



การศึกษาเปรียบเทียบการเจริญและการเปลี่ยนแปลงของรากยางพาราในช่วง  
ฤดูฝนและฤดูแล้งด้วยเทคนิคมินิไรโซตรอน

The Study of Fine Root Transition of Rubber Tree (*Hevea brasiliensis*)  
between Rainy and Dry Season by Minirhizotron Technique

স্যুমพล ณะวงษ์

Sayumphon Nawong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพืชศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Science in Plant Science  
Prince of Songkla University

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การศึกษาเปรียบเทียบการเจริญและการเปลี่ยนแปลงของรากยางพารา  
ในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งด้วยเทคนิคมินิไรโซตรอน

The Study of Fine Root Transition of Rubber Tree (*Hevea brasiliensis*)  
between Rainy and Dry Season by Minirhizotron Technique

สยมพล ณะวงษ์

Sayumphon Nawong

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาพืชศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

Prince of Songkla University

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**ชื่อวิทยานิพนธ์** การศึกษาเปรียบเทียบการเจริญและการเปลี่ยนแปลงของรากยางพารา  
ในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งด้วยเทคนิคมินิไรโซทรอน

**ผู้เขียน** นายสมพล ณะวงษ์

**สาขาวิชา** พืชศาสตร์

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**

**คณะกรรมการสอบ**

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สายัณห์ สดุดี)

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร ฌ นศร)

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม**

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สายัณห์ สดุดี)

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรัสศรี นวลศรี)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรัสศรี นวลศรี)

.....กรรมการ  
(ดร.ระวี เจียรวิภา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพืชศาสตร์

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.สายัณห์ สดุดี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายสยมพล ณะวงษ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน  
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายสุขุมพล ณะวงษ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเปรียบเทียบการเจริญและการเปลี่ยนแปลงของรากยางพาราในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งด้วยเทคนิคมินิไรโซทรอน
ผู้เขียน	นายสยมพล ณะวงษ์
สาขาวิชา	พืชศาสตร์
ปีการศึกษา	2558

### บทคัดย่อ

การศึกษากการเจริญเติบโตของรากฝอยยางพาราในรอบปีด้วยเทคนิคมินิไรโซทรอนในแปลงยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุ 9 ปี เพื่อศึกษากการเจริญเติบโตและเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความยาวของรากในแต่ละฤดูกาลและศึกษากการตอบสนองของรากต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินและดัชนีพื้นที่ใบ พบว่าหลังจากการฝังท่อมินิไรโซทรอนที่มีความยาว 100 และ 150 เซนติเมตร ด้วยวิธีการฝังที่แตกต่างกัน รากของยางพารามีการเจริญกลับคืนสู่สภาวะคงที่ภายในระยะเวลา 60 และ 90 วัน ตามลำดับ อัตราการงอกใหม่ของรากฝอยในท่อที่มีความยาว 100 และ 150 เซนติเมตร มีค่าสูงสุดหลังการฝังท่อประมาณ 30 และ 80 วัน ตามลำดับ รากของยางพารามีความหนาแน่นสูงสุดที่ระดับความลึก 0 - 10 เซนติเมตร และการเปลี่ยนแปลงความยาวของรากมีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผันตามกับการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในดินในแต่ละฤดูกาลตลอดทั้งปี การเพิ่มขึ้นของความชื้นในช่วงปลายฤดูร้อน ทำให้ความยาวรากที่ระดับความลึก 0 - 70 เซนติเมตร เพิ่มขึ้น และพบว่าความยาวรากที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากรากฝอยที่ระดับความลึก 40 - 70 เซนติเมตร 48.39 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่รากฝอยที่ระดับความลึก 0 - 10 เซนติเมตร และ 10 - 45 เซนติเมตร มีค่า 29.03 และ 22.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ารากฝอยของยางพารามีการเจริญเติบโตสูงสุดประมาณ 50 วัน หลังผลิใบใหม่และทรงพุ่มเจริญเติบโตเต็มที่

**Thesis Title**            The Study of Fine Root Transition of Rubber Tree (*Hevea brasiliensis*)  
                                      between Rainy and Dry Season by Minirhizotron Technique

**Author**                     Mr. Sayumphon Nawong

**Major Program**        Plant Science

**Academic Year**        2015

### ABSTRACT

Fine roots of 9 year-old of rubber tree (RRIM 600) were assessed by minirhizotron technique to study the dynamics of fine roots and response to soil water and leaf area index variations. Growth model of fine roots was analyzed by the logistic growth function. Results showed that after installation by 100 cm and the 150 cm long tubes root growth returned to steady state around 60 and 90 days, respectively to approach steady state. The maximum increasing rate of new fine roots in 100 and 150 cm long tubes was 30 and 80 days after installation. The study during May 2013 and September 2014 showed that fine roots of rubber trees were dense in soil surface (0 - 10 cm.). Decay and turnover of fine roots were significant with the variations in soil moisture over the year. Increase of soil moisture by late summer rainfall induced a strong increase in total root length over 0 - 70 cm. It was stated that 48.39 percent of increase due to roots at depth of 45 - 70 cm., while it was 29.03 and 22.58 percent by roots at depth of 0 - 10 and 10 - 45 cm, respectively. After full canopy stage by new leaves, it was around 50 days when new fine roots reached the maximum root length.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สายัณห์ สดุดี ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.จรัสศรี นวลศรี กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำในด้านการเรียนรวมถึงแนวทางในการแก้ปัญหาการทำวิจัย ตลอดจนการเขียนและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สมพร ณ นคร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ จากคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ระวี เจียรวิภา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณบุคลากรภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ ตลอดจนเพื่อน พี่ และน้องชาวพืชศาสตร์ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณพี่เจษฎา ไสภรัตน์ ที่ช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการทำวิจัย รวมทั้งให้คำปรึกษาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์

ทั้งนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมพร ณะวงษ์ คุณแม่สุชาดา ณะวงษ์ ตลอดจนญาติพี่น้องครอบครัว ที่คอยช่วยเหลือสนับสนุนและให้กำลังใจมาจนสำเร็จการศึกษาครั้งนี้

สยมพล ณะวงษ์



## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(9)
สารบัญภาพ	(10)
บทที่ 1 บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	2
วัตถุประสงค์	13
บทที่ 2 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	14
วัสดุ และอุปกรณ์	14
วิธีการดำเนินงาน	15
บทที่ 3 ผล	24
บทที่ 4 วิจัยรณ	52
บทที่ 5 สรุป	59
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	66
ประวัติผู้เขียน	95

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของรูปแบบการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth-curve ของรากยางพาราหลังการติดตั้งท่อโปร่งใสขนาด 100 เซนติเมตร และวันที่ ( $h$ ) อัตราการเพิ่มของความยาวรากหนาแน่นมีค่าสูงสุด ( $bK/4$ ) หลังการติดตั้งท่อโปร่งใส $h$ (วัน)	37
2	ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของรูปแบบการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth-curve ของรากยางพาราหลังการติดตั้งท่อโปร่งใสขนาด 150 เซนติเมตร และวันที่ ( $h$ ) อัตราการเพิ่มของความยาวรากหนาแน่นมีค่าสูงสุด ( $bK/4$ ) หลังการติดตั้งท่อโปร่งใส $h$ (วัน)	37
3	ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของรูปแบบการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth-curve ของรากยางพาราหลังการติดตั้งท่อโปร่งใสขนาด 150 เซนติเมตร และวันที่ ( $h$ ) อัตราการเพิ่มของความยาวรากหนาแน่นมีค่าสูงสุด ( $bK/4$ ) หลังการติดตั้งท่อโปร่งใส $h$ (วัน)	40

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ลักษณะการติดตั้งมินิไรโซทรอนในแนวตั้ง 90 องศา และแนวเอียง 45 องศา	8
2 ภาพจำลองตำแหน่งของดินยางและอุปกรณ์ต่างๆ ในแปลงทดลอง	18
3 รูปแบบของการเจริญเติบโตแบบโลจิสติก (Logistic growth curve)	23
4 ภาพที่ 4 ภาพตัวอย่างที่บันทึกด้วยกล้อง PSU - Minirhizotron - 1 : กล้องตัวที่ 1 กล้องตัวที่ 2 และกล้องตัวที่ 3	24
5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของเส้นตารางที่อ่านได้จากโปรแกรม Root Fly (Measured value) และค่าจริง (Observed value) : (ก) กล้องตัวที่ 1 (ข) กล้องตัวที่ 2 และ (ค) กล้องตัวที่ 3 ตามลำดับ	25
6 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากมินิไรโซทรอน และการเจาะดิน : (ก) ท่อขนาด 100 เซนติเมตร (ข) ท่อขนาด 150 เซนติเมตร ทำการเก็บข้อมูลในวันที่ 27 ธันวาคม 2556 (ครั้ง 1)	27
7 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากมินิไรโซทรอน และการเจาะดิน : (ก) ท่อขนาด 100 เซนติเมตร (ข) ท่อขนาด 150 เซนติเมตร ทำการเก็บข้อมูลในวันที่ 22 พฤษภาคม 2557 (ครั้ง 2)	27
8 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากมินิไรโซทรอน และการเจาะดิน : (ก) ท่อขนาด 100 เซนติเมตร (ข) ท่อขนาด 150 เซนติเมตร ทำการเก็บข้อมูลในวันที่ 3 ตุลาคม 2557 (ครั้ง 3)	28
9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขึ้นดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดิน และเครื่องวัด ความขึ้นดิน	29
10 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซทรอน ขนาดความยาวท่อ 100 เซนติเมตร ที่ได้จากการบันทึกข้อมูล	31
11 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซทรอน ขนาดความยาวท่อ 150 เซนติเมตร ที่ได้จากการบันทึกข้อมูล	32
12 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซทรอน ขนาดความยาว 100 เซนติเมตร ระหว่างวันที่ 1 พฤษภาคม 2556 - 21 กันยายน 2556	34

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
13 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน ขนาดความยาว 150 เซนติเมตร ระหว่างวันที่ 1 พฤษภาคม 2556 - 21 กันยายน 2556	35
14 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน ขนาดความยาว 100 เซนติเมตร : (ก) ความยาวรากที่ได้จากการบันทึกข้อมูล (ข) ความยาวรากที่ได้จากแบบจำลองการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth- curve	38
15 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน ขนาดความยาว 150 เซนติเมตร : (ก) ความยาวรากที่ได้จากการบันทึกข้อมูล (ข) ความยาวรากที่ได้จากแบบจำลองการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth- curve	39
16 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน ขนาดความยาว 150 เซนติเมตร : (ก) ความยาวรากที่ได้จากการบันทึกข้อมูล (ข) ความยาวรากที่ได้จากแบบจำลองการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth- curve	41
17 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน : (ก) ท่อขนาด 100 เซนติเมตร และ(ข) ท่อขนาด 150 เซนติเมตร	43
18 ความชื้นในดินในพื้นที่ทำการทดลองระหว่างวันที่ 21 กันยายน 2556 - 27 กันยายน 2557	44
19 ปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ในช่วงทำการทดลองระหว่างเดือน เมษายน 2556 - กันยายน 2557	46
20 พื้นที่ทรงพุ่มในพื้นที่ทำการทดลองระหว่างวันที่ 11 มกราคม 2557 - 17 กันยายน 2557	47
21 ความสัมพันธ์การเจริญของรากและความชื้นในดิน : (ก) ท่อขนาด 100 เซนติเมตร และ(ข) ท่อขนาด 150 เซนติเมตร	49

### สารบัญภาพ (ต่อ)

#### ภาพที่

#### หน้า

- 22 ความสัมพันธ์การเจริญของรากและทรงพุ่ม : (ก) ที่ขนาด 100 เซนติเมตร  
และ(ข) ที่ขนาด 150 เซนติเมตร

51

## บทที่ 1

### บทนำ

#### บทนำต้นเรื่อง

ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) เป็นพืชอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศไทย และภูมิภาคอาเซียน ประเทศไทยเป็นผู้ผลิต และส่งออกวัตถุดิบยางพาราเป็นอันดับหนึ่งของโลก และมีพื้นที่ปลูกยางประมาณ 18.76 ล้านไร่ โดยภาคใต้มีพื้นที่ปลูกมากที่สุด รองลงมาเป็นภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออกรวมภาคกลาง และภาคเหนือ ตามลำดับ การปลูกยางพารา ก่อให้เกิดกิจกรรมต่อเนื่องทั้งภาคการผลิต และภาคอุตสาหกรรม เกี่ยวข้องกับทุกภาคส่วนทั้งเกษตรกร ผู้ประกอบการ และภาครัฐ ที่กระจายอยู่ทั่วประเทศ นับเป็นเวลากว่าศตวรรษหลังจากที่ประเทศไทยนำยางพาราเข้ามาปลูกจนเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศ โดยทรงความเป็นผู้นำในการผลิต และส่งออกยางธรรมชาติมากเป็นอันดับหนึ่งของโลกมาตั้งแต่ ปี 2534 ปัจจุบันประเทศไทยยังคงทรงความเป็นผู้นำในการผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก ด้วยปริมาณ 3.57 ล้านตัน คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 33.48 ของปริมาณการผลิตยางธรรมชาติของโลก ซึ่งมีปริมาณ 10.66 ล้านตัน ส่งออก 2.95 ล้านตัน คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 36.42 ของปริมาณการส่งออกยางธรรมชาติของโลก ที่มีปริมาณ 8.1 ล้านตัน ตามลำดับ การส่งออกยางธรรมชาติของประเทศไทย ส่งออกในรูปของวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ยาง ไม้ยางพาราแปรรูป และผลิตภัณฑ์ไม้ คิดเป็นมูลค่า 678,942 ล้านบาท สร้างรายได้ให้กับเกษตรกรชาวสวนยาง ตลอดจนอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง (สถาบันวิจัยยาง, 2555)

ปัจจุบันงานวิจัยด้านการเกษตรที่เกี่ยวข้องกับยางพารากำลังได้รับความสนใจ เพื่อช่วยให้การจัดการสวนยางพารามีประสิทธิภาพ และให้ผลตอบแทนเป็นผลผลิตที่สูงขึ้น อาทิ การศึกษาการใช้สารเคมีที่ช่วยเพิ่มผลผลิตน้ำยาง การพัฒนาระบบกรีด การพัฒนาปรับปรุงพันธุ์ การศึกษาด้านดิน และการใช้ปุ๋ย การศึกษาอิทธิพลของสภาพภูมิอากาศที่มีผลต่อสรีรวิทยา ซึ่งการศึกษาด้านสรีรวิทยาของยางพาราเป็นอีกสาขาที่มีความหลากหลาย โดยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาส่วนที่อยู่เหนือพื้นดิน ทั้งนี้ความรู้ความเข้าใจและการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับรากฝอยของยางพารายังมีค่อนข้างจำกัด เนื่องจากรากฝอยเป็นส่วนหนึ่งของพืชที่ยากต่อการศึกษาเพราะเป็นส่วน

ที่อยู่ใต้ดินประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อการศึกษาด้านนี้ค่อนข้างจำกัด ทำให้องค์ความรู้และความเข้าใจระบบรากของยางพารายังมีค่อนข้างจำกัด ทั้งที่ในพืชบางชนิดปริมาณรากฝอยอาจใช้ผลผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ในรอบปีถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่เป็นปัจจัยหลัก ไม่ว่าจะเป็นความชื้นในดิน อุณหภูมิดิน ที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญและการเปลี่ยนแปลงของราก การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นในฤดูกาลต่างๆ โดยประเทศไทยแบ่งออกเป็นสองฤดู ได้แก่ ฤดูฝน และฤดูแล้ง

จากความสำคัญและปัญหาดังกล่าวทำให้มีการศึกษาเปรียบเทียบการเจริญและการเปลี่ยนแปลงของรากยางพาราในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้ง เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงพลวัตของระบบรากฝอยในตลอดช่วงปีของยางพารา การศึกษาด้านนี้จะทำให้นักวิจัยมีความรู้และเข้าใจพลวัตของรากยางพารามากขึ้น สามารถพัฒนาต่อยอดการวิจัยไปสู่การปฏิบัติเพื่อการจัดการสวนยางพาราได้ถูกต้องต่อไป

## การตรวจเอกสาร

### 1. ความสำคัญของราก

รากของพืชใบเลี้ยงคู่หรือพืชยืนต้นสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักๆ คือรากแก้วและรากฝอย รากแก้วทำหน้าที่สำคัญในการยึดลำต้นให้ติดกับพื้นดินไม่ให้เกิดการโค่นล้มได้ง่าย ส่วนรากฝอยของพืชมีหน้าที่สำคัญ คือดูดและลำเลียงน้ำ แร่ธาตุ จากดินสู่ส่วนต่างๆ ของลำต้น และเป็นแหล่งสำคัญในการผลิตฮอร์โมนพืชหลายชนิด อาทิ ออกซิน (Auxin) จะกระตุ้นให้เนื้อเยื่อพืชมีการขยายขนาดและเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกลุ่มเซลล์ให้ทำหน้าที่เป็นราก ดูดน้ำ และแร่ธาตุอาหาร มาเลี้ยงส่วนของอวัยวะอื่นๆ ซึ่งเนื้อเยื่อที่เปลี่ยนแปลงนี้อาจพัฒนาเป็นรากต่อไป (Salisbury and Ross, 1991 ; Noggle and Fritz, 1976) ส่วนไซโตไคนิน (cytokinin หรือ CK) และจิบเบอเรลลิน (Gibberellin) ซึ่งฮอร์โมนต่างๆ จะถูกลำเลียงไปใช้เพื่อการเจริญและพัฒนาของส่วนต่างๆ ของพืช (สมบุญ, 2548) Gollan และคณะ (1985) อ้างโดย สายัณห์ (2554) ได้รายงานว่ารากพืชมีความสำคัญต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืชอย่างมาก รากมีความสามารถในการส่งสัญญาณไปยังส่วนยอดเพื่อการปรับตัวต่อความกดดันของสภาวะแวดล้อม เช่น ภายใต้อุณหภูมิที่หนาวเย็นทำให้รากพืชมีการสังเคราะห์ไซโตไคนินลดลง ส่งผลให้ระดับความสมดุลระหว่างไซโต

ไคนิน ต่อแอบไซซิก (abscissic acid : ABA) ลดลง มีผลให้ปากใบปิดส่งผลสืบเนื่องให้การสังเคราะห์ด้วยแสงของใบลดลงด้วย

## 2. ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญของรากฝอยพืช

การเกิดรากและการตายของรากมีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของส่วนต่างๆ ของพืช จึงมีความพยายามศึกษาการเจริญและการเปลี่ยนแปลงของราก เพื่อทราบถึงอิทธิพล ปัจจัย และสิ่งแวดล้อม ที่มีผลต่อการเจริญของราก ในการศึกษา Gonkhamdee และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรากฝอยของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ด้วยเทคนิคไรโซตรอน (rizotron) โดยการฝังท่อซีเมนต์ลึก 4.5 เมตร และเจาะช่องเพื่อการบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของรากฝอย พบว่าที่ความลึกไม่เกิน 150 เซนติเมตร รากฝอยของยางพารามีการเจริญสูงที่สุด และเกิดขึ้นระหว่างเดือนพฤษภาคม ถึงเดือนมิถุนายน ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จึงทำให้รากเจริญได้ดี ในการทดลองของ Chairungsee และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาปริมาณของน้ำฝนที่ผลต่อการเปลี่ยนแปลงรากฝอยยางพาราอายุ 14 ปี ด้วยเทคนิคไรโซตรอน พบว่าการแตกใหม่ของรากฝอยมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝน การศึกษาใน *Alhagi sparsifolia* Shap พบว่ารากของ *A. sparsifolia* มีการปรับตัวต่อระดับความลึกของน้ำใต้ดิน โดยรากมีการเจริญลึกลงไปในพื้นที่ที่มีความชื้น ส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตของรากในแนวตั้งเพิ่มสูงขึ้นโดยความชื้นที่ผิวดินอยู่ที่ระดับ 3 - 9 เปอร์เซ็นต์ จะกระตุ้นให้รากมีการหยั่งลึกมากที่สุด ขณะที่ความชื้น 30 เปอร์เซ็นต์จะทำให้รากหยุดการเจริญเติบโตในแนวตั้งและเกิดการแตกแขนงของรากได้ดี (Zeng *et al.*, 2010)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการแผ่กระจายของราก สภาพแวดล้อมมีอิทธิพลอย่างสูงต่อการเจริญของรากพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินซึ่งเป็นส่วนที่รากพืชสัมผัสจะมีผลทั้งทางตรงและทางอ้อม นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญของรากพืช ได้แก่

1. พันธุกรรมของพืช เนื่องจากพืชปลูกส่วนใหญ่ได้มีการคัดเลือกปรับปรุงพันธุ์มาเป็นเวลานาน ทำให้พันธุ์พืชแต่ละชนิดมีการเจริญเติบโตของระบบรากที่แตกต่างกันเพื่อให้มีคุณสมบัติในการปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดีในพื้นที่ปลูกแต่ละแห่ง เช่น พันธุ์พืชที่ได้รับการปรับปรุงพันธุ์ให้มีความสามารถในการทนต่อสภาพแห้งแล้ง จะได้รับการคัดเลือกให้มีระบบรากที่



หยั่งลึกและแผ่กระจายของรากได้อย่างรวดเร็ว เพื่อช่วยให้มีการดูดน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น

2. การแข่งขันกันของพืช เป็นผลมาจากการแข่งขันระหว่างพืชต่างชนิด หรือพืชชนิดเดียวกันเมื่อมีการเพิ่มประชากรของพืชโดยการลดระยะปลูกให้แคบขึ้น ทำให้รากเจริญได้น้อยลง

3. การลดลงของพื้นที่ใบ ปกติการเจริญของรากขึ้นอยู่กับ การเจริญของยอด ดังนั้น เมื่อมีการตัดส่วนยอดจะมีผลทำให้น้ำหนักของรากลดลง เนื่องจากใบเป็นแหล่งสังเคราะห์แสงและสร้างอาหาร (Salisbury and Rose, 1978)

4. อากาศในดิน เนื่องจากก๊าซออกซิเจนมีความสำคัญต่อขบวนการหายใจ การดูดซึมน้ำและธาตุอาหารของรากพืช (Salisbury and Rose, 1978) อากาศในดินเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของรากพืชและจุลินทรีย์ในดิน ปริมาณของอากาศในดินมักไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดและปริมาณช่องว่างในดิน ปริมาณน้ำในดินและอากาศในดินตามปกติจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) 0.2 - 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและมีก๊าซออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ประมาณ 10 - 12 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนจะเปลี่ยนแปลงไป เมื่อดินนั้นถูกนำไปใช้ในการเพาะปลูก วิธีการในการเพาะปลูก การใส่ปุ๋ย การไถพรวน จะทำให้ดินมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น และก๊าซออกซิเจนน้อยลง เพราะรากพืชมีกิจกรรมอยู่ตลอดเวลา โดยที่การใส่ปุ๋ย การไถพรวน จะทำให้ทั้งพืช และจุลินทรีย์ในดิน มีการเจริญเติบโตดี กิจกรรมทางด้านหายใจก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย (Noggle and Fritz, 1976)

5. ความเป็นกรด - ด่างของดิน เมื่อ pH ของดินต่ำกว่า 5.0 หรือสูงกว่า 8.0 จะมีผลทำให้การเจริญของรากพืชถูกจำกัดได้ นอกจากนี้ในสภาพที่ดินเป็นกรดจัดมีผลทำให้เกิดความเป็นพิษของธาตุอาหารบางตัว เช่น อลูมิเนียม แมงกานีส และเหล็ก เป็นต้น

6. อุณหภูมิของดิน ปกติอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญของรากจะต่ำกว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญของส่วนยอด แต่ถ้าอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจะมีผลยับยั้งการเจริญของรากพืช การดูดน้ำจะลดลง ต้นพืชจะเหี่ยว นอกจากนี้กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน ในสภาพอุณหภูมิของดินต่ำก็จะลดลงด้วย ทำให้ได้อินทรีย์สารที่เป็นประโยชน์ต่อพืชน้อยตามไปด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์พืชด้วย ดังนั้นในเขตเมืองหนาวมีการเพิ่มอุณหภูมิรากโดยการทำท่อน้ำอุ่นฝังในดิน เพื่อช่วยให้รากพืชเจริญได้ดีขึ้น ส่วนอุณหภูมิในดินที่สูงกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการ

เจริญของส่วนยอดนั้น จะทำให้รากชะงักการเจริญเติบโตได้ (Salisbury and Rose, 1978; Noggle and Fritz, 1976)

### 3. ความสัมพันธ์ระหว่างรากและส่วนยอด

นอกเหนือจากหน้าที่หลักของรากที่มีต่อพืชบางประการ เช่น ทำหน้าที่ดูดน้ำและธาตุอาหาร ยึดเกาะดินให้พืชทรงตัวอยู่ได้ ทำหน้าที่สะสมอาหาร ขยายพันธุ์ในพืชบางชนิด และทำหน้าที่เป็นแหล่งเริ่มต้นในการสร้างฮอร์โมนพืช ยังพบว่าการเจริญเติบโตของรากมีความสัมพันธ์กับการเจริญของส่วนยอด โดยยอดทำหน้าที่สร้างอาหาร ส่งเสริมให้รากเจริญได้ดี แต่เมื่อมีความแปรปรวนของสภาพแวดล้อมจะมีผลทำให้เกิดความแปรปรวนในการกระจายน้ำหนักแห้งในส่วนของรากและต้น ดังนั้นในการวิเคราะห์การเจริญเติบโตจึงพิจารณาโดยใช้หลักการของความสัมพันธ์ระหว่าง source และ sink เมื่อพืชมีการเจริญในส่วนยอดคือมีการเจริญของใบที่ทำหน้าที่สังเคราะห์แสงได้ดี ซึ่งถือเป็น source ที่ส่งเสริมให้มีการเจริญของราก คือ sink ได้ดีด้วย (สายัณห์, 2554)

การปกคลุมทรงพุ่มหรือดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index: LAI) ก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของราก เนื่องจากดัชนีพื้นที่ใบจะเป็นตัวบ่งบอกความเหมาะสมของจำนวนใบพืชต่อความสามารถในการรับแสง (light interception) ประสิทธิภาพการใช้แสง และการเจริญเติบโตของพืช เพราะใบจัดได้ว่าเป็นอวัยวะหลักของพืชที่ทำหน้าที่ การสังเคราะห์แสง ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในวัฏจักรคาร์บอนและน้ำ (นพดล, 2552)

### 4. เทคนิคมินิไรโซโทรนอน (minirhizotron technique)

วิธีการศึกษารากของพืชที่เป็นวิธีการโดยตรง เช่น การขุดเจาะตัวอย่างดินที่มีรากของพืช การขุดรากของพืชทั้งต้นหรือการเปิดหน้าดินบางส่วน มักเป็นวิธีการที่ต้องทำลายรากของพืช ดังนั้นจึงมีการคิดค้นวิธีการศึกษารากของพืชที่ยังคงเป็นวิธีการศึกษาโดยตรง แต่ไม่เป็นการทำลายรากของพืช และสามารถทำซ้ำได้หลายๆ ครั้ง วิธีการหนึ่งที่ได้รับคามนิยม คือเทคนิคมินิไรโซโทรนอน โดยวิธีการดังกล่าวเป็นการบันทึกภาพของรากพืชผ่านท่อโปร่งใสที่ฝังลงไปดิน ด้วยกล้องบันทึกภาพขนาดเล็ก ซึ่งสามารถใช้ในการศึกษาได้ทั้งการสร้างรากใหม่และการตายของราก

