งการกักเก็บน้ำของดิน

เนื่องจากการศึกษานี้มีการติดตั้งทั้งตัววัดปริมาณน้ำและแรงดึงของน้ำในดิน จึงสามารถหาเส้นโค้งการกักเก็บน้ำของดิน (Soil water retention curve: SWRC) ที่มีการปลูกพืชและดินเปล่าได้ เส้นโค้งนี้มีความสำคัญที่จะบอกความสามารถในการกักเก็บน้ำในดิน และสามารถนำไปประกอบการวิเคราะห์การไหลของน้ำ (Hydraulic conductivity) ในดินที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated soil) รูปที่ 37 แสดงเส้นโค้งการกักเก็บน้ำของดินเปรียบเทียบกันระหว่างบริเวณที่ไม่มีการปลูกและมีการปลูกหญ้า (โซน 5 และ 6 ตามลำดับ) โดยแรงดึงของน้ำในช่วง 0 – 100 kPa วัดจากตัววัดแรงดันน้ำในดิน (Tensiometers) สำหรับการวัดแรงดูดที่สูงกว่า 90kPa จะทำการวัดจาก MPS-6 (หรือ TERO21) ในบริเวณโซน 5 และ 6

จากผลการตรวจวัดพบว่า สำหรับบริเวณที่ไม่มีการปลูกหญ้ามียเส้นโค้งการกักเก็บน้ำของดินใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ทดสอบในดินเหนียวอม (Briggs et al. 2013) โดยมีค่าปริมาณน้ำในดินต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากดินเหนียวกรุงเทพฯที่ใช้ในโครงการนี้มีลักษณะเม็ดหยาบกว่าดังเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อน อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าค่าแรงดันที่อากาศเข้าได้ (Air entry value) มีค่าประมาณ 20 kPa ซึ่งมากกว่าดินเหนียวอมจากงานวิจัยของ Briggs et al. (2013) แสดงให้เห็นว่าการบดอัดในโครงการนี้มีความหนาแน่นมากกว่าทำให้อากาศเข้าสู่ช่องว่างเม็ดดินได้ลำบาก ซึ่งค่านี้ตกอยู่ในช่วงที่พบได้สำหรับดินเหนียวอมบดอัด ที่จะมีค่าตั้งแต่ 10 – 100 kPa ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและการคละขนานของเม็ดดิน เมื่อแรงดึงน้ำในดินมีค่ามากกว่าแรงดันที่อากาศเข้าได้ ดินจะเริ่มเข้าสู่พฤติกรรมแบบไม่อิ่มน้ำ การลดลงของปริมาณน้ำในช่วงเปลี่ยนแปลง (Transition zone) พบว่ามีความชันใกล้เคียงกับดินเหนียวอมจากงานวิจัยของ Briggs et al. (2013) เนื่องจากความชันในช่วงการเปลี่ยนแปลงมีค่ามาก ดินอาจจะมียลักษณะแบบสองเส้นความชัน (Bimodel SWRC) ได้ ทั้งนี้เส้นโค้งการกักเก็บน้ำของดินแบบสองเส้นความชันมักเกิดขึ้นได้ถ้าดินที่ถมบดอัดมีการคละขนานมากขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดช่องว่างในเม็ดดินที่มีขนาดแตกต่างกันมาก (Seki 2007) เพียงแต่ว่าการตรวจวัดยังจำกัดเพียงแค่ค่าแรงดึงน้ำที่ประมาณ 200 kPa จึงยังให้ข้อสรุปที่ชัดเจนไม่ได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณน้ำในดินที่ความลึกต่างกัน จะเห็นว่ามีความต่างของปริมาณน้ำในดินระหว่าง 0.5 เมตร และ 1 เมตร (กราฟไม่ต่อเนื่องกัน) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าดินที่มีความคั้น

มากขึ้น (อยู่ในระดับความลึกมากขึ้น) จะมีค่าปริมาณน้ำในดินที่สูงกว่า (Ng and Peng, 2011) ทั้งนี้เนื่องมาจากความเค้นที่กระทำต่อดินแตกต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณช่องว่างของเม็ดดินเปลี่ยนไปแม้จะเป็นดินชนิดเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าจากผลการวัดในบริเวณที่ปลูกหญ้า จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันที่อากาศเข้าได้ (Air entry value) มีค่าน้อยกว่า 10 kPa แสดงว่าอากาศสามารถเข้าสู่ดินได้แม้ตั้งแต่ดินที่มีค่าแรงดึงน้ำไม่สูงมาก ดินจะเริ่มเข้าสู่พฤติกรรมแบบไม่อุ้มน้ำทันที เมื่อเทียบกับในช่วงที่พบได้สำหรับดินเหนียวถมบดอัด ที่จะมีค่าตั้งแต่ 10 – 100 kPa ทั้งนี้จะเกิดจากการที่มีรากหญ้าขนานไขเข้าสู่ดิน เกิดช่องว่างมากขึ้นและทำให้อากาศสามารถเข้าสู่ดินได้สะดวกขึ้น อย่างไรก็ตามการลดลงของปริมาณน้ำในช่วงเปลี่ยนแปลง (Transition zone) พบว่ามีค่าลดลงช้ากว่าเมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้ปลูกหญ้า แสดงให้เห็นความสำคัญของรากหญ้าแฝกที่ส่งผลต่ออัตราคงค้างและอัตราการไหลของน้ำในดิน ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาเมื่อวิเคราะห์เสถียรภาพและการใช้งานของโครงสร้างพื้นฐาน เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณน้ำในดินที่ความลึกต่างกัน จะเห็นว่าความต่างของปริมาณน้ำในดินระหว่าง 0.5 เมตร และ 1 เมตรมีค่าลดลง หรือก็คือมีความต่อเนื่องของข้อมูลที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้ปลูกหญ้า ทำให้เห็นว่าผลของการมีรากมีอิทธิพลมากกว่าผลของความเค้นที่มีต่อเส้นโค้งการกักเก็บน้ำของดิน เพื่อให้สามารถนำผลตรวจวัดไปจำลองในโปรแกรมต่อไป จำเป็นต้องทำการสอบเทียบสมการเส้นโค้งการกักเก็บน้ำนี้ ทั้งที่บริเวณที่ปลูกและไม่ปลูกหญ้า โดยวิธีที่นิยมใช้ได้แก่สมการของ van-Genuchten model โดยค่าตัวแปรสอบเทียบได้แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 37. แสดงเส้นโค้งการกักเก็บน้ำของดินระหว่างบริเวณที่มีการปลูกและไม่มีการปลูกหญ้า

ตารางที่ 2. สรุปลค่าตัวแปรสอบเทียบเส้นโค้งการกักเก็บน้ำของดิน

van-Genuchten's parameter	$\theta_s$ [%]	$\theta_r$ [%]	$\alpha$ [ $kPa^{-1}$ ]	$n$ [-]	$m$ [-]
Z5	40	18	0.015	1.50	0.33
Z6	40	15	0.070	1.18	0.15

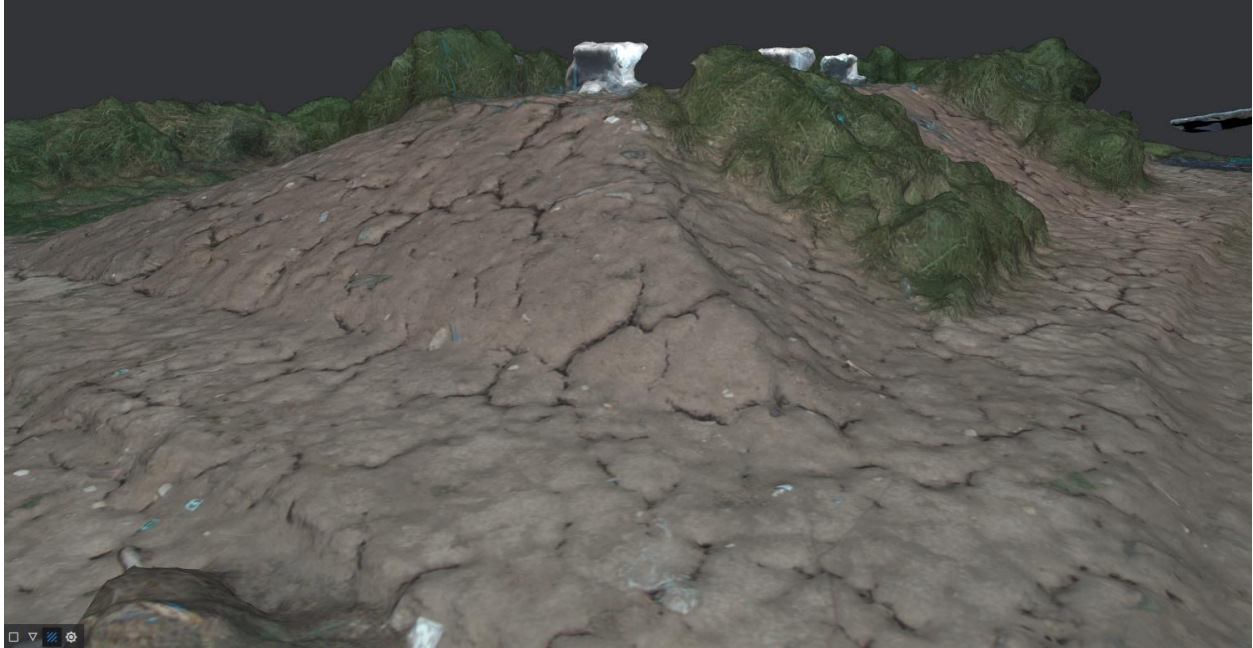
#### 4.3 ผลการเคลื่อนตัวและรอยแตกของคันดินในสนาม

