



การประเมินพลวัตการเจริญเติบโตของรากยางพาราโดยเทคนิคมินิไรโซตรอน
The Assessment of Dynamics Root Growth in Rubber by
a Minirhizotron Technique

ศักดิ์อนันต์ แซ่ลิม
Sakanan Saelim

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาพืชศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การประเมินพลวัตการเจริญเติบโตของรากยางพาราโดยเทคนิคมินิไรโซตรอน
The Assessment of Dynamics Root Growth in Rubber by
a Minirhizotron Technique

ศักดิ์อนันต์ แซ่ลิ้ม
Sakanan Saelim

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาพืชศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประเมินผลวัตการเจริญเติบโตของรากยางพาราโดยเทคนิคมิโนไรโซตรอน
 ผู้เขียน นายศักดิ์อนันต์ แซ่ลิ่ม
 สาขาวิชา พืชศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ระวี เจียรวิภา)ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร. สมพร ณ นคร)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมกรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ระวี เจียรวิภา)
..... (รองศาสตราจารย์ ดร. สายัณห์ สดุดี)กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร. สายัณห์ สดุดี)
กรรมการ (ดร. สุรชาติ เพชรแก้ว)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาพืชศาสตร์

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร. ดำรงค์ดี ฟ้ารุ่งแสง)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ระวี เจียรวิภา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. สายัณห์ สดุดี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นายศักดิ์อนันต์ แซ่ลิ้ม)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายศักดิ์อนันต์ แซ่ลิ้ม)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประเมินผลวัตการเจริญเติบโตของรากยางพาราโดยเทคนิคมินิไรโซทรอน
ผู้เขียน นายศักดิ์อนันต์ แซ่ลิ้ม
สาขาวิชา พืชศาสตร์
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

สภาวะเครียดน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาวะเครียดน้ำที่เกิดจากการขาดน้ำ และน้ำท่วมขัง ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษากการตอบสนองทางสรีรวิทยาและศึกษาผลวัตของรากยางพาราโดยใช้เทคนิคมินิไรโซทรอน โดยแบ่งเป็น 3 การทดลอง คือ 1) ทดสอบสภาวะขาดน้ำกับยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุ 1 ปี ปลุกในกล่องศึกษาราก rhizobox ทำการปลูกทดสอบภายในเรือนกระจกเพื่อเปรียบเทียบการให้น้ำ 3 ระดับวางแผนการทดลองแบบ CRD ประกอบด้วยการให้น้ำทุกวัน การให้น้ำทุก 4 วันเว้น 4 วันและการให้น้ำทุก 8 วันเว้น 8 วัน เป็นระยะเวลา 32 วัน ผลการศึกษาพบว่า ค่าการชักนำปากใบและศักย์ของน้ำในใบของต้นยางที่ให้น้ำทุก 8 วันลดลงต่ำสุด มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับ การให้น้ำทุก 4 วัน และการให้น้ำปกติ ส่วนความยาวรากที่ระดับความลึก 0 - 40 เซนติเมตร มีค่าลดลงแต่ที่ระดับความลึก 40 - 100 เซนติเมตร มีการเจริญเติบโตสม่ำเสมอจนสิ้นสุดการทดลอง ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการประเมินความยาวรากโดยเทคนิคมินิไรโซทรอนและการนับจุดตัดรากพบความสัมพันธ์ระดับต่ำกับต้นยางที่ให้น้ำทุก 4 และ 8 วัน การทดลองที่ 2) ศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาและการเปลี่ยนแปลงผลวัตของรากยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 อายุ 8 เดือน ปลูกทดสอบในสภาพโรงเรือน วางแผนการทดลอง แบบ factorial design in CRD โดยการให้น้ำแก่ต้นยางพารา 3 ระดับ คือ ให้ให้น้ำทุกวัน ให้น้ำช่วงระดับผิวดิน และให้น้ำช่วงท่วมเหนือผิวดิน 10 เซนติเมตร เป็นระยะเวลา 42 วัน ผลการศึกษาพบว่า การชักนำปากใบ และค่าศักย์ของน้ำในใบของต้นยางพาราทั้งสองพันธุ์ที่ได้รับน้ำท่วมขังมีค่าลดลงในระยะที่ให้น้ำขัง โดยที่ยางพาราพันธุ์ RRIM 600 มีแนวโน้มลดลงน้อยกว่าพันธุ์ RRIT 251 และหลังการปล่อยน้ำขังพบการฟื้นตัวคือ อัตราการชักนำปากใบ และศักย์ของน้ำในใบปรับเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่า ยางพาราพันธุ์ RRIM 600 มีความสูงต้นมากกว่าพันธุ์ RRIT 251 ความยาวรากมีชีวิตพบสูงสุดในต้นยางพาราที่ให้น้ำทุกวันและไม่พบรากตาย ขณะที่ต้นยางที่ให้น้ำช่วงระดับผิวดิน และท่วมเหนือผิวดินพบว่าความยาวรากมีชีวิตลดลงตลอดระยะความลึกของดิน (0-50 เซนติเมตร) การให้น้ำช่วงระดับผิวดินพบการสร้างราก adventitious root บริเวณเปลือกยางโคนต้นพบลักษณะ lenticels และสีของรากเปลี่ยนเป็นสีดำล้าพบที่ระดับความลึก 30-50 เซนติเมตร ในยางพาราทั้งสองพันธุ์ที่ให้น้ำช่วงผิวดิน และท่วมเหนือผิวดิน และการทดลองที่ 3) ประเมินผลวัตของรากยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในสภาพสวนยางพาราอายุ 16 ปี เพื่อศึกษา

การเปลี่ยนแปลงด้านพลวัตของรากยางพาราใช้เทคนิคมินิไรโซทรอนที่ระดับความลึก 0-60 เซนติเมตร ผลการศึกษาพบว่า ช่วงฤดูแล้ง (กุมภาพันธ์-เมษายน 2557) ความยาวรากเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ระยะแรกของช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม 2557) ค่าความยาวรากสูงสุดพบเดือนตุลาคม 2557 ที่ระดับความลึก 10 - 20 เซนติเมตร อัตราความยาวรากเพิ่มขึ้นสูงสุดพบในเดือนกันยายน 2557 (0.01 มม./ตร.มม./เดือน) ความยาวรากตายพบสองระยะในช่วงฤดูฝนเดือนสิงหาคม 2557 และ ธันวาคม 2557 โดยความยาวรากตายลดลงอีกครั้งเมื่อเข้าสู่ช่วงแล้งระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ - เมษายน 2558 การเปลี่ยนแปลงพลวัตของรากตลอดการศึกษาพบสูงสุดที่ระดับความลึก 20 - 30 เซนติเมตร โดยพัฒนาการทรงพุ่มที่ประเมินด้วยค่าดัชนีพื้นที่กับอัตราการเพิ่มขึ้นของความยาวรากในช่วงผลัดใบพบว่าความยาวรากยางเพิ่มขึ้นภายหลังจากค่าดัชนีพื้นที่ใบเพิ่มขึ้นสูงสุดเป็นระยะเวลาประมาณ 30 วัน ปริมาณผลผลิตยางพาราต้านน้ำหนักยางแห้ง (กรัม/ต้น/ครั้งกรีด) มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคือมีค่าเพิ่มขึ้นในระยะก่อนยางพาราผลัดใบ และลดลงในระยะที่ยางพาราแตกใบใหม่ นอกจากนี้ปัจจัยของปริมาณน้ำฝนและความชื้นดินมีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของรากยางพาราในรอบปีที่ระดับความลึก 40 - 60 เซนติเมตร ($P \leq 0.01$) แสดงให้เห็นว่าต้นยางพาราสามารถปรับตัวต่อสภาวะเครียดน้ำที่ระดับแตกต่างกัน และการศึกษาพลวัตรากพืชด้วยเทคนิคมินิไรโซทรอนสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของรากยางพาราได้อย่างต่อเนื่องทั้งในสภาพการทดลองในโรงเรือนและสภาพแปลงปลูก

Thesis Title The Assessment of Dynamics Root Growth in Rubber by a Minirhizotron Technique
Author Mr. Sakanan Saelim
Major Program Plant Science
Academic Year 2017

Abstract

Water stress is the major constraint factor affecting on agricultural production especially water deficit and waterlogging conditions. This study aims to evaluate the physiological responses and fine root dynamics of rubber tree under water stress condition by using a minirhizotron technique. The study was conducted in 3 experiments. 1) Water deficit experiment, the study was carried out under glasshouse with CRD statistical design using RRIM 600 clone (1-year old) grown in rhizoboxs (1 plant/rhizobox). Plant materials were subjected with 3 regimes of watering: 1) control treatment (daily watering) 2) withholding water with 4-day interval (WH) and rewatering (RW) 3) withholding water with 8-day interval (WH) and rewatering (RW) under 3 replications during 32 days of the experimental period. Results showed that stomatal conductance and leaf water potential of rubber trees under the WH (8-day interval) and RW were significantly different lower than the WH and RW every 4-day interval and the daily watering treatment. Fine root length density in WH (8-day interval) and RW decreased at 0-40 cm depth while the remaining fine root growth was found at 40 - 100 cm soil depth. Linear regression of minirhizotron technique and gridline method was found low relationship among the treatments. Experiment 2, waterlogging experiment was examined on RRIM 600 and RRIT 251 clone, 8-month seedlings were grown in the plastic tank (5.3 cubic foot). The experiment was arranged as factorial design in CRD with 3 replications. Planting materials were subjected to 3 levels of waterlogging as waterings, surface waterlogging (SW) and partial waterlogging (PW) (10 cm above soil surface) compare with control (daily watering) for 42 days of experimental period. Results showed that stomatal conductance and leaf water potential of SW and PW treatment decreased during waterlogging in both of RRIM 600 and RRIT 251 clones. After water draining, RRIM 600 clone exhibited shoot emergence,

leading to higher recovery than RRIT 251. Fine root length density of live root decreased along 0-50 cm depth during waterlogging. The morphological adaptation was found in SW and PW by the development of lenticels, adventitious roots, aerenchyma and lenticels formation. Experiment 3, fine root dynamics was monitored with minirhizotron technique under field condition using clone RRIM 600 (16-year-old) in Songkhla province. Fine root dynamics was observed at 0-60 cm soil depth with minirhizotron technique. Transparent acrylic tubes were installed with 3 sampling trees during January 2014 - May 2015. Results showed that during the first dry season (February - April 2014), fine root length density was gradually increased until maximum fine root production occurrence during rainy season (October 2014) at 10-20 cm soil depth. The rate of maximum fine root production was $0.01 \text{ mm mm}^{-2} \text{ month}^{-1}$ in September 2014 and fine root mortality occurred 2 phases in August 2014 and December 2014. In 2015, at the earlier of dry season during (February-April) fine root production decreased again and tended to increase at the start of rainy season in May 2015. Fine root distribution estimated in year-round (February 2014- January 2015) was found highest at 20-30 cm depth. The increasing of fine root dynamics occurred after the full canopy development stage for 30 days. Dry rubber weight (g/t/t) increased to the peak period at late January 2014 continued to earlier February 2014, similarly found in January-February 2015 before leaf falling. Then, it decreased after leaf flushing. Rainfall and soil moisture were correlated with fine root dynamics at 40-60 cm depth ($P \leq 0.01$). It was concluded that rubber tree adaptation under different water stress levels by using the minirhizotron technique was suitable to monitor fine root dynamics both in glasshouse and field condition

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนร่วมในการศึกษาระดับปริญญาโทผู้บัณฑิตจนสำเร็จจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ระวี เจียรวิภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.สายัณห์ สดุดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำวางแผนการดำเนินการวิจัย การแก้ไขปัญหางานทดลอง ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สมพร ณ นคร ประธานกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ดร.สุรชาติ เพชรแก้ว กรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ คุณสัตยา บุญรัตน์ชู หัวหน้าวิศวกรซ่อมบำรุงประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ที่ช่วยเหลือปรับปรุงอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ทำการทดลอง ขอขอบคุณ ผศ.ดร. อุปลักษณ์ มีสวัสดิ์ ที่ให้คำแนะนำการเตรียมตัวอย่างเนื้อเยื่อพืช และขอขอบคุณ คุณพรสวรรค์ สุทธิพันธ์ สำหรับการช่วยเหลือแนะนำการใช้เครื่องมือเตรียมเนื้อเยื่อพืช ขอขอบคุณ ดร. เกษภา โสภารัตน์ ดร. ศุภครุษา อภิรัตติกร์ คุณนิราณี ปือราเฮง คุณสุณิรัตน์ วัฒนาศิลากร คุณธงชัย ไทรน้อย Mr. Ari Santosa Pamungkas คุณสมมูล ณะวงษ์ คุณกรกช เรืองศรี คุณปิยวิษณุ สวัสดิ์วงศ์ คุณวรรณทการณ สติยกุล คุณภรรณิกา แทนแสง คุณจิตรา จันโสด คุณวิลาพรรณ ทองตะโก คุณวรัญญา ขวดหริม คุณอนุธิดา ชูแก้ว คุณพรเทพ ธีระวัฒนพงศ์ คุณพงศกร สุธิกาญจนไทย์ คุณณัฐวิทย์ ญาณพิสิษฐกุล และบุคคลที่ไม่ได้เอ่ยนาม ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยการทำงานวิจัย การเก็บตัวอย่างสิ่งทดลอง การออกพื้นที่