จุดเด่นของเทคนิคมินิไรโซทรอน คือสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรากที่สนใจได้จำเพาะมากขึ้น ขึ้นอยู่กับความถี่ของการบันทึกภาพ โดยที่ไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงของรากพืช (Ephrath *et al.*, 1999; Johnson *et al.*, 2001) การศึกษารากพืชด้วยเทคนิคมินิไรโซทรอนสามารถศึกษาได้ทั้งจำนวนราก ความยาว พื้นที่ และเส้นผ่านศูนย์กลางของราก นอกจากนี้เทคนิคมินิไรโซทรอน สามารถประยุกต์ใช้ศึกษาได้ทั้งการเจริญเติบโตของรากพืช และการตายของรากพืช (Hendrick and Pregitzer, 1996; Majdi, 1996) รวมทั้งสามารถศึกษาค่าความหนาแน่นความยาวของราก (root length density : RLD) หรือค่าความยาวของรากต่อปริมาตรของดิน ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญของการศึกษาการกระจายและการดูดน้ำของรากของราก (Ephrath *et al.*, 1999)

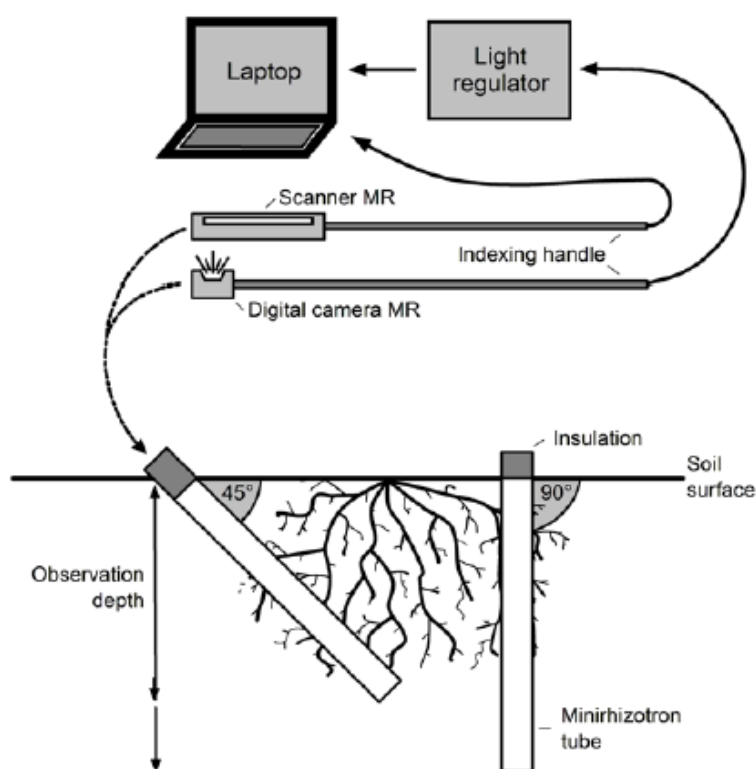
เทคนิคมินิไรโซทรอนเป็นวิธีการศึกษาติดตามรากขนาดเล็กของพืชที่ไม่ทำลายรากของพืช และสามารถศึกษาซ้ำได้ในจุดเดิม แต่ก็มีข้อควรระวังในการใช้งาน ซึ่งอาจเกิดได้จากขั้นตอนการฝังท่อลงไปดิน การฝังท่อจึงควรมีความมั่นใจว่าท่อกับดินสัมผัสกันดี และไม่ทำให้ดินบริเวณรอบๆ ผิวด้านนอกท่ออัดตัวกันแน่น การติดตั้งท่อด้วยการขาดความระมัดระวังอาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ Johnson และคณะ (2001) แนะนำว่าหลังจากการฝังท่อลงไปดินควรรอเป็นระยะเวลาประมาณ 6 - 12 เดือน ก่อนการเก็บข้อมูลเพื่อให้รากของพืชฟื้นคืนกลับมา และให้ธาตุอาหารกลับสู่สภาพใกล้เคียงก่อนหน้าการติดตั้ง การติดตามการเปลี่ยนแปลงของรากพืช เช่น การเจริญเติบโต การตาย และเกิดใหม่ของราก ต้องมีความมั่นใจว่าท่อที่ฝังจะไม่มีเคลื่อนที่ ส่วนความถี่ของการบันทึกภาพขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ศึกษาและอุปกรณ์ที่ใช้ อย่างไรก็ตามระยะเวลาที่ยาวนาน ตั้งแต่ 8 สัปดาห์ หรือมากกว่านั้น อาจทำให้ค่าประมาณการเปลี่ยนแปลงของรากที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากในช่วงระยะเวลาที่ยาวนานมีความเป็นไปได้ที่รากของพืชจะงอกใหม่และตายไป ทำให้มีภาพบางส่วนที่ไม่ได้รับการบันทึกในช่วงระยะเวลาดังกล่าว โดยที่ระยะเวลาประมาณ 2 สัปดาห์หรือน้อยกว่านั้น เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษารากของพืช และทำให้การประมาณแม่นยำขึ้น นอกจากนี้การวิเคราะห์ภาพเฉพาะบางเฟรมในหนึ่งท่อ ก็เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการลดปัญหาจำนวนท่อที่ใช้ในการทดลอง และจำนวนภาพที่ต้องวิเคราะห์ ดังนั้นการวิเคราะห์ภาพเพียงบางภาพในหนึ่งท่อ จึงช่วยลดความแปรปรวนอันเนื่องมาจากการบันทึกภาพ นอกจากนี้ตัวแปรความยาวของรากมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงง่ายกว่าจำนวนของราก

อย่างไรก็ตามยังมีความแปรปรวนที่เกิดจากการใช้เทคนิคมินิไรโซตรอน และการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการบันทึก สิ่งที่ต้องคำนึงในการใช้เทคนิคดังกล่าว คือขั้นตอนการติดตั้งท่อโปร่งใสในดิน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการบินที่ภาพ จำนวนและคุณภาพของการบันทึกภาพ และการใช้ข้อมูลที่ได้จากการบันทึก

## 5. การติดตั้งมินิไรโซตรอน

เทคนิคมินิไรโซตรอนถูกนำมาใช้กับท่อโปร่งใส (acrylic tube) ที่ถูกติดตั้งอยู่ในดินเพื่อใช้ในการสังเกตการเจริญและการเปลี่ยนแปลงรากพืช เป็นการศึกษาในสภาพดินและปัจจัยอื่นๆ เช่น หิน และชนิดของดินแตกต่างกันการติดตั้งจึงต้องเพิ่มการระมัดระวังเพื่อรอยขีดข่วนที่จะมีต่อท่อโปร่งใสในสภาพพื้นที่มีลักษณะเป็นหินหรือดินที่มีความแข็งมาก อาจใช้อุปกรณ์ชุดเจาะที่เป็นเครื่องกล รถแทรกเตอร์ หรือสว่านที่มีการประยุกต์ใช้สำหรับการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน การติดตั้งโดยในสภาพดินที่มีลักษณะเป็นหิน หรือดินสภาพแข็ง อาจส่งผลที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วนบริเวณผิวท่อได้ จึงควรเจาะช่องให้ใหญ่กว่าท่อโปร่งใส เพราะเมื่อสอดท่อเข้าไปจะลดการเสียดสีระหว่างดินกับท่อ และควรหลีกเลี่ยงการติดตั้งโดยการหมุนท่อเข้าไป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของราก และการอัดดินแน่นมากเกินไปก็อาจมีผลกระทบต่อ การเจริญของรากได้ ในกรณีที่มีการขุดหลุมขนาดใหญ่ ควรใช้ดินที่มีความละเอียดหรือดินร่อนรองกันหลุมก่อนฝังท่อ เพื่อให้รากมีการเจริญเป็นธรรมชาติมากที่สุด (Rewald and Ephrath, 2013)

การติดตั้งท่อมินิไรโซตรอนในการสังเกตรากพืช สามารถติดตั้งได้ทั้งในแนวตั้ง (ที่ 90 องศา) ซึ่งการติดตั้งในแนวเอียงทำให้สามารถประเมินกระจายตัวของรากพืชได้ดีกว่าการติดตั้งในแนวตั้ง เนื่องจากการติดตั้งในแนวเอียงช่วยลดการขนานของรากลงไปแนวตั้ง ที่สัมผัสกับท่อมินิไรโซตรอน และสามารถช่วยลดช่องว่างรอบๆ ท่อที่อาจการแทรกซึมของน้ำได้ ทั้งนี้ปัจจัยของ ชนิดพืช ประเภทของดิน และรูปแบบการเจริญเติบโตของราก องศาของการติดตั้ง อย่างไรก็ตาม การติดตั้งเอียงทำมุม 45 องศา กับแนวราบ ทำให้รากพืชมีโอกาสสัมผัสกับผิวของท่อมินิไรโซตรอน ได้ดีกว่าการติดตั้งในแนวตั้ง (Rewald and Ephrath, 2013)



ภาพที่ 1 ลักษณะการติดตั้งมินิโรโซตรอนในแนวตั้ง 90 องศา และแนวเอียง 45 องศา  
ที่มา : Rewald และ Ephrath (2013)

## 6. ความถี่ของการจับภาพบันทึกข้อมูล

จุดเด่นของเทคนิคมินิโรโซตรอน คือสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงรากพืชได้อย่างต่อเนื่อง การกำหนดความถี่ในการศึกษามีผลสำคัญในการประเมินการสร้างรากใหม่และอัตราการตายของราก การเว้นช่วงระยะเวลาการบันทึกที่ยาวนานเกินไปอาจทำให้เกิดขึ้นของรากใหม่และการตายของรากบางส่วนขาดหายไประหว่างช่วงของการบันทึกข้อมูลได้ ความถี่ที่เหมาะสมมักอยู่ที่ 2 - 4 สัปดาห์ ซึ่งการศึกษาในเขตนานวักไม่มีการบันทึกข้อมูลในช่วงที่รากมีการพักตัว การศึกษารากความถี่ที่ใช้กันมากที่สุด คือเลือกจับความถี่ระหว่าง 2 - 4 สัปดาห์ และลดการจับภาพในช่วงพักตัว (เช่น ฤดูหนาว) ทั้งนี้ปัจจัยหลักที่จะเป็นตัวกำหนดความถี่ของการจับภาพในการศึกษารากพืชด้วยมินิโรโซตรอน คืออัตราการตายของรากพืชแต่ละชนิด (Rewald and Ephrath, 2013)

## 7. การประยุกต์ใช้เทคนิคมินิไรโซทรอนสำหรับการศึกษารากพืช

การศึกษารากของ *Quercus ilex* L. ด้วยเทคนิคมินิไรโซทรอน พบว่าความหนาแน่นของรากฝอยลดลงตามความลึกของดินที่เพิ่มขึ้น และมีความหนาแน่นสูงสุดบริเวณชั้นดินใกล้ผิวดิน (López *et al.*, 2001) การศึกษาใน *Acer saccharum*, *Liquidambar styraciflua*, *Pinus elliotii*, *Picea glauca*, *Salix* spp. และ *Populus tremuloides* พบว่าจำนวนรากที่ได้จากเทคนิคมินิไรโซทรอนสามารถใช้ประมาณความยาวของรากได้ (Crocker *et al.*, 2003) ในรายงานของ Parker และคณะ (1991) ได้ศึกษาเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของราก (root length density : RLD) ที่ได้จากวิธีการเก็บตัวอย่างดิน วิธีนับราก การเปิดช่องดิน และการใช้เทคนิคมินิไรโซทรอน ที่ฝังท่อเอียง 45 องศา ในมันฝรั่ง พบว่าค่าจากเทคนิคมินิไรโซทรอนให้ค่าประมาณที่ใกล้เคียงกับการเก็บตัวอย่างดิน และมีความแม่นยำระดับความลึกมากกว่า 30 เซนติเมตร จากผิวดิน ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือขึ้นมา ค่าประมาณที่ได้มีความแม่นยำต่ำ ประเด็นดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าเทคนิคมินิไรโซทรอน มีความสามารถในการประเมินอัตราการเจริญเติบโต การตาย จำนวนราก และความหนาแน่นของรากฝอยของพืชได้ แต่อาจมีความแม่นยำต่ำ หากใช้ประมาณ RLD บริเวณใกล้ผิวดิน ซึ่งในการศึกษาของ Samson และ Sinclair (1994) ในข้าวโพดให้ผลคล้ายกับการศึกษาของ Parker และคณะ (1991) อย่างไรก็ตาม Ephrath และคณะ (1999) รายงานว่าการใช้เทคนิคมินิไรโซทรอน ศึกษาการศึกษารากของพืชตระกูลกระถิน (*Acacia saligna*) และข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) สามารถใช้ประมาณค่า RLD ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับค่าจริงที่ได้จากวิธีการเก็บตัวอย่างดิน และไม่มี ความแตกต่างระหว่างการฝังท่อเอียง 45 องศา และการฝังในแนวตั้ง

ทั้งนี้การประยุกต์เทคนิคมินิไรโซทรอนเพื่อการศึกษาการคายน้ำของพืชยังมีข้อจำกัด หลายๆ การศึกษามักเป็นวิธีการใช้วิธีการเจาะเก็บตัวอย่างดิน (core sampling) หรือ การใช้เทคนิคมินิไรโซทรอน ตัวอย่างการศึกษาการคายน้ำของพืชด้วยวิธีการเจาะเก็บตัวอย่างดิน ในรายงานของ Philip และคณะ (1996) ศึกษาการแพร่กระจายของรากและธาตุอาหารในสวนยางพาราที่รัฐ Tripura ประเทศอินเดีย พบว่าปริมาณความหนาแน่นรากสูงสุดที่ระดับความลึก 0 - 18 เซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ปรากฏมีปริมาณสูงสุดในระดับความลึกเดียวกัน การศึกษาอิทธิพลการให้น้ำยางพาราในฤดูแล้งที่มีต่อรากของยางพาราด้วยเทคนิคมินิไรโซทรอน พบว่าต้นยางพาราที่ไม่ให้น้ำมีการปรับตัวโดยการหยั่งรากลึกลงไปในดินชั้นล่าง เพื่อดูด

ความชื้นจากดินชั้นล่าง ในขณะที่ต้นยางพาราที่ให้น้ำอย่างสม่ำเสมอ มีการเจริญเติบโตของรากมากบริเวณผิวดิน (สายัณห์ และนเรศ, 2551) นอกจากนี้การศึกษารากโดยใช้เทคนิคมินิไรโซทรอน โดยการถ่ายภาพรากยางพาราด้วยกล้องดิจิทัล มีความสัมพันธ์กับการศึกษารากโดยใช้เทคนิคการเจาะดิน จึงแนะนำว่าการศึกษารากยางพาราโดยใช้เทคนิคมินิไรโซทรอน เป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมในการศึกษาการเจริญเติบโตของรากเพราะสามารถทำได้รวดเร็ว วัดผลได้ต่อเนื่องโดยไม่ทำลายส่วนของราก (Ephrath *et al.*, 1999)

## 8. การวิเคราะห์ภาพ

มีซอฟต์แวร์จำนวนมากที่สามารถใช้ได้กับการวิเคราะห์ของภาพมินิไรโซทรอน ซึ่งสามารถรองรับได้ทั้งภาพ วีดีโอและการสแกน ได้แก่ RooTracker (Duke University National Phytotron, Durham, NC, USA), WinRHIZO Tron (Regent Instruments, Inc., Quebec, Canada) และ RootFly (Birchfield and Wells, Clemson University, Clemson, SC, USA) หรือประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์ของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เช่น MapInfo (Pitney Bowes Mapinfo Corporation, New York, NY, USA) ก็อาจจะเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ราก แต่ละซอฟต์แวร์มีจุดเด่นและจุดด้อย สำหรับการวิเคราะห์รากแตกต่างกัน บางระบบก็มีการอนุญาตให้มีการปรับเปลี่ยนจากการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างภาพ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการติดตามราก ส่วนซอฟต์แวร์อื่นๆ ช่วยให้การติดตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรากหรือการตรวจสอบรากอัตโนมัติ จุดเด่นของมินิไรโซทรอน เมื่อเทียบกับการเจาะดิน คือความสามารถในการติดตามการเจริญเติบโตและอัตราการตายของรากได้ดีขึ้น (Iversen *et al.*, 2012)

## 9. อิทธิพลของสิ่งแวดล้อมต่อการเปลี่ยนแปลงของราก

แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย ในอนาคตจะเปลี่ยนแปลงในทางที่มีฝนมากขึ้นในเกือบทุกภาคของประเทศไทย ส่วนอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในประเทศไทยจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก อาจจะมีเพิ่มสูงขึ้นหรือลดลงประมาณ 1 - 2 องศาเซลเซียส แต่การเปลี่ยนแปลงในเชิงของอุณหภูมิที่สำคัญประการหนึ่ง คือจำนวนวันที่อากาศเย็นในรอบปีจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และในทางกลับกันจำนวนวันที่อากาศร้อนในรอบปีก็จะเพิ่ม

มากขึ้น ซึ่งอาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือแม้ว่าอุณหภูมิของประเทศไทยไม่ร้อนขึ้นมากนัก แต่จะร้อนนานขึ้นกว่าเดิม และฤดูหนาวของประเทศไทยจะสั้นลง อีกประเด็นหนึ่งที่มีความสำคัญก็คือความแปรปรวนหรือความแตกต่างระหว่างฤดูต่อฤดู หรือในระหว่างปีต่อก็อาจสูงขึ้นด้วยเช่นกัน (ศุภกร, 2554) กล่าวคือจำนวนวันที่มีอากาศร้อน หรือวันที่มีอุณหภูมิสูงสุดมากกว่า 33 องศาเซลเซียส จะเพิ่มขึ้น 2 - 3 สัปดาห์ต่อปี และจำนวนวันที่มีอากาศเย็น หรือวันที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส จะลดลง 2 - 3 สัปดาห์ต่อปี หรืออาจกล่าวได้ว่าในอนาคตฤดูร้อนในภูมิภาคนี้จะมีระยะเวลายาวนานขึ้นและฤดูหนาวจะสั้นลง (ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554)

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อน มีสภาพแวดล้อมเหมาะสมต่อการปลูกยาง โดยเฉพะอย่างยิ่งทางภาคใต้ และบางจังหวัดของภาคตะวันออกซึ่งเป็นแหล่งปลูกยางเดิม ต่อมาได้มีการขยายพื้นที่ปลูกยางไปยังแหล่งปลูกยางใหม่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือ (กรมวิชาการเกษตร, 2550) ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของภาคใต้ในช่วงที่ผ่านมา พบว่าผลกระทบของความแปรปรวนของภูมิอากาศส่งผลให้ผลผลิตมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณฝนรายปีที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้วันกรีดยางลดลง นอกจากนี้พบว่ามี ความรุนแรงของพายุส่งผลให้ต้นยางโคนล้มเสียหาย และมีน้ำท่วมขัง จนส่งผลให้ผลผลิตลดลงอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ฤดูกาลที่ผิดปกติ เช่น มีฝนตกในช่วงฤดูร้อน ส่งผลให้ต้นยางพารามีการพัฒนาผิดปกติคือออกดอกน้อยและดอกร่วง ทำให้ไม่ติดเมล็ด ซึ่งส่งผลกระทบต่อเกษตรกรที่ผลิตต้นพันธุ์ยาง นอกจากนี้ฝนที่ตกเป็นช่วงๆในฤดูร้อนทำให้เกิดโรคระบาด เช่น โรคราแป้งทำให้ใบอ่อนร่วงหลายครั้ง (ณรงค์ และคณะ, 2555)

การศึกษาด้านอิทธิพลของภูมิอากาศที่มีผลการเจริญและการเปลี่ยนแปลงสรีรวิทยาของราก พบว่ารากพืชจะมีการเจริญในช่วงฤดูใบไม้ผลิ และอัตราการตายสูงสุดในฤดูร้อน (Jainwei et al., 2008) สายัณห์ และนเรศ (2551) ศึกษาการเจริญเติบโตของรากยางพาราที่มีการให้น้ำในระดับต่างๆ กันในช่วงฤดูแล้งโดยใช้เทคนิคมินิไรโซทรอน พบว่าต้นยางพาราที่ไม่มีการให้น้ำ มีการปรับตัวโดยการหยั่งรากลึกลงเพื่อดูดความชื้นจากดินชั้นล่าง ในขณะที่ต้นยางพาราที่ให้น้ำอย่างสม่ำเสมอ มีการเจริญเติบโตของรากมากบริเวณผิวดิน ซึ่งการให้น้ำแก่ต้นยางพาราทำให้ดินมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้รากสามารถดูดน้ำจากดินชั้นบน จึงทำให้รากการแผ่กระจายมากในดินชั้นบน ซึ่งความสอดคล้องกับการทดลองของ วินัย และคณะ (2555) ใน



การศึกษาค้นคว้าของการให้น้ำแบบต่างๆ ที่มีต่อการเจริญเติบโตของรากลำไยในโรงเรือนพลาสติก พบว่าในสภาพดินทรายที่มีการให้น้ำมากพอจนดินชั้นล่างชื้น รากลำไยเจริญเติบโตมากที่สุด และหนาแน่นที่สุดที่ก้นถัง ขณะที่ต้นลำไยที่ให้น้ำแบบประหยัดหรือแบบขาดแคลนมีการแผ่กระจายของรากตั้งแต่ผิวดินถึงดินชั้นล่าง แต่ปริมาณรากน้อยกว่าการให้น้ำเต็มที่

นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อรากต้นลำไย และแร่ธาตุอาหารของราก รวมไปถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน (Noggle and Fritz, 1976) ในการศึกษาผลกระทบต่ออุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงรากของมะเขือเทศ พบว่ารากต้นลำไยมะเขือเทศเจริญได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (Hurewitz and Janes, 1983) และในการศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซึ่มสารละลายธาตุอาหารของข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare* L.) ที่อุณหภูมิ 3 - 25 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่ 9 องศาเซลเซียส ข้าวบาร์เลย์ดูดซึ่มธาตุอาหารได้ดี และมีปริมาณความหนาแน่นของรากมากกว่าอุณหภูมิอื่นๆ (Macduff et al., 1986) ในขณะที่การศึกษาของ Gluszek และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษารากของแอปเปิ้ล (*Malus domestica*) ด้วยเทคนิคมินิไรโซทรอน พบว่ารากแอปเปิ้ลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะมีอัตราการรอดชีวิตน้อยกว่ารากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่เมื่ออุณหภูมิลดลงในช่วงฤดูหนาว

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของการติดตั้งท่อมินิไรโซทรอน ในการฟื้นตัวของรากยางพารา
2. เพื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของรากยางพารา ในระหว่างฤดูฝนและฤดูแล้ง ในภาคใต้ของประเทศไทย

## บทที่ 2

### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

#### 1. วัสดุ อุปกรณ์

1. ต้นยางพาราที่มีขนาดลำต้นใกล้เคียงกันมีเส้นรอบวง 50 - 55 เซนติเมตร
2. กล้อง PSU - Minirhizotron - 1
3. คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก
4. แบตเตอรี่สำรอง
5. เครื่องเจาะเก็บตัวอย่างแบบมือหมุน (Hand Auger) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร
6. ท่ออะคริลิก (acrylic tube) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 104 มิลลิเมตร ยาว 100 และ 150 เซนติเมตร ปลายด้านหนึ่งปิด
7. ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว
8. ฝาปิดท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว
9. กล้องถ่ายภาพยี่ห้อ Nikon รุ่น E4800 (Japan)
10. เลนส์ชนิด fish eye ที่รับภาพได้ 180 องศาในแนวราบ ยี่ห้อ Delta-t Devices (Cambridge, United Kingdom)
11. ขาตั้งกล้อง ยี่ห้อ Giotto รุ่น MT 9242 และหัวบอล รุ่น MH 1300
12. เครื่องวัดความชื้นในดิน ยี่ห้อ Delta-t Devices รุ่น HH2 และหัววัดความชื้น รุ่น PR2 (Cambridge, United Kingdom)
13. เครื่องนับจำนวน (Counter)

## สถานที่ทดลอง

ทดลองในแปลงยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุ 9 ปี ยังไม่เปิดกรีด ระยะปลูก 7 x 3 เมตร เป็นสวนยางของเกษตรกรที่บ้านนา หมู่ที่ 5 ตำบลทุ่งขมิ้น อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา (N6° 56' 03" E10° 32' 43") โดยทำการทดลองศึกษาเปรียบเทียบการเจริญและการเปลี่ยนแปลงของรากยางพาราในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งด้วยเทคนิคมินิไรโซทรอน

## 2. วิธีการดำเนินงาน

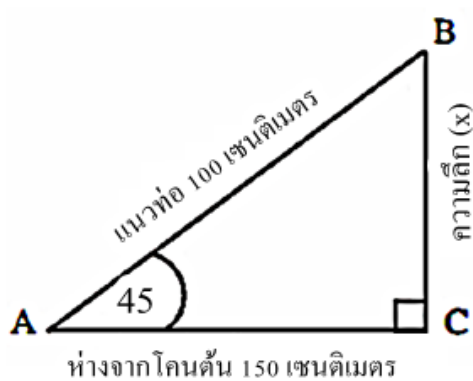
**การคัดเลือกยางพารา** คัดเลือกยางพาราจำนวน 3 ต้น จากในแปลงเพื่อทำการทดลอง โดยเลือกยางพาราที่มีขนาดลำต้นใกล้เคียงกันมีเส้นรอบวง 50 - 55 เซนติเมตร และมีสภาพพื้นที่เรียบสม่ำเสมอมากที่สุด

**การเตรียมพื้นที่และติดตั้งอุปกรณ์** เมื่อได้ยางพาราเพื่อทำการทดลองแล้ว ทำการขุดหลุมเพื่อติดตั้งท่ออะคริลิก แต่ละต้นจะมีการฝังท่ออะคริลิกโปร่งใสจำนวน 2 ท่อ ได้แก่ คือท่ออะคริลิกยาว 100 เซนติเมตร จะฝังทำมุม 45 องศา กับแนวระดับ ห่างจากโคนต้น 150 เซนติเมตร ต้นยางพารา และท่ออะคริลิกยาว 150 เซนติเมตร ซึ่งจะฝังทำมุม 60 องศา กับแนวระดับ ห่างจากโคนต้น 150 เซนติเมตร การขุดหลุมสำหรับท่อที่ยาว 150 เซนติเมตร จะทำการเปิดหน้าดินด้วยจอบ ให้มีความกว้าง ยาว และลึก เท่ากับ 100 x 100 x 80 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ จากนั้นจะขุดต่อจนถึงระดับ 150 เซนติเมตร ด้วยเครื่องเจาะเก็บตัวอย่างดินแบบมือหมุน ส่วนหลุมสำหรับท่อที่ยาว 100 เซนติเมตร จะใช้เฉพาะเครื่องเจาะเก็บตัวอย่างดินแบบมือหมุนขุดทำมุม 45 องศา กับแนวระดับ วิธีการฝังท่อจะต้องนำดินที่ได้จากการขุดหลุมไปตากในที่ร่มจนแห้ง จากนั้นนำดินดังกล่าวไปบดให้เป็นผงหนึ่งสัปดาห์หลังจากการขุดหลุม ท่ออะคริลิกจะถูกฝังด้วยการสอดท่อลงไปหลุมแล้วค่อยๆ หยอดดินที่ตากแล้วลงไปหลุมเพื่อให้ดินแนบสนิทกับผิวท่อ