##### แบบจำลองสามมิติของคันดิน

ทีมวิจัยได้ทำการรวบรวมภาพถ่ายทางอากาศเพื่อนำมาวิเคราะห์สร้างแบบจำลองสามมิติ ซึ่งในช่วงแรกพบว่าภาพถ่ายทางอากาศมีมิติที่ไม่เพียงพอ ทำให้ผลที่ได้รับเมื่อเปรียบเทียบกับการรังวัดแล้วได้ผลที่ไม่ละเอียดเพียงพอ (ค่าความคลาดเคลื่อนโดยประมาณ 50 เซนติเมตร) เมื่อทำการรวบรวมภาพถ่ายทางอากาศให้มีจำนวนมากเพียงพอ ซึ่งปัจจุบันคือจำนวนมากกว่า 60 ภาพ (ค่าความคลาดเคลื่อนโดยประมาณ 5 เซนติเมตร) และปรับให้มีมุมมองการเก็บภาพที่หลากหลายมากขึ้น ทำให้ได้แบบจำลองสามมิติของคันดินที่มีความน่าเชื่อถือ รูปที่ 38 คือแบบจำลองที่สร้างจากเดือนเมษายนในช่วงการตรวจวัดฤดูร้อน โดยทางซ้ายมือเป็นภาพถ่ายทางอากาศในมุมมองจากด้านบน ภาพทางขวามือเป็นภาพจากแบบจำลองสามมิติในมุมมองเดียวกัน ในรูปแสดงให้เห็นถึงสภาพคันดินและสิ่งปลูกสร้างโดยรอบที่ชัดเจน เทียบได้กับภาพที่ถ่ายได้จริง โดยเมื่อทำการเปลี่ยนมุมมองให้ใกล้มากขึ้น จากรูปที่ 39 จะเห็นได้ว่า แบบจำลองสามมิติสามารถจำลองสภาพผิวดินได้ชัดเจน รวมถึงตำแหน่งรอยแตกตามคันดิน หรือ รอยกัดเซาะของคันดินที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามจะสังเกตเห็นว่าแบบจำลองสามมิตินี้มีข้อจำกัดในบริเวณที่ปลูกหญ้า เนื่องจากมีหญ้าปกคลุมทั่วพื้นผิวและเป็นการยกต่อโปรแกรมที่จะทำการวิเคราะห์สภาพพื้นผิวได้ ดังนั้นแบบจำลองสามมิตินี้ จึงเหมาะสมแก่การใช้วัดการเคลื่อนตัวของคันดิน และเปรียบเทียบกับการรังวัดและจากการตรวจวัดของเครื่องมืออื่นๆ โดยการอ้างอิงตำแหน่งจะกระทำเฉพาะพื้นผิวดินเท่านั้น



รูปที่ 38. แบบจำลองสามมิติเทียบกับภาพถ่ายทางอากาศ



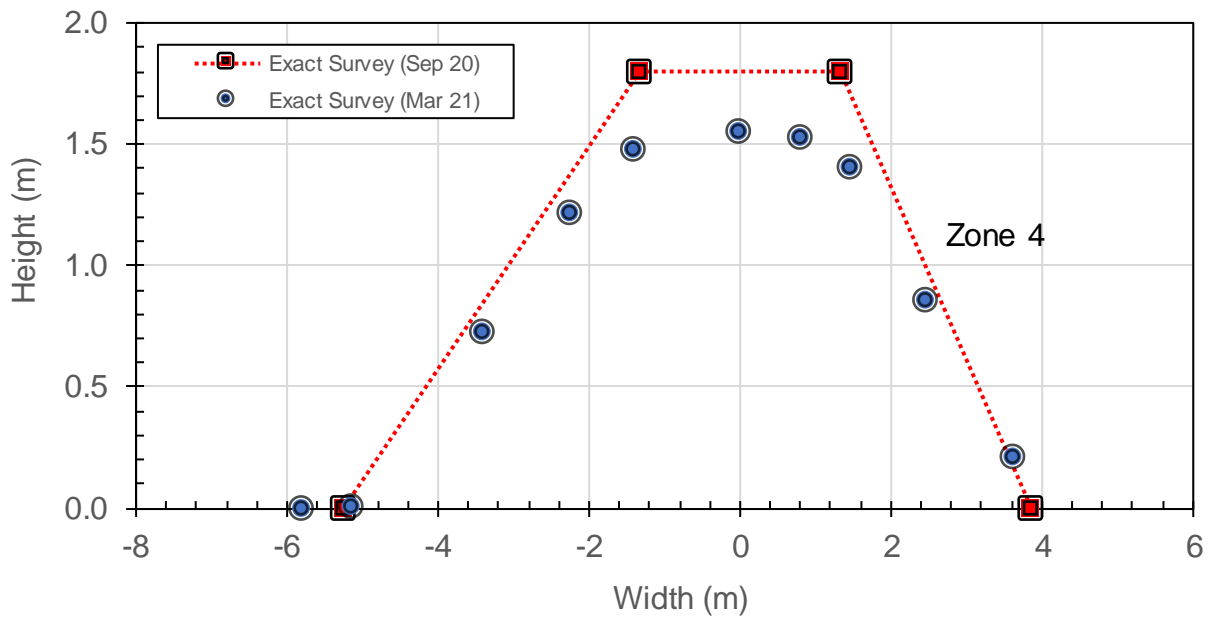
รูปที่ 39. รูปมุมมองใกล้ของแบบจำลองสามมิติที่แสดงรอบแตกและรอยกัดเซาะ

#### การเคลื่อนตัวของคันดินในช่วงฤดูร้อน

รูปที่ 40 – 42 แสดงรูปตัดการเคลื่อนตัวของคันดินตามบริเวณต่างๆ ตั้งแต่หลังก่อสร้างคันดินช่วงกันยายน 2563 จนถึง ช่วงฤดูร้อน มีนาคม 2564 โดยแบ่งการตรวจวัดเป็นจากการรังวัด เทียบกับรูปตัดของแบบจำลองสามมิติ จากผลการเคลื่อนตัวจะเห็นว่าคันดินทุกบริเวณมีการเคลื่อนตัว มุมลาดเอียงของคันดินมีค่าลดลงเช่นกันในทุกบริเวณ การเคลื่อนตัวนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากคันดินเพิ่งมีการก่อสร้าง การอัดตัวคายน้ำด้วยน้ำหนักของคันดินเองก็ดี การได้รับน้ำครั้งแรก (first wetting) ช่วงปลายฤดูฝนของคันดินก็ดี จึงมีผลทำให้เกิดการเคลื่อนตัวมากในช่วง 6 เดือนแรกหลังการก่อสร้าง แต่ทุกบริเวณไม่มีการเสถียรภาพหรือการพังทลายของหน้าดิน เมื่อพิจารณาผลจากการรังวัดเทียบกับผลของแบบจำลองสามมิติ พบว่ามีศทางการเคลื่อนตัวมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้เราสามารถใช่แบบจำลองสามมิติเพื่อร่วมสังเกตการเคลื่อนตัวในโครงการนี้ได้ ทั้งนี้การทรุดตัวและเคลื่อนตัวในบริเวณโซน 1 และ 4 อาจจะมีค่ามากกว่าในบริเวณอื่นได้ เนื่องจากมีตำแหน่งติดกับแหล่งน้ำและไม่มีแรงเสริมจากดินบริเวณข้างเคียง

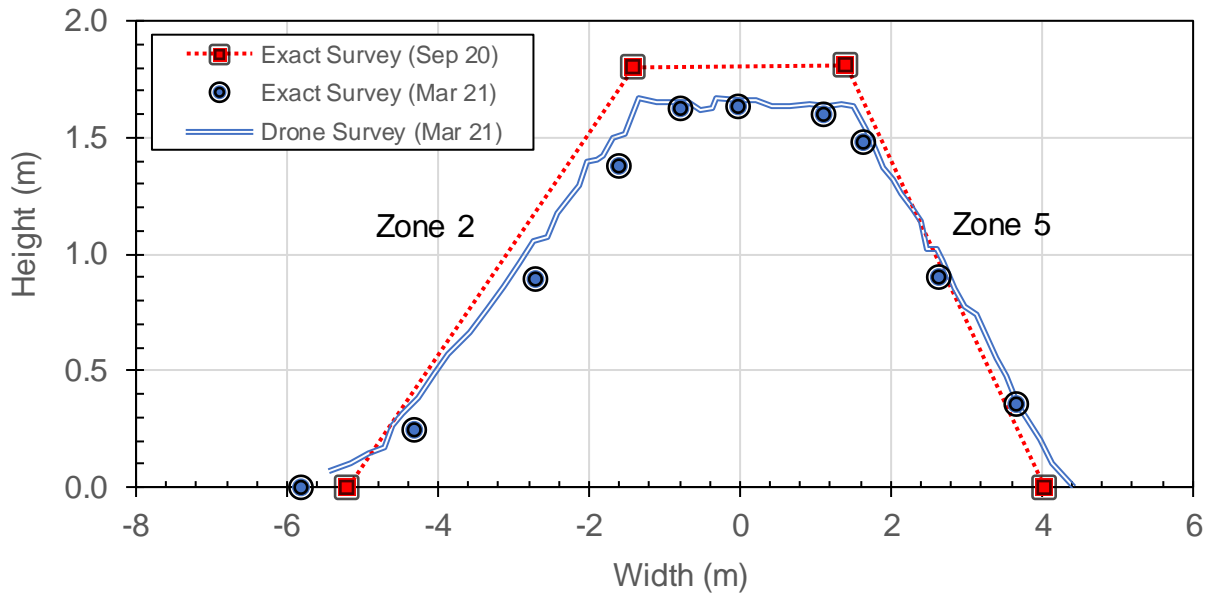


Cross Section 1 (Zone 1 - 4)