ขอขอบคุณบุคลากรประจำแปลงปฏิบัติการภาควิชาพืชศาสตร์ คุณสุภาณี ชนะวีรวรรณ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่ทดลอง ขอขอบคุณ คุณปฐมพงศ์ วงเลี้ยง หัวหน้าเรือนปฏิบัติการเรือนกระจก คณะทรัพยากรธรรมชาติ ที่อำนวยความสะดวกด้านสถานที่สำหรับการทดลอง ขอขอบคุณ คุณถนอม ธรรมโชติตั้ง เจ้าของแปลงยางพาราที่ใช้ในการทดลองภาคสนาม และอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลเพื่อการวิจัย

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนเพื่อการทำวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ อำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่ และขอขอพระคุณคุณพ่ออัยว์ และคุณแม่ว่าไลพร รวมทั้งพี่น้องในครอบครัวที่สนับสนุนและช่วยเหลือจนสำเร็จการศึกษา

ศักดิ์อนันต์ แซ่ลิ่ม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(7)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญภาพ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	2
วัตถุประสงค์	28
บทที่ 2 วัสดุ อุปกรณ์ วิธีการทดลอง	29
บทที่ 3 ผล	
การทดลองที่ 1	41
การทดลองที่ 2	62
การทดลองที่ 3	100
บทที่ 4 วิจารณ์	117
บทที่ 5 สรุป	123
เอกสารอ้างอิง	124
ประวัติผู้เขียน	140

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณน้ำฝน ค่าการคายระเหยน้ำ (ET _o) ความชื้นดิน น้ำหนักยางแห้ง เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง และค่าดัชนีพื้นที่ใบ เปรียบเทียบกับรากยางพาราที่ระดับความลึกทุก ๆ 10 เซนติเมตร (0-60 เซนติเมตร) ระหว่างเดือนมกราคม-ธันวาคม 2557	116

สารบัญญภาพ (1)

ภาพที่		หน้า
1	แผนผังกลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชที่ชักนำโดยสภาวะเครียดน้ำ	11
2	การศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของรากยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่จังหวัดสงขลาโดยวิธีการเปิดหน้าดินลึก 0-4 m (a) และการศึกษาที่จังหวัดบุรีรัมย์โดยเทคนิคสแกนภาพรากยางพาราที่ระดับความลึก 0-4 m (b)	24
3	ตัวอย่างการศึกษารากพืชโดยติดตั้งท่อมินิไรโซทรอนที่ทำมุมในแนวนอนแนวตั้งฉาก และมุม 45 องศากับพื้นดิน (a) ส่วนประกอบของอุปกรณ์มินิไรโซทรอนที่ใช้บันทึกภาพรากพืช ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและบันทึกข้อมูลภาพ กล้องถ่ายภาพรากและอุปกรณ์ควบคุมไฟส่องสว่าง (b)	25
4	ความแปรผันระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการบันทึกภาพถ่ายรากกับข้อมูลรากที่บันทึกได้	27
5	กล่องศึกษารากยางพารา (Rhizobox) ประกอบจากท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว ผ่าครึ่งประกบด้วยแผ่นอะคริลิกใสขนาด กว้าง 60 cm. สูง 120 cm.หนา 0.5 cm โดยภายในกล่อง rhizobox ใส่ท่อมินิไรโซทรอนที่ผลิตจากท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 cm. ยาว 120 cm หนา 3 mm. เพื่อใช้บันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงของรากต้นกล้ายางพารา และท่อวัดความชื้น soil profile probe	32
6	การนับจำนวนรากที่ตัดกับเส้นจุดตัดขนาด 1x1 cm. โดยใช้ตารางนับจุดตัดราก (gridline) (a) และตัวอย่างการนับจำนวนรากกับแนวเส้นตาราง (b)	33
7	การเตรียมต้นยางพาราก่อนเริ่มการทดลอง โดยปลูกในถังพลาสติก ใช้หน้าดินเป็นวัสดุปลูกทดลองบริเวณเรือนกระจก คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	35
8	ภาพจำลองการให้น้ำทั้ง 3 ระดับการทดลอง T1 ทริตเมนต์ให้น้ำปกติ T2 ทริตเมนต์ให้น้ำท่วมขังผิวดิน และ T3 ทริตเมนต์ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน	36
9	แผนผังต้นยางพารา ตำแหน่งที่ติดตั้งท่อมินิไรโซทรอน และท่อวัดความชื้นดิน (a) การติดตั้งท่อมินิไรโซทรอนทำมุม 45 องศากับแนวระดับบริเวณโคนต้นยางพารา (b)	39
10	ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่บันทึกตลอดการทดลองโดยเครื่องบันทึกอุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแบบอัตโนมัติ	41

สารบัญญภาพ (2)

ภาพที่		หน้า
11	ค่าความเขียวของใบยางพาราตลอดการทดลองวัดค่าโดยเครื่องคลอโรฟิลล์มิเตอร์ SPAD-502	42
12	การตอบสนองของค่าการชักนำปากใบยางพาราที่ระดับการให้น้ำยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3) ในรอบวัน เวลา 08.00 น. 10.00 น. และ 12.00 น.	44
13	กราฟ box plot การตอบสนองของค่าการชักนำปากใบยางพาราที่ระดับการให้น้ำที่แตกต่างกันในรอบวันที่เวลา 08.00น. 10.00น. และ 12.00น	45
14	การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ของน้ำในใบยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (a) ให้น้ำทุก 4 วัน (b) และให้น้ำทุก 8 วัน (c) ตลอดการทดลอง	46
15	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าศักย์ของน้ำในใบยางพารา ยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3) ช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (Predawn) (a) และช่วงเที่ยงวัน (Midday) (b)	47
16	กราฟ box plot แสดงค่าเฉลี่ยของค่าศักย์ของน้ำในใบยางพาราที่ระดับการให้น้ำยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3)	48
17	การเปลี่ยนแปลงความชื้นดินของยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (a) ให้น้ำทุก 4 วัน (b) และให้น้ำทุก 8 วัน (c) ตลอดการทดลอง	49
18	ค่าเฉลี่ยความยาวรากยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (a) ให้น้ำทุก 4 วัน (b) และให้น้ำทุก 8 วัน (c) ที่ระดับความลึก 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm โดยใช้กล้องมินิโรโทรตอน	51
19	กราฟ box plot แสดงค่าเฉลี่ยความยาวรากยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3) ที่ระดับความลึกที่ระดับความลึก 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm	52
20	ค่าเฉลี่ยความยาวรากมีชีวิตรที่ประเมินโดยวิธีการนับจุดตัดรากยางพาราที่ยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3) ตลอดการทดลอง	54
21	กราฟ box plot ความยาวรากมีชีวิตรที่ระดับความลึก 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm เปรียบเทียบระหว่างทริตเมนต์ให้น้ำทุกวัน (T1) ทริตเมนต์ให้น้ำทุก 4 วัน และทริตเมนต์ให้น้ำทุก 8 วัน	55

สารบัญญภาพ (3)

ภาพที่		หน้า
22	ค่าเฉลี่ยความยาวรากตายที่ประเมินโดยวิธีการนับจุดตัดรากยาวพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (a) ให้น้ำทุก 4 วัน (b) และให้น้ำทุก 8 วัน (c) ตลอดการทดลอง	57
23	กราฟ box plot ความยาวรากตายที่ประเมินด้วยวิธีการนับจุดตัดราก ที่ระดับความลึก 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm เปรียบเทียบระหว่างทรีตเมนต์ให้น้ำทุกวัน (T1) ทรีตเมนต์ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และทรีตเมนต์ให้น้ำทุก 8 วัน (T3)	58
24	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความยาวรากที่ระดับความลึก 0-100 cm ประเมินโดยใช้การนับจุดตัดราก (Gridline) และการใช้เทคนิคมิโรโซตรอน เปรียบเทียบระหว่างทรีตเมนต์ให้น้ำทุกวัน (a) ทรีตเมนต์ให้น้ำทุก 4 วัน (b) และทรีตเมนต์ให้น้ำทุก 8 วัน (c)	59
25	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของรากและยอดต้นยางพาราทั้งยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3) ที่ภายหลังสิ้นสุดการทดลอง	60
26	ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3) ภายหลังสิ้นสุดการทดลอง	61
27	ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ($^{\circ}\text{C}$) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) เฉลี่ยรายวัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง บันทึกโดยเครื่องตรวจวัดอุณหภูมิอากาศ และความชื้นอัตโนมัติ	62
28	การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในยางพาราที่ให้น้ำปกติ (a) ยางพาราที่ให้น้ำขังผิวดิน (b) และยางพาราที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (c) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขัง และระยะปล่อยน้ำขัง	64
29	การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ในยางพาราที่ให้น้ำปกติ (a) ยางพาราที่ให้น้ำขังผิวดิน (b) และยางพาราที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (c) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขัง และระยะปล่อยน้ำขัง	65
30	ค่าความเขียวของใบต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 เปรียบเทียบระหว่าง ทรีตเมนต์ควบคุม (M1,T1) ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดิน (M2, T2) และทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (M3,T3) ตลอดระยะเวลาการทดลองให้น้ำขัง และภายหลังจากการปล่อยน้ำขัง	67

สารบัญภาพ (4)

ภาพที่		หน้า
31	การตอบสนองของค่าศักย์ของน้ำในใบของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 เปรียบเทียบระหว่างทรีตเมนต์ควบคุม (M1,T1) ทรีตเมนต์ให้น้ำขังระดับผิวดิน (M2,T2) และทรีตเมนต์ให้น้ำขังเหนือผิวดิน (M3,T3) ในระยะทดลองให้น้ำท่วมขัง และภายหลังการปล่อยน้ำขัง	68
32	กราฟ box plot การตอบสนองของค่าศักย์ของน้ำในใบยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำปกติ (M1,T1) ทรีตเมนต์ให้น้ำขังผิวดิน (M2,T2) และทรีตเมนต์ให้น้ำขังเหนือผิวดิน (M3,T3) เปรียบเทียบระหว่างระยะให้น้ำท่วมขัง และระยะฟื้นตัว	70
33	การเปลี่ยนแปลงของค่าการซึมน้ำปากใบของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ให้น้ำปกติ (M1) ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดิน (M2) และให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (M3) เปรียบเทียบที่ระยะเวลาให้น้ำท่วมขัง และระยะปล่อยน้ำขัง	72
34	การเปลี่ยนแปลงของค่าการซึมน้ำปากใบของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่ให้น้ำปกติ (T1) ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดิน (T2) และให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (T3) เปรียบเทียบที่ระยะเวลาให้น้ำท่วมขัง และระยะปล่อยน้ำขัง	73
35	กราฟ box plot เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าการซึมน้ำปากใบของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ทรีตเมนต์ให้น้ำปกติ (M1,T1) ทรีตเมนต์ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดิน (M2,T2) และทรีตเมนต์ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (M3,T3) ในระยะให้น้ำท่วมขัง และระยะฟื้นตัว	75
36	ความยาวรากมีชีวิตที่ระดับความลึก 0-10 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว	77
37	ความยาวรากมีชีวิตที่ระดับความลึก 10-20 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว	78
38	ความยาวรากมีชีวิตที่ระดับความลึก 20-30 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว	79
39	ความยาวรากมีชีวิตที่ระดับความลึก 30-40 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว	80
40	ความยาวรากมีชีวิตที่ระดับความลึก 40-50 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว	81

สารบัญภาพ (5)

ภาพที่		หน้า
41	กราฟ box plot แสดงความยาวรากมีชีวิตรที่ระดับความลึก 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 และ 40-50 เซนติเมตร เปรียบเทียบระหว่างยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ที่มีการให้น้ำปกติ (a) ทรีตเมนต์ให้น้ำขังระดับผิวดิน (b) และทรีตเมนต์ให้น้ำขังเหนือผิวดิน (c)	83
42	ความยาวรากตายที่ระดับความลึก 0-10 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว	84
43	ความยาวรากตายที่ระดับความลึก 10-20 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว	85
44	ความยาวรากตายที่ระดับความลึก 20-30 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว	86
45	ความยาวรากตายที่ระดับความลึก 20-30 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว	87
46	ความยาวรากตายที่ระดับความลึก 20-30 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว	88
47	กราฟ box plot แสดงความยาวรากตายที่ระดับความลึก 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 และ 40-50 เซนติเมตร เปรียบเทียบระหว่างยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ที่มีการให้น้ำขังระดับผิวดิน (a) และทรีตเมนต์ให้น้ำขังเหนือผิวดิน (b)	90
48	น้ำหนักแห้งของยอดและรากของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ที่ระดับน้ำท่วมขังแตกต่างกัน	91
49	เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งรวมของรากและยอดระหว่างต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ภายหลังสิ้นสุดการทดลอง	92
50	น้ำหนักแห้งของ ใบ ลำต้น ราก และต้นตอ ของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ภายหลังสิ้นสุดการทดลอง	93
51	การเจริญเติบโตด้านความสูงของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ในระยะก่อนให้น้ำท่วมขัง (before waterlogged) และภายหลังให้น้ำท่วมขัง (end of waterlogged)	94

สารบัญญภาพ (6)