ในการศึกษาครั้งนี้มีการขุดหลุมเพื่อเตรียมการฝังท่อในวันที่ 23 เมษายน 2556 และดำเนินการฝังท่อในวันที่ 1 พฤษภาคม 2556 เนื่องจาก 1 วัน หลังการฝังท่อเกิดฝนตก และต้องรอให้ดินที่ขุดมาแห้ง เพื่อจะนำกลับไปกรอกฝังรอบๆ ท่อโปร่งใสให้ผิวท่อแนบสนิทกับดิน หลังจากนั้นทำการบันทึกภาพครั้งแรกวันที่ 25 พฤษภาคม 2556

ความลึกในแนวดิ่งของท่อที่ฝังสามารถคำนวณหาได้จาก

1. ท่อที่ฝังขนาดยาว 100 เซนติเมตร ทำมุม 45 องศา



$$\sin 45^\circ = BC / AC$$

แทนค่า  $\sin 45^\circ = 1/\sqrt{2}$  หรือ 0.707,  $BC = X$ ,

$$AB = 100 \text{ เซนติเมตร}$$

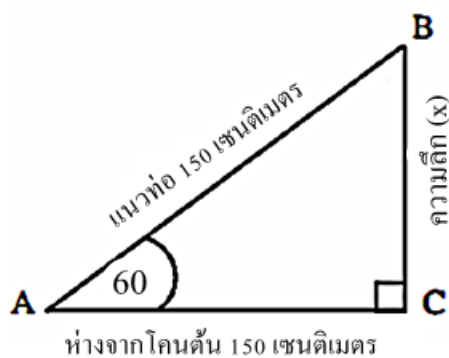
ดังนั้น  $0.707 = X / 100$

$$X = 100 \times 0.707$$

$$X = 70.7 \text{ เซนติเมตร}$$

เพราะฉะนั้น ความลึกของท่อที่ฝังขนาดยาว 100 เซนติเมตร ทำมุม 45 องศา มีค่าเท่ากับ 70.7 เซนติเมตร

2. ท่อที่ฝังขนาดยาว 150 เซนติเมตร ทำมุม 60 องศา



$$\sin 60^\circ = BC / AC$$

แทนค่า  $\sin 60^\circ = \sqrt{3}/2$  หรือ 0.866,  $BC = X$ ,

$$AB = 150 \text{ เซนติเมตร}$$

ดังนั้น  $0.866 = X / 150$

$$X = 150 \times 0.866$$

$$X = 129.9 \text{ เซนติเมตร}$$

เพราะฉะนั้น ความลึกของท่อที่ฝังขนาดยาว 150 เซนติเมตร ทำมุม 60 องศา มีค่าเท่ากับ 129.9 เซนติเมตร

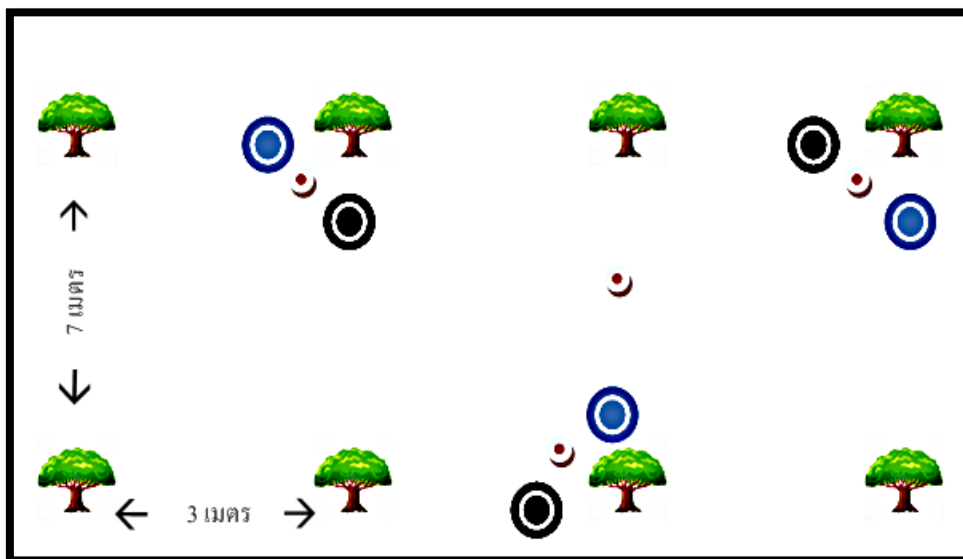
### 3. การเก็บข้อมูล

#### 3.1 ข้อมูลการเจริญและการเปลี่ยนแปลงราก





บันทึกข้อมูลโดยการบันทึกภาพรากฝอยที่ปรากฏอยู่รอบๆ ฝิวท่ออะคริลิกด้วยกล้อง PSU-Minirhizotron-1 เพื่อบันทึกการเจริญและการเปลี่ยนแปลงของรากที่เกิดขึ้น หลังจากการติดตั้งท่ออะคริลิก โดยทำการบันทึกภาพทุก 2 สัปดาห์

#### 3.2 ข้อมูลความชื้นในดิน

เก็บบันทึกข้อมูลความชื้นในดินด้วยเครื่องวัดความชื้นในดิน Soil Profile Probe Delta-t Devices รุ่น HH2 และหัววัดรุ่น PR2 โดยมีการฝังท่อวัดความชื้นจำนวน 4 ท่อ ลึก 100 เซนติเมตร ทำมุม 90 องศากับแนวระดับ ได้แก่ บริเวณห่างจากต้นยาง 100 เซนติเมตร ของยางที่ทำการทดลองทั้ง 3 ต้น และบริเวณกึ่งกลางของยางพาราทั้ง 3 ต้น อีกหนึ่งตำแหน่ง โดยทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ สัปดาห์



ภาพที่ 2 ภาพจำลองตำแหน่งของต้นยางและอุปกรณ์ต่างๆ ในแปลงทดลอง

-  : ต้นยาง
-  : ท่ออะคริลิกที่ฝังขนาดยาว 150 เซนติเมตร ทำมุม 60 องศา
-  : ท่ออะคริลิกที่ฝังขนาดยาว 100 เซนติเมตร ทำมุม 45 องศา
-  : ฝังท่อวัดความชื้นในดิน

### 3.3 ข้อมูลภาพการปกคลุมทรงพุ่มหรือดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index: LAI)

เก็บบันทึกข้อมูลภาพถ่ายทรงพุ่มของยางพาราโดยใช้กล้องบันทึกภาพแบบ Hemispherical photography ประกอบด้วยเลนส์ตาปลา (Fish eye) ที่รับภาพได้ 180 องศาในแนวราบ

การเก็บข้อมูลดัชนีพื้นที่ใบ ได้มีการเริ่มถ่ายรูปทรงพุ่มเมื่อเดือนมกราคม 2557 แต่ในช่วงต้นเดือนกุมภาพันธ์ถึงปลายเดือนมีนาคม 2557 จะมีการเก็บข้อมูล 3 วันต่อครั้ง เนื่องจากเป็นช่วงที่ยางมีการผลัดใบและผลิใบออกมา ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดของแต่ละวัน จึงมีการเก็บข้อมูลที่มีความถี่มากขึ้น ส่วนในช่วงเดือนอื่นๆ จะมีการเก็บข้อมูล 1 ครั้งต่อเดือน เพราะช่วงดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงของทรงพุ่มที่น้อยมาก

### 3.4 ข้อมูลความยาวรากพืชด้วยวิธีเจาะดิน (Core sampling)

เป็นวิธีการเจาะดินบริเวณระบบรากพืชด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างดินที่ทราบปริมาตร จากนั้นจึงทำการแยกรากออกจากดินโดยวิธีล้างราก และทำการวัดความยาวรากด้วยวิธีการนับจุดตัด (Tennant, 1975) เพื่อคำนวณกลับไปเป็นค่าความหนาแน่นของราก หรือความยาวรากต่อปริมาตรของดิน โดยจะทำการเก็บตัวอย่างทั้งหมด 3 ครั้ง (27 ธันวาคม 2556, 22 พฤษภาคม 2557 และ 3 ตุลาคม 2557) ที่ระดับความลึก 10 - 20, 20 - 30, 30 - 40, 40 - 50, 50 - 60, 60 - 70, 70 - 80, 80 - 90, 90 - 100 และ 110 - 120 เซนติเมตร (ความลึก 70 - 80, 80 - 90, 90 - 100 และ 110 - 120 เซนติเมตร จะใช้ในการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากกล้องมินิไรโซทรอนเฉพาะต่อขนาดยาว 150 เซนติเมตร)

การประเมินความยาวรากจากการนับจุดตัดของราก โดยใช้ภาชนะที่มีลักษณะเป็นถาดสี่เหลี่ยมและโปร่งใส ภายในเติมน้ำความสูงประมาณ 2 เซนติเมตร เมื่อทำการประเมินความยาวรากจึงใส่ชิ้นส่วนรากลงในถาด โดยเกลี่ยให้ชิ้นส่วนรากลอยบนน้ำ และกระจายทั่วทั้งถาด ด้านใต้ถาดมีกระดาษกราฟรองเพื่อใช้เป็นสเกลสำหรับการนับจุดตัดที่ชิ้นส่วนของรากพาดผ่าน จากนั้นนับจุดตัดของรากที่พาดผ่านจุดตัดบนเส้นกระดาษกราฟ ใช้เครื่องนับจำนวนช่วยในการจดจำการนับจำนวน

Newman (1966) อ้างโดย Tennant (1975) ได้ใช้สูตร

$$R = \frac{\pi NA}{2H}$$

การคำนวณความยาวรากมีสูตรคำนวณ (Tennant, 1975) ดังนี้

$$\text{ความยาวราก (เซนติเมตร)} = \frac{11}{14} \times \frac{\text{จำนวนจุดตัด (N) หน่วยเป็นเซนติเมตร} \times \text{ตารางหน่วย}}{\text{เส้นกริดที่ใช้ นับจุดตัด (เซนติเมตร)}}$$



สูตร ปริมาตรของดิน ซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์ เซนติเมตร (ลบ.ซม.)

$$\text{ปริมาตรทรงกระบอก} = \pi r^2 h$$

$$\text{เมื่อ } \pi = 22/7 \text{ หรือ } 3.14$$

$$r = \text{รัศมี (ซม.)}$$

$$h = \text{ความสูง (ซม.)}$$

ดังนั้น เมื่อทราบปริมาตรของดิน จึงสามารถคำนวณความยาวหนาแน่นของราก หรือความยาวรากต่อปริมาตรของดิน (ซม./ลบ.ซม.)

จากสูตร

$$\frac{\text{ความยาวราก (ซม.)}}{\text{ปริมาตร (ลบ.ซม.)}}$$

---


$$\text{ปริมาตร (ลบ.ซม.)}$$

3.5 ข้อมูลถ่ายภาพเส้นตรงภายในท่ออะคริลิก เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างกล้อง PSU - Minirhizotron - 1 กับค่าจริงของเส้นตรง

#### 4. การวิเคราะห์ข้อมูล

##### 4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่าย

วิเคราะห์ข้อมูลการเจริญและเปลี่ยนแปลงของรากโดยใช้โปรแกรม RootFly เพื่อเป็นตัวแทนข้อมูลที่ได้จากเทคนิคมิไรโซทรอนซึ่งจะทำให้ทราบความยาวของรากได้

##### 4.2 การประเมินความถูกต้องของกล้อง PSU - Minirhizotron - 1

วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากความยาวของเส้นตรงโดยการถ่ายภาพด้วยกล้อง PSU - Minirhizotron - 1 กับค่าจริงความยาวของเส้นตรง ภาพที่ได้จากกล้อง ถูกวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม RootFly เพื่อเปรียบเทียบกับเส้นตรงที่ทราบความยาวที่เป็นค่าจริง

#### 4.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างวิธีมินิไรโซโทรน (minirhizotron) และวิธีการเจาะดิน (core sampling)

วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของรากยางพาราที่ได้จากวิธีมินิไรโซโทรน และวิธีการเจาะดินด้วยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้น

#### 4.4 การเปรียบเทียบระหว่างค่าความชื้นดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดิน และเครื่องวัดความชื้นดิน (Soil Profile Probe Delta-t Devices)

วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลความชื้นดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดิน โดยการเจาะด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 10, 20, 40, 60 และ 100 เซนติเมตร กับ ข้อมูลความชื้นดินจากการวัดด้วยหัววัด รุ่น PR2 และตัวเครื่อง รุ่น HH2 จากยี่ห้อ Delta-t Devices

#### 4.5 การวิเคราะห์พลวัตการเปลี่ยนแปลงของราก

เมื่อได้สมการความสัมพันธ์ตามขั้นตอนข้างต้น จึงทำการแปลงค่าที่ได้จากโปรแกรม RootFly และปรับให้ค่าความยาวที่คำนวณได้ จากค่าในแนวการฝังท่อเอียงทำมุม 45 และ 60 องศา ให้เข้าสู่ค่าแนวตั้งด้วยสมการตรีโกณมิติข้างต้น เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของรากตลอดทั้งช่วงปีในแต่ละชั้นความลึก

ภาพที่บันทึกด้วยอุปกรณ์ PSU - Minirhizotron – 1 นำมาวิเคราะห์ประเมินการเปลี่ยนแปลงความยาวของรากด้วยโปรแกรม RootFly ([www.gnu.org/copyleft/gpl.html](http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html)) ค่าความยาวของรากถูกประเมินแบ่งตามช่อง หรือ window ของการบันทึกภาพ (ซึ่งเป็นภาพถ่ายบริเวณตั้งแต่ชั้นผิวดิน (window1) ถึงชั้นใต้ดินล่างสุดที่ศึกษา (window20 (ท่อ 100 ซม.), window 30 (ท่อ 150 ซม.)) ค่าความยาวรวมของรากต่อ window ที่ได้จะมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร และนำมาคำนวณค่าความยาวรากหนาแน่นของราก ดังสมการ

$$\text{ความหนาแน่นของราก (มม./ตร.มม.)} = \frac{\text{ความยาวรากรวม (มม.)}}{\text{พื้นที่ของภาพที่บันทึกภาพ (ตร.มม.)}}$$

(พื้นที่ภาพที่บันทึกภาพ กล้องตัวที่ 1 มีขนาด 52 x 50 มิลลิเมตร, กล้องตัวที่ 2 มีขนาด 48 x 35 มิลลิเมตร และกล้องตัวที่ 3 มีขนาด 48.7 x 38.3 มิลลิเมตร)

ค่าความยาวรากหนาแน่นที่คำนวณได้ถูกใช้วิเคราะห์รูปแบบการพัฒนาและการกลับคืนมาของรากยางพาราหลังการติดตั้งท่อโปร่งใส โดยการพิจารณาและคัดเลือก ช่องหรือ window ของการบันทึกภาพที่มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงเชิงเวลา เป็นการเจริญเติบโตแบบ S-shape เพื่อให้สามารถวิเคราะห์การเจริญเติบโตดังกล่าว ในสมการวิเคราะห์การเจริญเติบโตแบบ Logistic growth curve ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประเมินด้วยสมการแบบ Logistic growth curve จะถูกใช้ตีความและเปรียบเทียบความแตกต่างของการฝังท่อทั้งสองขนาด เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบจากการฝังท่อแต่ละแบบ และใช้เป็นสมการในการพยากรณ์ช่วงระยะเวลาการกลับคืนสภาพของรากยางพาราหลังการติดตั้งท่อโปร่งใส

รูปแบบของสมการการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth curve หรือ S-shaped growth curve (Brown and Rothery, 1993)

$$y = \frac{K}{(1 + Ae^{-bx})}$$

เมื่อ  $y$  คือ ค่าตัวแปรตาม หรือปริมาณหรือขนาดของประชากร

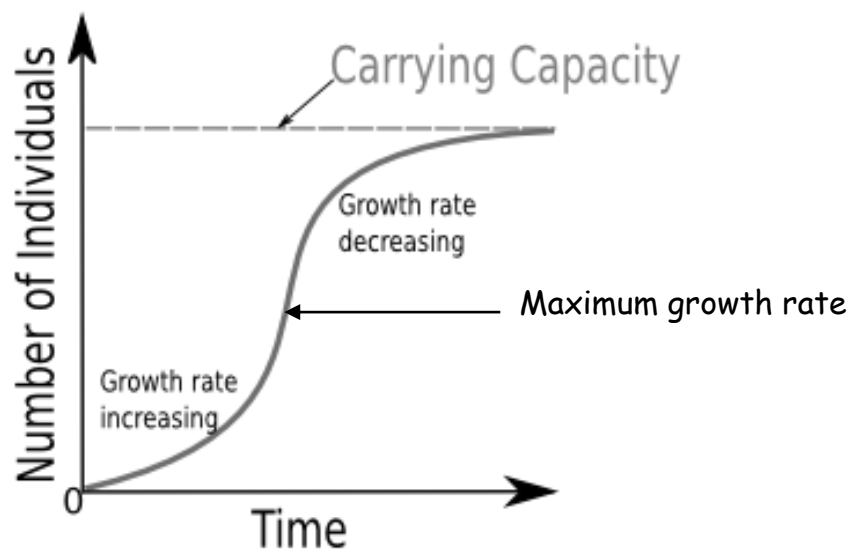
$x$  คือ ตัวแปรตั้งต้น หรือเวลา

$K$  (carrying capacity) คือ ขนาดของประชากรสูงสุดหรือค่า  $y$  ที่เป็นไปได้สูงสุด ในที่นี้คือ ค่าความยาวรากหนาแน่นสูงสุด

$A$  คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการประมาณของสมการ

$b$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต หรือเป็นค่าอัตลักษณ์ของการเติบโต โดยอัตราการเจริญเติบโตหรือการเปลี่ยนแปลงจะสูงที่สุดเมื่อ  $y$  มีค่าเท่ากับ  $K/2$  และอัตราการเจริญเติบโตหรือเปลี่ยนแปลงสูงสุดมีค่าเท่ากับ  $bK/4$  (มม./ตร.มม./วัน)

ดังนั้น อัตราการเพิ่มขึ้นของความยาวรากหนาแน่นจะมีค่าสูงที่สุด เมื่อความยาวรากหนาแน่นสูงสุดหารด้วย 2



ภาพที่ 3 รูปแบบของการเจริญเติบโตแบบโลจิสติก (Logistic growth curve)

ที่มา : Education Portal (2014)

#### 4.6 การวิเคราะห์พื้นที่ใบ

บันทึกที่บันทึกด้วยกล้องประกอบด้วยเลนส์ Fish eye จะถูกวิเคราะห์เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของดัชนีทรงพุ่มด้วยโปรแกรม Gap Light Analyser (GLA), Version 2.0 (Frazer *et. al.*, 1999)

#### 4.7 ข้อมูลสภาพอากาศ

บันทึกข้อมูลสภาพภูมิอากาศเป็นรายวันในช่วงที่ทำการทดลอง โดยใช้ข้อมูลจากสถานีอากาศเกษตรรคองส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุด อุณหภูมิต่ำสุด และปริมาณน้ำฝน

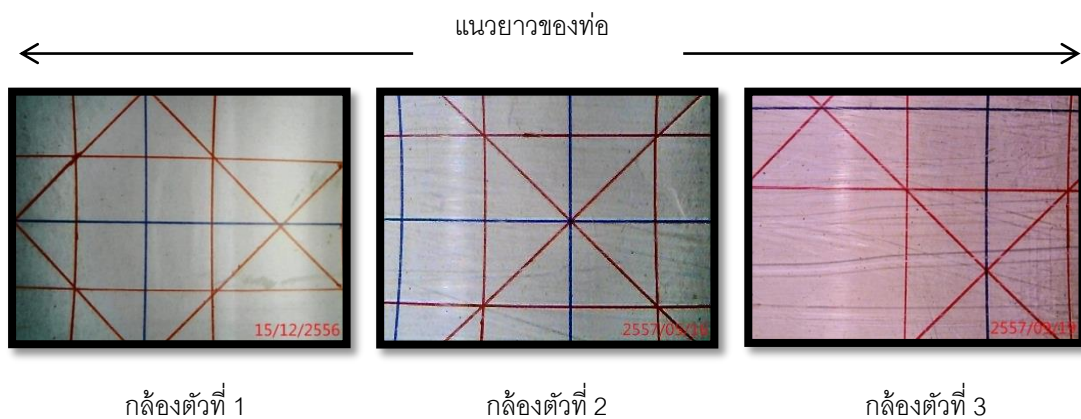
### บทที่ 3

#### ผล

#### 1. การประเมินความถูกต้องของกล้อง PSU - Minirhizotron - 1

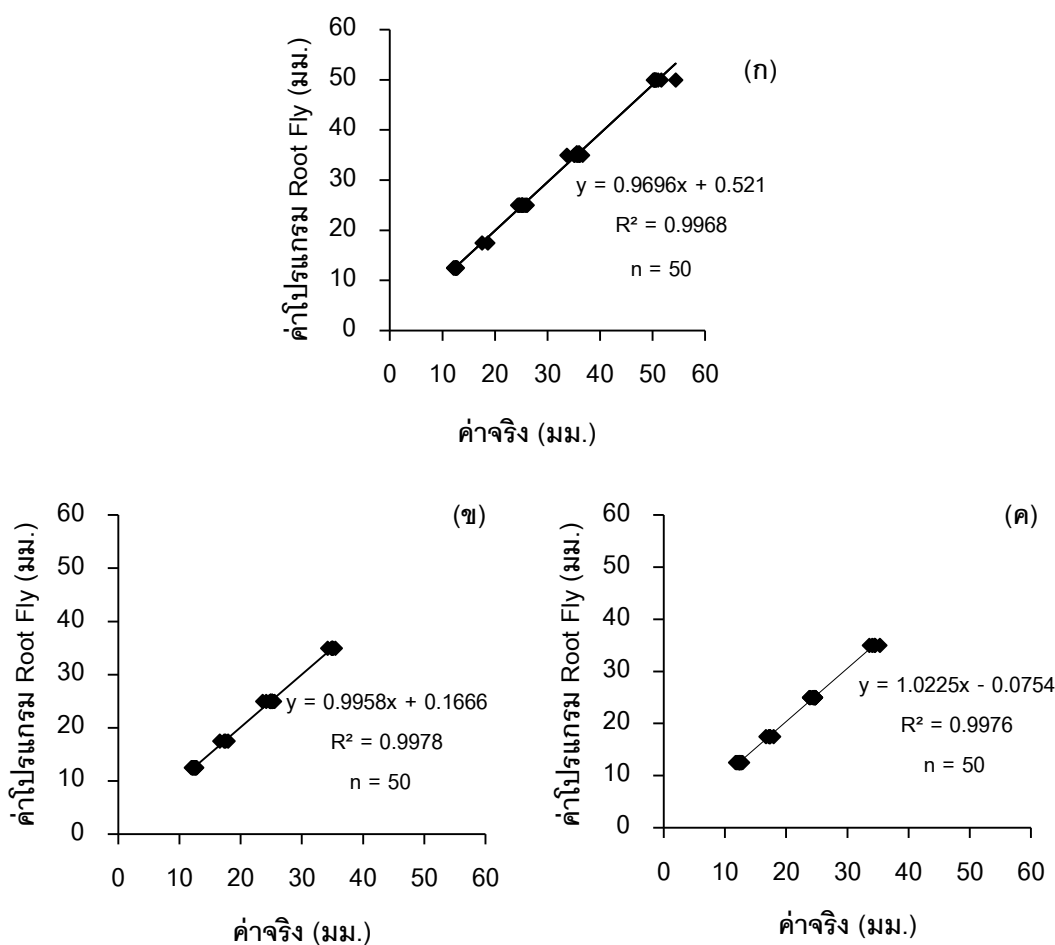
ภาพที่บันทึกด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมา มีความคมชัดค่อนข้างสูง หารายละเอียดภาพได้ชัดเจนเป็นภาพสี แต่ภาพที่ได้ทุกภาพมีความบิดเบี้ยวเชิงเรขาคณิต เนื่องจากความโค้งภายในผิวท่ออะคริลิกที่ใช้เป็นท่อมินิไรโซโทรน ทำให้เส้นตารางของภาพที่บันทึกได้ในแนวตัดขวางของท่อ มีลักษณะโค้งออกด้านนอกที่บริเวณส่วนปลายและเว้าเข้าด้านในบริเวณตรงกลาง ส่วนในแนวยาวของท่อ มีลักษณะโค้งเว้าเช่นกัน แต่จะเป็นการโค้งของปลายทั้งสองด้านเข้าหากัน ทั้งนี้ความคมชัดของการบันทึกภาพ จะขึ้นอยู่กับระยะโฟกัสของกล้อง ซึ่งสามารถปรับได้โดยตรงที่เลนส์ของกล้อง รวมทั้งขึ้นอยู่กับค่าความละเอียดของโปรแกรมที่ใช้บันทึกภาพ ในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้ภาพที่มีความละเอียดเพียง  $640 \times 480$  พิกเซล เนื่องจากให้ภาพที่คมชัดและใช้พื้นที่สำหรับการจัดเก็บต่อภาพไม่สูง ประมาณ 60 กิโลไบต์ต่อภาพ ทำให้ประหยัดพื้นที่ในการจัดเก็บข้อมูล

ตลอดการทดลองทั้งหมดได้ใช้กล้องจำนวน 3 ตัว เนื่องจากกล้องมีอายุการใช้งานที่น้อยในสภาพการใช้งานในแปลง กล้องแต่ละตัวจะให้ภาพที่มีขนาดพื้นที่ในภาพที่กล้องจับภาพได้ สี ที่แตกต่างกัน ดังนี้



ภาพที่ 4 ภาพตัวอย่างที่บันทึกด้วยกล้อง PSU - Minirhizotron - 1 : กล้องตัวที่ 1 กล้องตัวที่ 2 และกล้องตัวที่ 3