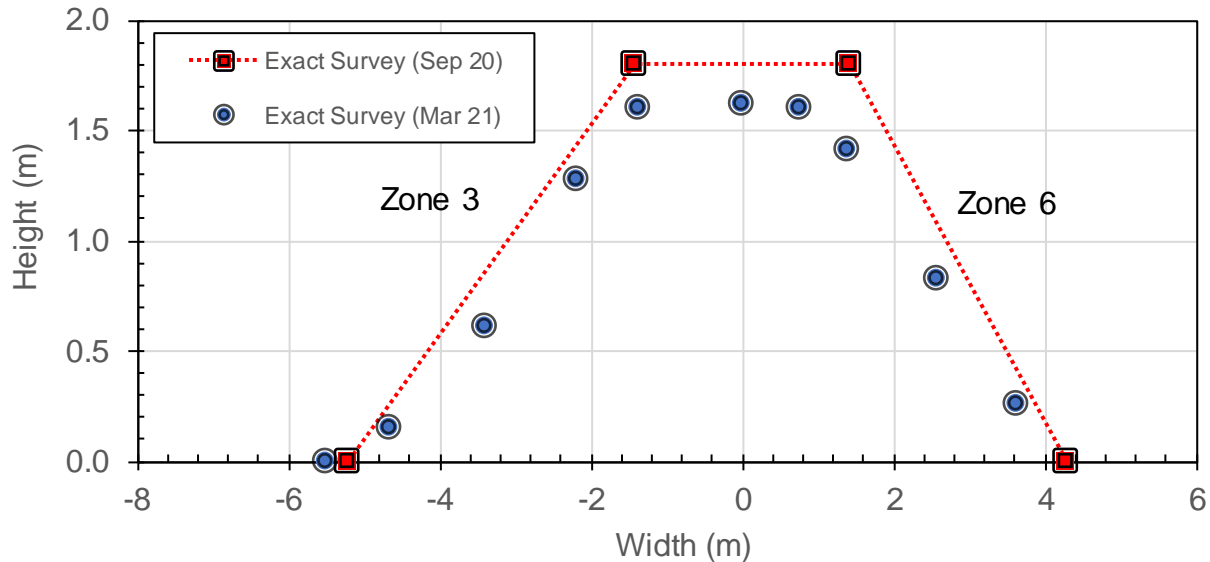
รูปที่ 40 รูปตัดการเคลื่อนตัวของคันดินในบริเวณโซน 1 และ 4

Cross Section 2 (Zone 2 - 5)



รูปที่ 41 รูปตัดการเคลื่อนตัวของคันดินในบริเวณโซน 2 และ 5

### Cross Section 3 (Zone 3 - 6)

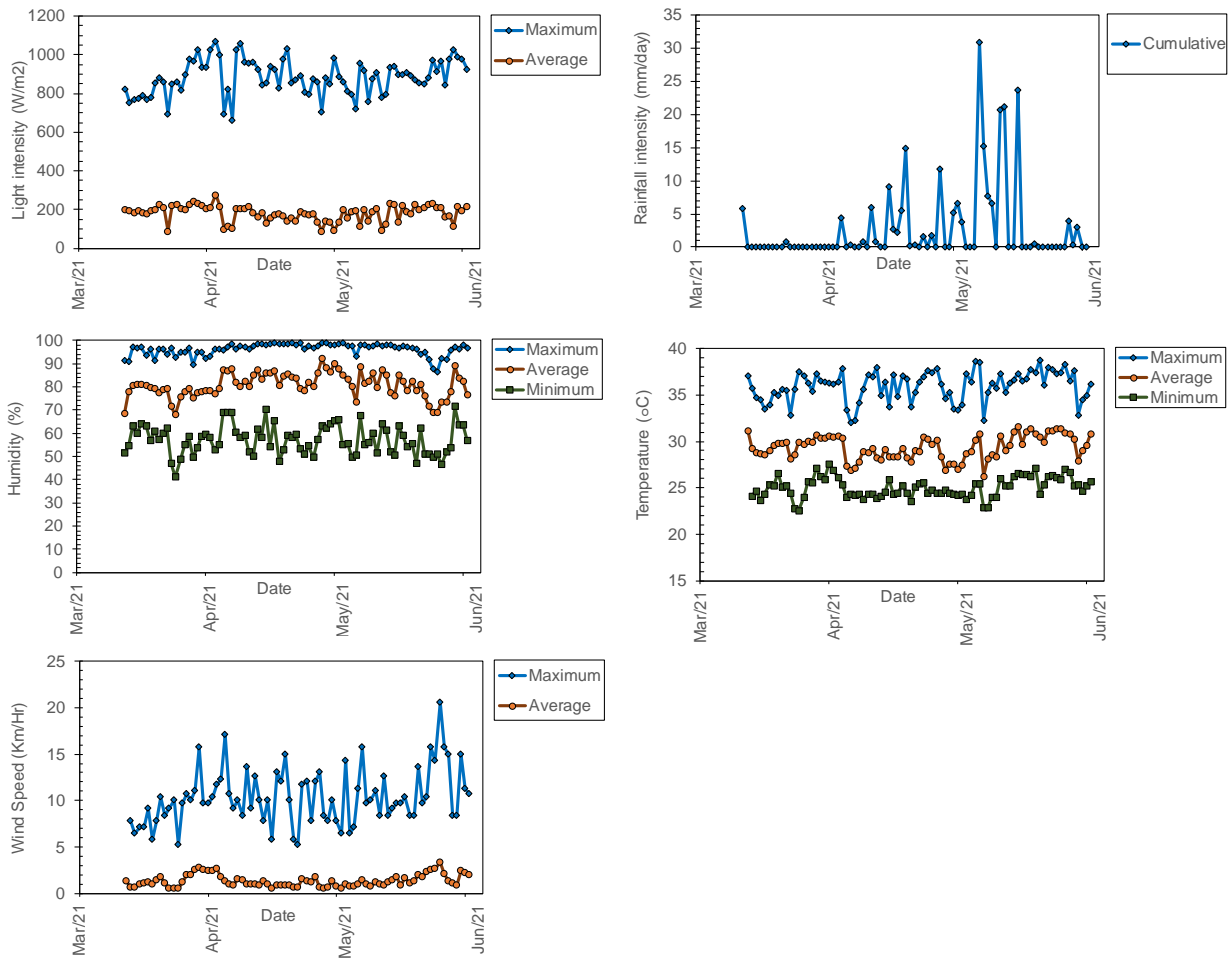


รูปที่ 42 รูปตัดการเคลื่อนตัวของคันดินในบริเวณโซน 3 และ 6

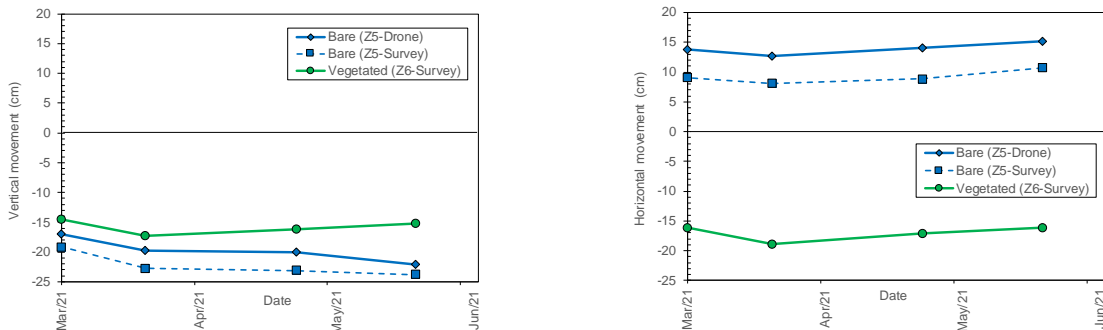
นอกจากนี้ รูปที่ 43 และ 44 แสดงสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการทดลองเทียบกับการเคลื่อนตัวของคันดินในช่วงฤดูร้อน โดยค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นนั้นเทียบกับค่าระดับเริ่มต้นจากหลังการก่อสร้างคันดินเสร็จในช่วงกันยายน 2563 (เป็นระดับที่ 0) ผลจากการวัดระดับแสดงให้เห็นว่าคันดินมีการทรุดตัวมากตั้งแต่หลังก่อสร้างเสร็จ จนถึงต้นเดือนมีนาคม 2564 จากสาเหตุการอัดตัวคายน้ำและการได้รับน้ำครั้งแรงดังที่กล่าวไว้ หากแต่เมื่อมีการปลูกหญ้าในบริเวณที่กำหนดไว้ช่วงเดือนมกราคม ส่งผลให้ค่าการเคลื่อนตัวที่ตรวจวัดมีค่าแตกต่างกัน สำหรับการทรุดตัวนั้น มีค่าอยู่ประมาณ 15 เซนติเมตรในบริเวณที่มีการปลูกหญ้า และมีการทรุดตัวถึง 20 เซนติเมตร ในบริเวณที่ไม่มีการปลูกหญ้า จุดที่น่าสังเกตคือการเคลื่อนตัวออกของคันดินที่มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด ในบริเวณที่มีการปลูกหญ้ามีการเคลื่อนตัวเข้าสู่ลาดคันดินประมาณ 15 เซนติเมตร แทนที่จะเคลื่อนตัวออกประมาณ 15 เซนติเมตร เหมือนในบริเวณที่ไม่มีการปลูกหญ้า เมื่อนำค่าปริมาณน้ำมาพิจารณาประกอบ จะเห็นว่าพีชนั้นช่วยลดปริมาณน้ำในดิน ส่งผลให้ดินมีความแข็งแรงมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยทำให้ปริมาตรดินนั้นลดลง จึงทำให้เกิดการเคลื่อนตัวเข้าสู่ลาดคันดินนั่นเอง ทำให้สรุปได้ว่าการปลูกพืชในช่วง 3 เดือนแรกของการเจริญเติบโต ก็มีผลทำให้การทรุดตัวจากการอัดตัวคายน้ำและการได้รับน้ำนั้น ลดลงได้ถึงประมาณ 25% และยังช่วยลดการเคลื่อนตัวออกของคันดินที่อาจจะนำไปสู่การเสถียรภาพของลาดคันดินได้