ภาพที่		หน้า
52	ลักษณะการเจริญเจริญเติบโตส่วนของยอดและรากของต้นยางพาราพันธุ์ RRIT 251 (a) และต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (b) ที่ระดับน้ำท่วมขังแตกต่างกัน ภายหลังจากสิ้นสุดการทดลอง	95
53	ลักษณะของรากต้นยางพาราเปรียบเทียบกับระหว่างทรีตเมนต์ควบคุม (a) และทรีตเมนต์ที่ได้รับน้ำท่วมขังระดับผิวดิน และท่วมขังเหนือผิวดิน (b) และแสดงความแตกต่างสีของราก ความหนาแน่น และการแตกแขนงของรากที่แตกต่างกันระหว่างทรีตเมนต์ควบคุม และทรีตเมนต์ให้น้ำท่วมขัง (c)	97
54	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของลำต้นต้นยางพาราของทรีตเมนต์ควบคุม (a) ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดิน (b) และทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (c) ภายหลังจากสิ้นสุดการทดลอง	98
55	ลักษณะตัวอย่างเนื้อเยื่อรากยางพาราที่ปรากฏหลังจากสิ้นสุดการทดลอง รากยางพารา ทรีตเมนต์ควบคุม(a,b) และรากยางพาราที่ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดิน และเหนือผิวดิน (c,d)	99
56	ข้อมูลสภาพอากาศประกอบด้วย ปริมาณน้ำฝน ค่าการคายระเหยน้ำ อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิต่ำสุดที่บ้านทีกตลอดการทดลอง (มกราคม 2557-พฤษภาคม 2558)	100
57	กราฟ box plot เปอร์เซ็นต์ความขึ้นดินที่เปลี่ยนแปลงตลอดการทดลองบ้านทีกที่ระดับความลึก 10, 20, 30, 40, 60 และ 100 เซนติเมตร	101
58	เปอร์เซ็นต์ความขึ้นดินตลอดการทดลองวัดที่ระดับความลึก 10 20 30 40 60 และ 100 cm (เดือนกุมภาพันธ์ – เมษายน 2557 และ กุมภาพันธ์ – เมษายน 2558 เป็นช่วงฤดูแล้ง และระหว่างเดือนพฤษภาคม 2557 – มกราคม 2558 กำหนดเป็นฤดูฝน ตามเกณฑ์ของกรมอุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก)	102
59	การเปลี่ยนแปลงของรากมีชีวิตที่ระดับความลึกทุก ๆ 10 cm (0-60 cm) ตลอดการศึกษาตั้งแต่เดือน มกราคม 2557-พฤษภาคม 2558	103
60	การเปลี่ยนแปลงของรากตายที่ระดับความลึกทุก ๆ 10 cm (0-60 cm) ตลอดการศึกษาตั้งแต่เดือนมกราคม 2557-พฤษภาคม 2558	104
61	กราฟ box plot ของความยาวรากมีชีวิตและรากตาย ศึกษาที่ระดับความลึก 0-60 cm ตลอดการศึกษา (มกราคม 2557 – พฤษภาคม 2558)	105

สารบัญภาพ (7)

ภาพที่		หน้า
62	กราฟ box plot รากยางพาราที่ระดับความลึก 0 - 60 cm เปรียบเทียบระหว่างฤดูแล้งปี 2557 (กุมภาพันธ์ - เมษายน 2557) และ ปี 2558 (กุมภาพันธ์ - เมษายน 2558)	106
63	กราฟ box plot ความยาวรากที่ระดับความลึก 0 - 60 cm ช่วงฤดูฝนระหว่างเดือน พฤษภาคม 2557 - มกราคม 2558	106
64	การเปลี่ยนแปลงของอัตราการความยาวรากเฉลี่ยรายเดือนที่ระดับความลึกทุก 10 cm (0 - 60 cm) ตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์ 2557 - พฤษภาคม 2558	107
65	การเปลี่ยนแปลงของอัตราการตายของรากยางพาราเฉลี่ยรายเดือนที่ระดับความลึกทุก ๆ 10 cm (0 - 60 cm) ตลอดการศึกษาตั้งแต่เดือนมกราคม 2557 - พฤษภาคม 2558	108
66	ค่าเฉลี่ยความยาวรากมีชีวิต (a) และรากตาย (b) ที่ระดับความลึก 0 - 60 cm ตลอดระยะเวลาการศึกษาระหว่างเดือนมกราคม 2557 - พฤษภาคม 2558	107
67	การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักยางแห้ง (g/t/t) และเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (%DRC) มกราคม 2557 - พฤษภาคม 2558	110
68	ตัวอย่างภาพถ่ายพัฒนาการรากยางพาราที่ระดับความลึก 10 - 20 และ 20 - 30 cm แสดงเดือนเมษายน 2557 (a) กรกฎาคม 2557 (b) ตุลาคม 2557 (c) มกราคม 2558 (d) และ เมษายน (e) บันทึกภาพโดยใช้กล้องมินิไรโซทรอน	111
69	การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และความยาวรากรวม (0-60 cm) ตลอดการศึกษา (มกราคม 2557-พฤษภาคม 2558)	113
70	กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้น ระหว่างความยาวรากและความชื้นดิน ที่ระดับความลึก 0-10cm (a), 10-20 cm (b) 20-30 cm (c) 30-40 cm (d) 40-50 cm (e) และ 50-60 cm (f) ตลอดการศึกษา (มกราคม 2557-พฤษภาคม 2558)	114

บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการผลิตพืช สถานการณ์ในปัจจุบันความรุนแรงและผลกระทบอาจมีแนวโน้มความถี่เกิดสูงขึ้น ในทางการเกษตรผลกระทบที่เกิดขึ้นกับพืชปลูกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เช่น ความแปรปรวนของอุณหภูมิอากาศ จำนวนวันฝนตกหรือปริมาณน้ำฝนที่มีมากเกินไปจนเกิดน้ำท่วมเป็นปัจจัยสำคัญต่อการผลิตพืช (IPCC, 2013) สำหรับประเทศไทยอย่างพารามีการขยายพื้นที่ปลูกอย่างรวดเร็วจากภาคใต้ไปสู่พื้นที่ทางภาคเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกยางใหม่ แต่ปัจจัยของสภาพแวดล้อมและปริมาณน้ำฝนได้ส่งผลกระทบต่อการผลิตยางดิบทั้งทางลำต้นและปริมาณของผลผลิตและด้วยยางพาราเป็นพืชที่ต้องการปริมาณน้ำฝนสูงและอากาศร้อนชื้น ทำให้มีผลต่อการเปิดกรีดและอายุเปิดกรีดซึ่งสามารถกรีดได้ในปีที่ 7 หลังจากปลูกต้องมีการชะลอการเปิดกรีด เพื่อให้ต้นยางมีความสมบูรณ์และมีขนาดเหมาะสมเพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดอาการแห้งและขนาดลำต้นไม่ได้มาตรฐาน (Rao *et al.*, 1993) จากเหตุผลดังกล่าวปัจจัยที่เป็นตัวจำกัด คือ ปริมาณน้ำที่พืชต้องการไม่เพียงพอต่อการใช้กระบวนการเจริญเติบโต ซึ่งพื้นที่ภาคเหนือและภาคอีสานของประเทศไทยเกิดภาวะแห้งแล้งขึ้นทุกปี งานวิจัยด้านพืชศาสตร์ที่ผ่านมาเกี่ยวกับหน้าที่และความสำคัญของส่วนประกอบต่างๆ ของพืชมุ่งเน้นศึกษาแต่ส่วนของพืชที่อยู่เหนือพื้นดินที่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนเป็นหลัก แต่ข้อมูลการเจริญเติบโตของพืชที่อยู่ใต้ดิน คือ ระบบรากพืช มีข้อมูลการรายงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจาก รากพืชเป็นส่วนที่ซ่อนอยู่ใต้ดินที่เรียกว่า “Hidden half” (Böhm, 1979) ในขณะที่มีรายงานว่ารากพืชเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งต่อสรีรวิทยาการเจริญเติบโตและการพัฒนาส่วนของลำต้นเหนือพืชดินทั้งการออกดอก ปริมาณผลผลิต รวมถึงคุณภาพของผลผลิตด้วย นอกจากนี้ การศึกษาเกี่ยวกับรากพืชมีการปฏิบัติงานที่ค่อนข้างลำบากต้องใช้แรงงานมาก และต้องมีอุปกรณ์จำเพาะ รวมถึงต้องใช้ระยะเวลาในการศึกษาอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบรากพืชมีน้อย โดยเฉพาะพื้นที่ภาคใต้ประเทศไทยซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกพืชเศรษฐกิจหลัก คือ ยางพาราและปาล์มน้ำมัน แต่ในปัจจุบันประสบปัญหาความแปรปรวนของภูมิอากาศที่มีผลต่อปริมาณและคุณภาพผลผลิต เช่น การเปลี่ยนแปลงของซีพลักษณ์ในรอบปี (phenological change) การโค่นล้มจากพายุ อ่อนแอต่อโรคระบาดทางดิน ความแปรปรวนของอัตราการเจริญเติบโตทางลำต้นและปริมาณผลผลิต รวมทั้งอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยของพื้นที่ปลูกที่ขาดความอุดมสมบูรณ์และขาดการจัดการที่เหมาะสม (Isarangkool Na Ayutthaya *et al.*, 2011) ดังนั้น การศึกษาค้นคว้าวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการตอบสนองทางสรีรวิทยาและการเปลี่ยนแปลงของพลวัตรากต้นยางพาราภายใต้การเปลี่ยนแปลง

ของความชื้นในดินและศึกษาถึงอิทธิพลของฤดูกาลต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของต้นยางพาราทั้งส่วนลำต้นเหนือพื้นดินและระบบรากยางพารา โดยประเมินการตอบสนองของต้นยางพาราที่ปลูกทดสอบในโรงเรือนและศึกษาในสภาพแปลงปลูกของเกษตรกร ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้สามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับการวางแผนการจัดการสวนในด้านการจัดการระบบน้ำแก่ต้นกล้ายางพาราในระยะแรกปลูก การพิจารณาให้ปุ๋ยแก่ต้นยางพาราในช่วงเวลาที่เหมาะสมและพืชสามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมทั้งอาจใช้เพื่อคาดการณ์ผลผลิตในรอบปีได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

การตรวจเอกสาร

ยางพารา (*Hevea brasiliensis* Müell Arg) เป็นพืชที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการผลิตน้ำยางธรรมชาติมีส่วนสำคัญในแง่ของแหล่งตั้งต้นของการผลิตล้อยางสำหรับยานพาหนะ เช่น รถยนต์ รถบรรทุกสินค้า และอุตสาหกรรมการบิน (Li and Fox, 2012) และยังเป็นพืชที่มีความสำคัญเชื่อมโยงกับวิถีชีวิตของเกษตรกรในแง่ของพืชที่เป็นแหล่งรายได้หลักโดยประเทศผู้ผลิตหลัก และมีพื้นที่ปลูกในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ครอบคลุมมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์จากแหล่งผลิตทั่วโลก ได้แก่ ไทย อินโดนีเซีย มาเลเซีย เวียดนาม ฟิลิปปินส์ พม่า และกัมพูชา โดยระยะเวลาสิบกว่าปีที่ผ่านมา พบว่าความต้องการใช้ยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สาเหตุหลักเนื่องมาจากการขยายตัวของเศรษฐกิจในประเทศจีน และอัตราการใช้อย่างธรรมชาติในการผลิตล้อยางเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับการเพิ่มโรงงานอุตสาหกรรมสำหรับการผลิตล้อยางอย่างต่อเนื่อง ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นการเพิ่มพื้นที่ปลูกยางพารา การคาดการณ์ของสำนักงานเกษตรและอาหารของสหประชาชาติพบว่า สัดส่วนการผลิตยางธรรมชาติของประเทศผู้ผลิตในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ถือเป็นสัดส่วนมากถึง 97 เปอร์เซ็นต์ (FAO, 2013) อย่างไรก็ตาม แม้ว่าความผันผวนของราคารับซื้อยางธรรมชาติที่เกิดจากปัจจัยต่างๆส่งผลต่อการขยายพื้นที่ปลูกยางแต่จากการคาดการณ์พบว่า อัตราการขยายพื้นที่ปลูกยางพาราธรรมชาติยังคงมีการขยายพื้นที่ปลูกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Prachaya, 2015) สำหรับพื้นที่เหมาะสมดั้งเดิม (Traditional area) สำหรับการปลูกยาง (พื้นที่ปลูกเดิมมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิรายปีอยู่ที่ 28 ± 2 องศาเซลเซียส และปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 2,000-4,000 mm ต่อปี) (Priyadarshan *et al.*, 2005) ขยายพื้นที่ปลูกไปยังพื้นที่ปลูกใหม่ (nontraditional area) ไปยังที่ราบสูงเชิงเขาในประเทศ กัมพูชา ลาว พม่า ตอนเหนือของประเทศไทย เวียดนาม และตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศจีนในเขตมณฑลยูนนานซึ่งบริเวณดังกล่าวมีความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของยางพารา (Li and Fox 2012; Fox and Castella, 2013) ผลกระทบที่เกิดขึ้นส่งผลพัฒนาการด้านการเจริญเติบโตของลำต้นและผลผลิตลดลง (Warren-Thomas *et al.*, 2015) ยิ่งไปกว่านั้นผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนพื้นที่ปลูกยางจากเดิมที่เป็นพื้นที่ป่าธรรมชาติไปเป็นการปลูกยางเชิงเดี่ยว ยังส่งผลกระทบต่อกลไกของ

ระบบนิเวศหลายด้าน เช่น อัตราการกักเก็บน้ำสำรองในธรรมชาติลดลง (Guardiola-Claramonte *et al.*, 2008; Ziegler *et al.*, 2009) การกักเก็บคาร์บอนในดิน (Li *et al.*, 2008) ระดับความอุดมสมบูรณ์ของดิน (Zhang *et al.*, 2007) อัตราการคายระเหยน้ำเพิ่มสูงขึ้น (Giambelluca *et al.*, 2016) และความหลากหลายทางชีวภาพลดลง (Li *et al.*, 2007).