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของเส้นตารางที่อ่านได้จากโปรแกรม (x) และค่าจริงจากเส้นตาราง (y) ด้วยรูปแบบสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง พบว่า กล้องตัวที่ 1 มีสมการ คือ  $y = 0.969x + 0.521$  ( $R^2 = 0.996$ ) กล้องตัวที่ 2 มีสมการ คือ  $y = 0.995x + 0.166$  ( $R^2 = 0.997$ ) และกล้องตัวที่ 3 มีสมการ คือ  $y = 1.022x + 0.075$  ( $R^2 = 0.997$ ) (ภาพที่ 5) ซึ่งค่าความยาวของเส้นที่ได้จากค่าประมาณด้วยโปรแกรม และคำนวณด้วยสมการปรับค่า มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง ผลการประเมินความถูกต้องของกล้อง PSU - Minirhizotron - 1 ทั้ง 3 ตัว แสดงให้เห็นว่าภาพที่บันทึกจากกล้องทั้ง 3 มีความบิดเบี้ยวทางเรขาคณิตเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวของเส้นตารางที่อ่านได้จากโปรแกรม Root Fly (Measured value) และค่าจริง (Observed value) : (ก) กล้องตัวที่ 1 (ข) กล้องตัวที่ 2 และ (ค) กล้องตัวที่ 3 ตามลำดับ

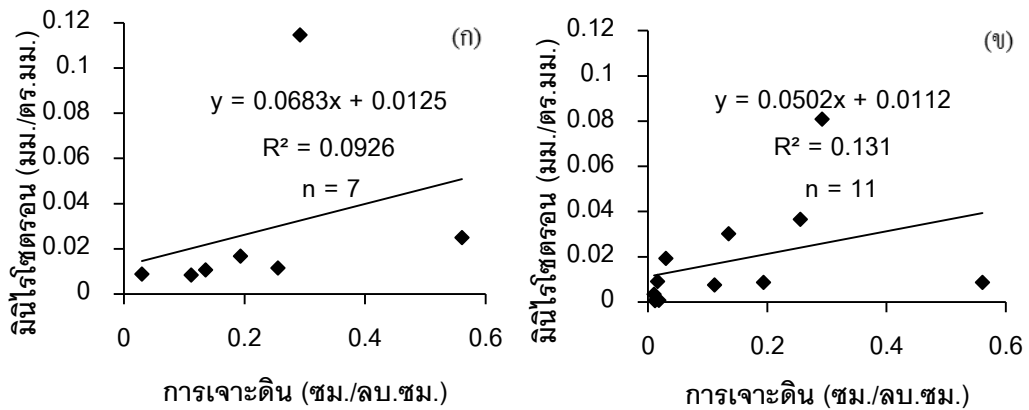
## 2. การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากกล้องมินิไรโซตรอน และการเจาะดิน

การศึกษาเปรียบเทียบค่าวิเคราะห์ความยาวรากที่บันทึกได้ด้วยกล้อง PSU - Minirhizotron - 1 และค่าที่บันทึกการเจาะดิน โดยค่าที่ได้จากการประเมินด้วยกล้อง PSU - Minirhizotron - 1 เป็นค่าความยาวรากต่อพื้นที่ (มม./ตร.มม.) ส่วนค่าที่ได้จากการขุดดินเป็นค่าความยาวรากต่อปริมาตรของดิน หรือ ความยาวรากหนาแน่นรวม (root length density : RLD) (ชม./ชม.<sup>3</sup>) โดยการจับคู่วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการประเมินด้วยกล้อง PSU - Minirhizotron - 1 และค่าที่ได้จากการเจาะดินเพื่อชุกรากโดยใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่างดินแบบมีหมุนที่ระดับความลึก 10 - 20, 20 - 30, 30 - 40, 40 - 50, 50 - 60, 60 - 70, 70 - 80, 80 - 90, 90 - 100 และ 110 - 120 เซนติเมตร (ความลึก 70 - 80, 80 - 90, 90 - 100 และ 110 - 120 เซนติเมตร จะใช้ในการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากกล้องมินิไรโซตรอนเฉพาะท่อขนาดยาว 150 เซนติเมตร) ซึ่งมีการเก็บตัวอย่างทั้งหมด 3 ครั้ง พบว่า

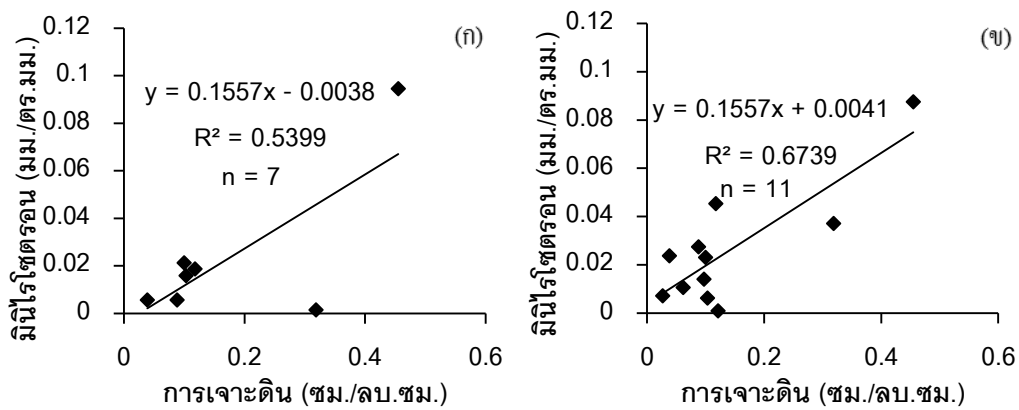
ครั้งที่ 1 วันที่ 27 ธันวาคม 2556 พบว่าท่อ 100 เซนติเมตร มีสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง  $y = 0.0683x + 0.0125$  ( $R^2 = 0.0926$ ) และท่อ 150 เซนติเมตร มีสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง  $y = 0.0502x + 0.0112$  ( $R^2 = 0.131$ ) (ภาพที่ 6)

ครั้งที่ 2 วันที่ 22 พฤษภาคม 2557 พบว่าท่อ 100 เซนติเมตร มีสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง  $y = 0.1557x + 0.0038$  ( $R^2 = 0.5399$ ) และท่อ 150 เซนติเมตร มีสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง  $y = 0.1557x + 0.0041$  ( $R^2 = 0.6739$ ) (ภาพที่ 7)

ครั้งที่ 3 วันที่ 3 ตุลาคม 2557 พบว่าท่อ 100 เซนติเมตร มีสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง  $y = 0.016x + 0.0402$  ( $R^2 = 0.0138$ ) และท่อ 150 เซนติเมตร มีสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง  $y = 0.0072x + 0.0294$  ( $R^2 = 0.0025$ ) (ภาพที่ 8)

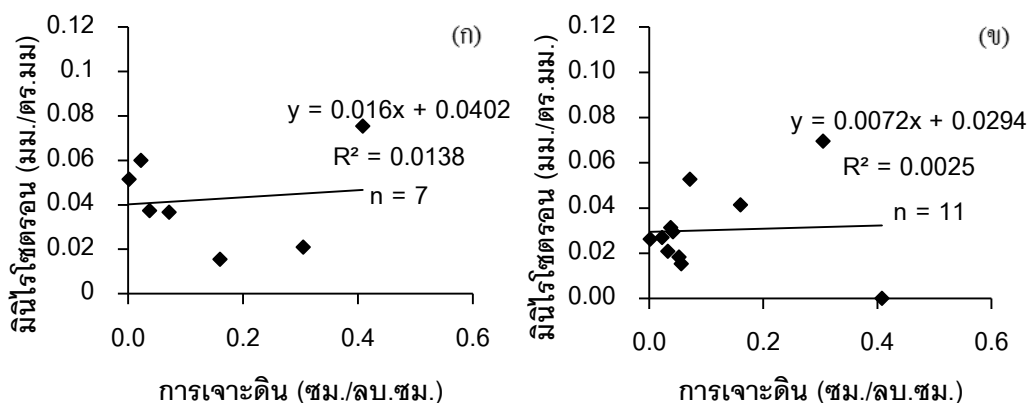


ภาพที่ 6 สัมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากมิโนโรไซตรอน และการเจาะดิน : (ก) ท่อขนาด 100 เซนติเมตร (ข) ท่อขนาด 150 เซนติเมตร ทำการเก็บข้อมูลในวันที่ 27 ธันวาคม 2556 (ครั้ง 1)



ภาพที่ 7 สัมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากมิโนโรไซตรอน และการเจาะดิน : (ก) ท่อขนาด 100 เซนติเมตร (ข) ท่อขนาด 150 เซนติเมตร ทำการเก็บข้อมูลในวันที่ 22 พฤษภาคม 2557 (ครั้ง 2)





ภาพที่ 8 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากมินิไรโซตรอน และการเจาะดิน : (ก) ท่อขนาด 100 เซนติเมตร (ข) ท่อขนาด 150 เซนติเมตร ทำการเก็บข้อมูลในวันที่ 3 ตุลาคม 2557 (ครั้ง 3)

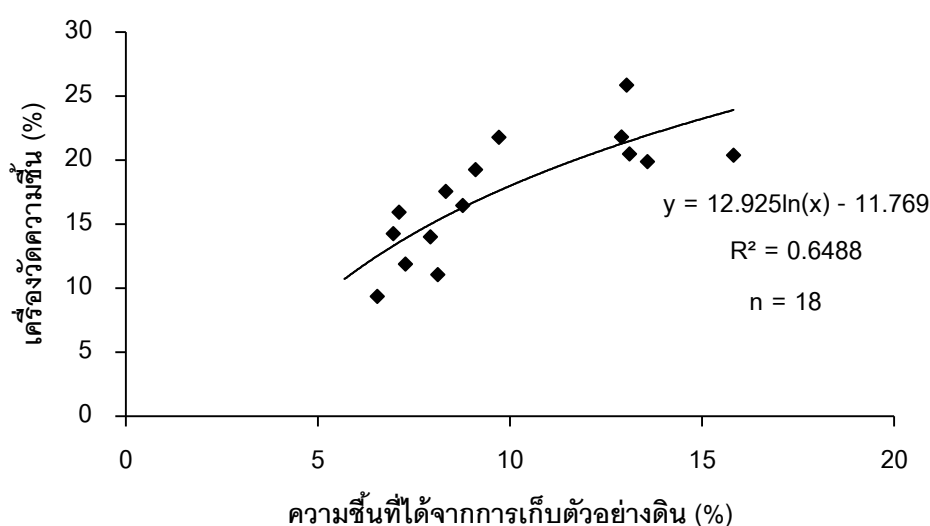
ผลการวิเคราะห์พบว่าในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 และ 3 ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ประเมินได้จากกล่อง PSU - Minirhizotron - 1 และค่าที่ได้จากการขุดดินค่อนข้างต่ำ ขณะที่ในการเก็บบันทึกข้อมูลครั้งที่ 2 ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นฤดูฝน และเป็นช่วงที่ยางพารามีใบแก่เต็มที่หลังการผลัดใบประจำปี มีค่าความสัมพันธ์ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในท่อที่มีความยาว 150 เซนติเมตร

จากผลดังกล่าวข้างต้นจึงสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ความยาวรากด้วยกล่อง PSU Minirhizotron - 1 มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลวัตของรากฝอยของยางพารา แต่อาจไม่มีความเหมาะสมต่อการวิเคราะห์ RLD หรือไม่เหมาะสมต่อการเปรียบเทียบค่ากับวิธีการเจาะดิน การศึกษารากโดยใช้เทคนิคมินิไรโซตรอนในการทดลองนี้จึงสรุปได้ว่าเทคนิคมินิไรโซตรอนสามารถที่จะศึกษาการเจริญและการเปลี่ยนแปลงของราก รวมทั้งความหนาแน่นของรากในแต่ละพื้นที่ได้ดี แต่ไม่เหมาะสำหรับการศึกษาในการเปรียบเทียบกับวิธีการเจาะดิน

### 3. การเปรียบเทียบค่าความชื้นดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดินและเครื่องวัดความชื้นดิน

ข้อมูลความชื้นดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดิน โดยการเจาะด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึก 10, 20, 30, 40, 60 และ 100 เซนติเมตร ถูกวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าที่วัดด้วยหัววัด รุ่น PR2 และตัวเครื่อง รุ่น HH2 จากยี่ห้อ Delta-t Devices เพื่อประเมินความแม่นยำของอุปกรณ์

จากการวิเคราะห์หรีเกรสชันถดถอยเชิงเส้นระหว่างค่าความชื้นในดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดิน และค่าที่ได้จากเครื่องวัดความชื้นในดิน ได้ผลการวิเคราะห์หมีสมการความสัมพันธ์แบบลอการิทึม  $y = 12.925\ln(x) - 11.769$  ( $R^2 = 0.65$ )

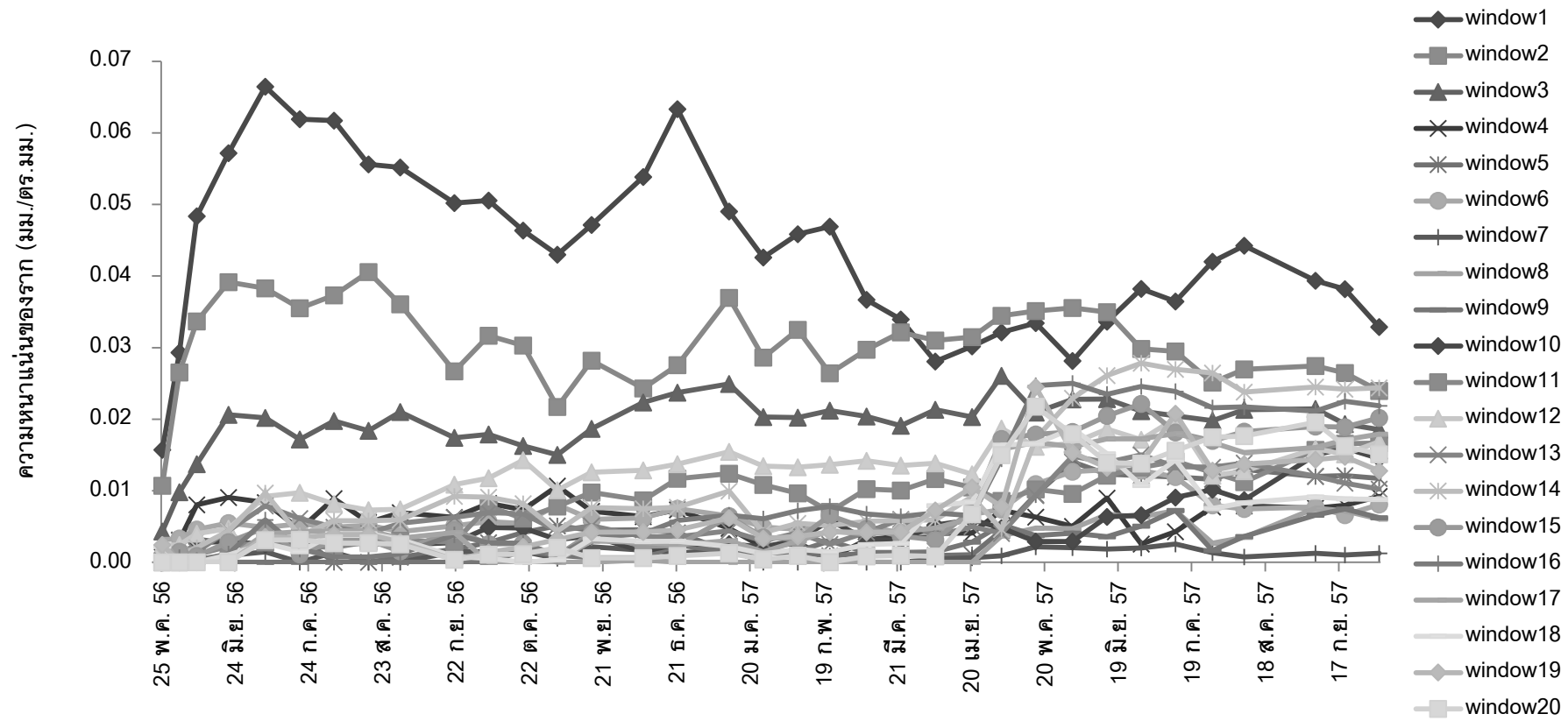


ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดิน และเครื่องวัดความชื้นดิน

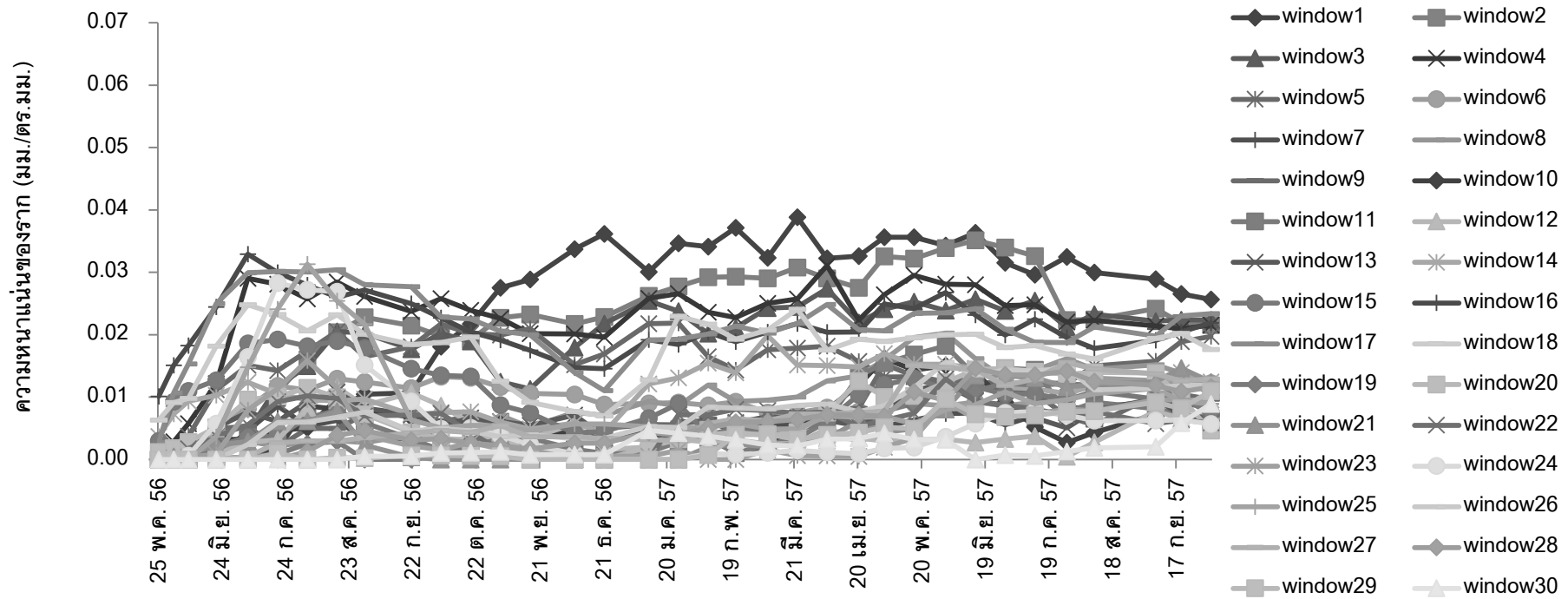
จากผลการวิเคราะห์หมีสัมพันธ์พบว่าค่าความชื้นดินจากการเก็บตัวอย่างดิน เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความชื้นดินให้ค่าที่แม่นยำประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องมีความแม่นยำเพียงพอที่สามารถใช้ศึกษาการเจริญของรากยางพาราได้

#### 4. การเจริญและการเปลี่ยนแปลงของราก

จากการศึกษาพบว่าความยาวรากที่บันทึกจากท่อมินิไรโซทรอนที่มีความยาว 100 เซนติเมตร (ภาพที่ 10) มีค่าความยาวรากหนาแน่นในแต่ละชั้นความลึก หรือแต่ละ window มีค่าต่ำกว่า เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากท่อขนาด 150 เซนติเมตร (ภาพที่ 11) จากการศึกษาการเจริญของรากความยาวท่อ 100 เซนติเมตร ที่ไม่ได้เปิดหน้าดินที่ลึกและกว้าง โดยใช้เฉพาะเครื่องเจาะดินแบบมือหมุน พบว่ารากมีความหนาแน่นสูงสุดใน window1, window2 และ window3 ซึ่งเป็นบริเวณชั้นผิวดิน ตั้งแต่ช่วงแรกของการเก็บข้อมูลในปลายเดือนพฤษภาคม 2556 และในเดือนเมษายน 2557 พบว่ารากบริเวณชั้นใต้ดินตั้งแต่ window15 ถึง window20 มีการเจริญที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 10) ส่วนการเจริญของรากในความยาวท่อ 150 เซนติเมตร พบว่ารากมีความหนาแน่นที่มีค่าสูงของทุก window ตั้งแต่ปลายเดือนพฤษภาคม 2556 เมื่อเทียบกับการเจริญของรากในความยาวท่อ 100 เซนติเมตร และเมื่อเข้าสู่เดือนกันยายน 2556 พบว่ารากในทุก window เริ่มมีค่าความยาวรากรวมลดลง เหลือรากที่มีความหนาแน่นสูงสุดเฉพาะ window1 ถึง window5 ซึ่งเป็นบริเวณผิวดิน และพบว่าเฉพาะบริเวณ window16 ถึง window18 ที่มีการแตกแขนงจำนวนมาก และในช่วงเดือนเมษายน 2557 รากบริเวณดังกล่าวมีการเจริญที่เพิ่มขึ้น และพบว่ามีรากใหม่งอกเพิ่มขึ้นมาในบริเวณตั้งแต่ window15 ลงไปซึ่งเป็นบริเวณใต้ดิน (ภาพที่ 11)

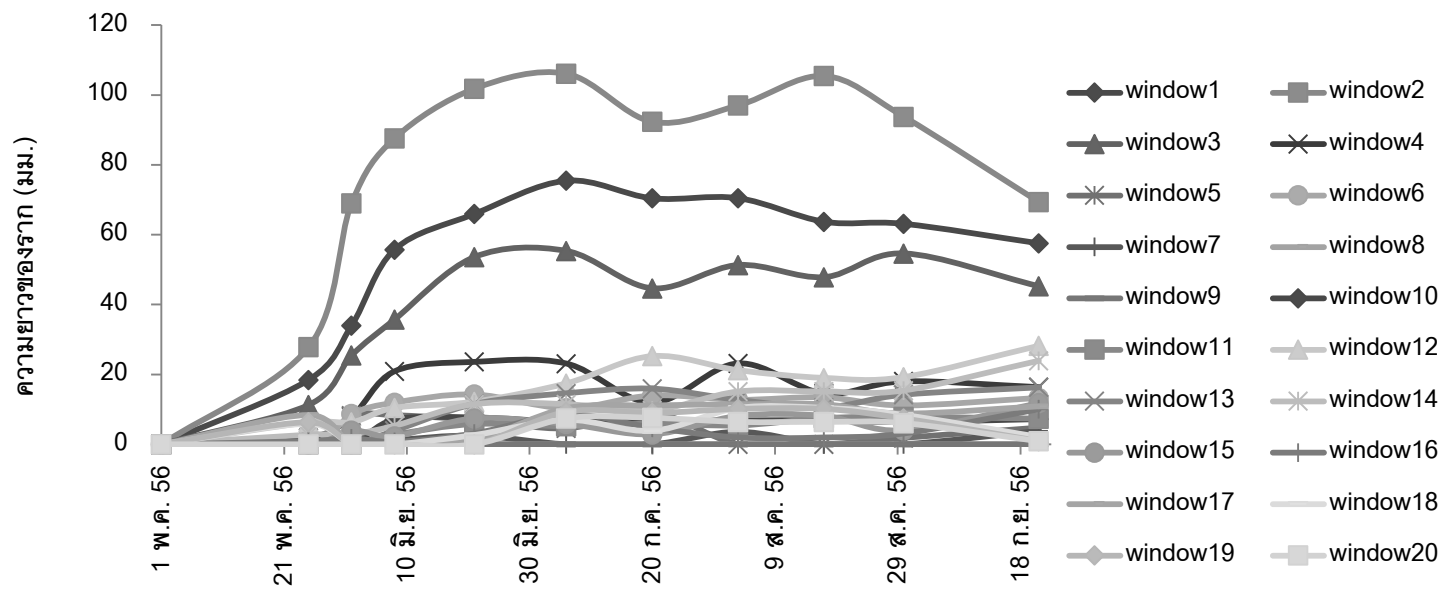


ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซทรอนขนาดความยาวท่อ 100 เซนติเมตร ที่ได้จากการบันทึกข้อมูล

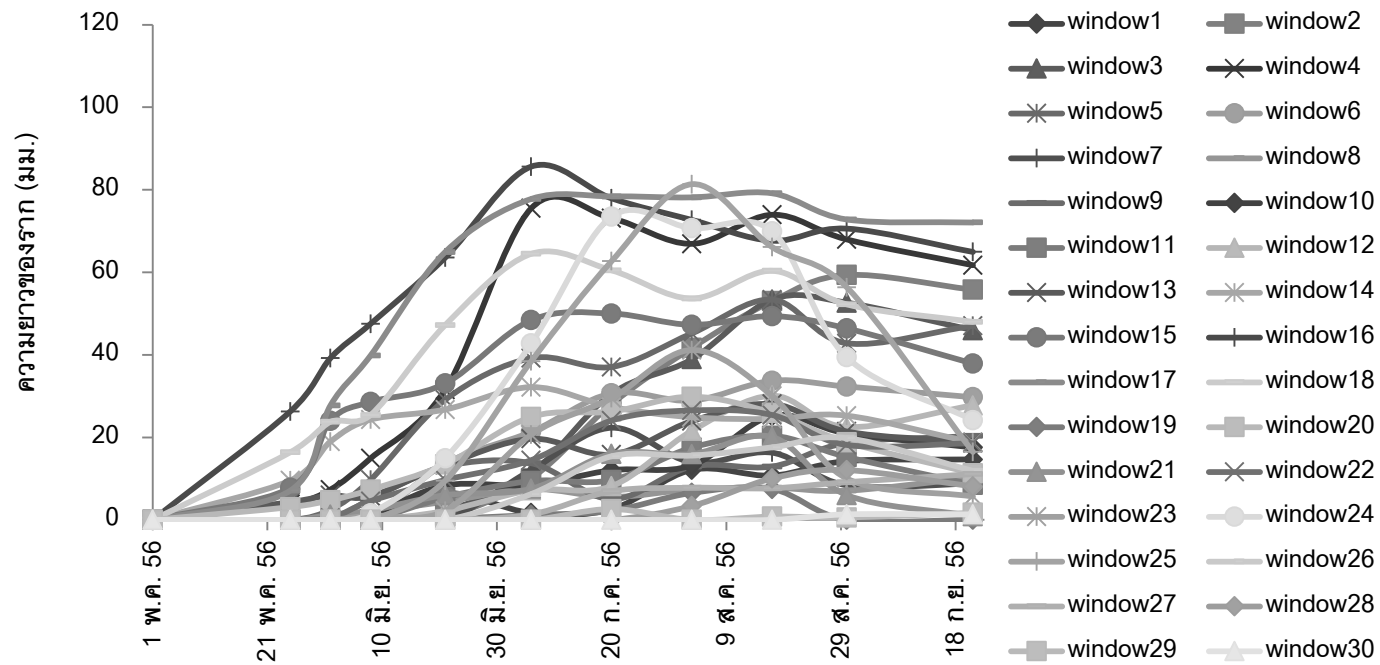


ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอนขนาดความยาวท่อ 150 เซนติเมตร ที่ได้จากการบันทึกข้อมูล