โดยสภาพอากาศในช่วงเดือนมีนาคมมีความแล้งเกือบตลอดเดือน ทำให้การทรุดตัวและเคลื่อนตัวเข้าสู่ลาดดิน (ดินหดตัว) ทั้งในบริเวณที่มีการปลูกหญ้าและไม่ปลูกหญ้า แต่เมื่อเข้าสู่เดือนเมษายนนั้นได้เริ่มมีปริมาณฝนจากมรสุมและมีปริมาณมากขึ้นในช่วงเดือนพฤษภาคม เมื่อดูผลรว้งวัดในบริเวณที่มีการปลูกหญ้านั้น การทรุดตัวนั้นจะมีค่าน้อยลง และมีการเคลื่อนตัวออกเช่นกัน ทั้งนี้เพราะดินจะขยายตัวเมื่อได้รับปริมาณน้ำ แต่จากผลที่วัดได้ใน

บริเวณที่ไม่มีการปลูกหญ้า นั้น มีการทรุดตัวและเคลื่อนตัวออกอย่างต่อเนื่อง อาจกล่าวได้ว่าการอ่อนตัวและเคลื่อนตัวออกมีผลมากกว่าการขยายตัวจากน้ำ ทำให้เกิดการทรุดตัวโดยรวมเพิ่มนั่นเอง จากผลการตรวจวัดชี้ให้เห็นว่า ค้นดินที่มีการปลูกหญ้าและไม่มีการปลูกหญ้า มีการตอรับและเคลื่อนตัวแตกต่างกัน โดยในบริเวณที่ไม่มีการปลูกหญ้านั้นมีความเสี่ยงต่อเสถียรภาพมากขึ้น และผลจากการตรวจวัดในระยะแรกนี้ ชี้ให้เห็นหนทางความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหาการเคลื่อนตัวของค้นดินโดยวิธีชีววิศวกรรมดิน



รูปที่ 43 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศขณะทำการทดลองในช่วงฤดูร้อน



รูปที่ 44 การเคลื่อนตัวของค้นดินขณะทำการทดลองในช่วงฤดูร้อน

## บทที่ 5 ความก้าวหน้าโครงการและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปความก้าวหน้าของงานวิจัยฝั่งประเทศไทย

กิจกรรมการวิจัยในส่วนงาน B มีรายละเอียดดังแสดงผลในบทที่ 4 และตัวชี้วัดในส่วนงานนี้ได้แก่ (1) การเตรียมสถานที่และ (2) การตรวจสอบการตอบสนองของพืชและดินภายใต้สภาพอากาศที่แตกต่างกัน ความสำเร็จในปัจจุบัน ตัวชี้วัดในข้อแรกซึ่งเป็นการเตรียมพื้นที่ที่มีความก้าวหน้าของตัวชี้วัดคือ 100% มีการเตรียมพื้นที่สำหรับการตรวจสอบภาคสนามรวมถึงการสร้างคันดิน และหลุมทดสอบสำหรับตรวจลักษณะดิน มีการสั่งซื้อและปลูกหญ้าแฝกในบริเวณโซน 1, 3, 4 และ 6 อีกทั้งมีการเตรียมและติดตั้งเครื่องมือวัดทั้งหมดที่ใช้ในโครงการนี้

ตัวชี้วัดที่สองในเรื่องการตรวจวัดการตอบสนองของพืชและดินซึ่งกำลังดำเนินการอยู่ มีความก้าวหน้าของตัวชี้วัดคือ 30% โดยแบ่งเป็น การทดสอบกำลังรับแรงดึงของราก ส่วนงานนี้ได้ทำการตรวจวัดในช่วงการเติบโตของรากเสร็จสิ้นแล้ว กำลังเตรียมทดสอบในช่วงที่มีการเสื่อมสลายของราก ทีมวิจัยยังได้ทำการสำรวจการเปลี่ยนแปลงของหญ้าแฝก ปริมาณน้ำในดิน และการเคลื่อนตัวของคันดินในช่วงฤดูร้อน และกำลังเตรียมดำเนินการตรวจวัดในช่วงฤดูฝนต่อไป นอกจากนี้การจัดประชุมออนไลน์กลุ่มย่อยระหว่างทีมวิจัยไทยและจีนเป็นระยะ

สำหรับองค์ความรู้ใหม่ที่ได้จากงานวิจัยจนถึงปัจจุบัน ได้มีการรวบรวมเป็นบทความวิจัยและมีการส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ 2 ฉบับ

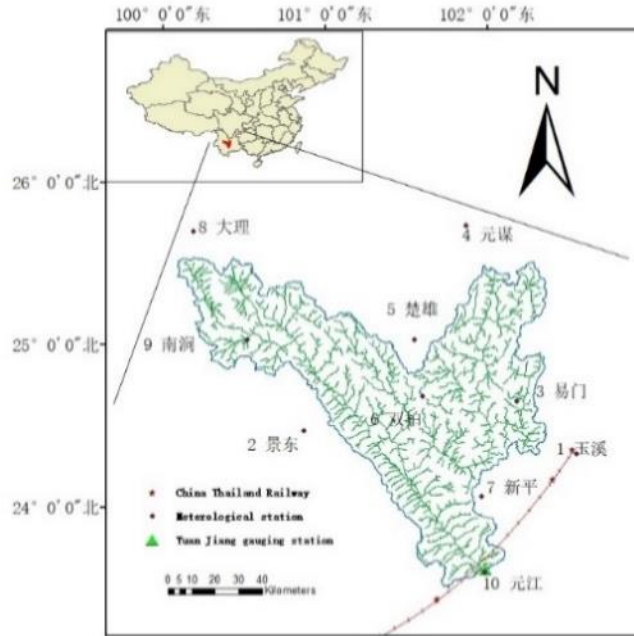
### 5.2 สรุปความก้าวหน้าของงานวิจัยฝั่งประเทศจีน

#### 5.2.1. ส่วนงาน A – ศึกษาลักษณะและความแปรปรวนของสภาพอากาศที่รุนแรงในภูมิภาคมรสุมเอเชีย

##### (1) ขอบเขตการวิจัย

พื้นที่วิจัยตามแนวรถไฟจีน-ไทย ต้นน้ำลำธารของกลุ่มน้ำหยวนเจียงในมณฑลยูนนาน (รูปที่ 45)

- เป็นเขตตอนบนในที่ราบสูงตอนกลาง
- เนื้อที่ลุ่มน้ำ 25,900 ตารางกิโลเมตร
- ความสูง 1,600-2200 เมตร
- อุณหภูมิเฉลี่ยทั้งปี 15-18°C
- ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยทั้งปี 800-1000 มม.
- ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาความชื้น 10 สถานีในกลุ่มน้ำหยวนเจียงตั้งแต่ปี 1971-2000
- ข้อมูลอุทกวิทยาของสถานีอุทกวิทยา Yuanjiang ตั้งแต่ปี 1991-2000



รูปที่ 45. ที่ตั้งของกลุ่มน้ำหยวนเจียงและสถานีอุตุนิยมวิทยา

(2) กำหนดแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

No	GCMs	Research institutions	spatial resolution
1	CanESM5	CCCMA, Canada	500km
2	MIROC6	MIROC, Japan	250km
3	IPSL-CM6A-LR	IPSL, France	250km
4	BCC-CSM2-MR	BCC, China	100km
5	MPI-ESM1-2-LR	MRI, Germany	250km

(3) GCMs (Global Climate Models) การแก้ไขค่าเบี่ยงเบน และการสร้างข้อมูลรวม

- วิธีการดาวนัสเกล BCS D ใช้เพื่อแก้ไขค่าเบี่ยงเบนและการลดขนาดของข้อมูล GCM ระหว่างปี 1971-2000 และข้อมูลปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ และความชื้นรายเดือนที่วัดได้ เพื่อประเมินความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของ GCM ในระดับรายเดือนเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิที่วัดได้หลังจากที่ค่าเบี่ยงเบนได้รับการแก้ไขแล้ว