สถานการณ์ปลูกยางพาราที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อความแปรปรวนของผลผลิตยางพารา ซึ่งการจัดการสวนยางภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมในปัจจุบันต้องปรับเปลี่ยนรวมทั้งมีการจัดการที่เหมาะสมเพื่อให้กระบวนการผลิตยางพาราคู่มาต่อการลงทุนและสามารถให้ผลผลิตได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการเข้าใจถึงพัฒนาการทั้งระบบของต้นยางพาราในสภาพแวดล้อมและช่วงอายุที่ต่างกันจึงเป็นสิ่งสำคัญ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มีการศึกษาส่วนของพืชเหนือพื้นดิน (aboveground) เป็นส่วนใหญ่เนื่องจากสามารถปฏิบัติได้ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่การศึกษาการเปลี่ยนแปลงส่วนของพืชใต้ดิน (belowground) โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนของรากพืช (plant root systems) ยังเป็นส่วนสำคัญเช่นเดียวกันซึ่งในระยะหลายทศวรรษที่ผ่านมาวิจัยได้พัฒนาและปรับปรุงวิธีการตลอดจนเครื่องมือเพื่อใช้ศึกษาและติดตามการเปลี่ยนแปลงของระบบรากพืช เช่น พัฒนาการรากพืชในรอบปี (root dynamics) ลักษณะเฉพาะของราก (root traits) ลักษณะทางสัณฐานของราก (root morphology) หรือ ภาระหมุนเวียนของราก (root turnover) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของรากมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยจากสภาพแวดล้อม (Norby and Jackson, 2000; Iversen, 2010) ในขณะเดียวกันความก้าวหน้าทางด้านวิทยาการและเทคโนโลยีมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ช่วยให้นักวิจัยสามารถเข้าใจได้ถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลงของรากได้ดีขึ้นและสามารถประยุกต์ใช้เพื่อการผลิตพืชให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

1. สรีรวิทยาของยางพารา

ยางพาราเป็นพืชผลัดใบที่มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนชื้นกลุ่มน้ำอเมซอนสามารถเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี 1,800-2,500 mm (Pakianathan *et al.*, 1989) และมีจำนวนวันฝนตกประมาณ 100-150 วัน (Watson, 1989) การปลูกยางพาราเพื่อเก็บเกี่ยวในผลผลิตในรูปของน้ำยางสดเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จในการปลูกสร้างสวนยางพารา กระบวนการสร้างน้ำยางของต้นยางก่อนที่เริ่มเก็บเกี่ยวผลผลิตต้นยางมีการพัฒนาด้านสรีรวิทยาทั้งส่วนของรากและลำต้นที่สมบูรณ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์แสง พัฒนาการของใบยางพาราหลังจากการผลิใบใหม่ใช้ระยะเวลาประมาณ 35-40 วัน จึงเจริญเติบโตเต็มที่และมีพื้นที่ใบเพิ่มขึ้นซึ่งทำหน้าที่เกี่ยวข้องในการเปิดปิดปากใบ การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้กระบวนการสังเคราะห์แสง (Samsuddin and Impena, 1979) การศึกษาของ Silpi และคณะ (2006) เกี่ยวกับพลวัตการแข่งขันระหว่างการสร้างน้ำยางและการสร้างเนื้อไม้เพื่อการเจริญเติบโตในช่วงที่

เปิดกรีด พบว่า ต้นยางที่ไม่ได้เปิดกรีดมีการเจริญเติบโตของลำต้นอย่างสม่ำเสมอในช่วงฤดูฝนจนถึงฤดูแล้งที่ต้นยางผลัดใบแต่อัตราการเจริญเติบโตของลำต้นในช่วงที่ผลัดใบลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับต้นยางที่เปิดกรีด พบว่า อัตราการขยายขนาดของลำต้นลดลงมาก (Priyadashan and Clement-Demange, 2004) การศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการปรับตัวระหว่าง source-sink ของต้นยางที่เปิดกรีดและเมื่อมีการเปิดกรีดยาวนานหลายปีการให้น้ำยางจะเป็นขั้นตอนระยะยาวที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆของต้นยางพารา

1.1 ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง (Photosynthetic efficiency)

การเจริญเติบโตของต้นยางพาราในระยะก่อนเปิดกรีดต้องใช้เวลา 6-7 ปี เพื่อให้มีขนาดลำต้นที่เหมาะสม (ขนาดเส้นรอบลำต้นไม่น้อยกว่า 50 cm วัดที่ความสูง 150 cm เหนือพื้นดิน) ต่อการกรีดเพื่อเก็บเกี่ยวผลผลิตน้ำยางสดเพื่อลดผลกระทบต่อการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นภายหลังการเปิดกรีด การพัฒนาและปรับปรุงพันธุ์ยางในอดีตเมื่อ 20 ปีที่ผ่านมาได้มีการคัดเลือกพันธุ์ยางพาราที่ให้ผลผลิตสูงโดยอาศัยหลักการประเมินที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของยางพาราพันธุ์ดีรวมถึงค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำของพืช (water use efficiency ; WUE) โดยมีการคัดเลือกพันธุ์ยางเป็นครั้งแรกที่ประเทศศรีลังกา (Charles-Edwards, 1982) ซึ่งพบว่าพันธุ์ยางที่ให้ผลผลิตสูงจะมีประสิทธิภาพการใช้น้ำและการสังเคราะห์แสงในอัตราที่สูง (Nugawela *et al.*, 1995) พันธุ์ยางพาราที่ให้ผลผลิตน้ำยางสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ให้ผลผลิตสูง ปานกลาง และต่ำ แต่ทั้งนี้ยังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง เช่น ขนาดของทรงพุ่ม ความหนาแน่นทรงพุ่ม ดัชนีพื้นที่ใบและค่า light extinction coefficient (K) เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

1.2 ความสัมพันธ์ของน้ำในต้นยางพารา

บทบาทของน้ำที่สำคัญต่อลักษณะทางสรีรวิทยาของต้นยางพาราแม้ว่าพื้นที่ปลูกยางส่วนใหญ่อยู่ในเขตร้อนชื้น (ละติจูด 15 องศาเหนือ และลองจิจูด 15 องศาใต้) มีการขยายพื้นที่ปลูกไปยังพื้นที่ที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้ได้รับผลกระทบของความแห้งแล้งในหลายพื้นที่ เช่น ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ หรือภาคเหนือ (เส้นละติจูด 19 องศาเหนือ) พื้นที่สูงของเวียดนามและพื้นที่ทางภาคเหนือของอินเดีย (ละติจูด 29 องศาเหนือ) พื้นที่ตะวันตกเฉียงใต้ของจีน (ละติจูด 22 องศาเหนือ) และภาคใต้ของบราซิล (ละติจูด 23.5 องศาเหนือ) (Silpi *et al.*, 2006)

การศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ระหว่างการให้น้ำและการแตกใบใหม่ในช่วงผลัดใบยางโดยรายงานของ จันทรจิรา และ สายัณห์ (2551) การให้น้ำแก่ต้นยางพาราในสภาพแปลงปลูกมีส่วนช่วยให้การแตกใบใหม่ของต้นยางพาราเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วประมาณ 1 สัปดาห์ เมื่อเปรียบเทียบกับต้นยางที่งดให้น้ำอีกทั้งมีการพัฒนาของพื้นที่ใบ ความหนาแน่นของทรงพุ่มมากกว่าต้นยางที่งดให้น้ำแต่

การให้น้ำไม่มีผลต่อคุณภาพของผลผลิตเปอร์เซ็นต์เนื้ออย่างแห้งและขนาดเส้นรอบวงลำต้น ทั้งนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงแล้งที่ปริมาณน้ำในดินที่เป็นประโยชน์มีอยู่จำกัดส่งผลให้ระดับการลำเลียงน้ำและพัฒนาการของใบยางเกิดขึ้นได้ช้า แต่ภายหลังการเพิ่มปริมาณน้ำแก่ต้นยางเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้ระดับของสภาพการนำน้ำในท่อลำเลียงมีค่าสูงขึ้นซึ่งประเมินได้จากพัฒนาการของการสร้างใบยางและอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซในรอบวันของต้นยางพาราที่ได้รับน้ำมีค่าสูงกว่าต้นยางที่ไม่มีการให้น้ำ

ความสำคัญของน้ำในต้นยางพารายังมีส่วนสำคัญในการใช้ประเมินความเข้ากันได้ระหว่างต้นตอและกิ่งตอพันธุ์ดี การทดลองของ Feng และคณะ (2011) เพื่อทดสอบความต้านทานสภาวะแห้งแล้งของยางพาราโดยใช้กิ่งตอพันธุ์ CATAS 7-33-97 ติดตามต้นตอพันธุ์ PB 86, PR107, RRIM 600 และ GT1 ผลการศึกษาพบว่า ต้นตอพันธุ์ GT1 มีค่าการต้านทานต่อสภาวะแห้งแล้งที่ดีที่สุด และมีค่าสภาพการนำน้ำของรากสูงสุดในกลุ่มที่ทดลองซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะประจำพันธุ์ GT1 ที่ปรับปรุงพันธุ์จากประเทศอินโดนีเซียที่ต้านทานต่อสภาพแล้งและหนาวเย็นได้ดี

1.3 บทบาทของปากใบ (stomata)

การรายงานของ Gomes และ Hanjah (1980) ศึกษาความหนาแน่นของปากใบยางพาราจำนวน 12 พันธุ์ พบว่ามีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 278 mm^{-2} (RRIM 605) ถึง 369 ต่อตาราง mm (พันธุ์ IRCI 10) Martin และ Zieri (2003) ศึกษาลักษณะทางกายภาพของยางพารา 2 พันธุ์บนต้นตอเดียวกัน พบว่า พันธุ์ RRIM 600 มีความหนาแน่นของปากใบ 296 mm^{-2} พันธุ์ GT 1 มีความหนาแน่นปากใบ 364 mm^{-2} การศึกษา Samsuddin (1980) รายงานว่า ความหนาแน่นของปากใบของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ GT1 มีค่า 465 และ 372 ต่อตาราง mm^{-2} ตามลำดับ ส่วนการศึกษา Côte d' Ivoire โดย Monteny และคณะ (1985) ได้มีการศึกษาความหนาแน่นของปากใบยางพาราจำนวน 3 พันธุ์ ได้แก่ RRIM 600 GT1 และ PB 235 พบว่า ความหนาแน่นของปากใบอยู่ในช่วง $389\text{-}568 \text{ mm}^{-2}$ แสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนของความหนาแน่นปากใบขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น อายุ ขนาดใบ และลักษณะเฉพาะทางพันธุกรรม เป็นต้น

1.4 ค่าศักย์ของน้ำในใบ (Leaf water potential)

การศึกษา Gururaja Rao และคณะ (1990) เมือง Kerala ทางตอนใต้ของประเทศอินเดีย ศึกษาการตอบสนองของยางพารา 2 สายพันธุ์ อายุ 10 ปี ต่อสภาวะขาดน้ำโดยวัดค่าการชักนำปากใบ ค่าศักย์ของน้ำในใบ และปริมาณผลผลิต พบว่า พันธุ์ RRII 105 สามารถรักษาระดับค่าศักย์ของน้ำในใบในช่วงกลางวัน (Mid-day) และก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (Predawn) โดยมีค่า -1.3 เมกกะปาสคาล (MPa) สูงกว่าพันธุ์ RRII 118 (-2.4 MPa) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายางพาราพันธุ์ RRII 105 สามารถ

รักษาระดับของการลำเลียงน้ำในต้นได้สูงกว่าพันธุ์ RR11 118 เพราะระดับของแรงดันเต่ง (turgor pressure) ในท่อลำเลียงน้ำและปรับค่าออสโมติกต่ำกว่า Rodrigo และคณะ (2005) พบว่า ยางพารา มีการปรับตัวของปากใบได้ดีในสภาวะเครียด ดังนั้นจึงใช้คุณสมบัติดังกล่าวในการคัดเลือกต้นยางที่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมโดยการวัดค่าการชักนำปากใบ (stomatal conductance) และค่าศักย์ของน้ำในใบ (leaf water potential) นอกจากนี้การศึกษาของ Sangsing และคณะ (2007) กับต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ PB 260 พบว่า อุณหภูมิที่ต้นยางพาราสามารถเจริญเติบโตได้ดีและเหมาะสมกับอัตราการสังเคราะห์แสงอยู่ระหว่าง 23-27 องศาเซลเซียส

1.5 การเกิดช่องว่างอากาศในท่อลำเลียงน้ำ (xylem embolism)