การวิเคราะห์รูปแบบการเจริญเติบโตการแตกใหม่ของรากด้วยสมการแบบ Logistic growth curve โดยคัดเลือกข้อมูลใน window ที่มีความเปลี่ยนแปลงของค่าความยาวรากหนาแน่นอย่างชัดเจน โดยในท่อน 100 เซนติเมตร ใช้ข้อมูลจาก window 1 - 4 และ ในท่อน 150 เซนติเมตร ใช้ข้อมูลจาก window2, window3, window4, window15, window16, window17, window18, window20, window21, window22, window23, window24 และ window25 มาใช้เพื่อการวิเคราะห์รูปแบบการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth curve ในท่อน 100 เซนติเมตร ใช้ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม 2556 ซึ่งเป็นวันที่ติดตั้งท่อไปรงใส จนถึงวันที่ 6 กรกฎาคม 2556 ซึ่งเป็นวันที่ค่าความยาวรากหนาแน่นของทุก window เริ่มเข้าสู่สภาวะเสถียร หรือมีการเพิ่มเข้าใกล้ค่าสูงสุดในช่วงนั้น (ภาพที่ 12) และในท่อน 150 เซนติเมตร ใช้ข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม 2556 จนถึงวันที่ 30 สิงหาคม 2556 ซึ่งเป็นวันที่ค่าความยาวรากหนาแน่นของทุก window เริ่มเข้าสู่สภาวะเสถียร (ภาพที่ 13)



ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากลของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอนขนาดความยาว 100 เซนติเมตร ระหว่างวันที่ 1 พฤษภาคม 2556 - 21 กันยายน 2556



ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอนขนาดความยาว 150 เซนติเมตร ระหว่างวันที่ 1 พฤษภาคม 2556 - 21 กันยายน 2556



การวิเคราะห์รูปแบบการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth curve ของข้อมูล จากท่อ 100 เซนติเมตร พบว่ารากของยางพาราใช้ระยะเวลาประมาณ 60 วัน ในการฟื้นคืนกลับ เข้าสู่สภาวะที่ค่าความยาวรากหนาแน่นมีค่าคงที่ (ภาพที่ 14 ตารางที่ 1) ขณะที่ข้อมูลจากท่อ 150 เซนติเมตร รากของยางพาราใช้ระยะเวลาประมาณ 90 วัน ในการฟื้นคืนกลับเข้าสู่สภาวะที่ค่า ความยาวรากหนาแน่นมีค่าคงที่ (ภาพที่ 15 และ 16, ตารางที่ 2 และ 3)

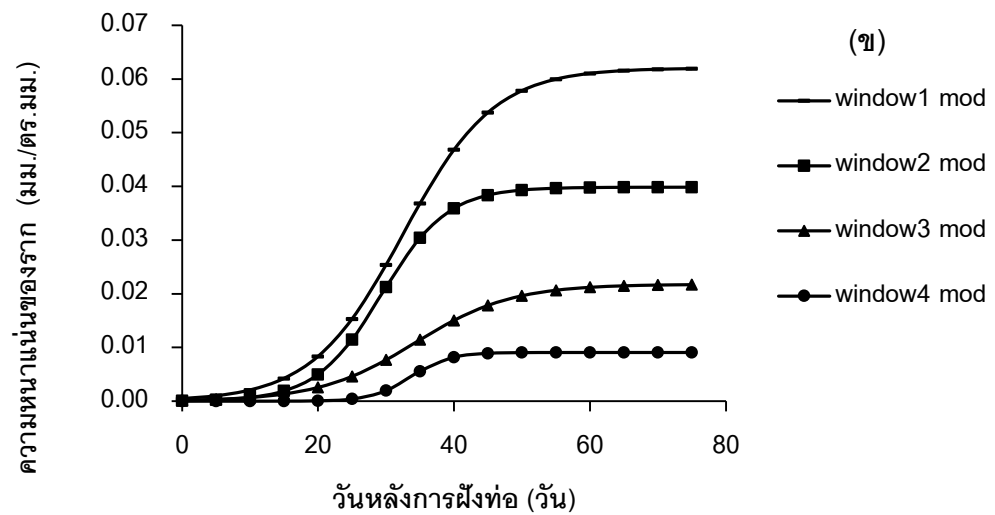
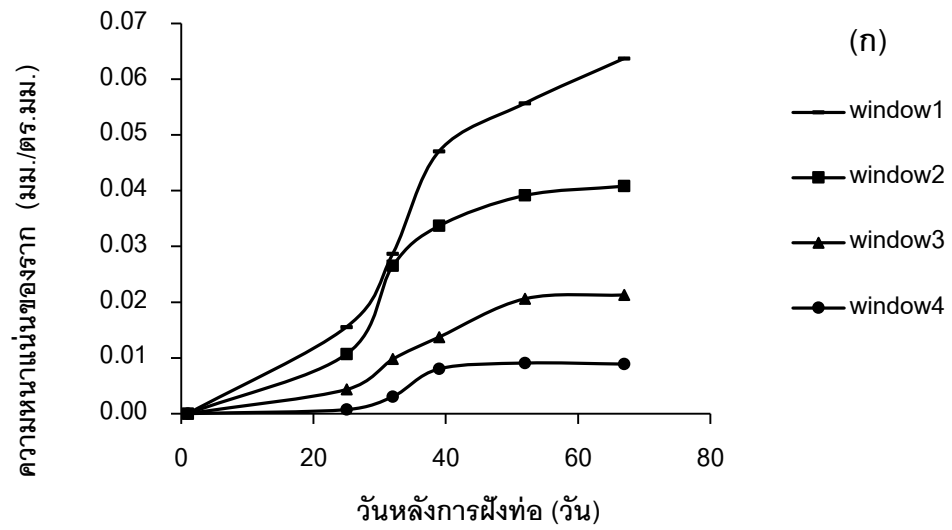
การวิเคราะห์ข้อมูลอัตราการเจริญเติบโต หรืออัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความยาว รากหนาแน่นของการฝังท่อ 100 เซนติเมตร พบว่าหลังการฝังท่อไปแล้ว 32, 29, 34 และ 33 วัน ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความยาวรากหนาแน่นของ window1, window2, window3 และ window4 มีค่าสูงสุด ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของ window4 สูงที่สุด (ตารางที่ 1) ขณะที่การฝังท่อ 150 เซนติเมตร พบว่าหลังการฝังท่อไปแล้ว 84, 80 และ 53 วัน ทำ ให้อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความยาวรากหนาแน่นของ window2, window3 และ window4 มี ค่าสูงสุด ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของ window4 สูงที่สุด (ตารางที่ 2) ขณะที่ชั้นความลึกที่ต่ำลงมาของท่อ 150 เซนติเมตร พบว่าหลังการฝังท่อไปแล้ว 37, 32, 38, 38, 50, 70, 61, 65, 63 และ 66 วัน ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความยาวรากหนาแน่นของ window15, window16, window17, window18, window20, window21, window22, window23, window24 และ window25 มีค่าสูงสุด ตามลำดับและมีค่าสัมประสิทธิ์การ เจริญเติบโตของ window23 สูงที่สุด (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 1 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของรูปแบบการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth curve ของ รากยางพาราหลังการติดตั้งท่อโปร่งใสขนาด 100 เซนติเมตร และวันที่ ( $h$ ) อัตราการเพิ่มของความยาวรากหนาแน่นมีค่าสูงสุด ( $bK/4$ ) หลังการติดตั้งท่อโปร่งใส  $h$  (วัน)

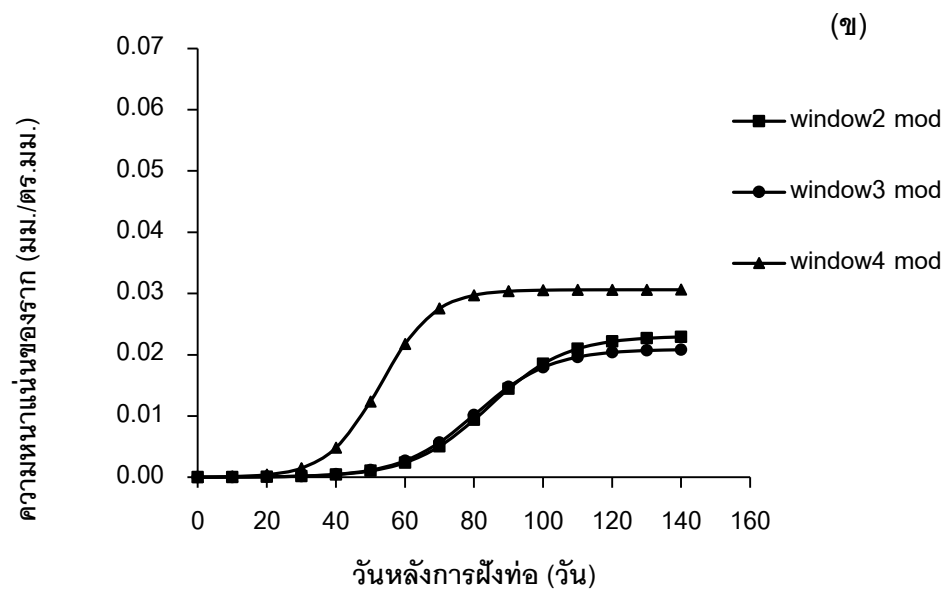
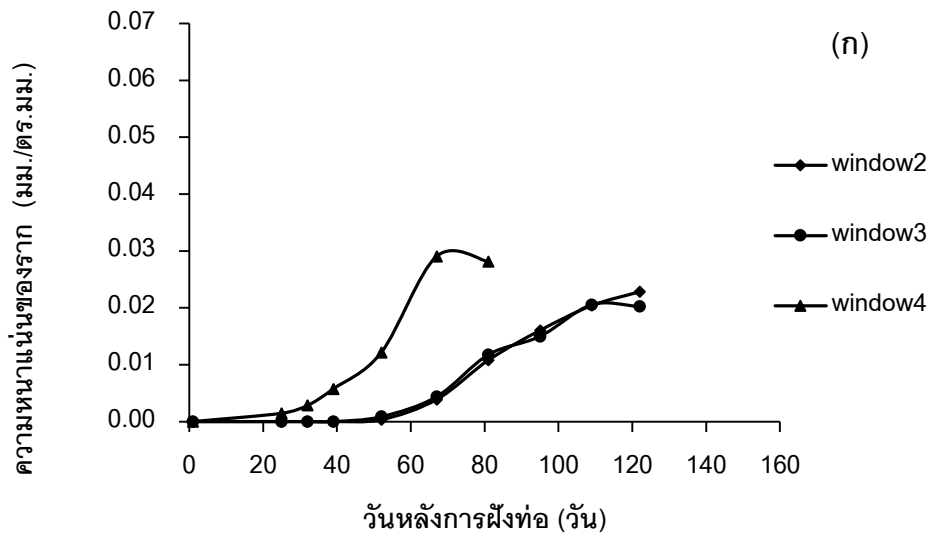
ท่อ 100 ซม.	window1	window2	window3	window4
$K$	0.06	0.04	0.02	0.01
$A$	127.65	446.49	127.08	143826.90
$b$	0.15	0.21	0.14	0.35
$h$ (วัน)	32.46	29.37	34.29	33.71
$bK/4$ (มม./ตร.มม./วัน)	0.00232	0.00207	0.00077	0.0080

ตารางที่ 2 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของรูปแบบการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth curve ของ รากยางพาราหลังการติดตั้งท่อโปร่งใสขนาด 150 เซนติเมตร และวันที่ ( $h$ ) อัตราการเพิ่มของความยาวรากหนาแน่นมีค่าสูงสุด ( $bK/4$ ) หลังการติดตั้งท่อโปร่งใส  $h$  (วัน)

ท่อ 150 ซม.	window2	window3	window4
$K$	0.02	0.02	0.03
$A$	1862.13	1778.39	936.38
$b$	0.09	0.09	0.13
$h$ (วัน)	84.27	80.62	53.03
$bK/4$ (มม./ตร.มม./วัน)	0.00052	0.00048	0.00099



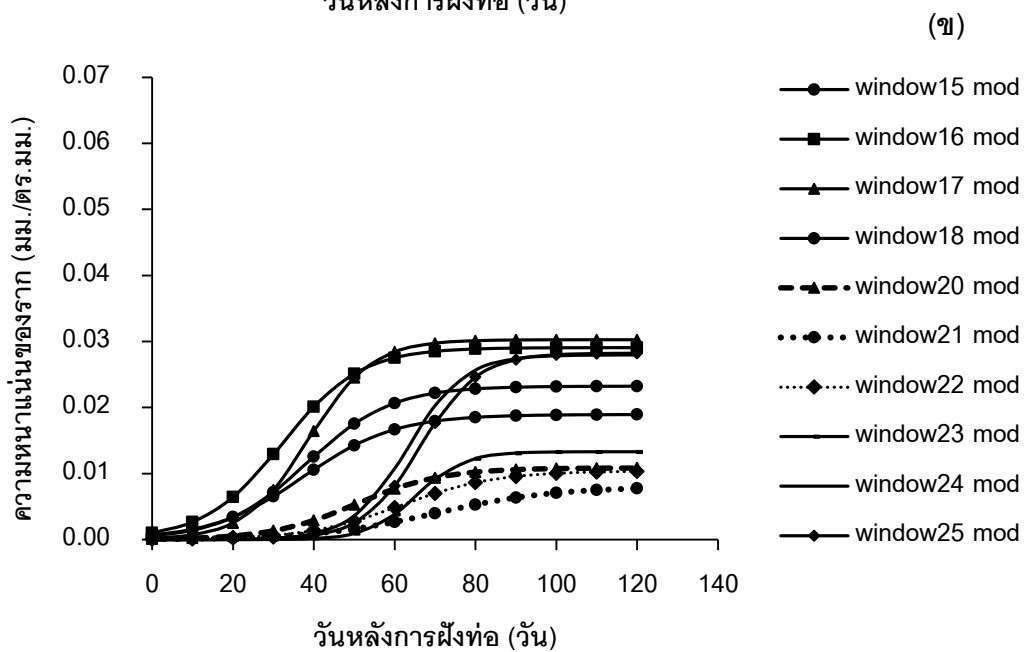
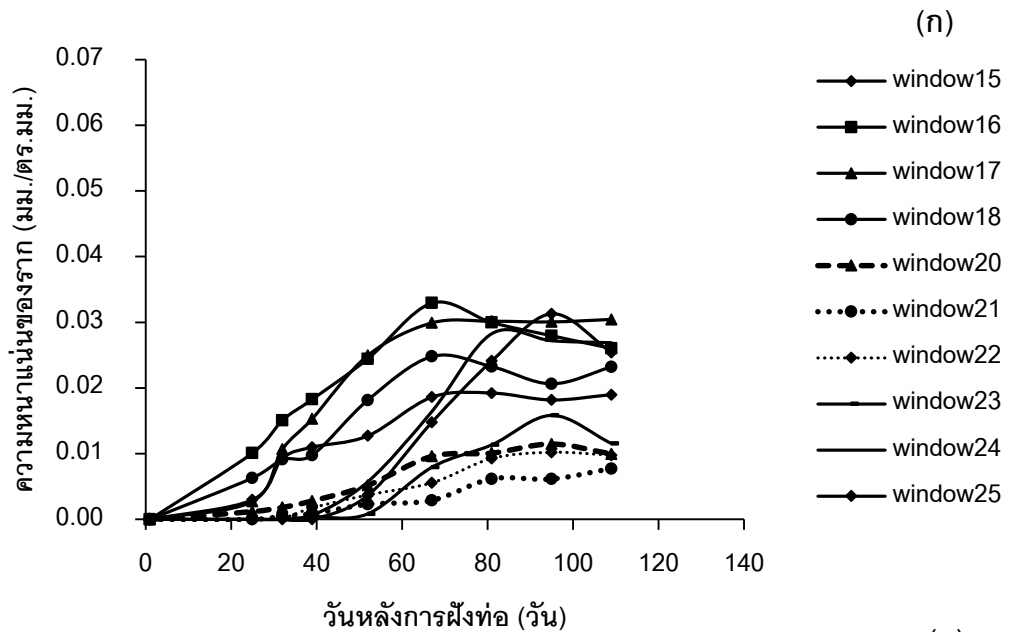
ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน ขนาดความยาว 100 เซนติเมตร : (ก) ความยาวรากที่ได้จากการบันทึกข้อมูล (ข) ความยาวรากที่ได้จากแบบจำลองการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth curve



ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน ขนาดความยาว 150 เซนติเมตร : (ก) ความยาวรากที่ได้จากการบันทึกข้อมูล (ข) ความยาวรากที่ได้จากแบบจำลองการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth curve

ตารางที่ 3 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของรูปแบบการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth curve ของรากยางพาราหลังการติดตั้งท่อโปร่งใสขนาด 150 เซนติเมตร และวันที่ ( $h$ ) อัตราการเพิ่มของความยาวรากหนาแน่นมีค่าสูงสุด ( $bK/4$ ) หลังการติดตั้งท่อโปร่งใส  $h$  (วัน)

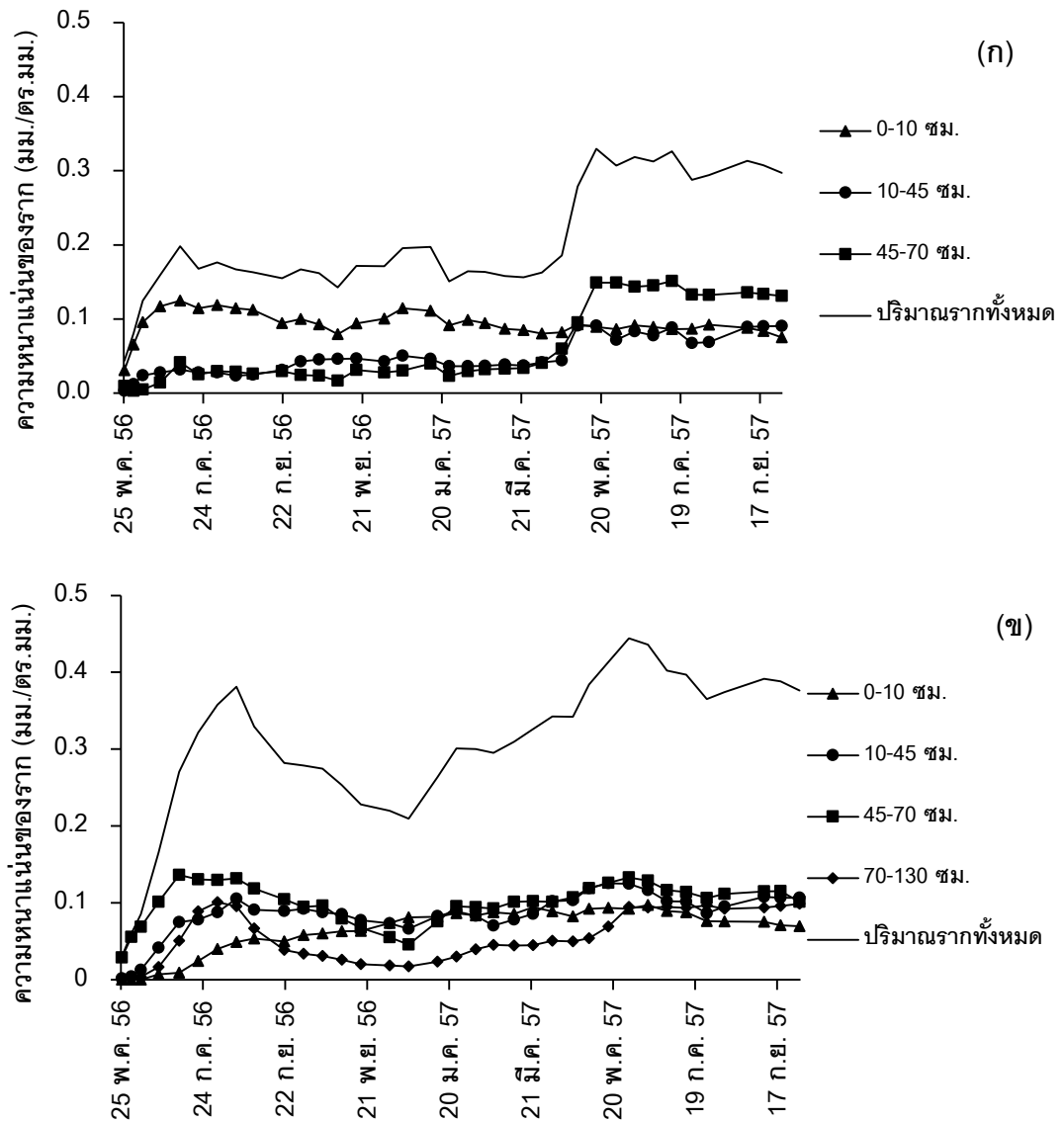
ท่อ 150 ซม.	window15	window16	window17	window18	window20	window21	window22	window23	window24	window25
$K$	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03
$A$	26.60	27.70	141.00	40.10	120.10	120.90	204.40	58791.00	8974.00	11340.60
$b$	0.09	0.10	0.13	0.10	0.09	0.07	0.09	0.17	0.14	0.14
$h$ (วัน)	37.30	32.14	38.65	38.33	50.54	70.09	61.61	65.32	63.24	66.39
$bK/4$ (มม./ตร.มม./วัน)	0.00042	0.00075	0.00097	0.00056	0.00026	0.00014	0.00022	0.00056	0.00101	0.00099



ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน ขนาดความยาว 150 เซนติเมตร : (ก) ความยาวรากที่ได้จากการบันทึกข้อมูล (ข) ความยาวรากที่ได้จากแบบจำลองการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth curve

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งตามระดับชั้นความลึก ในท่อ 100 เซนติเมตร แบ่งเป็นชั้นความลึก 0 - 10, 10 - 45 และ 45 - 70 เซนติเมตร พบว่าตั้งแต่วันที่ 25 พฤษภาคม 2556 จนถึงเดือนพฤษภาคม 2557 รากยางพารามีค่าความหนาแน่นสูงสุดอยู่บริเวณผิวดิน ได้แก่ระดับชั้นความลึก 0 - 10 เซนติเมตร และรองลงมาคือชั้นความลึก 10 - 45 และ 45 - 70 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าต่างกันไม่มากนัก ในช่วงหลังจากเดือนพฤษภาคม 2557 ซึ่งเป็นช่วงเข้าสู่ฤดูฝน รากบริเวณชั้นใต้ดินมีการเจริญที่เพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในบริเวณชั้น 45 - 70 เซนติเมตรที่เจริญสูงสุด มีค่า 48.39 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับความยาวรากรวมทั้ง 3 ระดับความลึก รองลงมาคือ ชั้นความลึก 10 - 45 เซนติเมตร มีค่า 29.30 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ชั้นความลึกบริเวณผิวดิน 0 - 10 เซนติเมตร มีค่า 22.58 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งรากไม่ได้มีการเจริญที่เพิ่มขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก

ส่วนการเจริญของรากจากท่อขนาด 150 เซนติเมตร แบ่งเป็นชั้นความลึก 0 - 10, 10 - 45, 45 - 70 และ 70 - 130 เซนติเมตร พบว่าปริมาณรากรวมเพิ่มขึ้นสูง จากนั้นค่อยๆ ลดต่ำลงมา รากที่แตกแขนงออกมาใหม่มีปริมาณที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ในระดับชั้นความลึก 0 - 10, 10 - 45, และ 45 - 70 เซนติเมตร และพบว่าที่ชั้นความลึก 70 - 130 เซนติเมตร มีปริมาณความยาวรากหนาแน่นที่น้อยกว่าชั้นอื่นๆ หลังจากที่รากลดต่ำลงมากในเดือนกันยายน 2556 จนถึง เดือนพฤษภาคม 2557 และหลังจากนี้เมื่อเข้าสู่ฤดูฝน พบว่ารากบริเวณชั้นใต้ดิน 10 - 45, 45 - 70 และ 70 - 130 เซนติเมตร มีปริมาณความหนาแน่นของรากที่เพิ่มขึ้น มีค่า 28.09, 29.92 และ 21.27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ชั้นความลึกบริเวณผิวดิน 0 - 10 เซนติเมตร มีค่า 20.72 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่ารากไม่ได้มีการเจริญที่เพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับท่อ 100 เซนติเมตร



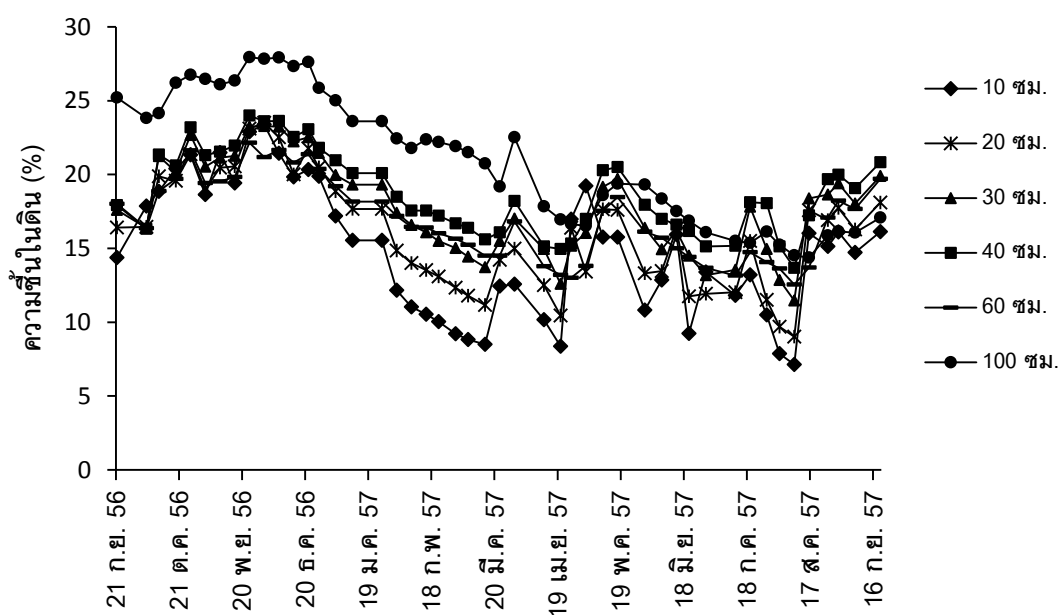
ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของยางพาราหลังการติดตั้งท่อมินิไรโซทรอน : (ก) ที่อ  
ขนาด 100 เซนติเมตร และ(ข) ที่อขนาด 150 เซนติเมตร



## 5. ความชื้นในดิน

ความชื้นในดินเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้สภาพดินมีความเหมาะสมในการเจริญเติบโตของรากได้ดี รากทำหน้าที่ ดูด และลำเลียงน้ำและธาตุอาหาร เพื่อไปเลี้ยงส่วนต่างๆ ของต้นพืช และเมื่อความชื้นในดินลดลง รากจึงมีการเจริญเติบโตที่ลดลงด้วย