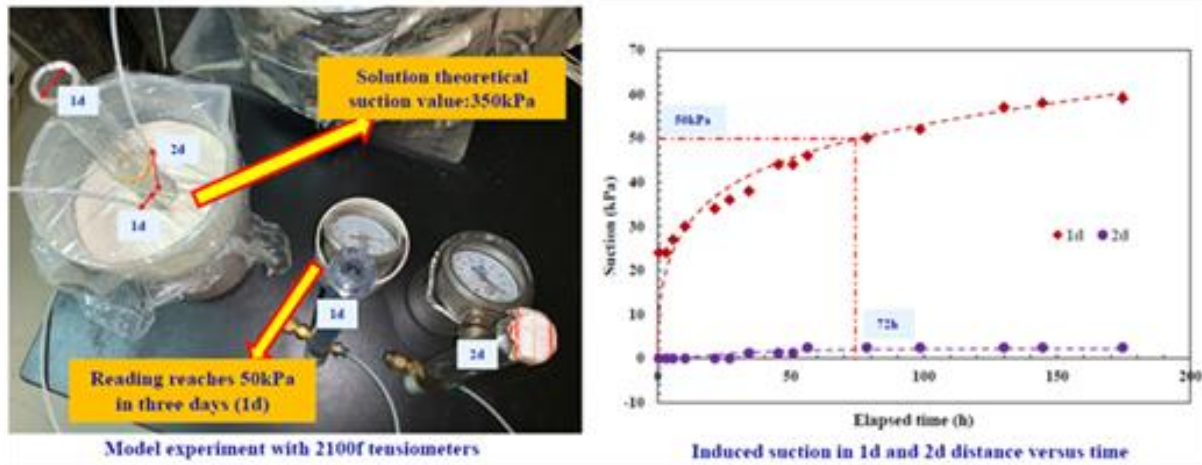
(4) ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อกระบวนการอุทกวิทยาของกลุ่มน้ำหยวนเจียง

- ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำฝน
- ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่ออุณหภูมิ
- ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการไหล

5.2.2. ส่วนงาน C – การจำลองคันดินที่มีพีซโดยใช้แบบจำลองหมุนเหวี่ยงภายใต้การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในระยะยาว

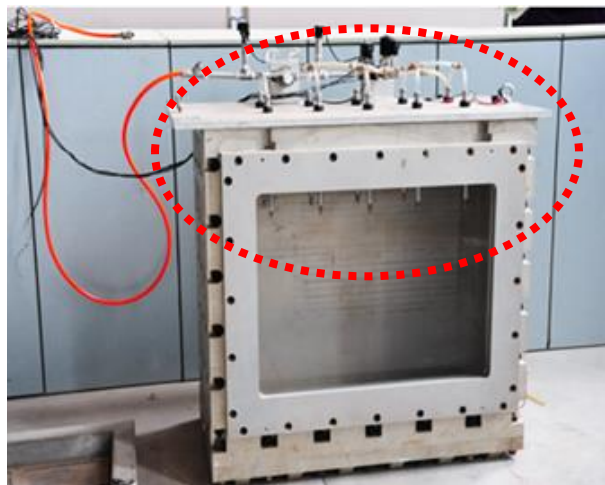
(1) การวิจัยและพัฒนาระบบจำลองการดูดน้ำของราก

- การจำลองนี้ใช้สารละลายโพลิเอทิลีนไกลคอลที่ซึมผ่านได้ และเมมเบรนแบบกึ่งซึมผ่าน เพื่อสร้างแรงดันออสโมติกที่ราก-ดิน ผลิตโดยการพิมพ์ 3 มิติ สามารถจำลองลักษณะโครงสร้างและลักษณะทางกลตามธรรมชาติ รูปแสดงผลลัพธ์ของแบบจำลองการดูดซึมน้ำรากด้วยแรงโน้มถ่วงปกติ



รูปที่ 46. ผลลัพธ์ของแบบจำลองการดูดซึมน้ำรากด้วยแรงโน้มถ่วงปกติ

(2) การวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ทดสอบ Drying-Wetting Cycle (ระบบจำลองภูมิอากาศ) ในการทดสอบ Centrifuge

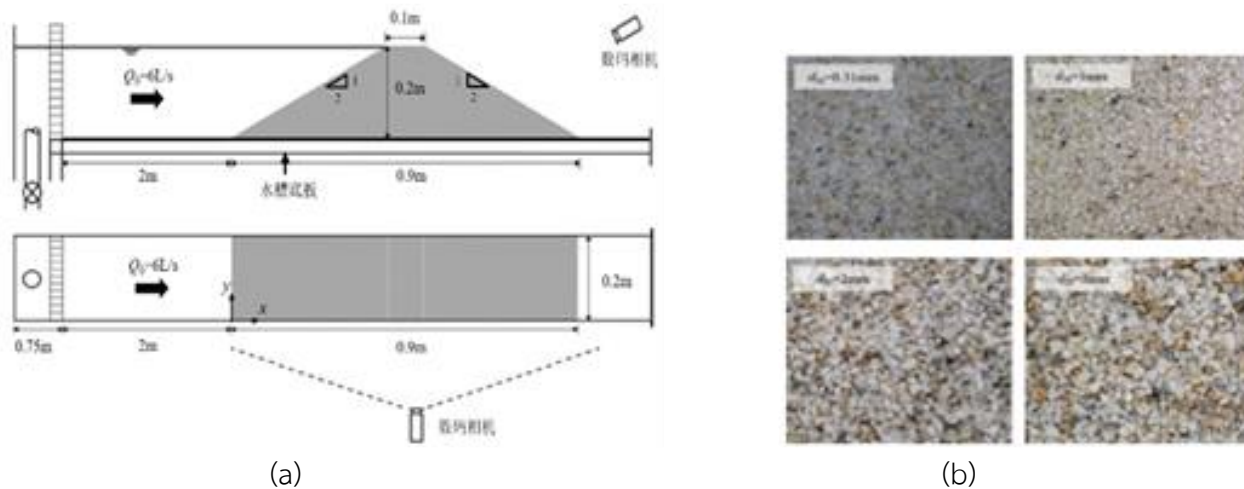


รูปที่ 47. อุปกรณ์ระบบจำลองภูมิอากาศสำหรับแบบจำลองหมุนเหวี่ยง

5.2.3. ส่วนงาน D – งานวิจัยเกี่ยวกับการพังทลายของคันดินในสภาพอากาศเขตร้อน

(1) การทำสอบในทางน้ำเปิด (Flume) และ Numerical modeling จำลองน้ำท่วม

- จากผลของการทดลองในทางน้ำเปิดและ Numerical modeling อัตราการไหลและอัตราการกัดเซาะถูกสร้างขึ้นตามทฤษฎี และแบบจำลองทำนายอัตราการไหลสูงสุดและอัตราการกัดเซาะของตัวคันดิน ก่อนการพังทลาย ซึ่งเป็นการเตือนล่วงหน้าเกี่ยวกับภัยพิบัติ โดยใช้หลัก Manning เป็นพื้นฐานทางทฤษฎี



รูปที่ 48. การทดสอบแบบจำลองฟลูม (a) แผนผังแผนผังของโครงสร้างแบบจำลองการทดสอบ (b) วัสดุเชื่อม

(2) การวิจัยและพัฒนา สำหรับศึกษาการยุบตัวของคันดิน โดยการทดสอบแบบจำลองหมุนเหวี่ยง

- การทดสอบแบบจำลองแรงเหวี่ยงสามารถค้นค่าระดับความเค้นที่แท้จริงของวัสดุ ซึ่งจะใช้จำลองการยุบตัวของดิน การไหลของน้ำเป็นพื้นฐานสำหรับการทดลองแบบจำลองแรงเหวี่ยงเพื่อให้เกิดการไหลขนาดใหญ่ และการพังทลายของลาดดิน

(3) การวิจัยการกัดเซาะ ในแบบจำลอง โดยพิจารณาการใช้วัสดุคลุมผิว

- พัฒนาแบบจำลองการกัดเซาะพิจารณาลักษณะของวัสดุ การเลื่อนและการกลิ้งของอนุภาคภายใต้แรงเฉือนที่ต่างกัน ภายใต้การกระทำของการไหลของน้ำ และการเปรียบเทียบกับผลการทดลองตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพัฒนาขึ้นเป็นพื้นฐานทางทฤษฎีสำหรับการสร้างแบบจำลองการพังทลายของคันดิน

### 5.3 รายละเอียดความร่วมมือและการถ่ายโอนความรู้

ส่วนงานความร่วมมือระหว่างส่วนงาน B และส่วนงานอื่นๆ ที่สามารถแบ่งออกเป็น

#### ส่วนงาน A

ทีมิวิจัยไทยจะช่วยให้ทีมิวิจัยจีนขยายการศึกษาในพื้นที่กรุงเทพฯ ซึ่งตั้งอยู่ในชุมชนเมืองและตามเส้นทางรถไฟความเร็วสูง โดยจะทำการค้นหาข้อมูลของสภาพภูมิอากาศในกรุงเทพฯ แบ่งเป็น ข้อมูลทางอุทกวิทยา ตัวอย่างเช่น ข้อมูลการไหลและระดับน้ำรายวัน และ ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ตัวอย่างเช่น ข้อมูลปริมาณน้ำฝน, อุณหภูมิ และ ความชื้นสัมพัทธ์รายวัน โดยส่วนงาน B จะมีการติดตั้งสถานีตรวจอากาศเพื่อติดตามสภาพอากาศปัจจุบันในพื้นที่คันดิน และเพื่อนำผลเทียบกับส่วนงาน A

#### ส่วนงาน C

ทีมิวิจัยไทยจะมุ่งเน้นไปที่พฤติกรรมของคันดินบดอัดขนาดจริงที่เกิดขึ้นตามฤดูกาล ทั้งนี้เป็นการศึกษาในระยะเวลาสั้น โดยผลของการตรวจวัด เช่น แรงดันน้ำในดิน และ ปริมาณน้ำในดิน รวมถึงการเคลื่อนตัวของคันดิน จะนำไปใช้เป็นข้อมูลในออกแบบแบบจำลองดินเหนียวในเครื่องหมุนเหวี่ยง (ส่วนงาน C) และเมื่อมีการจำลองสภาพภูมิอากาศในแบบจำลอง ก็จะสามารถทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระยะยาว (เช่น 50 – 100 ปี) ได้