สภาวะที่กระตุ้นให้พืชเกิดช่องว่างอากาศแทรกในท่อลำเลียงน้ำ (xylem embolism) เกิดจากสภาวะเครียดน้ำ เช่น การขาดน้ำหรือน้ำท่วมขังที่มีผลต่อสภาพการนำน้ำของรากพืชไปยังระบบท่อลำเลียงน้ำในต้น การศึกษาของ กฤษดา (2558) อธิบายถึงลักษณะทางสรีรวิทยาที่มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการทนทานหรือการปรับตัวภายใต้สภาวะความเครียดน้ำ คือ สมบัติในการเคลื่อนย้ายน้ำ (hydraulic property) โดยเฉพาะความต้านทานต่อการเกิดฟองอากาศในท่อลำเลียงน้ำ (xylem cavitation resistance) ในการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า สมบัติดังกล่าวมีความแปรปรวนระหว่างพันธุ์พืชและมีแนวโน้มใช้ค่านี้เป็นเครื่องมือในการคัดเลือกพันธุ์พืชทนแล้งได้ จากการศึกษาเปรียบเทียบการตอบสนองระหว่างยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 408 ซึ่งเป็นพันธุ์ยางพาราแนะนำชั้นหนึ่ง พบว่า การทดลองปลูกยางพาราในสภาวะในน้ำปกติ งดการให้น้ำ และให้น้ำท่วมขัง พบว่า ค่าประมาณการศักย์ของน้ำในใบที่เป็นจุดเริ่มของการเกิดฟองอากาศในท่อไซเล็ม (Xylem embolism) หรือค่า P12 พบว่า ในยางทั้ง 2 พันธุ์ การให้น้ำท่วมขังกระตุ้นให้เกิดฟองอากาศในท่อลำเลียงน้ำก่อนการขาดน้ำและค่าการคำนวณศักย์ของน้ำในใบที่ทำให้สูญเสียการนำไหลในท่อน้ำร้อยละ 50 หรือ PLC50 พบว่า การให้น้ำท่วมขังทำให้เกิดความสูญเสียการนำไหลของน้ำในท่อไซเล็ม (Loss of conductivity) ร้อยละ 50 ที่ในระดับศักย์ของน้ำในใบ (-0.91 และ -1.08 MPa ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 408) สูงกว่าการทดลองในสภาวะขาดน้ำ (-1.09 และ -1.21 MPa ในยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 408) และประมาณการค่าศักย์ของน้ำในใบที่ทำให้เกิดการเกิดฟองอากาศในท่อลำเลียงน้ำถึงจุดวิกฤติหรือค่า P88 ในพันธุ์ RRIM 600 พบว่า การให้น้ำท่วมขัง (-1.23 MPa) เกิดวิกฤติก่อนการขาดน้ำ (-1.45 MPa) แต่ในพันธุ์ RRIT 408 การขาดน้ำ (-1.53 MPa) ถึงจุดวิกฤติก่อนน้ำท่วมขัง (-1.62 MPa) และพบว่า ยางพาราพันธุ์ RRIT 408 มีแนวโน้มที่จะปรับตัวได้ดีกว่ายางพันธุ์ RRIM 600 เมื่อประสบกับสภาวะความเครียดน้ำ นอกจากนี้ Sangsing และคณะ (2004) พบว่า ปากใบควบคุมการเกิดฟองอากาศในระยะแรกที่ก้านใบของยางพารา และค่าศักย์ของน้ำในใบต่ำสุดที่พบในต้นยางที่อยู่ในสภาวะขาดน้ำมีค่าระหว่าง -1.8 ถึง -2.2 MPa

2. การตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชต่อสภาวะเครียดน้ำ

การเจริญเติบโตและการพัฒนาของพืชโดยทั่วไปได้รับอิทธิพลจากปัจจัยจากสิ่งไม่มีชีวิต เช่น อุณหภูมิอากาศสูง รังสีดวงอาทิตย์ น้ำท่วม และการขาดน้ำ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวทำให้เกิดผลกระทบทำให้เกิดการสูญเสียทั้งด้านคุณภาพและปริมาณของผลผลิตตลอดจนทำให้พืชเกิดสภาวะเครียดและส่งผลต่อการเจริญเติบโตผิดปกติไปจากเดิม โดยการปรับตัวของพืชเมื่อขาดน้ำมีการปรับลดตรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง ลดอัตราการสังเคราะห์แสง ตลอดจนการปิดปากใบเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำภายในต้นพืชออกสู่บรรยากาศภายนอก แต่ระดับของการตอบสนองของพืชอาจแตกต่างกันขึ้นกับลักษณะจำเพาะของพืชแต่ละชนิด พันธุกรรม ซึ่งหากพืชขาดน้ำเพียงเล็กน้อยหรือปานกลาง หรือช่วงเวลาสั้นๆ พืชสามารถปรับกระบวนการเมแทบอลิซึมกลับเข้าสู่ระดับปกติได้ แต่หากขาดน้ำเป็นระยะเวลายาวนานและเกิดขึ้นบ่อยกระบวนการปรับตัวของพืชไม่อาจเกิดขึ้นได้และพืชตายในที่สุด

สภาวะเครียดน้ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่มีผลกระทบต่อเจริญเติบโตของพืชสามารถแบ่งเป็น 2 สภาวะ คือ การขาดน้ำ และน้ำท่วมขัง ทั้งสองปรากฏการณ์ส่งผลต่อการเจริญเติบโต และผลผลิตตลอดชีพจักรของพืช แต่ความรุนแรงที่เกิดขึ้นกับพืช ยังขึ้นกับหลายปัจจัยที่เกิดจากภายในต้นพืช (endogenous factor) เช่น พันธุ์พืช ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนก๊าซ การปรับตัวของพืชโดยสร้างอวัยวะพิเศษในการแลกเปลี่ยนก๊าซ หรือการปรับระดับของฮอร์โมนควบคุมการเจริญเติบโต เป็นต้น ส่วนปัจจัยภายนอก (exogenous factor) ได้แก่ ความรุนแรงของสภาพแวดล้อมที่เกิดในขณะที่พืชอยู่ภายใต้สภาวะเครียดน้ำ เช่น อากาศร้อน หรือหนาว ระดับการคายระเหยน้ำสูง ความยาวนานของช่วงแสงในรอบวัน เป็นต้น

2.1 สภาวะขาดน้ำ (Water deficit)

ความแห้งแล้งหรือสภาวะขาดน้ำ คือปริมาณน้ำในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีปริมาณน้อยจนถึงจุดที่พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้หรือปริมาณน้ำต่ำกว่าจุดเหี่ยวเฉาถาวร ซึ่งอาจเกิดจากผลกระทบจากฤดูกาล ปริมาณน้ำฝนตามธรรมชาติ และปัจจัยทางกายภาพในดินถูกจำกัดในด้านความเครียดน้ำในดินที่มีผลต่อพืช เช่น สภาวะที่มีน้ำในดินน้อย (hypoxia) หรือสภาวะที่ออกซิเจนในดินเหลือเพียงน้อย (anoxia) และความต้านทานเชิงกล (mechanical impedance) ในดินซึ่งมีผลต่อการทะลุทะลวงหรือการชอนไชของรากในดินที่ระดับลึกเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาระบบรากพืช จากปัจจัยข้างต้นพบว่า มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในดินในสภาพที่ดินแห้งแรงดึงของน้ำในช่องว่างดินทำให้ค่าศักย์ของน้ำในดินอยู่ในระดับวิกฤต (ค่าติดลบ) ทำให้ค่าความต้านทานน้ำในดินเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Whitmore and Whalley, 2009) ซึ่งค่าต้านทานเชิงกลในดินอาจมีค่าถึง -100 kPa ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเครียดบริเวณอนุภาคของดินมี

ผลจากแรงตึงผิวของน้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคดิน (Whalley *et al.*, 2005) จากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดินทำให้อนุภาคดินเกิดการอัดแน่น (soil compaction) และมีผลต่อการพัฒนาขนาดของใบพืชตลอดจนส่งผลต่อการส่งสัญญาณระหว่างยอดกับรากพืชด้วย (Young *et al.*, 1997)

สภาวะดินขาดออกซิเจนซึ่งอาจมีระดับของออกซิเจนในดินต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของรากพืชด้วย (daSilva *et al.*, 1994) ผลกระทบจากสภาวะขาดน้ำในพืช ได้แก่ ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงของพืชลดลงอย่างรวดเร็วเกิดจากสมดุลของคาร์บอนที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงเสียสมดุล การปรับตัวของพืชโดยการปิดปากใบเพื่อลดการสูญเสียน้ำภายในลำต้นและรักษาระดับแรงดันน้ำภายในต้นไว้รวมถึงกระบวนการเมตาบอลิซึมที่สังเคราะห์พลังงานถูกยับยั้งหรือสูญเสียปฏิกิริยา (Lawlor and Casnie, 2002 ; Flexas *et al.*, 2006)

2.2 การปรับตัวของพืชด้านการแลกเปลี่ยนก๊าซ (Gas exchange)

2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์แสง

พืชที่เจริญเติบโตอยู่ภายใต้สภาวะเครียดน้ำ การตอบสนองด้านอัตราการสังเคราะห์แสงมีอัตราลดลงเมื่อพืชอยู่ในสภาวะเครียดน้ำยาวนานขึ้น กลไกการปรับตัวของพืชเบื้องต้นโดยลดอัตราการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในใบเป็นผลให้แหล่งพลังงาน ATP และน้ำตาล (RuBP) ที่ต้องใช้ลดลง (Tezara *et al.*, 1999; Ribas-Carbo *et al.*, 2005) จากนั้นพืชเริ่มปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำและเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำโดยในชั้น Mesophyll ของใบมีปริมาณของเอนไซม์ Rubisco เพิ่มขึ้นเพื่อตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในการใช้สร้างพลังงานในสภาวะที่พืชลดอัตราการสังเคราะห์แสงและการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนใน Thylakoids และการใช้น้ำตาล Trioses phosphates มีค่าลดลงซึ่งมีผลต่อเนื่องไปยังประสิทธิภาพของปฏิกิริยาทางเคมีของกระบวนการสังเคราะห์แสงในระบบ Photosystem II และการสร้างพลังงานเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตลดลง (Carmo-Silva *et al.*, 2011; Riverco *et al.*, 2009)

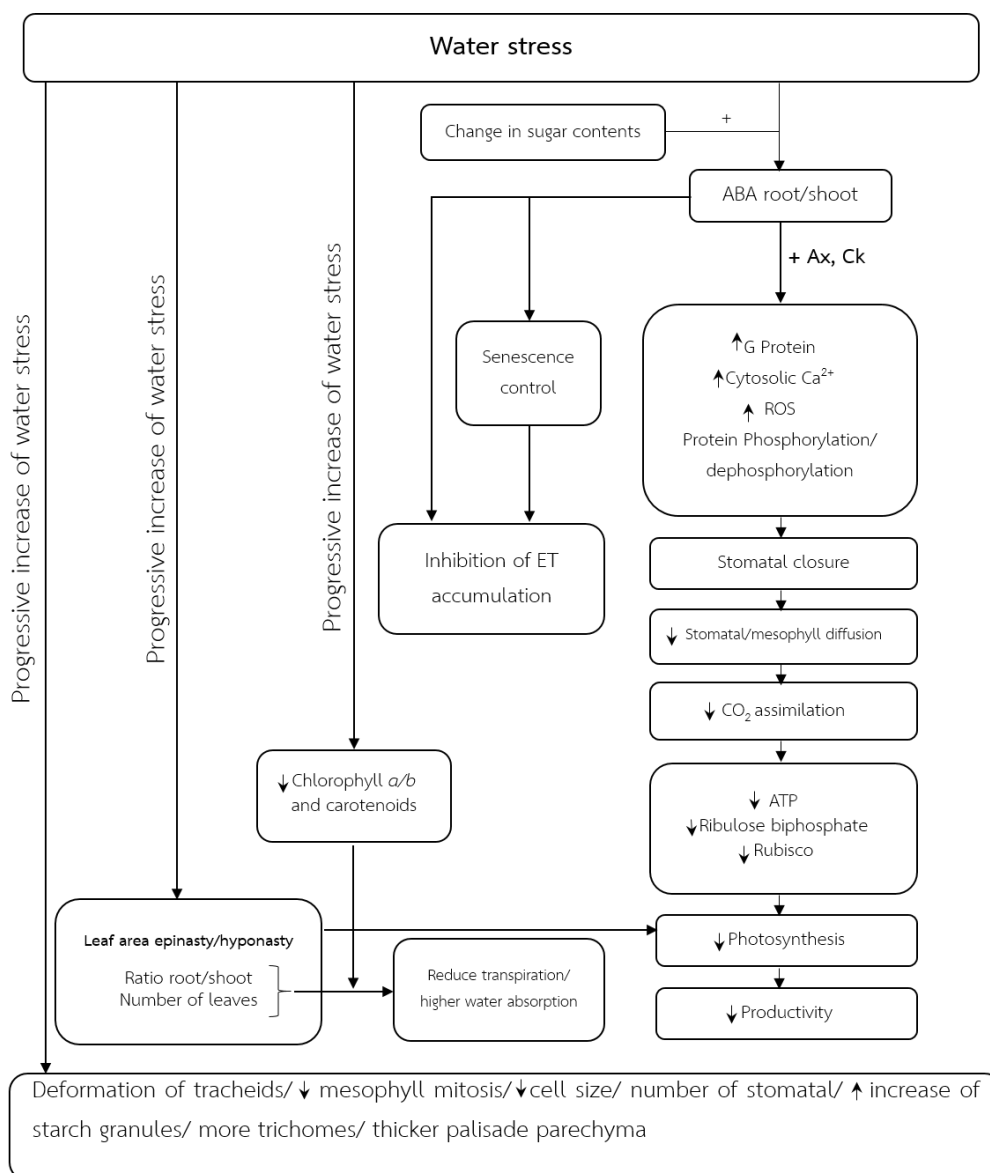
การขาดน้ำของพืชมีผลต่อปริมาณของรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสงคือ คลอโรฟิลล์ เอ และ คลอโรฟิลล์ บี ลดลงส่งผลต่อการสะสมน้ำหนักแห้งของพืชลดลงเช่นเดียวกัน โดยที่ระดับของรงควัตถุจะเป็นตัวควบคุมอัตราการใช้พลังงานและการตรึงคาร์บอนเพื่อใช้ในการสร้างคลอโรฟิลล์ทั้งระบบ (Chaves *et al.*, 2009) พืชลดการทำหน้าที่ของใบจนกระทั่งใบเสื่อมสภาพและทิ้งใบในที่สุดเพื่อเป็นการรักษาน้ำไว้ในลำต้น