การเปลี่ยนแปลงของความชื้นในดินในการทดลองนี้มีการวัดที่ระดับความชื้นลึก 6 ระดับ ได้แก่ 10, 20, 30, 40, 60 และ 100 เซนติเมตร พบว่าแต่ละระดับความลึกที่วัดมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งความชื้นจะเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับปริมาณน้ำฝนที่ตกในบริเวณพื้นที่ที่ทำการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่าระดับความลึกที่ 100 และ 40 เซนติเมตร มักมีค่าสูงสุด ตามลำดับ ส่วนความลึกที่ 10 และ 20 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ใกล้บริเวณผิวดินมีค่าน้อยสุดตามลำดับ

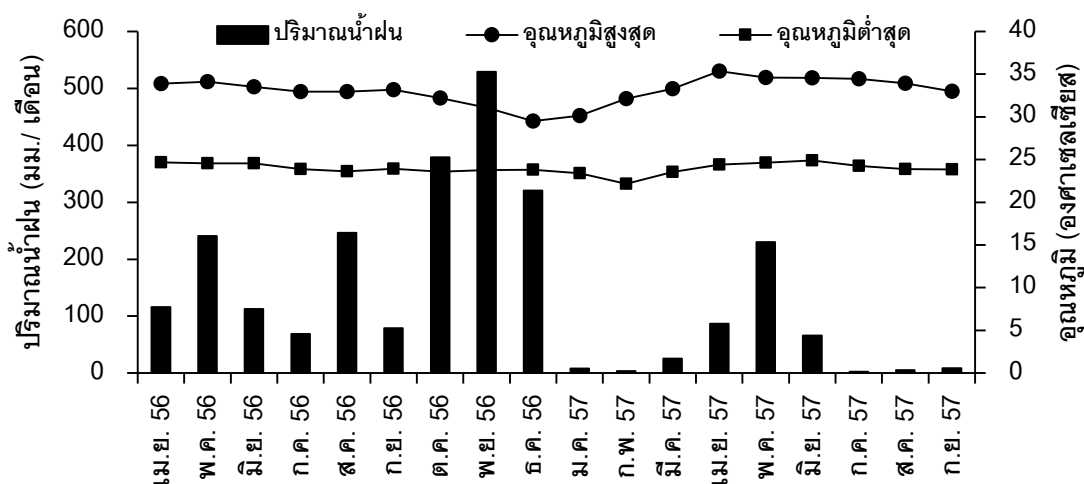


ภาพที่ 18 ความชื้นในดินในพื้นที่ทำการทดลองระหว่างวันที่ 21 กันยายน 2556 - 27 กันยายน

ปริมาณน้ำฝนของแต่ละฤดูกาลส่งผลต่อค่าของความชื้นในดินให้มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อรากโดยตรง เนื่องจากความชื้นในดินที่เหมาะสมจะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้รากเจริญเติบโตได้ดี

ในการขุดหลุมเพื่อฝังท่อมินิไรโซทรอนครั้งนี้ทำขึ้นปลายเดือนเมษายน 2556 ปริมาณน้ำฝนในเดือนดังกล่าวประมาณ 115.8 มิลลิเมตรต่อเดือน และเดือนพฤษภาคมประมาณ 241.0 มิลลิเมตรต่อเดือน ทำให้สภาพดินมีความชื้นเพียงพอที่ส่งผลให้รากเจริญใหม่กลับมาอย่างรวดเร็ว จากการใช้อุปกรณ์ในการติดตั้งฝังท่อที่ไปตัดทำลายราก

เมื่อเปรียบเทียบการเจริญของรากและปริมาณน้ำฝนของความยาวท่อ 100 และ 150 เซนติเมตร พบว่าหลังจากที่รากเจริญกลับมาอย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาประมาณ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ จากการฝังท่อวันที่ 1 พฤษภาคม 2556 รากมีการเจริญใหม่กลับเข้าสู่สภาวะที่ค่าความยาวรากหนาแน่นมีค่าคงที่หลังจากการฝังท่อมินิไรโซทรอน จนถึงเดือนเมษายน 2557 ถึงแม้ว่าในเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม 2556 จะมีฝนตกหนักโดยมีปริมาณน้ำฝนประมาณ 379.2 529.3 และ 320.7 มิลลิเมตรต่อเดือน ตามลำดับ และในเดือนมกราคมถึงกุมภาพันธ์ 2557 จะมีฝนตกน้อย โดยมีปริมาณน้ำฝนประมาณ 8.0 และ 3.8 มิลลิเมตรต่อเดือน ตามลำดับ รากก็ยังมีอาการเจริญคงที่สม่ำเสมอ ซึ่งมีอัตราการตายและการเจริญของรากใหม่ต่ำ และหลังจากเดือนเมษายน 2557 พบว่ามีอัตราการเจริญของรากที่เพิ่มขึ้น ซึ่งช่วงเวลานี้เมื่อเทียบกับข้อมูลทรงพุ่มหรือดัชนีพื้นที่ใบจะเห็นได้ว่าเป็นช่วงที่ทรงพุ่มมีการเจริญที่เต็มที่แล้ว



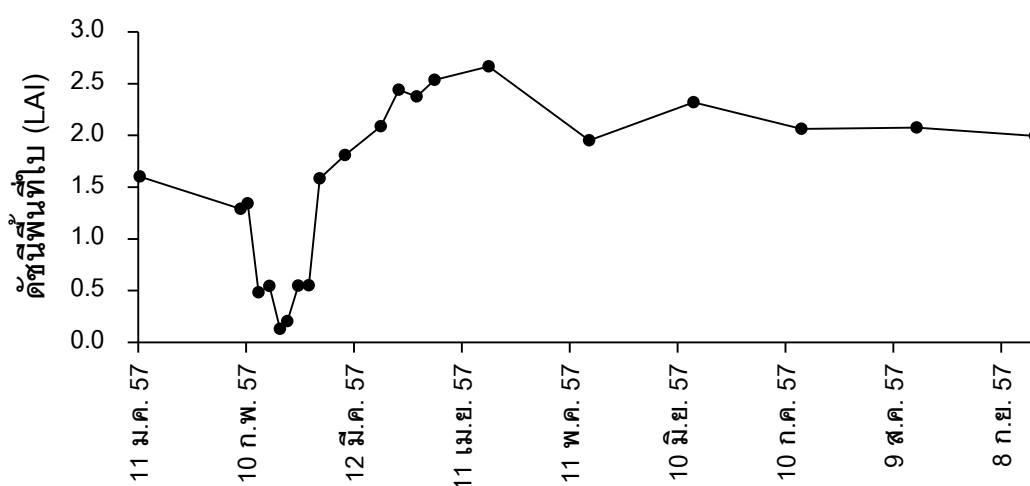
ภาพที่ 19 ปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิสูงสุด - ต่ำสุด ในช่วงทำการทดลองระหว่างเดือนเมษายน 2556 - กันยายน 2557

## 6. ทรงพุ่ม

ทรงพุ่มซึ่งประกอบไปด้วยใบที่ทำหน้าที่หายใจและการสังเคราะห์แสง ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในวัฏจักรคาร์บอนและน้ำ ใบจัดได้ว่าเป็นอวัยวะหลักของพืชที่ทำหน้าที่ในการรับแสงในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช เพื่อสร้างอาหารขึ้นมาส่งเสริมการเจริญเติบโตของราก

การปรับค่าความถูกต้องค่าดัชนีพื้นที่ใบที่ประมาณด้วยเทคนิคการถ่ายภาพ ใช้สมการความสัมพันธ์ตามรายงานของ เจษฎา (2552) โดยค่าดัชนีพื้นที่ใบที่ได้จากโครงตาข่ายซึ่งถือเป็นค่าจริง หรือ LAI (y) และค่าที่ได้จากภาพถ่ายที่วิเคราะห์โดยโปรแกรม GLA (x) มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง โดยเมื่อค่าที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GLA มีค่ามากกว่า 0.48 การปรับค่าความถูกต้องใช้สมการ  $y = 2.4683x - 1.1691$  ( $R^2 = 0.89$ ) ขณะที่เมื่อค่าที่วิเคราะห์ได้ค่าต่ำกว่า 0.48 จะปรับความถูกต้องด้วยสมการ  $y = 1.6413x$  ( $R^2 = 0.76$ )

จากข้อมูลที่มีการปรับค่าแล้วพบว่ายางพารามีการผลิใบ และผลัดใบในฤดูแล้ง โดยทรงพุ่มมีการผลัดใบอย่างรวดเร็วในช่วงต้นเดือนกุมภาพันธ์ 2557 ถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ 2557 และในช่วงต้นเดือนมีนาคม 2557 ถึงกลางมีนาคม 2557 มีการผลิใบใหม่หลังการผลัดใบอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นใบยางมีการเพิ่มความหนาแน่นอย่างช้าๆ จนถึงในช่วงกลางเมษายน 2557 ค่า LAI จึงมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ และเข้าใกล้ค่าสูงสุด



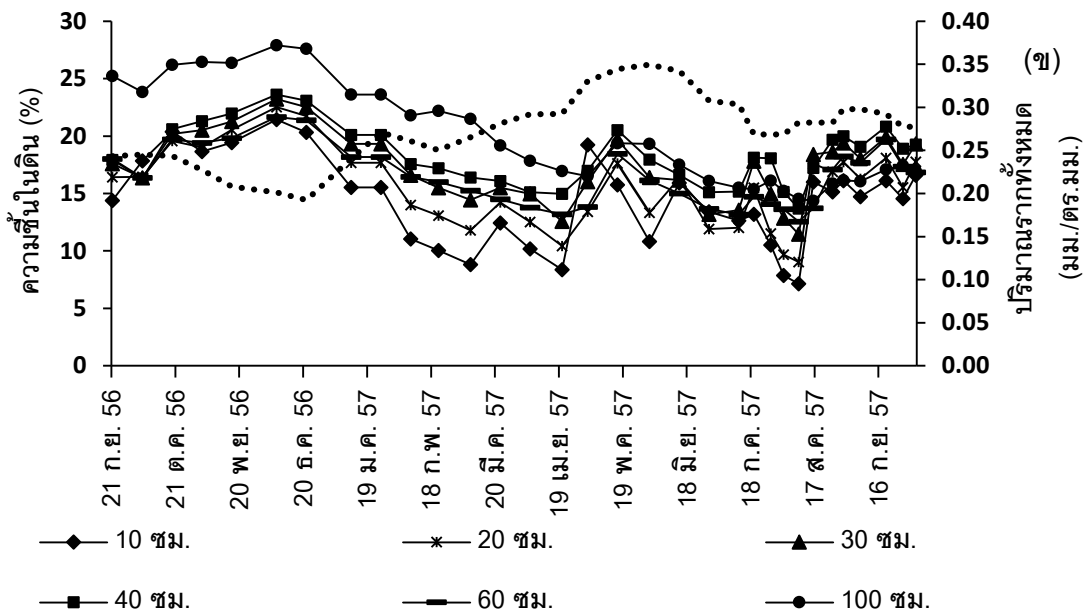
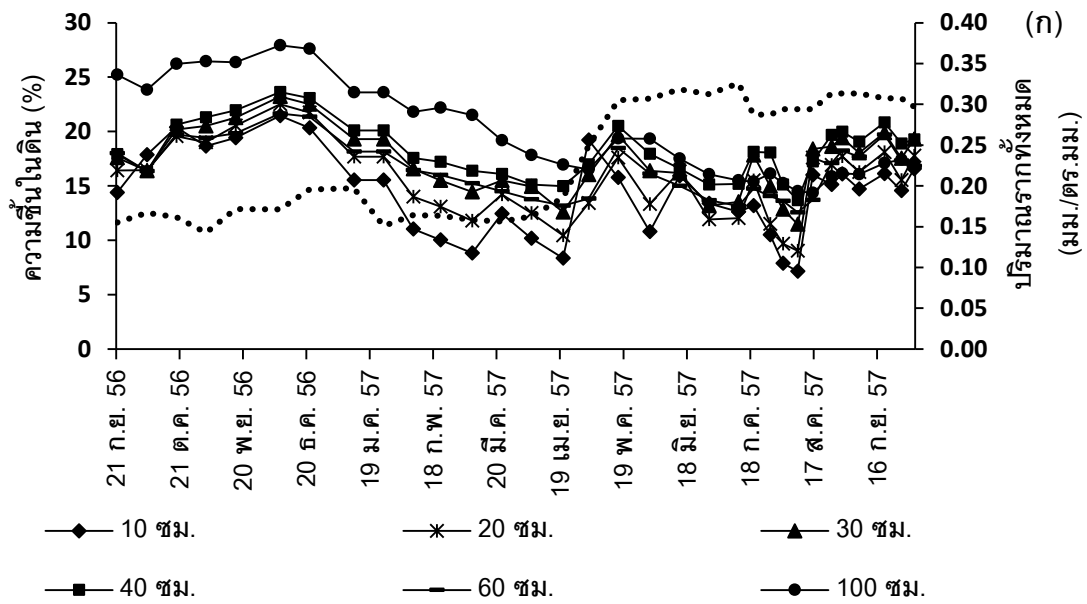
ภาพที่ 20 พื้นที่ทรงพุ่มในพื้นที่ทำการทดลองระหว่างวันที่ 11 มกราคม 2557 - 17 กันยายน 2557

## 7. ความสัมพันธ์การเจริญของรากและความชื้นในดิน

ผลรวมของรากมีการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับความชื้น เมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้น รากเจริญได้ดีมีการแตกแขนงที่เพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินลดลง รากจะมีการตายทำให้ความหนาแน่นของรากลดลงไปด้วย

ที่ขนาด 100 เซนติเมตร พบว่าผลรวมของรากหนาแน่นสูงสุดบริเวณผิวดิน 0 - 10 เซนติเมตร จนถึงเดือนพฤษภาคม 2557 ซึ่งเป็นช่วงเข้าสู่ฤดูฝนมีฝนตก 230.2 มิลลิเมตรต่อเดือน ทำให้ปริมาณรากบริเวณชั้นใต้ดินมีการเจริญที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในบริเวณชั้น 45 - 70 เซนติเมตรรากเจริญสูงสุด มีค่า 48.39 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ที่ขนาด 150 เซนติเมตร พบว่าราก

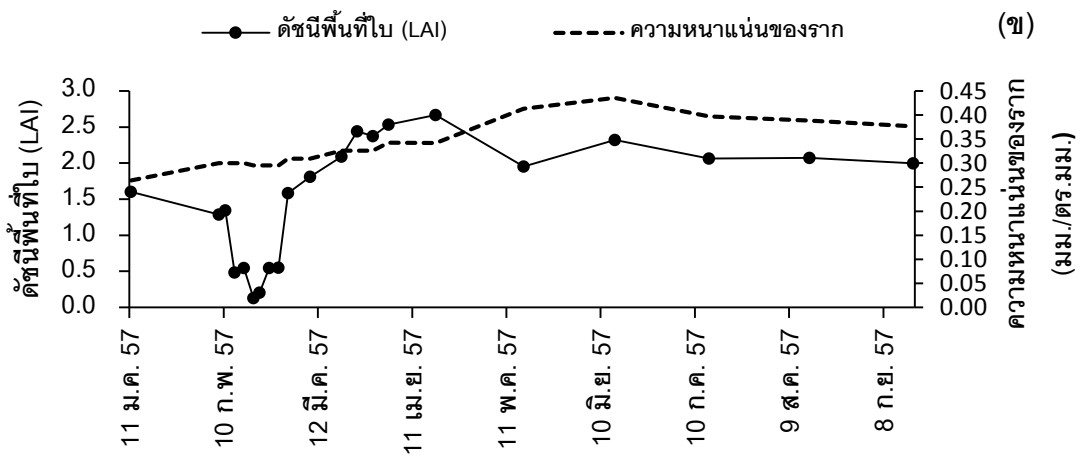
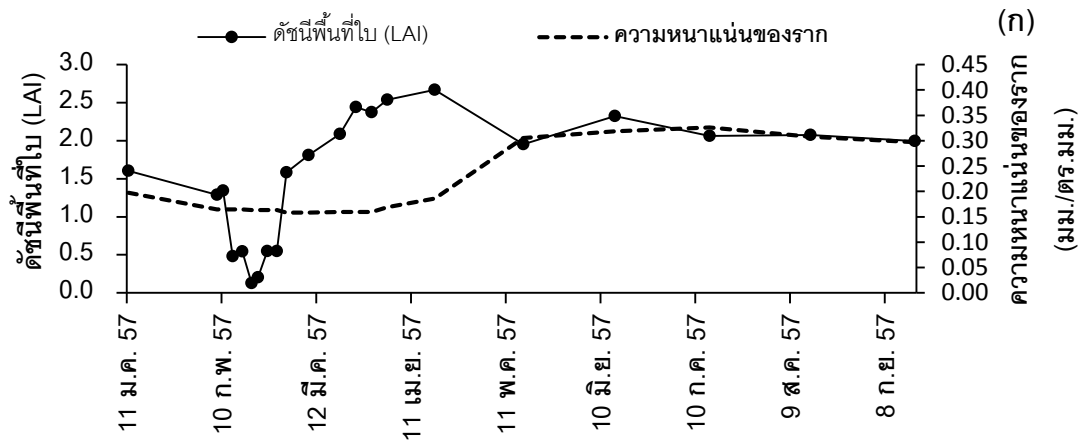
บริเวณชั้นใต้ดิน 45 - 70 มีปริมาณรากสูงสุดเช่นเดียวกัน มีค่า 29.92 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือชั้น ความลึก 10 - 45 มีค่า 28.09 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้งท่อขนาด 100 และ 150 เซนติเมตร พบว่าราก บริเวณผิวดิน 0 - 10 เซนติเมตร พบว่ารากไม่ได้มีการเจริญที่เพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อย มากหลังจากที่เข้าสู่ฤดูฝนในเดือนพฤษภาคม 2557 นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงเดือนกรกฎาคมถึง เดือนสิงหาคม 2557 เป็นช่วงที่ปริมาณน้ำฝนต่ำ 2.2 และ 5.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าปริมาณ ความหนาแน่นของรากลดต่ำลง และเพิ่มขึ้นอีกครั้งหลังจากเดือนกันยายน 2557



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์การเจริญของรากและความชื้นในดิน : (ก) ที่ขนาด 100 เซนติเมตร และ (ข) ที่ขนาด 150 เซนติเมตร

## 8. ความสัมพันธ์การเจริญของรากและทรงพุ่ม

ความสัมพันธ์ของการเจริญของรากเปรียบเทียบกับข้อมูลทรงพุ่ม พบว่าในช่วงที่ยางมีการผลัดใบ ข้อมูลรากมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยมีปริมาณความหนาแน่นของรากค่อนข้างสม่ำเสมอ จนมาถึงในช่วงเดือนพฤษภาคม 2557 ซึ่งเข้าสู่ฤดูฝน พบว่ารากมีการเจริญที่เพิ่มขึ้น รากที่เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นรากใหม่บริเวณชั้นใต้ดิน โดยเฉพาะในบริเวณชั้น 45 - 70 เซนติเมตร รากเจริญสูงสุด มีค่า 48.39 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ท่อนขนาด 150 เซนติเมตร พบว่ารากบริเวณชั้นใต้ดิน 45 - 70 มีปริมาณรากสูงสุดเช่นเดียวกัน มีค่า 29.92 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือชั้นความลึก 10 - 45 มีค่า 28.09 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้งท่อนขนาด 100 และ 150 เซนติเมตร พบว่ารากบริเวณผิวดิน 0 - 10 เซนติเมตร พบว่ารากไม่ได้มีการเจริญที่เพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก โดยช่วงนี้จะเป็นช่วงที่ทรงพุ่มมีการเจริญเติบโตของใบที่เต็มที่แล้วประมาณ 50 วัน



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์การเจริญของรวงและทรงพุ่ม : (ก) ท่อขนาด 100 เซนติเมตร และ(ข) ท่อขนาด 150 เซนติเมตร



## บทที่ 4

### วิจารณ์

#### 1. กล้อง PSU - Minirhizotron - 1

จากการศึกษาติดตามการเจริญและการเปลี่ยนแปลงของรากยาวงพาราด้วยกล้อง PSU - Minirhizotron - 1 มีการใช้กล้องทั้งหมด 3 ตัว สามช่วงระยะเวลา เนื่องจากสาเหตุกล้องเสียชำรุดจากการใช้งาน ซึ่งจะส่งผลให้ภาพที่ได้มีขนาดพื้นที่ในภาพ และการเหลื่อมล้ำของกล้องแต่ละตัวไม่เท่ากัน เมื่อนำภาพที่ถ่ายได้มาวิเคราะห์เพื่อหาความลึกในแนวดิ่ง จึงจำเป็นต้องลบส่วนที่เหลื่อมล้ำออก ในส่วนของขนาดพื้นที่ในภาพไม่เท่ากัน จะส่งผลในเรื่องของภาพที่ถ่ายบริเวณผิวดิน (window1) จนถึงบริเวณใต้ดินล่างสุด (ท่อขนาด 100 และ 150 คือ window20 และ window30 ตามลำดับ) เมื่อเปรียบเทียบกับกล้องทั้ง 3 ตัว จะทำให้ภาพใน window เดียวกันที่ได้เป็นภาพที่มีความลึกไม่ตรงกันเล็กน้อย และรากบางรากอาจขาดหายไปเมื่อเปลี่ยนจากกล้องตัวเก่า มาใช้ตัวใหม่ หรือรากดงกล่าวอาจไปถ่ายติดอยู่ใน window ที่อยู่ใกล้เคียง ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้ ส่วนผลของการประเมินความถูกต้องของกล้อง PSU - Minirhizotron - 1 แสดงให้เห็นถึงความบิดเบี้ยวของเส้นตรงเมื่อถ่ายภาพจากกล้องเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจริง ความแม่นยำของกล้องมีความแม่นยำสูงทั้งสามตัว โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.996, 0.997 และ 0.997 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า กล้องดังกล่าวสามารถใช้ติดตามรากเพื่อประเมินความยาวรากได้เป็นอย่างดี

ในการการศึกษาพลวัตของรากและความยาวรากด้วยกล้อง PSU - Minirhizotron - 1 สามารถใช้ติดตามรากได้ตลอดทั้งปีโดยไม่ทำลายราก และไม่มีผลกระทบต่อ การเจริญและการเปลี่ยนแปลงของรากบริเวณนั้น ข้อควรระวังในการศึกษาด้วยกล้อง PSU - Minirhizotron - 1 คือภาพที่ได้อาจมีสีของดินและรากแตกต่างจากภาพจริงเล็กน้อย เนื่องจากการศึกษารากพืชด้วยเทคนิคมิไรโซทรอน เป็นการศึกษาในท่ออะคริลิกโปร่งใสที่ฝังทิ้งไว้ในดิน การศึกษารากจึงต้องอาศัยแสงไฟในการส่องเพื่อถ่ายภาพ สีของแสงไฟเมื่อไปส่องกระทบกับราก

อาจมีสีที่ผิดเพี้ยนไปจากสีธรรมชาติเดิมของราก ดังนั้นเมื่อนำภาพดังกล่าวมาวิเคราะห์ เพื่อดูลักษณะสีของราก จึงไม่ค่อยแม่นยำมากนัก หรือบางครั้งการเกิดแสงที่สะท้อนภายในท่ออะคริลิก ก็อาจทำให้มองไม่เห็นรากได้

## 2. ความสัมพันธ์ระหว่างกล้องมินิไรโซทรอนและการเจาะดิน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกล้องมินิไรโซทรอนและวิธีการเจาะดิน พบว่าค่าที่ได้ทั้งสองวิธีมีความสัมพันธ์กันน้อย ซึ่งทั้งสองวิธีมีวิธีการศึกษาที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน การศึกษาด้วยกล้องมินิไรโซทรอนมีวิธีการโดยการฝังท่ออะคริลิกใส ผังเสียง 45 และ 60 องศา แล้วใช้กล้องถ่ายภาพภายในท่ออะคริลิกเสติดตามการเจริญของรากในตำแหน่งเดิม จากนั้นนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณรากในภาพและขนาดพื้นที่ภาพ เพื่อทราบถึงความหนาแน่นของราก (มม./ตร.มม) อีกทั้งยังต้องคำนวณหาความลึกของดินที่แปลงได้จากขนาดความยาวท่ออะคริลิกที่ฝัง 45 และ 60 องศา ส่วนการศึกษาด้วยวิธีการเจาะดินนั้น เป็นวิธีการเจาะดินบริเวณระบบรากพืชในแนวตั้งด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างดินที่ทราบปริมาตร จากนั้นจึงทำการแยกรากออกจากดินโดยวิธีล้างรากและทำการตรวจวัดความยาวรากวิธีนับจุดตัด (Tennant, 1975) เพื่อคำนวณกลับไปเป็นค่าความหนาแน่นของราก หรือความยาวรากต่อปริมาตรของดิน (ชม / ลบ. ชม.) ซึ่งจะทราบความลึกของดินจากตำแหน่งเจาะดินอยู่แล้ว

เมื่อนำทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกันในด้านวิธีการวิธีมินิไรโซทรอนมีการฝังท่อลงไป 45 และ 60 องศา มีขนาดท่อยาว 100 และ 150 เซนติเมตร เมื่อคำนวณความลึกในแนวตั้ง มีความลึก 70.7 และ 129.9 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีมินิไรโซทรอนมีความลึกในแนวตั้งดังกล่าว แต่ก็มีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับรากของผิวท่อยาว 100 และ 150 เซนติเมตร ดังนั้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีเจาะดินที่มีวิธีการเจาะบริเวณรากพืชในแนวตั้ง วิธีมินิไรโซทรอนจึงมีพื้นที่ผิวศึกษาการเจริญของรากมากกว่าวิธีการเจาะดิน นอกจากนี้ความหนาแน่นของรากแต่ละพื้นที่ที่เจาะเก็บตัวอย่างดิน มีปริมาณรากที่ไม่เหมือนกัน การกระจายของรากอาจพาราโนแปลงไม่ได้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแปลง และการติดตั้งท่อมินิไรโซทรอนอาจต้องใช้เวลาานพอสมควรที่จะฟื้นฟูสภาพรากให้กลับเหมือนกับรากในธรรมชาติ หรืออาจจะแตกต่างกับธรรมชาติโดยสิ้นเชิง

เพราะการติดตั้งไปตัดทำลายรากนั้น ทำให้มีการแตกแขนงเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นรากบริเวณนั้นจึงเพิ่มขึ้น การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกล้องมินิไรโซตรอน และการเจาะดินได้เก็บข้อมูลจำนวน 3 ครั้ง ได้แก่

ครั้งที่ 1 วันที่ 27 ธันวาคม 2556 พบว่าท่อขนาด 100 เซนติเมตร มีผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.0926 มีสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง  $y = 0.0683x + 0.0125$  และท่อขนาด 150 เซนติเมตร มีผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.131 มีสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง  $y = 0.0502x + 0.0112$  พบว่าค่าที่ได้จากเทคนิคมินิไรโซตรอนและการเจาะดินมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก ข้อมูลที่เก็บในช่วงนี้เป็นเวลาหลังจากการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน ประมาณ 7 เดือน รากที่เจริญใหม่หลังจากการติดตั้งยังไม่กลับสู่สภาพปกติที่เหมือนกับสภาพของรากที่เจริญในธรรมชาติ