#### ส่วนงาน D

คุณสมบัติของพีช ดิน และ สภาพภูมิอากาศ ที่ตรวจวัดได้จากภาคสนาม และ แบบจำลองหมุนเหวี่ยง จะใช้เป็นพารามิเตอร์เบื้องต้นในการวิเคราะห์สอบเทียบ (back analysis) หากการเปลี่ยนแปลงของน้ำในดินตามสภาพภูมิอากาศ และการเคลื่อนตัวของคันดินที่ตรวจวัดได้ในสนาม เมื่อค่าที่ได้จากตัวโปรแกรมสามารถเทียบกับค่าที่ตรวจวัดในสนามแล้ว ก็ให้นำแบบจำลองเชิงตัวเลขนี้ไปทำการศึกษาค่าตัวแปร (parametric study) อื่นๆ เช่น ปริมาณและชนิดของรากพีช ชนิดและความหนาแน่นของดิน ขนาดและรูปร่างของคันดิน รวมถึง สภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง และ สภาพอากาศขีดสุด

### 5.2. ตารางเปรียบเทียบผลการดำเนินงานกับแผนการดำเนินการที่ตั้งไว้ (Gantt Chart)

จากตารางที่ 3 การเตรียมสถานที่เสร็จสิ้นตามแผนที่วางไว้ช่วงสิ้นเดือนกันยายน 2563 ส่วนการตรวจวัดการตอบสนองของพีชและดินอยู่ระหว่างดำเนินการ คาดว่าจะแล้วเสร็จในช่วงสิ้นเดือนตุลาคม 2564 จากนั้นจะเริ่มทำการตรวจวัดรากหญ้าในช่วงเสื่อมสภาพต่อไป โดยคาดว่าจะแล้วเสร็จในช่วงสิ้นเดือนตุลาคม 2565



ตารางที่ 3. สรุปและกำหนดการของกิจกรรมการวิจัยในส่วนงาน B

Task	Item	1st year					2nd year					3rd year													
		2020					2021					2022					2023								
		6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
B	Test site preparation and decommissioning (33 months)																								
	Site selection and clearing	█																							
	Embankment construction		█	█	█																				
	Test pit & Field density test	█	█	█																					
	Laboratory index test			█	█	█																			
	Plant preparation			Ordering	Planting																				
	Sensor preparation & calibration		Calibration		Installation																				
	Site decommissioning																						█	█	█
B	Field monitoring (25 months)																								
	Root growth period				Establishment																				
	Killing process (membrane cover)																								
	Root decay period																								
	Soil response monitoring																								
	Plant response monitoring																								
	Inclinometer																								
	Topographic survey																								
D	Numerical modelling (22 months)																								
	Back analysis																								
	Parametric study																								
ALL	Project administration																								
	Research team meeting																								
	Steering meeting																								
	Workshop & Symposium																								
	Report																								
	Publication & Prelim guideline																								

### 5.3. ข้อเสนอแนะและงานตามโครงการที่จะทำต่อไป

#### *การทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากในช่วงที่มีการเสื่อมสลายของราก*

ในช่วงปีที่สองนี้ สำหรับตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาการสลายตัวของรากจะมีการใช้วิธีทำให้รากเสื่อมสลาย 2 วิธีคือการปิดคลุมดินและการใช้สารกำจัดวัชพืช โดยวิธีคลุมดินจะมีการนำผ้าพลาสติกสีดำมาคลุมไว้ทั้งกระบอกล้อมเพื่อมิให้ต้นหญ้าได้รับแสง ต่อเนื่องกันเป็นเวลาสองเดือน เป็นจำนวน 12 ตัวอย่าง หลังจากการคลุมดินพบว่าใบหญ้าแผงมีการเปลี่ยนสีและรากเริ่มเสื่อมสลาย ตัวอย่างจะถูกทิ้งไว้ให้รากเน่าเปื่อยในดินเป็นเวลา 30, 60, 120, 180 และ 360 วัน (แสดงเป็น B30, B60, B120, B180 และ B360) สำหรับสารกำจัดวัชพืช จะเลือกใช้โพรพานิล (N-(3,4-Dichlorophenyl) โพรพานาไมด์) ที่ 36% W/V ในสารละลายรวมกับการให้น้ำ Propanil เป็นสารที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการกำจัดวัชพืชและควบคุมวัชพืชในการปฏิบัติทางการเกษตรของประเทศไทย โดยมีตัวอย่างทั้งหมด 9 ตัวอย่าง สำหรับการศึกษาที่ถูกทิ้งไว้เพื่อการสลายตัวของรากในระยะเวลาที่สั้นกว่า (เช่น 15, 30 และ 60 วันแสดงเป็น H15, H30 และ H60) โดยตัวอย่างที่อยู่ภายใต้ช่วงสลายตัวของราก (การคลุมดินและสารกำจัดวัชพืช) ยังคงได้รับน้ำสัปดาห์ละสองครั้งตลอดระยะเวลาการสลายตัวทั้งหมดเพื่อหลีกเลี่ยงการทำให้ดินแห้งมากเกินไป

#### *การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของพืชและพฤติกรรมของคันดินในช่วงฤดูฝน*

ในช่วงครึ่งแรกของปีที่สองนั้น งานวิจัยส่วนต่อไปในภาคสนามจะเป็นการตรวจวัดในช่วงฤดูฝน โดยจะมีการตรวจวัดทั้งสามส่วน คือ ส่วนของพืช จะมีการศึกษาการเติบโตของพืชทั้งบนดินและใต้ดิน ส่วนที่สองคือการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำและแรงดันน้ำของดิน ในช่วงฤดูฝน ทั้งจากการซึมของน้ำฝนในบริเวณที่มีการปลูกหญ้าและไม่ปลูกหญ้า ท้ายสุดในส่วนของสภาพภูมิอากาศ จะมีการตรวจติดตามข้อมูลอากาศต่างๆอย่างต่อเนื่องจากเครื่องวัดสภาพภูมิอากาศดังแสดงไว้ในรายงานนี้ สิ่งที่สำคัญคือในช่วงฤดูฝนนั้น จะมีแนวโน้มปริมาณความชื้นที่มากขึ้น ซึ่งมีผลต่อเสถียรภาพของคันดิน จึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัดอย่างต่อเนื่อง โดยค่าที่ทำการบันทึกข้อมูลจะทำการบันทึกในเวลาที่สูงกว่า (ทุก 5 นาที) เมื่อเทียบกับช่วงฤดูร้อน (ทุก 10 นาที) เนื่องจากอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วในช่วงฝนตก

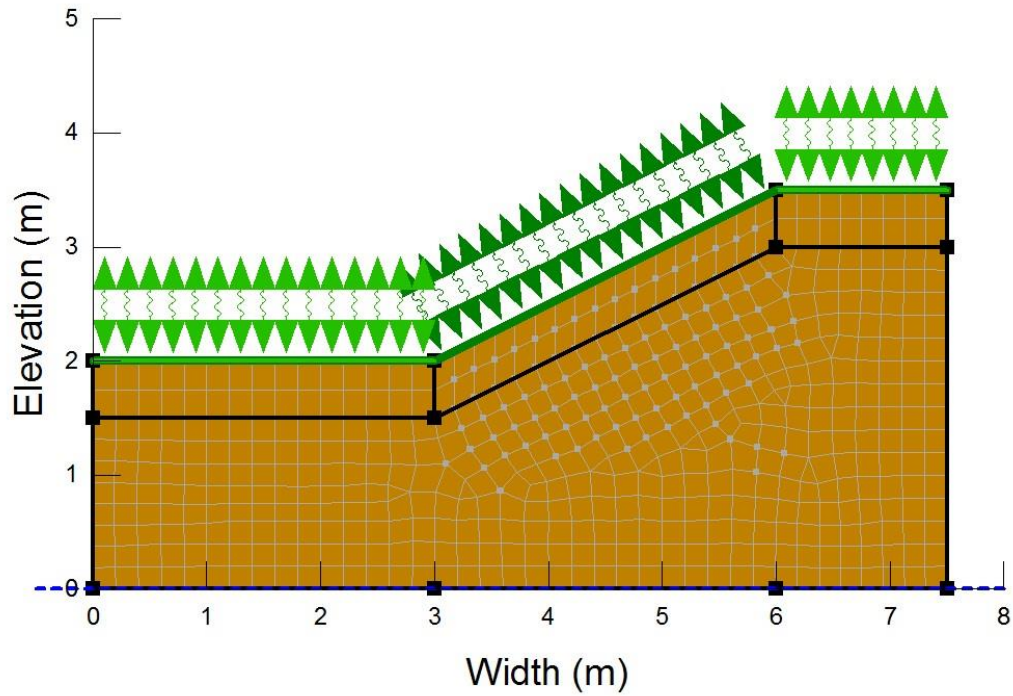
### การตรวจวัดในช่วงที่มีการเสื่อมสลายของราก

ในครึ่งหลังของปีที่สอง จะมีการจำลองการเสื่อมสลายของรากพืช โดยในที่นี่จะทำให้สอดคล้องกับสภาพที่ตรวจวัดกำลังรับแรงดึงในตัวอย่างขนาดเล็ก โดยการใช้การคลุมหญ้าในบริเวณที่ปลูกหญ้าเป็นเวลา 2 เดือน เพื่อให้มั่นใจว่าหญ้าไม่ได้รับแสงเพียงพอและไม่สามารถโตต่อไปได้ จากนั้นจึงเริ่มวงรอบการตรวจวัดใหม่อีกครั้งทั้งในฤดูร้อน และช่วงปีที่สามจะเป็นการตรวจวัดในช่วงฤดูฝนที่เหลืออยู่ นอกจากงานตรวจวัดภาคสนามแล้ว ในช่วงปีที่สองนี้ ทางทีมีวิจัยจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนามเพิ่มที่ในส่วนของการเติบโตของพืชทั้งใบและรากที่ตรวจวัดจากกล้องถ่ายภาพไปแล้วในฤดูร้อน และภาพถ่ายความร้อนเพื่อเปรียบเทียบอัตราการคายน้ำที่เกิดขึ้น เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพืชและปริมาณความชื้นในดินตามฤดูกาล