2.2.2 การเปลี่ยนแปลงของน้ำในต้นพืช

ปัจจัยของปริมาณน้ำในธรรมชาติที่ขาดแคลนทั้งจากสภาพภูมิประเทศ สภาพอากาศ หรือฤดูกาลมีผลต่อการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นและการออกดอกติดผลตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโตของพืชและเป็นปัจจัยจำกัดทำให้การขยายพันธุ์พืชลดลง (Kursar *et al.*, 2009) ปริมาณน้ำที่ไม่เพียงพอต่อการใช้ของพืชเป็นปัจจัยที่ทำให้พืชตอบสนองภายใต้สภาวะที่ไม่เหมาะสมนี้ โดยสาเหตุที่ทำให้พืชมีการเจริญเติบโตลดลงหรือหยุดชะงักเกิดจากการเปลี่ยนแปลงหรือสมดุลคาร์บอนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสงถูกลดอัตราลงและอาจสูญเสียปฏิกิริยามีผลให้พืชเริ่มปิดปากใบเพื่อรักษาปริมาณน้ำในต้นที่อาจจะสูญเสียออกสู่บรรยากาศภายนอกและส่งผลกระทบต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมที่เกิดขึ้นในใบผิดปกติและอัตราการทำงานลดลง (Lawlor and Cosnie, 2002; Flexas *et al.*, 2006) อย่างไรก็ตาม การปิดปากใบที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงและกระบวนการแลกเปลี่ยนก๊าซของพืชนั้นยังมีความสัมพันธ์กับค่าการชักนำน้ำในท่อลำเลียงน้ำ (xylem hydraulic conductivity) (Hubbard *et al.*, 2001; Cochard *et al.*, 2002) และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ของน้ำเป็นตัวชักนำให้ปากใบปิดและเป็นสื่อทำให้เกิดฟองหรือช่องว่างอากาศภายในท่อลำเลียงน้ำ (Sperry and Saliendra, 1994; Brodribb and Cochard, 2009) ในพืชบางชนิดก่อนที่ปากใบปิดมีการเพิ่มขนาดของขอบปากใบเพื่อป้องกันการอุดตันที่ปากใบ (Froux *et al.*, 2002; Martinez-Vilalta *et al.*, 2002) เช่นเดียวกับพืชบางชนิดพบว่า การปิดปากใบเกิดจากการสูญเสียแรงดันภายในท่อลำเลียงน้ำ (Nardini *et al.*, 2003) ดังนั้น ตัวแปรการสังเคราะห์แสงและการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำ (hydraulic capacity) ภายในท่อน้ำพืชจึงมีการศึกษาควบคู่กันในพืชที่อยู่ภายใต้สภาวะเครียดน้ำ

การศึกษาของ Sittichai และ Sayan (2014) เกี่ยวกับการตอบสนองของการชักนำปากใบ ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง เปรียบเทียบระหว่างยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ที่ให้น้ำปกติและงดการให้น้ำโดยพบว่า การชักนำปากใบของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 จะลดลงอย่างรวดเร็วภายหลังงดให้น้ำเป็นระยะเวลา 8 วัน (407 ถึง 42 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ในขณะที่พันธุ์ RRIT 251 มีค่าลดลงเมื่องดให้น้ำผ่านไป 10 วัน (369 ถึง 10 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ค่าศักย์ของน้ำในใบของพันธุ์ RRIT 251 ลดลงเมื่องดให้น้ำเป็นเวลา 10 วัน (-0.96 MPa ถึง -2.50 MPa) และระดับของประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของคลอโรฟิลล์ (F_v/F_m) ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 มีแนวโน้มสูงกว่าพันธุ์ RRIT 251 (0.801 และ 0.794 ตามลำดับ) อีกทั้งเมื่อมีการให้น้ำกลับคืน ระดับของการแลกเปลี่ยนก๊าซในยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่งดให้น้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับยางพาราที่ให้น้ำปกติได้เร็วกว่ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการปรับตัวที่ดีกว่าของยางพาราพันธุ์ RRIM 600

นอกจากนี้ ภายหลังจากที่พืชอยู่ในสภาวะเครียดน้ำได้มีการศึกษาเพิ่มเติมถึงกลไกการปรับตัวของพืชภายหลังจากที่ได้รับน้ำอีกครั้ง โดยพิจารณาจากค่าแลกเปลี่ยนก๊าซของพืช (Cai *et al.*, 2005; Galmés *et al.*, 2007) ในขณะที่บางการศึกษาใช้ตัวแปรความสัมพันธ์ของค่าการแลกเปลี่ยนก๊าซร่วมกับแรงดันภายในท่อน้ำพืช (hydraulic capacity) (Resco *et al.* 2009) เนื่องจากค่าแรงดันน้ำในต้นพืชเป็นตัวบังคับให้เกิดการแลกเปลี่ยนก๊าซในสภาวะเครียดน้ำและระยะที่ฟื้นตัวภายหลังจากการให้น้ำอีกครั้งหนึ่ง โดย Chen และคณะ (2009) ศึกษาถึงการตอบสนองของการแลกเปลี่ยนก๊าซกับแรงดันน้ำของต้นกล้วยพาราที่ปลูกภายใต้สภาวะขาดน้ำและการตอบสนองภายหลังจากการให้น้ำกลับคืน พบว่า ค่าการแลกเปลี่ยนก๊าซและสภาพของแรงดันน้ำในต้นกล้วยพาราที่งดการให้น้ำและให้น้ำกลับอีกครั้งมีการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กัน คือ การตอบสนองภายหลังจากที่ให้น้ำอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซปรับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระดับของแรงดันในท่อน้ำในลำต้น ซึ่งจากผลการศึกษายังพบอีกว่าระดับของแรงดันน้ำในลำต้นที่มีการให้น้ำทุกวันและต้นกล้วยพาราที่ให้น้ำมีความแตกต่างทางสถิติมากกว่าการเปลี่ยนแปลงระดับปริมาณฮอร์โมน ABA อาจเนื่องจากฮอร์โมน ABA ที่พบในสภาวะที่พืชเครียดน้ำนั้นจะพบได้ในปริมาณสูงในไม้ยืนต้น (Fuchs and Livingston, 1996) และการศึกษาตัวแปรที่ใช้ประเมินการตอบสนองของต้นกล้วยพาราพบว่า ในต้นกล้วยที่งดให้น้ำ เป็นเวลา 35 วัน ปริมาณน้ำในต้น ค่าศักย์ของน้ำในใบ อัตราการสังเคราะห์แสง และค่าการชักนำปากใบ ลดระดับลงอย่างต่อเนื่องหลังจากงดน้ำ 15-20 วัน และเมื่อมีการให้น้ำ การตอบสนองของตัวแปรต่างๆ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับต้นกล้วยที่มีการให้น้ำปกติภายหลังจากผ่านไป 3-5 วัน แต่การตอบสนองพืชต่อสภาวะที่เครียดน้ำยังขึ้นกับระยะเวลาและความรุนแรงที่พืชได้รับการตอบสนองของพืชจึงมีการปรับตัวที่ต่างกันออกไป (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 แผนผังกลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชที่ชักนำโดยสภาวะเครียดน้ำ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Zingaretti และคณะ (2013)

2.3 การปรับตัวทางสรีรวิทยาของพืชต่อสภาพน้ำท่วมขัง

2.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำในต้นพืช (plant water relations)

ความรุนแรงของสภาวะน้ำท่วมขังที่ส่งผลกระทบต่อพืชขึ้นอยู่กับระยะเวลาของน้ำท่วมขังที่เกิดขึ้นและกลไกการตอบสนองของพืชแต่ละชนิดว่ามีความทนทาน หรืออ่อนแอต่อสภาวะที่ขาดออกซิเจนในดิน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับพืชในสภาวะที่โมเลกุลของน้ำแทนที่ช่องว่างอากาศภายในดินจนกระทั่งรากพืชขาดออกซิเจนไปใช้ในระบบดูดซึมน้ำและธาตุอาหาร รวมถึงการลำเลียง

ผ่านยังท่อลำเลียงมาเลี้ยงส่วนของลำต้นถูกจำกัดจนเกิดสภาวะที่เรียกว่าสภาพการนำน้ำของราก (root hydraulic conductivity) ถูกยับยั้งไว้ (Islam and McDonald, 2004) ลักษณะที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับกระบวนการเกิดกรดที่สะสมในเซลล์ของไซโตพลาสซึมซึ่งกรดที่สะสมเกิดจากโปรตอนส่วนเกินที่เหลือจากกระบวนการสังเคราะห์แสงและไม่ได้นำไปใช้งานจนเกิดผลเสียต่อสภาพสมดุลของเซลล์ไซโตพลาสซึมและเป็นตัวเหนี่ยวนำให้ช่องทางผ่านเข้า-ออกของน้ำที่ผนังเซลล์ของรากปิดตัวลงและส่งผลกระทบต่อเนื่องให้การดูดซึมน้ำและการลำเลียงน้ำในพืชที่อ่อนแอต่อน้ำท่วมขังลดระดับลงและทำให้ใบพืชเหี่ยวเฉาคล้ายกับลักษณะของพืชที่ปรากฏเมื่อเผชิญกับสภาวะแห้งแล้ง (Tournarie-Roux *et al.*, 2003; Verdoucq *et al.*, 2008) ทำให้พืชตายในที่สุด และไม่สามารถฟื้นตัวภายหลังหากระดับน้ำท่วมขังลดลงก็ตาม

Crawford (2003) และ Lenssen และคณะ (2004) กล่าวว่าในพืชที่ทนทานต่อน้ำท่วมขังความสัมพันธ์ของน้ำในต้นพืชอยู่ในระดับที่แตกต่างกันหลายระดับ โดยขึ้นกับปัจจัยของฤดูกาลร่วมกับการตอบสนองแบบจำเพาะเจาะจงของพืชต่อสภาพแวดล้อม ณ ขณะนั้น ตัวอย่างเช่น สภาวะที่เกิดน้ำท่วมขังในช่วงฤดูร้อนกับต้นหญ้า (*Paspalum dilatatum*) และต้นถั่ว (*Lotus tenuis*) พืชทั้งสองชนิดยังคงเจริญเติบโตได้ในระดับปกติถึงแม้ว่าออกซิเจนในดินถูกจำกัดแต่การปรับตัวของต้นหญ้า พบว่า น้ำท่วมส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงของการแลกเปลี่ยนก๊าซ เช่น ค่าการชกน้ำปากใบ ค่าศักย์ของน้ำในใบ และอัตราการคายน้ำเพียงเล็กน้อย ในทางตรงข้ามผลจากน้ำท่วมขังต่อต้นถั่วจะพบว่า ค่าศักย์ของน้ำในใบ การชกน้ำปากใบ และการคายน้ำ ลดระดับลง 40, 50 และ 60 เปอร์เซ็นต์ จนอยู่ในภาวะวิกฤตเมื่อน้ำท่วมขังเกินระยะเวลา 15 วัน โดยการปิดปากใบส่งผลกระทบต่อเนื่องให้ค่าการชกน้ำปากใบและอัตราการคายน้ำลดลงเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำออกไปสู่บรรยากาศ (Ashraf, 2003; Striker *et al.*, 2005)

2.3.2 การตอบสนองด้านการสังเคราะห์แสง

การตอบสนองของพืชต่อน้ำท่วมขังที่พบโดยทั่วไปคือ อัตราการตรึงคาร์บอนลดลง เช่น อัตราการสังเคราะห์แสง สภาวะน้ำท่วมขังที่พืชเกิดกับพืชในระยะเวลานั้นมีผลทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง ปริมาณการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ถูกจำกัดอันเนื่องมาจากปากใบปิด (Pezeshki and DeLaune, 1998; Malik *et al.*, 2001; Striker *et al.*, 2005; Mollard *et al.*, 2010; Ashraf and Harris, 2013) การเปิดปิดปากใบของพืชเมื่อเกิดน้ำท่วมขังส่งผลกระทบต่อระบบการสังเคราะห์แสง กลไกการควบคุมปากใบเกิดจากการสูญเสียน้ำของระดับแรงดันเต่งภายในเซลล์คุมที่มีลักษณะรูปไตประกบกันทำหน้าที่เสมือนทางเข้า-ออกเพื่อการแลกเปลี่ยนก๊าซ และการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงทำให้เซลล์หดตัวและปิดช่องว่างลง และบางการศึกษารายงานว่าการปิดปากใบอาจเกิดจากการชกน้ำของฮอร์โมนแอบซิสซิก แอสิด

หรือ ABA ที่สร้างขึ้นในใบ (Else *et al.*, 1996; Jackson *et al.*, 2003) แต่ไม่ได้เกิดจากลำเลียงส่งผ่านมาจากส่วนของราก เหมือนลักษณะการเกิดในสภาวะแห้งแล้ง (Davies and Zhang, 1991)