ครั้งที่ 2 วันที่ 22 พฤษภาคม 2557 พบว่าท่อขนาด 100 เซนติเมตร มีผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.5399 มีสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง  $y = 0.1557x + 0.0038$  และท่อขนาด 150 เซนติเมตร มีผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.6739 มีสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง  $y = 0.1557x + 0.0041$  พบว่าค่าที่ได้จากเทคนิคมินิไรโซตรอนและการเจาะดินค่อนข้างที่จะมีความสัมพันธ์สูงพอสมควรโดยเฉพาะท่อขนาด 150 เซนติเมตร ซึ่งเป็นเวลาที่ครบรอบประมาณ 1 ปี ของการติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน เป็นช่วงเริ่มต้นฤดูฝน และเป็นช่วงที่ยางพารามีใบแก่เต็มที่หลังการผลัดใบประจำรอบปี ความหนาแน่นของรากในช่วงนี้ได้จากเทคนิคมินิไรโซตรอนค่อนข้างใกล้เคียงกับรากในธรรมชาติที่ได้จากวิธีการเจาะดิน

ครั้งที่ 3 วันที่ 3 ตุลาคม 2557 พบว่าท่อขนาด 100 เซนติเมตร มีผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.0138 มีสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง  $y = 0.016x + 0.0402$  และท่อขนาด 150 เซนติเมตร มีผลการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.0025 มีสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง  $y = 0.0072x + 0.0294$  พบว่าทั้งท่อขนาด 100 และ 150 เซนติเมตร ค่าที่ได้จากเทคนิคมินิไรโซตรอน และการเจาะดินมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการวิเคราะห์ความยาวรากด้วยเทคนิคมินิไรโซตรอน มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลวัตของรากฝอย รวมทั้งความหนาแน่นของรากในแต่ละพื้นที่ได้ดี แต่อาจไม่มีความเหมาะสมต่อการเปรียบเทียบกับวิธีการเจาะดิน

### 3. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดินและเครื่องวัดความชื้นดิน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดินและเครื่องวัดความชื้นดิน การศึกษาความชื้นดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดิน มีวิธีการโดยการขุดดินบริเวณตำแหน่ง 10, 20, 30, 40, 60 และ 100 เซนติเมตร ลงไปในดิน ซึ่งเป็นตำแหน่งความลึกเดียวกันกับเครื่องวัดความชื้นวัดได้ ผลที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.65 สามารถวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์แบบลอการิทึม  $y = 12.925\ln(x) - 11.769$  ค่าที่ได้มีความสัมพันธ์กันไม่มากนัก เป็นผลจากการสูญเสียความชื้นจากการเก็บตัวอย่างดินระหว่างก่อนนำดินมาทำการทดลอง เนื่องจากระยะเวลาที่พื้นดินที่ทดลองห่างไกล ต้องใช้ระยะเวลาพอสมควร ก่อนเดินทางมาถึงห้องทำการทดลองทำให้เกิดการสูญเสียความชื้นจากดินได้

### 4. การเจริญและการเปลี่ยนแปลงของราก

จากการศึกษาการเจริญของรากยางพาราโดยใช้เทคนิคมินิไรโซตรอนเป็นวิธีที่ไม่เป็นการทำลายรากของพืช (Ephrath *et al.*, 1999; Johnson *et al.*, 2001) สามารถติดตามการเจริญเติบโตและตายของรากได้ดีขึ้น (Iversen *et al.*, 2012) โดยทำการทดลองยางพาราทั้งหมด 3 ต้น ฝังท่ออะคลิลิก ต้นละ 2 ท่อ ขนาด 100 และ 150 เซนติเมตร ทำมุม 45 และ 60 องศาตามลำดับ ซึ่งสามารถประเมินกระจายความลึกรากของพืชดีกว่าท่อแนวตั้ง (Rewald and Ephrath, 2013) และติดตั้งห่างจากโคนต้น 150 เซนติเมตร ทำการขุดหลุมติดตั้งท่อในวันที่ 23 เมษายน 2556 ดำเนินการฝังท่อในวันที่ 1 พฤษภาคม 2556 ทำการบันทึกภาพครั้งแรกเมื่อวันที่

25 พฤษภาคม 2556 จนถึง 3 ตุลาคม 57 ความถี่ในการเก็บข้อมูลราก 2 สัปดาห์ต่อครั้งเพื่อประเมินการสร้างรากและการตายของราก (Rewald and Ephrath , 2013)

#### 4.1 การวิเคราะห์รูปแบบของสมการการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth curve

ข้อมูลการเจริญของรากระหว่างวันที่ 1 พฤษภาคม 2556 ถึง 21 กันยายน 2556 ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบของสมการการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth curve หรือ S-shaped growth curve (Brown and Rothery, 1993) เพื่อการเจริญใหม่และพัฒนาการของรากยางพาราหลังการฝังท่อมินิไรโซตรอน (Johnson *et al.*, 2001) โดยคัดเลือกข้อมูลรากใน window ที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความยาวรากหนาแน่นอย่างชัดเจน ผลการศึกษาพบว่าท่อขนาด 100 และ 150 เซนติเมตร ใช้ระยะเวลาประมาณ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ ในการฟื้นคืนกลับเข้าสู่สภาวะที่ค่าความยาวรากหนาแน่นมีค่าคงที่

ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการศึกษารากฝอยของยางพาราด้วยเทคนิคมินิไรโซตรอน จำเป็นต้องเว้นระยะเวลาหลังการติดตั้งประมาณ 60 และ 90 วัน ของท่อขนาด 100 และ 150 เซนติเมตร ตามลำดับ จึงค่อยทำการบันทึกข้อมูล เพื่อให้รากที่ถูกตัดขาดจากผลกระทบจากกระบวนการฝังท่อ และฟื้นคืนกลับมาในสภาพใกล้เคียงก่อนหน้าการฝังท่อ ซึ่งการศึกษานี้สอดคล้องกับที่ Johnson และคณะ (2013) ได้เสนอไว้ว่าควรเว้นระยะเวลาหลังการฝังท่อประมาณ 6 - 12 เดือน ก่อนทำการการบันทึกข้อมูล

หากเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตของการฝังท่อทั้งสองขนาด พบว่าการฝังท่อ 100 เซนติเมตร ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโตสูงกว่าการฝังท่อแบบ 150 เซนติเมตร เนื่องจากการฝังท่อ 100 เซนติเมตร เป็นการขุดหลุมฝังท่อที่มีผลกระทบต่อกรตัดรากของยางพาราน้อยที่สุด ทำให้การกลับคืนสภาพของรากยางพาราบริเวณรอบๆ ฝิวท่อ 100 เซนติเมตร จึงเร็วกว่าการเปิดหน้าดินของการฝังท่อ 150 เซนติเมตร แต่อย่างไรก็ตามการฝังท่อที่มีความยาว 100 เซนติเมตรจะทำให้ระดับความลึกของการศึกษารากของยางพาราทำได้ตื้นกว่าท่อที่มีความยาว 150 เซนติเมตร ดังนั้นหากต้องการใช้ท่อที่มีความยาว 150 เซนติเมตร และไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเปิดหน้าดินบางส่วนในขั้นตอนการฝัง การศึกษาพลวัตของการเจริญของ

รากต้องรอให้ผ่านพ้นระยะเวลาประมาณ 90 วัน หลังการฝังท่อ ส่วนการฝังท่อด้วยการใช้เครื่องชุดแบบมือหมุน สามารถเริ่มศึกษาพลวัตของรากได้ตั้งแต่ 60 วัน หลังการฝังท่อ

#### 4.2 อิทธิพลของการติดตั้งอุปกรณ์ที่มีผลต่อราก

จากการศึกษาพบว่าความยาวของรากที่บันทึกจากท่อมินิโรโซตรอน ที่มีความยาว 150 เซนติเมตร ที่มีวิธีการติดตั้งโดยจะทำการเปิดหน้าดินด้วยจอบ ให้มีความกว้าง ยาวและลึก เท่ากับ  $100 \times 100 \times 80$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ จากนั้นจะขุดต่อจนถึงระดับ 150 เซนติเมตร ด้วยเครื่องเจาะเก็บตัวอย่างดินแบบมือหมุน พบว่ามีค่าความยาวรากหนาแน่นในแต่ละชั้นความลึก หรือแต่ละ window มีค่าสูง เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากท่อขนาดความยาว 100 เซนติเมตร ที่ใช้เฉพาะเครื่องเจาะแบบมือหมุน การศึกษาการเจริญของรากความยาวท่อ 100 เซนติเมตร ที่ไม่ได้เปิดหน้าดินที่ลึกและกว้าง โดยใช้เฉพาะเครื่องเจาะดินแบบมือหมุน พบว่ารากมีความหนาแน่นสูงสุดใน window1, window2 และ window3 ซึ่งเป็นบริเวณที่บริเวณผิวดิน ส่วนการเจริญของรากในความยาวท่อ 150 เซนติเมตร ในช่วงแรกของการเก็บข้อมูล ในปลายเดือน พฤษภาคม 2556 พบว่ารากมีความหนาแน่นที่มีค่าสูงของทุก window เนื่องจากการเปิดหน้าดินไปตัด ทำลายราก ทำให้รากมีการไปกระตุ้นให้แตกแขนงมากขึ้น และส่งผลให้บริเวณนั้นมีรากหนาแน่น

#### 5. ความสัมพันธ์ของการเจริญของรากและความชื้นในดิน

การเจริญของรากพืชและการตายของรากพืช มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (Hendrick and Pregitzer, 1996; Majdi, 1996) รากยางจะมีการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับความชื้นในดิน เมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้น รากจะเจริญได้ดี มีการแตกแขนงที่เพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินลดลงรากจะมีการตาย ทำให้รากมีความหนาแน่นลดน้อยลงไปด้วย โดยความชื้นจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้รากเจริญได้ดี (สายัณห์ และนเรศ, 2551; วินัย และคณะ, 2555) รากฝอยมีการเกิดใหม่และการตายของรากฝอยมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับความชื้นในดินแต่ละ

ฤดูกาล ในฤดูกาลเจริญเติบโตของรากอยู่ในช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคม ( Gonkhamdee *et al.*, 2009) ความชื้นในฤดูกาลดังกล่าวมาจากปริมาณของน้ำฝนที่เกิดขึ้น (Chairungsee *et al.*, 2013) โดยรากเจริญได้ดีสูงสุดที่ความชื้นในดิน 30 เปอร์เซ็นต์ (Zeng และคณะ, 2010) ซึ่งทำให้อุณหภูมิในดินลดต่ำลง (Hurewitz and Janes, 1983) ส่งเสริมให้ดินมีความเหมาะสมต่อการเจริญของรากได้ดี

## 6. ความสัมพันธ์ของการเจริญของรากและทรงพุ่ม

การเจริญเติบโตของรากและการเปลี่ยนแปลงของทรงพุ่มซึ่งจะเห็นได้ชัด ในช่วงที่ยังมีการผลัดใบและผลิใบใหม่ (Jainwei *et al.*, 2008) ในเดือนมกราคม 2557 ในช่วงที่ยังมีการผลัดใบและผลิใบใหม่ พบว่ารากจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงมากนัก (Salisbury and Rose, 1978) โดยจะมีการสร้างรากและการตายของรากที่ต่ำ จนถึงเดือนเมษายน 2557 เป็นช่วงที่ทรงพุ่มมีใบเจริญสมบูรณ์แล้ว ร่วมกับอิทธิพลของฝนที่ทำให้ความชื้นมีความเหมาะสม พบว่าต้นยางเริ่มสร้างรากใหม่เกิดขึ้น และความหนาแน่นของรากจะมีค่าคงที่ แล้วหยุดสร้างรากใหม่ในเดือนพฤษภาคม 2557 สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากรากมีความสัมพันธ์กับทรงพุ่ม ในแง่ของการเจริญของใบ ที่ทำหน้าที่หายใจและการสังเคราะห์แสง ซึ่งถือเป็น source ที่ส่งเสริมให้มีการเจริญของราก คือ sink และในช่วงที่ยังมีการผลัดใบและการแตกใบใหม่นั้น ยางจำเป็นต้องใช้สารอาหารในการสร้างใบใหม่ขึ้นมา และเมื่ออย่างมีทรงพุ่มใบที่เจริญสมบูรณ์แล้ว ใบจัดได้ว่าเป็นอวัยวะหลักของพืชที่ทำหน้าที่ในการรับแสงสำหรับการสังเคราะห์แสงสร้างอาหารขึ้นในส่งเสริมการเจริญเติบโตของราก (นพดล, 2552) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของรากที่มีต่อสรีรวิทยาของส่วนยอด (สายัณห์, 2554)

## บทที่ 5

### สรุป

จากการประเมินความถูกต้องของกล่อง PSU - Minirhizotron - 1 พบว่ากล่อง PSU - Minirhizotron - 1 สามารถใช้ติดตามรากเพื่อประเมินความยาวรากได้เป็นอย่างดี มีความแม่นยำกับค่าจริง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.996, 0.997 และ 0.997 ของกล่องตัวที่ 1 กล่องตัวที่ 2 และ กล่องตัวที่ 3 ตามลำดับ

จากการศึกษาการเปรียบเทียบค่าการเจริญของรากที่ได้จากกล่องมินิไรโซทรอน และการเจาะดิน พบว่าปริมาณของรากแตกต่างกันของทั้ง 2 วิธี เนื่องจากความหนาแน่นของรากแต่ละพื้นที่ที่เจาะเก็บตัวอย่างดิน มีปริมาณรากที่ไม่เหมือนกัน การกระจายของรากอาจพาราในแปลงไม่ได้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแปลง จึงทำให้ค่าที่ได้จากมินิไรโซทรอน และการเจาะดินจึงแตกต่างกัน ดังนั้นในการศึกษารากโดยใช้เทคนิคมินิไรโซทรอน จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีมินิไรโซทรอนสามารถที่จะศึกษาการเจริญและการเปลี่ยนแปลงของราก รวมทั้งความหนาแน่นของรากในแต่ละพื้นที่ได้ดี แต่ไม่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในการเปรียบเทียบกับวิธีการเจาะดิน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นดินที่ได้จากการเก็บตัวอย่างดิน และเครื่องวัดความชื้นดิน (Soil Profile Probe Delta-t Devices) พบว่าค่าความชื้นดินจากการเก็บตัวอย่างดิน เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความชื้นดิน ด้วยหัววัด รุ่น PR2 และตัวเครื่อง รุ่น HH2 จากยี่ห้อ Delta-t Devices ให้ค่าที่แม่นยำ 65 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือมีความแม่นยำเพียงพอที่สามารถใช้ศึกษาการเจริญของรากอาจพาราได้

การวิเคราะห์รูปแบบของสมการการเจริญเติบโตแบบ Logistic growth curve หลังจากการฝังท่อมินิไรโซทรอนที่มีความยาว 100 และ 150 เซนติเมตร ด้วยวิธีการฝังที่แตกต่างกัน 40 และ 60 องศา ตามลำดับ พบว่ารากของยางพารามีการเจริญกลับคืนสู่สภาวะคงที่ภายในระยะเวลา 60 และ 90 วัน ตามลำดับ อัตราการงอกใหม่ของรากฝอยในท่อที่มีความยาว 100 และ 150 เซนติเมตร มีค่าสูงสุดหลังการฝังท่อ 30 และ 80 วัน ตามลำดับ

การเจริญและการเปลี่ยนแปลงของราก พบว่ารากมีความหนาแน่นสูงสุดที่ระดับความลึก 0 - 10 เซนติเมตร และการเปลี่ยนแปลงความยาวของรากมีความสัมพันธ์ในลักษณะแปร



ผันตามกับการเปลี่ยนแปลงของความชื้นดินในแต่ละฤดูกาลตลอดทั้งปี การเพิ่มขึ้นของความชื้นในช่วงปลายฤดูร้อน ทำให้ความยาวรากในท่อขนาด 100 เซนติเมตร ที่ระดับความลึก 0 - 70 เซนติเมตร เพิ่มขึ้น และพบว่าความยาวรากที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากรากฝอยที่ระดับความลึก 45 - 70 เซนติเมตร 48.39 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่รากฝอยที่ระดับความลึก 0 - 10 เซนติเมตร และ 10 - 45 เซนติเมตร มีค่า 29.03 และ 22.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนในท่อขนาด 150 เซนติเมตร ที่ระดับความลึก 0 - 70 เซนติเมตร เพิ่มขึ้นเช่นกัน พบว่าความยาวรากที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากรากฝอยที่ระดับความลึก 10 - 70 เซนติเมตร มีค่า 58.01 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่รากฝอยที่ระดับความลึก 70 - 130 และ 0 - 10 เซนติเมตร และ เซนติเมตร มีค่า 21.72 และ 20.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่าผลรวมของรากมีการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับความชื้น เมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้น รากจะเจริญได้ดี มีการแตกแขนงที่เพิ่มขึ้น และเมื่อความชื้นในดินลดลง รากจะมีการตายทำให้ความหนาแน่นของรากลดลงไปด้วย อีกทั้งยังพบว่าในช่วงเดือนเมษายน 2557 พบว่ารากมีการเจริญที่เพิ่มขึ้น รากที่เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นรากใหม่บริเวณชั้นใต้ดิน ตั้งแต่ window 15 ลงไป หรือมากกว่า 45 เซนติเมตร ของทั้งท่อ 100 และ 150 เซนติเมตร โดยช่วงนี้จะ เป็นช่วงที่ทรงพุ่มมีการเจริญเติบโตของใบที่เต็มที่แล้วประมาณ 50 วัน

## เอกสารอ้างอิง

- กรมวิชาการเกษตร. 2550. ข้อมูลวิชาการยางพารา 2550. กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ. สถาบันวิจัยยาง.
- เจษฎา ไสภารัตน์. 2552. การใช้ภาพดาวเทียม SPOT - 5 เพื่อประเมินดัชนีพื้นที่ใบของยางพารา กรณีศึกษา อำเภอนาหม่อม จังหวัดสงขลา. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ณรงค์ คงมาก, ปกรณ์ ดิษฐกิจ, ศุภกร ชินวรรณ และสายัณห์ สดุดี. 2555. การปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภัยธรรมชาติในบริบทเชิงพื้นที่. ชุดโครงการพัฒนาความรู้และยุทธศาสตร์ความตกลงพหุภาคีด้านสิ่งแวดล้อมและยุทธศาสตร์ลดโลกร้อน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- นพดล จรัสสัมฤทธิ์. 2552. การพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พื้นที่ปลูกลำไยโดยการใช้ค่าดัชนีพื้นที่ใบ. รายงานผลการวิจัย ภาควิชาพืชไร่ คณะผลิตผลการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ปรีชา กาเพชร, ชยันต์ ภัคดีไทย และวินัย ศรวัตติ. 2554. การหาพื้นที่ใบจากภาพถ่ายดิจิทัล. เกษตร 39 (ฉบับพิเศษ): 392-397.
- วินัย วิริยะอลงกรณ์, ธนะชัย พันธุ์เกษมสุข, สมชาย องค์ประเสริฐ และ โวลฟรัม สแป. 2555. ผลของการให้น้ำแบบต่าง ๆ ที่มีต่อการเจริญเติบโตของรากลำไยที่ศึกษาแบบ split root ในโรงเรือนพลาสติก. การประชุมวิชาการแห่งชาติ ครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน 4-7 ธันวาคม 2555 หน้า 1122-1133.
- ศุภกร ชินวรรณ. 2554. ภาพฉายอนาคตระบบการผลิตพืชไร่นาในประเทศไทย และผลผลิตในอนาคตภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ. กรุงเทพฯ. ศูนย์เครือข่ายงานวิเคราะห์วิจัยและฝึกอบรมการเปลี่ยนแปลงของโลกแห่งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2554. โครงการศึกษาด้านผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศในอนาคตและการปรับตัวของภาคส่วนที่สำคัญ. ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เครือข่ายงานวิเคราะห์ วิจัย และฝึกอบรมการเปลี่ยนแปลงของโลกแห่งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันวิจัยยาง. 2555. เอกสารวิชาการ ข้อมูลวิชาการยางพารา. 2555. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.

สายนธ์ สดุดี และนเรศ จิโส๊ะ 2551. การประเมินการเจริญเติบโตของรากยางพารา (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) โดยใช้เทคนิคมินิไรโซทรอน. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 26: 50-60.

สายนธ์ สดุดี. 2554. ความสำคัญของรากพืช. สงขลา: เอกสารประกอบการสอน คณะทรัพยากรธรรมชาติ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์. 2548. สรีรวิทยาพืช. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาพฤกษศาสตร์. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จามจุรีโปรดักท์.

Brown, D. and Rothery, P. 1993. Models in Biology: Mathematics, Statistics and Computing. United Kingdom. John Wiley & Sons Ltd.

Chairungsee, N., Gay F., Thaler, P., Kasamsap, P., Thanisawanyangkura, S., Chantuma, A. and Jourdan, C. 2013. Impact of tapping and soil water status on fine root dynamics in a rubber tree plantation in Thailand. *Frontiers in Plant Science* 4: 1-15.

Chaissalee, N., Thongchet, W., Chumriang, P. and Puangchit, L. 2001. Photosynthesis and leaf water potential of *Dendrocalamus latiflorus* planted at the Pangda Royal Atation. Proceedings of 7<sup>th</sup> Silvicultural Seminar, Changmai Province, 12-14 December 2001. pp 357-369.

- Education Portal. 2014. Logistic population growth equation, definition and graph. <http://educportal.com/academy/lesson/logistic-population-growth-equation-definition-graph.html> # lesson. (accessed September 4, 2014).
- Ephrath, J. E., Silberbush, M. and Berliner, P.R. 1999. Calibration of minirhizotron readings against root length density data obtained from soil cores. *Plant and Soil* 209: 201-208.
- Frazer, G.W., Canham, C.D. and Letzman, K.P. 1999. Gap Light Analyser (GLA), Version 2.0 : Imaging Software to Extract Canopy Structure and Gap: Light Transmission Indices from True-Colour Fisheye Photographs, User Manual and Program Documentation. Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia and Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, NY, USA.
- Gluszek, S., Paszt, L. S., Sumorok, B., Derkowska, E. and Kozera, R. 2013. Application of the minirhizotron technique to studying the roots of fruit plants. *Advances in Science and Technology-Research Journal* 7: 45-53.
- Gonkhamdee, S., Maeght, J. L., Do, F. and Pierret, A. 2009. Growth dynamics of fine *Hevea brasiliensis* roots along a 4.5-m soil profile. *Khon Kaen Agriculture Journal* 37: 265-276.
- Hendrick, R. L. and Pregitzer, K. S. 1996. Applications of minirhizotron to understand root function in forests and other natural ecosystems. *Plant and Soil* 185: 293-304.
- Hurewitz, J and Janes, H. W. 1983. Effect of altering the root-zone temperature on growth, translocation, carbon exchange rate, and leaf starch accumulation in the tomato. *Plant physiology* 73: 46–50.
- Iversen, C.M., Murphy, M.T., Allen, M.S., Childs, J., Eissenstat, D.M., Lilleskov, E.A., Sarjala, T.M., Sloan, V.L. and Sullivan, P.F. 2012. Advancing the use of minirhizotron in wetlands. *Plant and Soil* 352: 23-39.

- Jianwei, S., Zhengquan, W., Shuiqiang, Y., Xiankui, Q., Yue, S., Shuxia, J. and Li, M. 2008. Estimation of fine root production, mortality and turnover with minirhizotron in *Larix gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* plantations. *Frontiers of Biology in China* 3: 496–506.
- Johnson, M. G., Tingey, D. T., Phillips, D. T. and Storm, M. J. 2001. Advancing fine root research with minirhizotron. *Environmental and Experimental Botany* 45: 263-289.
- López, B., Sabaté, S. and Gracia, C. A. 2001. Vertical distribution of fine root density, length density, area index and mean diameter in a *Quercus ilex* forest. *Tree Physiology* 21: 555-560.
- Macduff, J. H., Wild, A., Hopper, M. J. and Dhanoa, M. S. 1986. Effects of temperature on parameters of root growth relevant to nutrient uptake: Measurements on oilseed rape and barley grown in flowing nutrient solution. *Plant and soil* 94: 321-332.
- Majdi, H. 1996. Root sampling methods applications and limitations of minirhizotron technique. *Plant and Soil* 185: 255-258.
- Noggle, G. R. and G. J. Fritz. 1976. *Introductory Plant Physiology*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs. 688 p.
- Philip, V., Rao, D. V. K. N., Varghese, M., Vinod, K.K., Pothen, J. and Krishnakumar, A.K. 1996. Spatial distribution of roots and nutrients in soil under robber plantations in Tripura. *Indian journal of Natural Rubber Research* 9:106-111.
- Rewald, B. and Ephrath, J.E. 2013. minirhizotron technique. The hidden half. 4<sup>th</sup> edition. CRC Press, Eds. Eshel, A. and Beeckman, T. New York, USA. 15-17 April 2013, pp. 1-15.
- Salisbury, F. B. and Ross, C. W. 1978. *Plant Physiology*. 2<sup>nd</sup> Ed. Wadsworth Publishing Company, Belmont, California.

- Salisbury, F. B. and Ross, C. W. 1991. Plant Physiology. 4<sup>th</sup> Ed. Wadsworth Publishing Company, Belmont, California.
- Samson, B. K. and Sinclair, T. R. 1994. Soil core and minirhizotron comparison for the determination of root length density. *Plant and Soil* 161: 225-232.
- Tennant, D. 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *Journal of Ecology* 63: 995-1001.
- Zeng, F., Song, C., Guo, H., Liu, B., Luo, W., Gui, D., Arndt, S. and Guo, D. 2013. Responses of root growth of *Alhagi sparsifolia* Shap. (Fabaceae) to different simulated groundwater depths in the southern fringe of the Taklimakan Desert, China. *Journal of Arid Land* 5: 220-232.