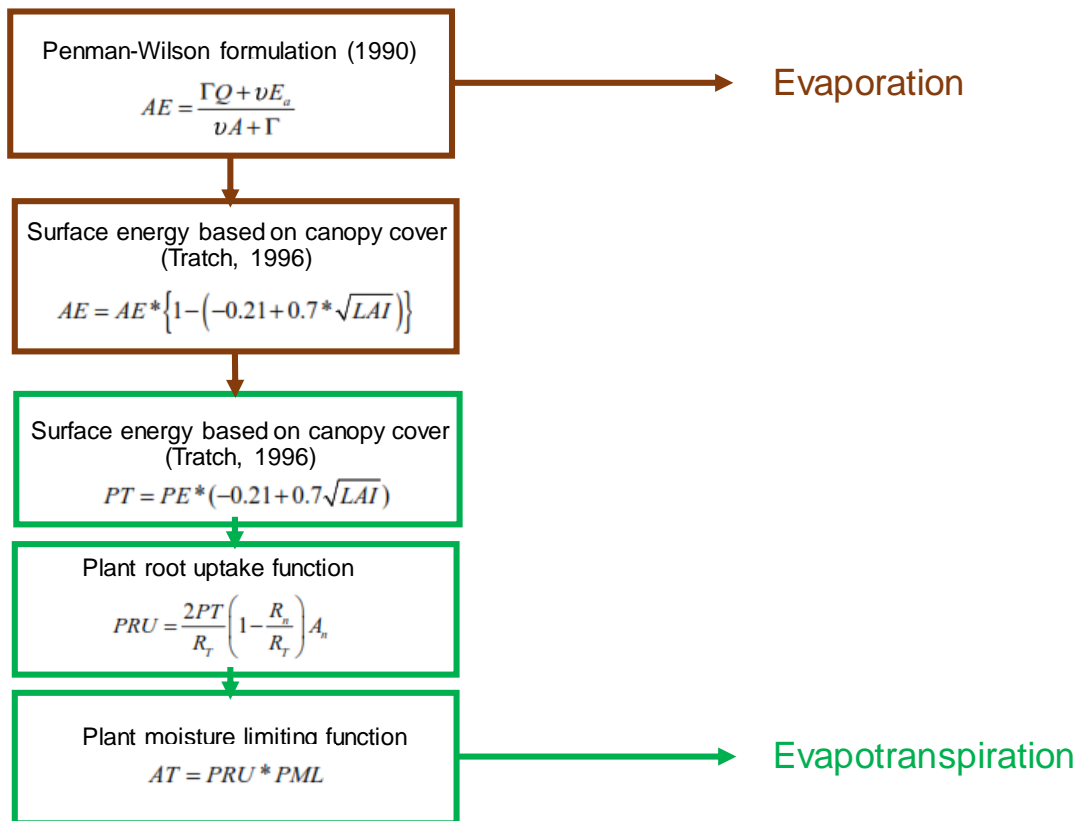
### การสอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ทีมีวิจัยไทยจะร่วมในผลงาน D ด้านการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อสอบเทียบและขยายผลงานในส่วนภาคสนาม (ส่วนงาน B) ทางทีมีวิจัยจะพัฒนาแบบจำลองในโปรแกรม Geostudio โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) โมดูล VADOSE/W ดังรูปที่ 49 เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของน้ำในดินจากสภาพภูมิอากาศและพืช โดยอาศัยการคำนวณเงื่อนไขขอบเขต ดังในรูปที่ 50 ประกอบการวิเคราะห์ในแบบจำลองนี้ โดยค่าที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์ (input parameters) ดังกล่าว เช่น อัตราการระเหย (Evaporation) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ Penman-Wilson formulation (1990) โดยใช้ค่าตรวจวัดที่ได้จากเครื่องวัดสภาพอากาศ และ อัตราการคายน้ำ ที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิของใบ คือเมื่อทราบอุณหภูมิของใบก็จะสามารถวิเคราะห์หาค่าการชักนำของปากใบ (Stomatal conductance) เมื่อพิจารณาควบคู่กับโมเดลสภาพภูมิอากาศ ทำให้เราสามารถวิเคราะห์อัตราการคายน้ำ (Transpiration) ได้จากโมเดลการดูดน้ำของพืช (Root water Uptake function; RWU) รวมถึงสัมประสิทธิ์ (coefficient) ต่างๆในการคำนวณ เช่น อัตราการค้างของน้ำในดิน หลังจากทำการวิเคราะห์การไหลแล้วนั้น ผลที่ได้รับจากโปรแกรม (output parameters) จะเป็นค่าแรงดันน้ำในดิน (หรือค่าปริมาณน้ำในดิน) ซึ่งเราสามารถทำการสอบเทียบ (back analysis) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ได้ โดยทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ เพื่อให้ได้ค่าแรงดันน้ำในดินใกล้เคียงกับที่ตรวจวัดได้ในสนาม

จากนั้นจะนำข้อมูลแรงดันน้ำในดินนี้จะนำไปใช้ป้อนค่าในการวิเคราะห์ (input parameters) หากการเคลื่อนตัว โดยโมดูล SIGMA/W ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้แบบจำลองพฤติกรรมดิน ดังนั้นค่าที่จะต้องใส่แก่ตัวโปรแกรมคือข้อมูลคุณสมบัติดินพื้นฐานจากตัวคันดิน รวมถึงในบริเวณรากต้นไม้จะมีการพิจารณาคุณสมบัติทางชีวกลศาสตร์ของรากที่มีผลต่อการเสริมกำลังของดินที่วัดจากการทดสอบการดึงรากในโครงการนี้ด้วยเช่นกัน ผลที่ได้รับจากโปรแกรม (output parameters) คือ ค่าการเคลื่อนตัวของคันดิน ซึ่งสามารถสอบเทียบได้กับการเคลื่อนตัวที่ตรวจวัดจริงในสนาม และค่าเสถียรภาพของลาดดิน (Slope stability number) ในรูปแบบที่แสดงเป็น factor safety ของคันดิน โดยทีมีวิจัยจะทำการสอบเทียบผลตรวจวัดในช่วงการเติบโตของรากพืชปีแรก จากนั้นจะเริ่มทำการสอบเทียบผลของการเสื่อมสลายของพืชต่อไป



รูปที่ 49. รูปทั่วไปของแบบจำลองเชิงตัวเลขโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 50. ขั้นตอนการคำนวณเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองสำหรับแบบจำลองเชิงตัวเลข

ทางที่มิวิจัยจะทำการขยายผล (parametric study) จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สอบเทียบข้อมูลในรอบปีแล้ว ทำการศึกษาผลของสภาพภูมิอากาศที่ระยะยาวขึ้น และสภาพภูมิอากาศขีดสุด (Extreme climate) ในรอบ 10 ปี หรือเท่าที่สามารถจะหาข้อมูลย้อนหลัง (historical record) ได้ เพื่อวิเคราะห์หา ค่าการเคลื่อนตัวของคันดิน และค่าเสถียรภาพของลาดดิน ของสภาพอากาศนั้นๆ

#### *การประชุมและการถ่ายทอดเทคโนโลยี*

ในเรื่องการการประชุมระหว่างทีมไทยและจีนจะจัดขึ้นทุกครึ่งปี โดยครั้งต่อไปจะจัดภายในเดือนมิถุนายน ตามแผนที่วางไว้ โดยที่มิวิจัยไม่สามารถจัดการประชุมแบบตัวต่อตัวได้จึงปรับเป็นการประชุมแบบออนไลน์ ในส่วนการประชุมกับคณะกรรมการภายนอกจากภาครัฐและเอกชน ทางที่มิวิจัยได้ปรับเป็นการถามตอบข้อคิดเห็นเป็นรายคนผ่านระบบออนไลน์เช่นกัน โดยจะมีการจัดประชุมอีกครั้งในเดือนมิถุนายน ท้ายสุดคือการอบรมและถ่ายทอดเทคโนโลยีครั้งที่ 1 ทางที่มิวิจัยไทย และ จีน มีกำหนดการจัดสัมมนาในช่วงเดือนตุลาคมปีนี้ ในงานนี้จะเป็นการอบรมความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมปฐพีและโครงสร้างพื้นฐาน รวมถึงวิธีการทางซีวีวิศวกรรมที่เป็นผลงานของที่มิวิจัยทั้งสองฝั่ง เป็นการนัดสัมมนาผ่านระบบออนไลน์ โดยเน้นกลุ่มเป้าหมาย คือ นักวิจัย อาจารย์ นักศึกษา และวิศวกร รวมถึงข้าราชการที่ทำงานเกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นฐานในประเทศไทย