ผลของสภาวะที่ขาดออกซิเจนในดินต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงขึ้นกับปริมาณของคลอโรฟิลล์ในใบและประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (carboxylation) มีอัตราการลดลง (Yordanova *et al.*, 2004) ผลกระทบจากน้ำท่วมซึ่งต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงสามารถพบการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางภายนอกที่เกิดขึ้นกับพืช คือ พืชชะงักการเจริญเติบโต ลำต้นแคระแกร็น ใบเปลี่ยนเป็นสีเหลืองหรือใบหงิกงอจนกระทั่งใบร่วง ทั้งนี้ในระยะที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนทางด้านกายภาพที่ปรากฏพืชมีกระบวนการปรับตัวเพื่อให้มีชีวิตรอดโดยการใช้พลังงานสำรองที่เก็บสะสมไว้ในรูปของคาร์โบไฮเดรตเพื่อใช้เป็นพลังงานในกระบวนการแลกเปลี่ยนก๊าซที่พืชยังสามารถรักษาระดับการแลกเปลี่ยนก๊าซไว้ ดังนั้น ในการศึกษาถึงการปรับตัวหรือการประเมินความสามารถในการมีชีวิตรอดของพืชภายใต้สภาวะน้ำท่วมขัง ระดับของคาร์โบไฮเดรตสำรองที่พืชเก็บสะสมไว้จึงเป็นอีกตัวแปรหนึ่งสามารถนำมาใช้ศึกษาได้ (Manzur *et al.*, 2009; Striker *et al.*, 2011)

Luo และคณะ (2010) ได้ศึกษารูปแบบการปรับตัวของพืชตระกูลหญ้า 2 ชนิด คือ *Alternanthera philoxeroides* และ *Hemarthria altissima* ในพื้นที่แหล่งขุมน้ำโดยพบว่ากลยุทธในการปรับตัวเพื่อให้มีชีวิตรอดของต้น *A. philoxeroides* โดยการหลีกเลี่ยง (escape) สภาวะน้ำท่วมขังโดยการยืดขยายส่วนข้อปล้องให้ลำต้นสูงกว่าระดับน้ำขัง โดยใช้คาร์โบไฮเดรตเป็นพลังงานสำรองในสภาพที่ขาดออกซิเจนในดิน และภายหลังจากระดับน้ำท่วมขังลดลง พบการแตกใบใหม่อย่างรวดเร็วในระยะเวลา 3 วัน และระดับการสังเคราะห์กลับสู่สภาวะปกติ ในขณะที่ต้น *H. altissima* ปรับตัวโดยการลดอัตราเมตาบอลิซึมลงขณะอยู่ในสภาวะน้ำท่วมขังและมีการสะสมน้ำตาลซูโครสสำรองไว้ที่บริเวณลำต้นเพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารสำรองซึ่งพบว่า การฟื้นตัวภายหลังจากน้ำท่วมขังลดลงมีการแตกใบขึ้นใหม่ภายในระยะเวลาเพียง 2 วัน และมีรากใหม่เกิดขึ้น

การศึกษาระบบการปรับตัวของต้นกล้วยพาราโดยสรุปผลการศึกษาคงของ de Carvalho และคณะ (2015) ประเมินการตอบสนองของอัตราการสังเคราะห์แสงของต้นกล้วยพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ปลูกในสภาวะน้ำท่วมขังเป็นระยะเวลา 21 วัน โดยการเติมไนโตรเจนในรูปของ ไนเตรต (NO_3^-) และแอมโมเนียม (NH_4^+) พบว่า กลไกของไนโตรเจนที่เติมให้แก่ต้นกล้วยในสภาวะน้ำท่วมขังทั้งสองรูปแบบทำหน้าที่ในการกำจัดของเสียในรูปของอนุมูลอิสระ (Reactive Oxygen Species; ROS) ที่เกิดขึ้นเมื่อสภาวะที่พืชขาดออกซิเจนและป้องกันการสะสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide; H_2O_2) ในเซลล์ โดยการเติมไนโตรเจนในรูปของไนเตรต (NO_3^-) มีประสิทธิภาพในการรักษาการแลกเปลี่ยนก๊าซทั้งการชักนำปากใบและอัตราการสังเคราะห์แสง

ดีกว่าการเติมไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียม (NH_4^+) และเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อความทนทานทางสรีรวิทยาของพืชที่สามารถอยู่รอดภายใต้สภาวะที่เกิดน้ำท่วมขังเป็นเวลานาน

3. การศึกษารากพืช

ระบบรากพืช ได้ถูกนิยามไว้ว่าเป็นส่วนหนึ่งของพืชที่ "ซ่อนไว้" (Hidden half) (Waisel *et al.*, 2002) ความสำคัญของรากพืชมีหน้าที่หาอาหาร ลำเลียงน้ำธาตุอาหารที่จำเป็นไปเลี้ยงส่วนลำต้น การตรึงลำต้นเหนือพื้นดินและความสำคัญต่อการหมุนเวียนของระบบนิเวศ (Atkinson, 1996) โครงสร้างและหน้าที่ที่ซับซ้อนดังกล่าวจึงต้องใช้วิธีการหรือเครื่องมือจำเพาะเพื่อการศึกษา ทำให้ข้อมูลปัจจัยที่ส่งผลด้านการเปลี่ยนแปลงของระบบรากพืชยังไม่เพียงพอซึ่งเมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการศึกษาส่วนเจริญเติบโตของพืชเหนือพื้นดิน ความหลากหลายของระบบรากพืชมีความเชื่อมโยงสัมพันธ์กับลักษณะเฉพาะของรากพืชแต่ละชนิดและระดับของปัจจัยทางธรรมชาติในบริเวณที่พืชเจริญเติบโต ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของรากดังกล่าวจึงต้องรวมเอาถึงปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมมาเป็นส่วนพิจารณาเพิ่มเติม (Atkinson, 2000) ตัวแปรของรากพืชที่ใช้ประเมินได้แก่ ความยาวรากต่อหน่วยพื้นที่ (root length density) ปริมาตรของรากต่อหน่วยพื้นที่ (Root volume) น้ำหนักราก (root weight) กระบวนการเกิดรากและการย่อยสลาย (root turnover) อัตราส่วนรากต่อยอด (root: shoot ratio) รูปแบบการแผ่ขยายของราก (branching pattern) และความสามารถในการดูดซึมธาตุอาหาร (root uptake ability) เป็นต้น

ตัวแปรเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของรากข้างต้นสามารถใช้คาดการณ์การทำหน้าที่ของรากพืชแต่ละชนิดได้ เช่น รูปแบบการเจริญเติบโตของราก การหายใจ อัตราการตรึงอากาศ อายุของราก การตาย หรือ การย่อยสลายของราก เป็นต้น อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากการศึกษารากตั้งแต่อดีตที่ใช้ประเมินหน้าที่ของระบบรากพืชนั้นยังคงมีความพยายามในการศึกษาอย่างต่อเนื่อง (Pregitzer *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2008; Fan and Guo, 2010; Xia *et al.*, 2010; McCormack *et al.*, 2012; Iverson, 2014) แนวทางปฏิบัติการศึกษารากพืชที่ได้รับการยอมรับและเป็นมาตรฐานสำหรับศาสตร์ทางด้านรากพืช คือ การใช้รากพืชที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 mm (Pregitzer, 2002; Guo *et al.*, 2008) เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมามีพบว่า รากละเอียดมีบทบาทอย่างมีนัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชทุกส่วนทั้งการดูดซึมน้ำ ลำเลียงน้ำ ธาตุอาหาร การตรึงและการกักเก็บคาร์บอนในดิน เมื่อย่อยสลายเป็นแหล่งอินทรีย์วัตถุที่สำคัญ (Gill and Jackson 2000; Matamala *et al.*, 2003) นอกจากนี้พลวัตของรากที่หมายถึงวัฏจักรของรากพืช ตั้งแต่รากเกิดใหม่พัฒนาและทำหน้าที่ในการดูดซึมน้ำธาตุอาหาร การลำเลียงส่งผ่านไปยังส่วนเจริญเติบโตรากและยอดจนหมดสภาพการทำหน้าที่และย่อยสลายมีส่วนสำคัญในระบบ

นิเวศตามธรรมชาติอย่างยั่งยืนและเป็นดัชนีเกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นตัวแปรชี้วัดระดับของการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศในเขตภูมิภาคต่างๆ

3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของรากพืช

การเจริญเติบโตของรากและหน้าที่ของรากพืชโดยทั่วไปมักได้รับผลกระทบจากปัจจัยความเครียดภายในและภายนอกและข้อมูลการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของระบบรากพืชยังมีจำกัดและพบว่า การเปลี่ยนแปลงมีกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน เช่น ตัวอย่างการศึกษาของ van Zyl (1984) เกี่ยวกับการเจริญเติบโตของรากในอุณหภูมิพบว่า การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมีผลต่อการสร้างรากใหม่ลดลงและความเครียดที่เกิดจากปัจจัยอื่น ๆ ร่วมกัน เช่น อุณหภูมิ ความร้อน ความแห้งแล้ง ความหนาแน่นในดิน และการขาดออกซิเจนในดิน ทำให้การเจริญเติบโตของรากถูกจำกัด (Whitmore and Whalley, 2009) นอกจากนี้ ลักษณะทางเคมีในดินที่ประกอบด้วยปัจจัยหลายส่วนยังเป็นผลต่อการเจริญเติบโตของรากเช่นเดียวกัน โดยพบว่า ทองแดง (Cu) ที่มีมากในดินมีผลจำกัดการเจริญเติบโตของราก (Toselli *et al.*, 2009) ในพื้นที่ดินเค็มมีผลต่อการลำเลียงน้ำของพืชหรือแม้แต่ในพื้นที่ดินกรดที่มีผลต่อการดูดซึมธาตุอาหารของพืช ซึ่งในทางกลับกันหากสถานะของดินมีปัจจัยเอื้อที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของรากพืชจะมีผลช่วยกระตุ้นให้รากพืชเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งในด้านความยาว ความหนาแน่น รวมถึงการมีอายุที่ยาวนานขึ้น การสร้างรากขึ้นมาใหม่ของพืชในรอบปีอาจมีการเปลี่ยนแปลงจากอิทธิพลของการจัดการทรงพุ่มพืชตามธรรมชาติที่ต้องการแสงแดดเพื่อการเจริญเติบโตตลอดจนได้รับผลจากปริมาณของคาร์โบไฮเดรตที่สะสมในพืช (Eissenstat *et al.*, 2013)

นอกจากนี้ การศึกษาของ Comas และคณะ (2005) เกี่ยวกับการเจริญเติบโตของรากอ่อนในระยะยาวพบว่า การพัฒนาของระบบรากต้นอ่อนมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการให้ผลผลิตเพื่อแปรรูปเป็นไวน์ เนื่องจากการเจริญเติบโตของต้นอ่อนและผลผลิตขึ้นกับการเจริญโตของรากโดยตรงและหากมีการไถพรวนดินที่ติดต่อกันทำให้จำนวนรากฝอยเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในการศึกษาบางเรื่องพบว่า หากการเจริญเติบโตของรากต้นอ่อนถูกจำกัดทำให้ลำต้นมีขนาดเล็ก ระบบรากสั้น ใบมีขนาดเล็ก ตลอดจนอัตราการสังเคราะห์แสงลดลง (Wang *et al.*, 2001) ความสำคัญของการเจริญเติบโตของรากพืชในการรักษาระดับของผลผลิตยังเป็นส่วนสำคัญที่นักปรับปรุงพันธุ์พืชใช้เป็นตัวแปรในการคัดเลือกพันธุ์พืชที่ดีให้ผลผลิตสูงและสามารถปรับตัวภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

3.2 อุณหภูมิดิน

การศึกษาในอดีตของ Head (1966) พบความแปรปรวนของการมีชีวิตรากต้นแอปเปิลในแต่ละฤดูกาลมีลักษณะที่แตกต่างกันซึ่ง พบว่า การมีชีวิตของรากต้นแอปเปิลมีอายุยาวนานมากที่สุดในช่วงฤดูหนาว แต่มีอายุลดลงเมื่อเข้าสู่ฤดูใบไม้ร่วง เช่นเดียวกับการศึกษาของ Forbes และคณะ (1997) ที่ศึกษาการมีชีวิตของรากต้น ryegrass (*Lolium perene*) พบว่า การมีอายุของรากจะสั้นลงเมื่ออุณหภูมิในดินเพิ่มสูงขึ้น สำหรับพืชที่เจริญเติบโตในเขตหนาวและมีความชื้นในอากาศสูง เช่น ต้นสนหอมพบการสร้างรากมีอัตราการลดลงในฤดูใบไม้ผลิเนื่องจากอุณหภูมิอากาศต่ำและอัตราการสังเคราะห์น้อย แต่เมื่อเปลี่ยนไปสู่ฤดูร้อนการสร้างรากมีอัตราเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่ในบางพื้นที่ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นหากปริมาณน้ำฝนมีน้อยพบอัตราการสร้างรากได้น้อย

อุณหภูมิของดินเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและสิ่งมีชีวิตในดิน อุณหภูมิในแต่ละชั้นดินที่ต่างกันจะไปมีผลต่อการแลกเปลี่ยนอากาศในดินชั้นต่างๆ ที่อยู่ติดกัน ความแน่นของดินปริมาณน้ำและอากาศในดิน เนื้อดิน เป็นต้น ล้วนเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการนำพาความร้อนในดิน เช่น ดินที่อัดตัวกันแน่นมีเนื้อดินละเอียดและความชื้นในดินสูงจะมีการนำพาความร้อนได้สูงอุณหภูมิของดินที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น ช่วยในการงอกของเมล็ด เมล็ดพืชต้องการระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการงอกแตกต่างกัน อุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไปจะกระทบกระเทือนต่อการงอกของเมล็ดได้ การดำเนินกิจกรรมของรากพืช เช่น การหายใจ การดูดอาหาร การแบ่งเซลล์ เป็นต้น ต้องการระดับอุณหภูมิบริเวณรอบ ๆ รากที่เหมาะสม การเกิดและการระบาดของโรคพืช ระดับอุณหภูมิและปัจจัยอื่นในดินมีผลต่อระดับความรุนแรงและแพร่ระบาดของเชื้อโรคในดินที่เป็นอันตรายกับพืชได้