ภาคผนวก

### กล้องถ่ายภาพ 1

ตารางภาคผนวกที่ 1 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกรับบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 1 ท่อขนาด 100 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง =sin 45°(มม.)
1	21.20	50.00	1060.23	14.99
2	52.00	50.00	2600.00	36.76
3	52.00	50.00	2600.00	36.76
4	52.00	50.00	2600.00	36.76
5	52.00	50.00	2600.00	36.76
6	52.00	50.00	2600.00	36.76
7	52.00	50.00	2600.00	36.76
8	52.00	50.00	2600.00	36.76
9	52.00	50.00	2600.00	36.76
10	52.00	50.00	2600.00	36.76
11	52.00	50.00	2600.00	36.76
12	52.00	50.00	2600.00	36.76
13	52.00	50.00	2600.00	36.76
14	52.00	50.00	2600.00	36.76
15	52.00	50.00	2600.00	36.76
16	52.00	50.00	2600.00	36.76
17	52.00	50.00	2600.00	36.76
18	52.00	50.00	2600.00	36.76
19	52.00	50.00	2600.00	36.76
20	30.30	50.00	1515.00	21.42
<b>รวม</b>	<b>987.50</b>	<b>1000.00</b>	<b>49375.23</b>	<b>698.17</b>



ตารางภาคผนวกที่ 2 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกรับบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 1 ที่ขนาด 150 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง = $\sin 45^\circ$ (มม.)
1	49.62	50.00	2480.96	42.97
2	52.00	50.00	2600.00	45.03
3	52.00	50.00	2600.00	45.03
4	52.00	50.00	2600.00	45.03
5	52.00	50.00	2600.00	45.03
6	52.00	50.00	2600.00	45.03
7	52.00	50.00	2600.00	45.03
8	52.00	50.00	2600.00	45.03
9	52.00	50.00	2600.00	45.03
10	52.00	50.00	2600.00	45.03
11	52.00	50.00	2600.00	45.03
12	52.00	50.00	2600.00	45.03
13	52.00	50.00	2600.00	45.03
14	52.00	50.00	2600.00	45.03
15	52.00	50.00	2600.00	45.03
16	52.00	50.00	2600.00	45.03
17	52.00	50.00	2600.00	45.03
18	52.00	50.00	2600.00	45.03
19	52.00	50.00	2600.00	45.03
20	52.00	50.00	2600.00	45.03
21	52.00	50.00	2600.00	45.03
22	52.00	50.00	2600.00	45.03

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง =sin 60°(มม.)
23	52.00	50.00	2600.00	45.03
24	52.00	50.00	2600.00	45.03
25	52.00	50.00	2600.00	45.03
26	52.00	50.00	2600.00	45.03
27	52.00	50.00	2600.00	45.03
28	52.00	50.00	2600.00	45.03
29	52.00	50.00	2600.00	45.03
30	25.29	50.00	1264.31	21.90
<b>รวม</b>	<b>1530.91</b>	<b>1500.00</b>	<b>76545.27</b>	<b>1325.76</b>

ตารางภาคผนวกที่ 3 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกรับบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 2 ท่อขนาด 100 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง = $\sin 45^\circ$ (มม.)
1	26.80	50.00	1340.15	18.95
2	52.00	50.00	2600.00	36.76
3	52.00	50.00	2600.00	36.76
4	52.00	50.00	2600.00	36.76
5	52.00	50.00	2600.00	36.76
6	52.00	50.00	2600.00	36.76
7	52.00	50.00	2600.00	36.76
8	52.00	50.00	2600.00	36.76
9	52.00	50.00	2600.00	36.76
10	52.00	50.00	2600.00	36.76
11	52.00	50.00	2600.00	36.76
12	52.00	50.00	2600.00	36.76
13	52.00	50.00	2600.00	36.76
14	52.00	50.00	2600.00	36.76
15	52.00	50.00	2600.00	36.76
16	52.00	50.00	2600.00	36.76
17	52.00	50.00	2600.00	36.76
18	52.00	50.00	2600.00	36.76
19	52.00	50.00	2600.00	36.76
20	5.03	50.00	251.34	3.55
<b>รวม</b>	<b>967.83</b>	<b>1000.00</b>	<b>48391.49</b>	<b>684.26</b>

ตารางภาคผนวกที่ 4 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกรับบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 2 ท่อขนาด 150 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง = $\sin 60^\circ$ (มม.)
1	21.38	50.00	1068.99	18.51
2	52.00	50.00	2600.00	45.03
3	52.00	50.00	2600.00	45.03
4	52.00	50.00	2600.00	45.03
5	52.00	50.00	2600.00	45.03
6	52.00	50.00	2600.00	45.03
7	52.00	50.00	2600.00	45.03
8	52.00	50.00	2600.00	45.03
9	52.00	50.00	2600.00	45.03
10	52.00	50.00	2600.00	45.03
11	52.00	50.00	2600.00	45.03
12	52.00	50.00	2600.00	45.03
13	52.00	50.00	2600.00	45.03
14	52.00	50.00	2600.00	45.03
15	52.00	50.00	2600.00	45.03
16	52.00	50.00	2600.00	45.03
17	52.00	50.00	2600.00	45.03
18	52.00	50.00	2600.00	45.03
19	52.00	50.00	2600.00	45.03
20	52.00	50.00	2600.00	45.03
21	52.00	50.00	2600.00	45.03
22	52.00	50.00	2600.00	45.03

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง =sin 60°(มม.)
23	52.00	50.00	2600.00	45.03
24	52.00	50.00	2600.00	45.03
25	52.00	50.00	2600.00	45.03
26	52.00	50.00	2600.00	45.03
27	52.00	50.00	2600.00	45.03
28	52.00	50.00	2600.00	45.03
29	52.00	50.00	2600.00	45.03
30	47.41	50.00	2370.45	41.05
<b>รวม</b>	<b>1524.79</b>	<b>1500.00</b>	<b>76239.44</b>	<b>1320.46</b>

ตารางภาคผนวกที่ 5 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูkBันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 3 ที่ขนาด 100 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง =sin 45°(มม.)
1	23.01	50.00	1150.74	16.27
2	52.00	50.00	2600.00	36.76
3	52.00	50.00	2600.00	36.76
4	52.00	50.00	2600.00	36.76
5	52.00	50.00	2600.00	36.76
6	52.00	50.00	2600.00	36.76
7	52.00	50.00	2600.00	36.76
8	52.00	50.00	2600.00	36.76
9	52.00	50.00	2600.00	36.76
10	52.00	50.00	2600.00	36.76
11	52.00	50.00	2600.00	36.76
12	52.00	50.00	2600.00	36.76
13	52.00	50.00	2600.00	36.76
14	52.00	50.00	2600.00	36.76
15	52.00	50.00	2600.00	36.76
16	52.00	50.00	2600.00	36.76
17	52.00	50.00	2600.00	36.76
18	52.00	50.00	2600.00	36.76
19	52.00	50.00	2600.00	36.76
20	5.1	50.00	255.00	3.61
<b>รวม</b>	<b>964.11</b>	<b>1000.00</b>	<b>48205.74</b>	<b>681.63</b>

ตารางภาคผนวกที่ 6 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 3 ที่ขนาด 150 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง = $\sin 60^\circ$ (มม.)
1	25.48	50.00	1273.91	22.06
2	52.00	50.00	2600.00	45.03
3	52.00	50.00	2600.00	45.03
4	52.00	50.00	2600.00	45.03
5	52.00	50.00	2600.00	45.03
6	52.00	50.00	2600.00	45.03
7	52.00	50.00	2600.00	45.03
8	52.00	50.00	2600.00	45.03
9	52.00	50.00	2600.00	45.03
10	52.00	50.00	2600.00	45.03
11	52.00	50.00	2600.00	45.03
12	52.00	50.00	2600.00	45.03
13	52.00	50.00	2600.00	45.03
14	52.00	50.00	2600.00	45.03
15	52.00	50.00	2600.00	45.03
16	52.00	50.00	2600.00	45.03
17	52.00	50.00	2600.00	45.03
18	52.00	50.00	2600.00	45.03
19	52.00	50.00	2600.00	45.03
20	52.00	50.00	2600.00	45.03
21	52.00	50.00	2600.00	45.03
22	52.00	50.00	2600.00	45.03

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง =sin 60°(มม.)
23	52.00	50.00	2600.00	45.03
24	52.00	50.00	2600.00	45.03
25	52.00	50.00	2600.00	45.03
26	52.00	50.00	2600.00	45.03
27	52.00	50.00	2600.00	45.03
28	52.00	50.00	2600.00	45.03
29	52.00	50.00	2600.00	45.03
30	48.52	50.00	2426.22	42.02
<b>รวม</b>	<b>1530.00</b>	<b>1500.00</b>	<b>76500.13</b>	<b>1324.98</b>



## กล้องถ่ายภาพ 2

ตารางภาคผนวกที่ 7 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกรับบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 1 ท่อขนาด 100 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง =sin 45°(มม.)
1	21.07	35.00	737.59	14.90
2	48.00	35.00	1680.00	33.94
3	48.00	35.00	1680.00	33.94
4	48.00	35.00	1680.00	33.94
5	48.00	35.00	1680.00	33.94
6	48.00	35.00	1680.00	33.94
7	48.00	35.00	1680.00	33.94
8	48.00	35.00	1680.00	33.94
9	48.00	35.00	1680.00	33.94
10	48.00	35.00	1680.00	33.94
11	48.00	35.00	1680.00	33.94
12	48.00	35.00	1680.00	33.94
13	48.00	35.00	1680.00	33.94
14	48.00	35.00	1680.00	33.94
15	48.00	35.00	1680.00	33.94
16	48.00	35.00	1680.00	33.94
17	48.00	35.00	1680.00	33.94
18	48.00	35.00	1680.00	33.94
19	48.00	35.00	1680.00	33.94
20	42.53	35.00	1488.66	30.07
<b>รวม</b>	<b>927.61</b>	<b>700.00</b>	<b>32466.25</b>	<b>655.82</b>

ตารางภาคผนวกที่ 8 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกรับบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 1 ที่ขนาด 150 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง = $\sin 60^\circ$ (มม.)
1	47.77	35.00	1672.09	41.37
2	48.00	35.00	1680.00	41.57
3	48.00	35.00	1680.00	41.57
4	48.00	35.00	1680.00	41.57
5	48.00	35.00	1680.00	41.57
6	48.00	35.00	1680.00	41.57
7	48.00	35.00	1680.00	41.57
8	48.00	35.00	1680.00	41.57
9	48.00	35.00	1680.00	41.57
10	48.00	35.00	1680.00	41.57
11	48.00	35.00	1680.00	41.57
12	48.00	35.00	1680.00	41.57
13	48.00	35.00	1680.00	41.57
14	48.00	35.00	1680.00	41.57
15	48.00	35.00	1680.00	41.57
16	48.00	35.00	1680.00	41.57
17	48.00	35.00	1680.00	41.57
18	48.00	35.00	1680.00	41.57
19	48.00	35.00	1680.00	41.57
20	48.00	35.00	1680.00	41.57
21	48.00	35.00	1680.00	41.57
22	48.00	35.00	1680.00	41.57

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง =sin 60°(มม.)
23	48.00	35.00	1680.00	41.57
24	48.00	35.00	1680.00	41.57
25	48.00	35.00	1680.00	41.57
26	48.00	35.00	1680.00	41.57
27	48.00	35.00	1680.00	41.57
28	48.00	35.00	1680.00	41.57
29	48.00	35.00	1680.00	41.57
30	47.93	35.00	1677.58	41.51
<b>รวม</b>	<b>1439.70</b>	<b>1050.00</b>	<b>50389.67</b>	<b>1246.78</b>

ตารางภาคผนวกที่ 9 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกรับบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 2 ที่ขนาด 100 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง = $\sin 45^\circ$ (มม.)
1	36.80	35.00	1288.11	26.02
2	48.00	35.00	1680.00	33.94
3	48.00	35.00	1680.00	33.94
4	48.00	35.00	1680.00	33.94
5	48.00	35.00	1680.00	33.94
6	48.00	35.00	1680.00	33.94
7	48.00	35.00	1680.00	33.94
8	48.00	35.00	1680.00	33.94
9	48.00	35.00	1680.00	33.94
10	48.00	35.00	1680.00	33.94
11	48.00	35.00	1680.00	33.94
12	48.00	35.00	1680.00	33.94
13	48.00	35.00	1680.00	33.94
14	48.00	35.00	1680.00	33.94
15	48.00	35.00	1680.00	33.94
16	48.00	35.00	1680.00	33.94
17	48.00	35.00	1680.00	33.94
18	48.00	35.00	1680.00	33.94
19	48.00	35.00	1680.00	33.94
20	45.33	35.00	1586.44	32.05
<b>รวม</b>	<b>946.13</b>	<b>700.00</b>	<b>33114.54</b>	<b>668.91</b>

ตารางภาคผนวกที่ 10 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 2 ท่อขนาด 150 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง = $\sin 60^\circ$ (มม.)
1	24.46	35.00	856.03	21.18
2	48.00	35.00	1680.00	41.57
3	48.00	35.00	1680.00	41.57
4	48.00	35.00	1680.00	41.57
5	48.00	35.00	1680.00	41.57
6	48.00	35.00	1680.00	41.57
7	48.00	35.00	1680.00	41.57
8	48.00	35.00	1680.00	41.57
9	48.00	35.00	1680.00	41.57
10	48.00	35.00	1680.00	41.57
11	48.00	35.00	1680.00	41.57
12	48.00	35.00	1680.00	41.57
13	48.00	35.00	1680.00	41.57
14	48.00	35.00	1680.00	41.57
15	48.00	35.00	1680.00	41.57
16	48.00	35.00	1680.00	41.57
17	48.00	35.00	1680.00	41.57
18	48.00	35.00	1680.00	41.57
19	48.00	35.00	1680.00	41.57
20	48.00	35.00	1680.00	41.57
21	48.00	35.00	1680.00	41.57
22	48.00	35.00	1680.00	41.57

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง =sin 60°(มม.)
23	48.00	35.00	1680.00	41.57
24	48.00	35.00	1680.00	41.57
25	48.00	35.00	1680.00	41.57
26	48.00	35.00	1680.00	41.57
27	48.00	35.00	1680.00	41.57
28	48.00	35.00	1680.00	41.57
29	48.00	35.00	1680.00	41.57
30	48.00	35.00	1680.00	41.57
31	25.00	35.00	875.00	21.65
<b>รวม</b>	<b>1441.46</b>	<b>1050.00</b>	<b>50451.03</b>	<b>1248.30</b>

ตารางภาคผนวกที่ 11 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 3 ที่ขนาด 100 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง = $\sin 60^\circ$ (มม.)
1	24.82	35.00	868.78	17.55
2	48.00	35.00	1680.00	33.94
3	48.00	35.00	1680.00	33.94
4	48.00	35.00	1680.00	33.94
5	48.00	35.00	1680.00	33.94
6	48.00	35.00	1680.00	33.94
7	48.00	35.00	1680.00	33.94
8	48.00	35.00	1680.00	33.94
9	48.00	35.00	1680.00	33.94
10	48.00	35.00	1680.00	33.94
11	48.00	35.00	1680.00	33.94
12	48.00	35.00	1680.00	33.94
13	48.00	35.00	1680.00	33.94
14	48.00	35.00	1680.00	33.94
15	48.00	35.00	1680.00	33.94
16	48.00	35.00	1680.00	33.94
17	48.00	35.00	1680.00	33.94
18	48.00	35.00	1680.00	33.94
19	48.00	35.00	1680.00	33.94
20	48.00	35.00	1680.00	33.94
<b>รวม</b>	<b>936.82</b>	<b>700</b>	<b>32788.78</b>	<b>662.33</b>

ตารางภาคผนวกที่ 12 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 3 ท่อขนาด 150 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง = $\sin 60^\circ$ (มม.)
1	35.48	35.00	1241.74	30.72
2	48.00	35.00	1680.00	41.57
3	48.00	35.00	1680.00	41.57
4	48.00	35.00	1680.00	41.57
5	48.00	35.00	1680.00	41.57
6	48.00	35.00	1680.00	41.57
7	48.00	35.00	1680.00	41.57
8	48.00	35.00	1680.00	41.57
9	48.00	35.00	1680.00	41.57
10	48.00	35.00	1680.00	41.57
11	48.00	35.00	1680.00	41.57
12	48.00	35.00	1680.00	41.57
13	48.00	35.00	1680.00	41.57
14	48.00	35.00	1680.00	41.57
15	48.00	35.00	1680.00	41.57
16	48.00	35.00	1680.00	41.57
17	48.00	35.00	1680.00	41.57
18	48.00	35.00	1680.00	41.57
19	48.00	35.00	1680.00	41.57
20	48.00	35.00	1680.00	41.57
21	48.00	35.00	1680.00	41.57
22	48.00	35.00	1680.00	41.57



ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง =sin 60°(มม.)
23	48.00	35.00	1680.00	41.57
24	48.00	35.00	1680.00	41.57
25	48.00	35.00	1680.00	41.57
26	48.00	35.00	1680.00	41.57
27	48.00	35.00	1680.00	41.57
28	48.00	35.00	1680.00	41.57
29	48.00	35.00	1680.00	41.57
30	48.00	35.00	1680.00	41.57
31	23.52	35.00	823.00	20.37
<b>รวม</b>	<b>1422.00</b>	<b>1050.00</b>	<b>49769.94</b>	<b>1256.56</b>

### กล้องถ่ายภาพ 3

ตารางภาคผนวกที่ 13 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูบบันทึก และค่าความลึกแนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 1 ที่ขนาด 100 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง =sin 45°(มม.)
1	18.49	38.30	708.167	13.07
2	48.70	38.30	1865.21	34.43
3	48.70	38.30	1865.21	34.43
4	48.70	38.30	1865.21	34.43
5	48.70	38.30	1865.21	34.43
6	48.70	38.30	1865.21	34.43
7	48.70	38.30	1865.21	34.43
8	48.70	38.30	1865.21	34.43
9	48.70	38.30	1865.21	34.43
10	48.70	38.30	1865.21	34.43
11	48.70	38.30	1865.21	34.43
12	48.70	38.30	1865.21	34.43
13	48.70	38.30	1865.21	34.43
14	48.70	38.30	1865.21	34.43
15	48.70	38.30	1865.21	34.43
16	48.70	38.30	1865.21	34.43
17	48.70	38.30	1865.21	34.43
18	48.70	38.30	1865.21	34.43
19	48.70	38.30	1865.21	34.43
20	24.67	38.30	944.86	17.4
<b>รวม</b>	<b>919.76</b>	<b>766.00</b>	<b>35226.80</b>	<b>650.27</b>

ตารางภาคผนวกที่ 14 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 1 ท่อขนาด 150 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง = $\sin 60^\circ$ (มม.)
1	46.87	38.30	1795.12	40.59
2	48.70	38.30	1865.21	42.17
3	48.70	38.30	1865.21	42.17
4	48.70	38.30	1865.21	42.17
5	48.70	38.30	1865.21	42.17
6	48.70	38.30	1865.21	42.17
7	48.70	38.30	1865.21	42.17
8	48.70	38.30	1865.21	42.17
9	48.70	38.30	1865.21	42.17
10	48.70	38.30	1865.21	42.17
11	48.70	38.30	1865.21	42.17
12	48.70	38.30	1865.21	42.17
13	48.70	38.30	1865.21	42.17
14	48.70	38.30	1865.21	42.17
15	48.70	38.30	1865.21	42.17
16	48.70	38.30	1865.21	42.17
17	48.70	38.30	1865.21	42.17
18	48.70	38.30	1865.21	42.17
19	48.70	38.30	1865.21	42.17
20	48.70	38.30	1865.21	42.17
21	48.70	38.30	1865.21	42.17
22	48.70	38.30	1865.21	42.17

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง =sin 60°(มม.)
23	48.70	38.30	1865.21	42.17
24	48.70	38.30	1865.21	42.17
25	48.70	38.30	1865.21	42.17
26	48.70	38.30	1865.21	42.17
27	48.70	38.30	1865.21	42.17
28	48.70	38.30	1865.21	42.17
29	48.70	38.30	1865.21	42.17
30	48.70	38.30	1865.21	42.17
31	10.81	38.30	414.02	9.36
<b>รวม</b>	<b>1469.98</b>	<b>1149.00</b>	<b>56300.23</b>	<b>1273.00</b>

ตารางภาคผนวกที่ 15 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 2 ท่อขนาด 100 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง = $\sin 45^\circ$ (มม.)
1	28.23	38.30	1081.21	19.96
2	48.70	38.30	1865.21	34.43
3	48.70	38.30	1865.21	34.43
4	48.70	38.30	1865.21	34.43
5	48.70	38.30	1865.21	34.43
6	48.70	38.30	1865.21	34.43
7	48.70	38.30	1865.21	34.43
8	48.70	38.30	1865.21	34.43
9	48.70	38.30	1865.21	34.43
10	48.70	38.30	1865.21	34.43
11	48.70	38.30	1865.21	34.43
12	48.70	38.30	1865.21	34.43
13	48.70	38.30	1865.21	34.43
14	48.70	38.30	1865.21	34.43
15	48.70	38.30	1865.21	34.43
16	48.70	38.30	1865.21	34.43
17	48.70	38.30	1865.21	34.43
18	48.70	38.30	1865.21	34.43
19	48.70	38.30	1865.21	34.43
20	39.84	38.30	1525.87	28.17
<b>รวม</b>	<b>944.67</b>	<b>766.00</b>	<b>36180.86</b>	<b>667.88</b>

ตารางภาคผนวกที่ 16 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 2 ท่อขนาด 150 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง = $\sin 60^\circ$ (มม.)
1	20.48	38.30	784.38	17.73568
2	48.70	38.30	1865.21	42.1742
3	48.70	38.30	1865.21	42.1742
4	48.70	38.30	1865.21	42.1742
5	48.70	38.30	1865.21	42.1742
6	48.70	38.30	1865.21	42.1742
7	48.70	38.30	1865.21	42.1742
8	48.70	38.30	1865.21	42.1742
9	48.70	38.30	1865.21	42.1742
10	48.70	38.30	1865.21	42.1742
11	48.70	38.30	1865.21	42.1742
12	48.70	38.30	1865.21	42.1742
13	48.70	38.30	1865.21	42.1742
14	48.70	38.30	1865.21	42.1742
15	48.70	38.30	1865.21	42.1742
16	48.70	38.30	1865.21	42.1742
17	48.70	38.30	1865.21	42.1742
18	48.70	38.30	1865.21	42.1742
19	48.70	38.30	1865.21	42.1742
20	48.70	38.30	1865.21	42.1742
21	48.70	38.30	1865.21	42.1742
22	48.70	38.30	1865.21	42.1742

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง =sin 60°(มม.)
23	48.70	38.30	1865.21	42.1742
24	48.70	38.30	1865.21	42.1742
25	48.70	38.30	1865.21	42.1742
26	48.70	38.30	1865.21	42.1742
27	48.70	38.30	1865.21	42.1742
28	48.70	38.30	1865.21	42.1742
29	48.70	38.30	1865.21	42.1742
30	48.70	38.30	1865.21	42.1742
31	10.01	38.30	383.38	8.66866
<b>รวม</b>	<b>1442.79</b>	<b>766.00</b>	<b>55258.86</b>	<b>1249.46</b>

ตารางภาคผนวกที่ 17 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 3 ท่อขนาด 100 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง= sin 60°(มม.)
1	19.78	38.30	757.57	13.98
2	48.70	38.30	1865.21	34.43
3	48.70	38.30	1865.21	34.43
4	48.70	38.30	1865.21	34.43
5	48.70	38.30	1865.21	34.43
6	48.70	38.30	1865.21	34.43
7	48.70	38.30	1865.21	34.43
8	48.70	38.30	1865.21	34.43
9	48.70	38.30	1865.21	34.43
10	48.70	38.30	1865.21	34.43
11	48.70	38.30	1865.21	34.43
12	48.70	38.30	1865.21	34.43
13	48.70	38.30	1865.21	34.43
14	48.70	38.30	1865.21	34.43
15	48.70	38.30	1865.21	34.43
16	48.70	38.30	1865.21	34.43
17	48.70	38.30	1865.21	34.43
18	48.70	38.30	1865.21	34.43
19	48.70	38.30	1865.21	34.43
20	44.51	38.30	1704.73	31.47
<b>รวม</b>	<b>940.89</b>	<b>766.00</b>	<b>36036.09</b>	<b>665.21</b>



ตารางภาคผนวกที่ 18 แสดงค่าความยาว ความกว้าง พื้นที่ของภาพที่ถูกบันทึก และค่าความลึก  
แนวตั้งของ แต่ละ window ของยางพาราต้นที่ 3 ท่อขนาด 150 เซนติเมตร

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง = $\sin 60^\circ$ (มม.)
1	21.08	38.30	807.36	18.25528
2	48.70	38.30	1865.21	42.17
3	48.70	38.30	1865.21	42.17
4	48.70	38.30	1865.21	42.17
5	48.70	38.30	1865.21	42.17
6	48.70	38.30	1865.21	42.17
7	48.70	38.30	1865.21	42.17
8	48.70	38.30	1865.21	42.17
9	48.70	38.30	1865.21	42.17
10	48.70	38.30	1865.21	42.17
11	48.70	38.30	1865.21	42.17
12	48.70	38.30	1865.21	42.17
13	48.70	38.30	1865.21	42.17
14	48.70	38.30	1865.21	42.17
15	48.70	38.30	1865.21	42.17
16	48.70	38.30	1865.21	42.17
17	48.70	38.30	1865.21	42.17
18	48.70	38.30	1865.21	42.17
19	48.70	38.30	1865.21	42.17
20	48.70	38.30	1865.21	42.17
21	48.70	38.30	1865.21	42.17
22	48.70	38.30	1865.21	42.17

ภาพที่ (window)	ความลึก (มม.)	กว้าง (มม.)	พื้นที่ (ตร.มม.)	ความลึกแนวตั้ง =sin 60°(มม.)
23	48.70	38.30	1865.21	42.17
24	48.70	38.30	1865.21	42.17
25	48.70	38.30	1865.21	42.17
26	48.70	38.30	1865.21	42.17
27	48.70	38.30	1865.21	42.17
28	48.70	38.30	1865.21	42.17
29	48.70	38.30	1865.21	42.17
30	48.70	38.30	1865.21	42.17
31	17.94	38.30	687.10	15.54
<b>รวม</b>	<b>1451.32</b>	<b>1149.00</b>	<b>55585.56</b>	<b>1256.84</b>

## เนื้อดิน

การวิเคราะห์เนื้อดิน ได้ทำการเก็บตัวอย่างดินด้วยเครื่องเก็บตัวอย่างดินแบบมีอ  
 หมุน ที่ระดับความลึก 0 - 10, 10 - 20, 20 - 30, 30 - 40, 50 - 60, 70 - 80, 90 - 100, 110 - 120  
 และ 130 - 140 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์เนื้อดิน พบว่าเนื้อดินทุกระดับความลึกมากกว่า 75  
 เปอร์เซ็นต์ เป็นดินร่วนปนทราย

ตารางภาคผนวกที่ 19 ผลจากการวิเคราะห์เนื้อดินของสภาพพื้นที่ทำการทดลอง

ความลึก (ซม.)	% ดินเหนียว	% ดินร่วน	% ดินทราย	เนื้อดิน
0-10	12.00	11.64	76.35	ดินร่วนปนทราย
10-20	12.49	8.90	78.61	ดินร่วนปนทราย
20-30	13.66	7.68	78.66	ดินร่วนปนทราย
30-40	13.78	6.87	79.36	ดินร่วนปนทราย
50-60	13.43	7.63	78.93	ดินร่วนปนทราย
70-80	12.85	7.78	79.37	ดินร่วนปนทราย
90-100	14.21	3.65	82.14	ดินร่วนปนทราย
110-120	14.20	7.51	78.29	ดินร่วนปนทราย
130-140	13.76	5.11	81.13	ดินร่วนปนทราย

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายสยมพล ณะวงษ์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610620029

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีสำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เทคโนโลยีการเกษตร)	มหาวิทยาลัยทักษิณ	2555

ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

สยมพล ณะวงษ์ เจษฎา ไสภรัตน์ และสายันห์ สดุดี. 2559. การเจริญเติบโตและพัฒนารูปร่างใหม่ของรากยางพาราหลังการฝังท่อมินิไรโซทรอน. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณปีที่ 19 ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน 2559) (ได้รับการตอบรับตีพิมพ์ อยู่ระหว่างรอตีพิมพ์)