## บรรณานุกรม

- Barker, D. H. (1995). Vegetation and slopes: stabilisation, protection and ecology. In proceedings of the international conference. Thomas Telford, Oxford, 29-30 September 1994.
- Boldrin D, Bengough AG, Lin Z, Loades KW (2021) Root age influences failure location in grass species during mechanical testing. *Plant Soil*.
- Boldrin, D., Leung, A. K. and Bengough, A. G. (2017). Root biomechanical properties during establishment of woody perennials. *Ecological Engineering*, 109, 196-206
- Briggs, K.M., Smethurst, J.A., Powrie, W., O'Brien, A.S., Butcher, D.J.E., (2013). Managing the extent of tree removal from railway earthwork slopes. *Ecol. Eng.* 61, pp. 690–696.
- Ceotto, E. and Di Candilo, M. (2010). Shoot cuttings propagation of giant reed (*Arundo donax* L.) in water and moist soil: The path forward?. *Biomass and Bioenergy*, 34(11), 1614-1623
- Comino E, Marengo P, Rolli V (2010) Root reinforcement effect of different grass species: A comparison between experimental and models results. *Soil Tillage Res* 110:60–68.
- Cooper, M.R., Bromhead, E.N., Petley, D.J., Grants, D.I., (1998). The Selborne cutting stability experiment. *Géotechnique* 48 (1), pp. 83–101.
- Culbertson, J. B., Valiela, I., Pickart, M., Peacock, E. E. and Reddy, C. M. (2008). Long-term consequences of residual petroleum on salt marsh grass. *Journal of Applied Ecology*, 45(4), 1284-1292.
- Cutler, D.F., T., Stevenson, D.W., Wiley-Blackwell (2009) *Plant Anatomy : An Applied Approach*, Oxford, UK.
- Dumlao MR, Ramanarivo S, Goyal V, et al (2015) The role of root development of *Avena fatua* in conferring soil strength. *Am J Bot* 102:1050–1060.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian geotechnical journal*, 15(3), pp. 313-321.
- Genet M, Stokes A, Salin F, et al (2005) The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plant Soil* 278:1–9.
- Glendinning, S., Hughes, P., Helm, P., Chambers, J., Mendes, J., Gunn, D., Wilkinson, P., Uhlemann, S., (2014). Construction, management and maintenance of embankments used for road and rail infrastructure: implications of weather induced pore water pressures. *ActaGeotech.* 9(5), 799–816.

- Glendinning, S., Loveridge, F., Starr-Keddle, R.E., Bransby, M.F., Hughes, P.N., (2009). Role of vegetation in sustainability of infrastructure slopes. Proc. ICE-Eng. Sustain. 162 (2), pp. 101–110.
- Gunn, D.A., Chambers, J.E., Uhlemann, S., Wilkinson, P.B., Meldrum, P.I., Dijkstra, T.A., Hall, L. (2003). Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23(5), pp. 403-413.
- Hughes, P. N., Glendinning, S., Mendes, J., Parkin, G., Toll, D. G., Gallipoli, D., & Miller, P. E. (2009). Full-scale testing to assess climate effects on embankments. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability Vol. 162, No. 2, pp. 67-79. Thomas Telford Ltd.
- Kamchoom, V., Leung, A.K. and Ng, C.W.W. (2017) Centrifuge modelling of root-induced soil suction and root geometry on slope stability, 9th International Conference on Porous Media and Annual Meeting, Delft University of Technology, Rotterdam, Netherlands, 8-11 May 2017
- Kaynia, A. M., Madshus, C., & Zackrisson, P. (2000). Ground vibration from high-speed trains: prediction and countermeasure. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(6), pp. 531-537.
- Kovacevic, N., Potts, D.M., Vaughan, P.R., (2001). Progressive Failure in Clay Embankments Due to Seasonal Climate Changes. Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Vol. 3. AA Balkema Publishers, pp. 2127–2130.
- Lees, A. S., MacDonald, G. J., Sheerman-Chase, A., and Schmidt, F. (2013). Seasonal slope movements in an old clay fill embankment dam. Canadian Geotechnical Journal, 50(5), 503-520.
- Leroueil, S., 2001. Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms.
- Leung, A.K., Kamchoom, V. and Ng, C.W.W. (2017) Influence of root-induced soil suction and root geometry on slope stability: a centrifuge study. Canadian Geotechnical Journal. 54(3): 291-303.
- Loades KW, Bengough AG, Bransby MF, Hallett PD (2015) Effect of root age on the biomechanics of seminal and nodal roots of barley (*Hordeum vulgare* L.) in contrasting soil environments. Plant Soil 395:253–261.
- Loveridge, F. A., Spink, T. W., O'Brien, A. S., Briggs, K. M., and Butcher, D. (2010). The impact of climate and climate change on infrastructure slopes, with particular reference to

- southern England. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43(4), 461-472.
- Mao Z, Saint-André L, Genet M, et al (2012) Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: Choosing cohesion models. *Ecol Eng* 45:55–69.
- Nakamura, H., Nghiem, Q. M. and Iwasa, N. (2007). Reinforcement of tree roots in slope stability: A case study from the Ozawa slope in Iwate Prefecture, Japan. In *Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*. Springer, Dordrecht, 81-90.
- Ng, C. W., & Pang, Y. W. (2000). Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(2), pp. 157-166.
- Ng, C.W.W. and Leung, A.K., (2012). Measurements of drying and wetting permeability functions using a new stresscontrollable soil column. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 138(1): 58-65.
- Ng, C.W.W., Kamchoom, V. and Leung, A.K. (2016) Centrifuge modelling of the effects of root geometry on the transpiration-induced suction and stability of vegetated slopes. *Landslides*. 13(5), 925-938.
- Ng, C.W.W., Leung, A.K., Kamchoom, V. and Garg, A. (2014) A novel root system for simulating transpiration-induced soil suction in centrifuge. *Geotechnical Testing Journal, ASTM*. 37(5), 733-747.
- O'Brien, A.S.,(2013). The assessment of old railway embankments – time for a change? Partial
- O'Brien, A., (2007). Rehabilitation of urban railway embankments: investigation, analysis and stabilisation. In: Cue'llar, V., Dapena, E., Alonso, E., et al. (Eds.), *Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid*.
- Perry, J., McGinnity, B., Russell, D., (1999). 'Railway earth structures: their condition, management and influence of track quality.
- Potts, D.M., Zdravkovic, L., (1999). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Application*.
- Rahardjo, H., Satyanaga, A., & Leong, E. C. (2013). Effects of flux boundary conditions on pore water pressure distribution in slope. *Engineering geology*, 165, pp. 133-142.
- Rossi, A. (2012). Turning red rural landscapes yellow Sufficiency economy and royal projects in the hills of Nan Province, Northern Thailand. *Austrian Journal of South-East Asian Studies*, 5(2), 275.



- Roumet C, Birouste M, Picon-Cochard C, et al (2016) Root structure-function relationships in 74 species: Evidence of a root economics spectrum related to carbon economy. *New Phytol* 210:815–826.
- Scott, J.M., Loveridge, F., O'Brien, A.S., (2007). Influence of climate and vegetation on railway embankments. In: Cue'llar, V., Dapena, E., Alonso, E., et al. (Eds.), *Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Madrid.
- Smethurst, J., Briggs, K., Powrie, W., Ridley, A. and Butcher, D. (2015). Mechanical and hydrological impacts of tree removal on a clay fill railway embankment. *Géotechnique*, 65(11), 869-882.
- Smethurst, J., Briggs, K., Powrie, W., Ridley, A., Butcher, D., (2015). Mechanical and hydrological
- Smethurst, J.A., Clarke, D., Powrie, W., (2006). Seasonal changes in pore water pressure in a grass-covered cut slope in London Clay. *Géotechnique* 56 (8), pp. 523–537.
- Take, W. A., & Bolton, M. D. (2011.) Seasonal ratcheting and softening in clay slopes, leading to first time failure. *Géotechnique*. 61(9): pp. 757-769.
- Takemiya, H., & Bian, X. (2005). Substructure simulation of inhomogeneous track and layered ground dynamic interaction under train passage. *Journal of Engineering Mechanics*, 131(7), pp. 699-711.
- Toll, D.G., Lourenço, S.D., Mendes, J., (2013). Advances in suction measurements using high suction tensiometers. *Eng. Geol.* 165, pp. 29–37.
- Wu Z, Leung A.K., Boldin D, Ganesan SP (2021) Variability in root biomechanics of *Chrysopogon zizanioides* for soil eco-engineering solutions. *Science of The Total Environment*: 145943.
- Wu, T. H., Kokesh, C. M., Trenner, B. R. and Fox, P. J. (2014). Use of live poles for stabilization of a shallow slope failure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(10)
- Zhang CB, Chen LH, Jiang J (2014) Why fine tree roots are stronger than thicker roots: The role of cellulose and lignin in relation to slope stability. *Geomorphology* 206:196–202.
- Zhang, L. L., Zhang, J., Zhang, L. M., & Tang, W. H. (2011). Stability analysis of rainfall-induced slope failure: a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 164(5), pp. 299-316.

## คณะนักวิจัย

### หัวหน้าโครงการ

ชื่อ ดร. วิรุฬห์ คำชุม  
ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์  
หน่วยงานที่สังกัด สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
หมายเลขโทรศัพท์ +66 95 647 0128  
Email: viroon.ka@kmitl.ac.th

### ผู้ร่วมโครงการ

ชื่อ ดร. แอนโทนี่ เหลิง  
ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์  
หน่วยงานที่สังกัด มหาวิทยาลัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งฮ่องกง  
Email: ceanthony@ust.hk

ชื่อ ดร. อภินิติ โชติสังกาศ  
ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์  
หน่วยงานที่สังกัด มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
Email: fengatj@ku.ac.th

ชื่อ Mr Arwan Aripinyo  
ตำแหน่ง นักวิจัย  
หน่วยงานที่สังกัด สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
Email: arwan\_civil00@yahoo.co.id

ชื่อ Ms. Yuliana  
ตำแหน่ง นักวิจัย  
หน่วยงานที่สังกัด สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
Email: yuliana07@gmail.com

ชื่อ นาย ฤทธิภูมิ วัชรชัยสุรพล  
ตำแหน่ง นักวิจัย  
หน่วยงานที่สังกัด สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
Email: rithow11@gmail.com