3.3 ความชื้นในดิน

ผลของความชื้นในดินที่ประเมินในรูปของค่าศักย์ของน้ำในดินต่อการมีชีวิตของรากพืชพบว่า ผลกระทบของค่าศักย์ของน้ำในดินมีผลต่อการแผ่ขยายของรากพืช ซึ่งผลกระทบของค่าศักย์ของน้ำในดินยังขึ้นกับปัจจัยจากระยะเวลาและช่วงอายุของราก ในพื้นที่เหนือเส้นศูนย์สูตร การตอบสนองของรากพืชต่อระดับความชื้นในดินพบว่า ในฤดูหนาวการเจริญเติบโตของรากจะหยุดลงเนื่องจากอากาศที่หนาวเย็น (Tierney *et al.*, 2003) และระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ในฤดูร้อนการยืดยาวของรากจะหยุดชะงัก (Joslin *et al.*, 2001) เช่นเดียวกับการรายงานที่ศึกษากับพืชในเขตร้อนชื้นซึ่งพบว่าอัตราการเกิดรากและความยาวรากมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูฝนมากกว่าในช่วงฤดูแล้ง (Green *et al.*, 2005) รายงานการศึกษาของ M'Bou และคณะ (2008) ที่ศึกษาการเพิ่มความยาวรากของต้นยูคาลิปตัสกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในดินในประเทศคองโกพบว่า ความยาว

รากสัมพันธ์กับฤดูกาล คือ มีค่ามากที่สุดในช่วงฤดูฝนมากกว่าช่วงฤดูแล้งและพบในดินที่ระดับความลึก 4 m มากที่สุด จากการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในดินและอัตราการเพิ่มความยาวรากมีความสัมพันธ์กัน ($r = 0.93$) นอกจากนี้ ระดับน้ำในดินที่ควบคุมการเพิ่มความยาวรากแล้วยังพบว่า ระดับของแรงดันน้ำภายในเซลล์ของทั้งในลำต้นยูคาลิปตัสเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ทำหน้าที่ควบคุมการเพิ่มความยาวรากอีกด้วย โดยเฉพาะแรงดันเต่งส่วนปลายของหมวรากเป็นตัวควบคุมความยาวรากของต้นยูคาลิปตัส (Halter *et al.*, 1996)

ปริมาณของความชื้นดินที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นตัวชักนำให้พืชเพิ่มความยาวรากมากขึ้น (Block *et al.*, 2006) การศึกษาของ Imada และคณะ (2008) ทดลองถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้า *Populus alba* อายุ 1 ปี โดยมีการให้น้ำขังที่ระดับความลึก 30 cm เป็นระยะเวลา 30 วัน เปรียบเทียบกับทริตเมนต์ที่มีการให้น้ำขังที่อย่างต่อเนื่องพบว่า ต้น *P. alba* มีการสร้างรากเพิ่มขึ้นใหม่ในบริเวณที่มีอากาศในดินที่จุดความจุความชื้นสนามและการศึกษาต่อมาของ Imada และคณะ (2010) พบว่ารากของต้น *P. alba* ในทริตเมนต์ที่มีการควบคุมระดับน้ำในดินมีมวลชีวภาพของรากที่ระดับความลึก 0-10 และ 10-20 cm จากผิวดินมีค่ามากกว่าทริตเมนต์ที่มีระดับน้ำในดินขังที่ แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ

3.4 ธาตุอาหารในดิน

การศึกษาถึงผลของปริมาณธาตุอาหารในดินต่อการมีชีวิตของรากพืชโดยการรายงานของ Pregitzer และคณะ (1993) ได้ให้ปุ๋ยไนโตรเจนแก่ต้น *Prunus* มากขึ้นพบว่า มีอัตราการสร้างรากใหม่และการเสื่อมสภาพของรากเก่าอย่างรวดเร็ว การมีชีวิตของรากที่ได้รับปุ๋ยไนโตรเจนพบว่า มีอายุสั้นเมื่อเปรียบกับรากที่เจริญเติบโตในสภาพทั่วไปและการศึกษาของ Serrasolses (1994) ในพื้นที่ป่าเขตเมดิเตอร์เรเนียนยังพบว่า ปริมาณของไนโตรเจนในดินที่ระดับความลึก 5-20 cm จากผิวดินมีปริมาณมากที่สุด ถึง 71% และมีปริมาณลดลงในดินที่ระดับความลึกมากขึ้นและกระบวนการเปลี่ยนรูปของธาตุอาหารในรูปอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ในดินโดยแบคทีเรียมีอัตราเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในดินเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูร้อน กระบวนการที่เกิดโดยแบคทีเรียหรือสิ่งมีชีวิตในดินเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้การหมุนเวียนของธาตุอาหารในดินที่ระดับความลึกต่างๆ เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

รายงานการศึกษาของ Pregitzer และคณะ (2000) แสดงให้เห็นว่าหากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศและปริมาณของไนโตรเจนในดินมีปฏิสัมพันธ์โดยตรงต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา การเจริญเติบโต และการหมุนเวียนคาร์บอนในดินของรากขนาดเล็กของต้น *Populus tremuloides* โดยหากระดับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเพิ่มสูงขึ้นและปริมาณของไนโตรเจนในดินมีปริมาณมากเป็นส่วนช่วยให้การเจริญเติบโตของรากและการสร้างรากใหม่มีอัตรา

เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว พื้นที่รากที่เพิ่มมากขึ้นทำให้การดูดซึมน้ำและธาตุอาหารของต้น *Populus tremuloides* เพิ่มสูงขึ้นด้วยและมีอัตราการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ การศึกษาของ Prasannakumari และคณะ (2010) พบว่า การให้ธาตุโพแทสเซียมมีส่วนช่วยให้ต้นกล้ายางพารามีความทนทานต่อสภาวะแห้งแล้งได้และโพแทสเซียมยังช่วยรักษาระดับของค่าศักย์ของน้ำในใบยางและปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบเมื่อเปรียบเทียบกับทรีตเมนต์ควบคุมและธาตุอาหารในดินยังมีผลต่อลักษณะทางสถาปัตยกรรมของรากกล้าคือ การปลูกทดสอบต้น *Arabidopsis* ในดินที่ขาดธาตุฟอสฟอรัสการเปลี่ยนแปลงของรากพืชที่เห็นได้ชัดเจน คือ พืชมีการสร้างขนรากบริเวณส่วนปลายรากโดยเพิ่มความหนาแน่นและความยาวของขนราก (Ma *et al.*, 2001; Bates and Lynch, 1996) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับต้นที่ปลูกในดินที่มีฟอสฟอรัสในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช

4. การตอบสนองของรากพืชต่อสภาพแวดล้อม

การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดรากใหม่ และย่อยสลายของรากพืชซึ่งมีส่วนสำคัญต่อวัฏจักรในระบบนิเวศ (Eissenstat *et al.*, 2000) พื้นที่ป่าไม้ตามธรรมชาติพบว่า การหมุนเวียนของราก (root turnover) ตั้งแต่การสร้างรากใหม่ พัฒนาการของราก ตลอดจนสิ้นอายุขัยและเสื่อมสลายตามธรรมชาติ เป็นกระบวนการที่สำคัญต่อการสร้างอินทรีย์วัตถุมากถึง 70 เปอร์เซ็นต์ (Bloomfield *et al.*, 1996; Norby and Jackson, 2000) ดังนั้น กระบวนการดังกล่าวจึงเป็นตัวแปรสำคัญต่อกระบวนการตรึงและการกักเก็บคาร์บอนในดิน (Nadelhoffer, 2000)

ภูมิภาคเขตร้อนขึ้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิดิน ปริมาณน้ำฝน การหมุนของธาตุอาหารในดิน และอัตราการคายระเหยน้ำตามฤดูกาล เป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมรูปแบบการเจริญเติบโตของรากพืช (Vogt *et al.*, 1996) เช่น การตอบสนองของรากพืชพบว่า อัตราการเกิดรากสูงสุดในฤดูใบไม้ผลิหรือหลังจากการผลัดใบในช่วงฤดูร้อน (Burke and Raynal, 1994; Hendrick and Pregitzer, 1993) การสะสมมวลชีวภาพของรากมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูใบไม้ผลิและฤดูร้อน (Chen *et al.*, 2004) มวลชีวภาพของรากที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดขึ้นสอดคล้องกับระดับของความชื้นในดินและปริมาณธาตุอาหารในดินอยู่ในระดับที่รากพืชดูดซึมน้ำไปใช้ในช่วงผลิใบใหม่ (Chapin *et al.*, 2002) นอกจากนี้ มวลชีวภาพที่เพิ่มสูงขึ้นยังเป็นตัวบ่งชี้อัตราการตรึงและการสะสมคาร์บอนของรากพืช (Nadelhoffer and Raich, 1992)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรากพืช (root traits) ที่ตอบสนองภายใต้สภาวะพืชขาดน้ำพบว่า การปรับตัวของพืชเพื่ออยู่รอดปรากฏ 2 รูปแบบ คือ การหลีกเลี่ยงหรือการทนทานต่อสภาวะขาดน้ำแต่กลไกการปรับตัวเริ่มจากการสร้างฮอร์โมน ABA ที่กระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

ระดับของกระบวนการเมตาบอลิซึมในเซลล์ที่ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำ การปรับเปลี่ยนรูปแบบสภาพการนำน้ำที่ลำเลียงผ่านระหว่างผนังเซลล์ของรากหรือการปรับตัวของลักษณะเฉพาะของรากเกิดการปัจจัยส่งเสริมของจุลินทรีย์ในดินที่ช่วยให้พืชมีชีวิตรอดอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม (Brunner *et al.*, 2015)

อย่างไรก็ตาม พลวัตของรากพืชที่ตอบสนองต่อฤดูกาลที่แตกต่างกันไม่เพียงเกิดจากปัจจัยควบคุมภายนอกจากสภาพแวดล้อมเท่านั้น แต่ยังรวมถึงปัจจัยภายในที่เกิดจากกระบวนการตอบสนองของพืชทางสรีรวิทยาอีกด้วย ดัชนีชี้วัดของรากที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้การทำหน้าที่ของรากพืชและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมในแต่ละฤดูกาล ได้แก่ ความยาวรากต่อหน่วยพื้นที่ (Root length density; RLD) และความยาวรากจำเพาะ (Specific root length; SRL) ซึ่งจะแสดงค่าในระดับที่ต่างกันตลอดช่วงอายุของรากพืชแต่ละชนิดและยังเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนของราก (Robinson *et al.*, 2003)

ระบบรากของพืชที่ประกอบด้วยรากขนาดใหญ่และรากขนาดเล็กเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช การเปลี่ยนแปลงของรากพืชขนาดเล็ก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ≤ 2 มม.) พบว่า เป็นส่วนสำคัญต่อการทำหน้าที่หาอาหาร การดูดซึมน้ำ โดยอัตราการเกิดรากใหม่หรือการตายไปของรากพืชขนาดเล็กมีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นพลวัต กล่าวคือ มีการสร้างรากขึ้นใหม่ทดแทนรากเดิมที่เสื่อมสภาพหรือถูกทำลายตามธรรมชาติและเกิดขึ้นเป็นวัฏจักรหมุนเวียนตลอดเวลา การเกิดหรือการเสื่อมสภาพของรากนั้นเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการหมุนเวียนธาตุอาหารในดิน (Nadelhoffer and Reich, 1992) และการตรึงคาร์บอนในดินในรูปของอินทรีย์วัตถุ (Reich and Bolstad, 2001; Shibata *et al.*, 2005) การแผ่ขยายของระบบรากพืช (root branching) เป็นกระบวนการที่สำคัญต่อการมีชีวิตของพืชภายใต้สภาวะที่ปัจจัยที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชในดินมีอยู่จำกัด เช่น ความชื้นในดิน ธาตุอาหารและอินทรีย์วัตถุในดิน เป็นต้น ปัจจัยดังกล่าวมีการแปรเปลี่ยนเป็นวัฏจักรอยู่ตลอดเวลาและขึ้นกับอิทธิพลของสภาพแวดล้อมที่เป็นตัวควบคุม

การศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการเกิดและการตายของรากขนาดเล็ก (fine root production and fine root mortality) ก่อนหน้านี้พบว่า มีความแปรปรวนขึ้นกับอิทธิพลจากปัจจัยภายในจากชนิดของพืช พันธุกรรมและปัจจัยภายนอกจากสภาพแวดล้อม การจำแนกลักษณะของพลวัตของรากพืชอาจใช้ช่วงของฤดูกาลในรอบปีเป็นหลักเพื่อให้สามารถเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนหรืออาจใช้ลักษณะจำเพาะของพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำฝนและอุณหภูมิที่แตกต่างกันในการจำแนกพลวัตของราก (Tierney *et al.*, 2003) พื้นที่เขตหนาวที่มีปริมาณน้ำในดินเพียงพอการเกิดรากใหม่อาจมีอัตราสูงสุดในช่วงปลายฤดูร้อนหรืออาจมีการสร้างรากเพิ่มขึ้นในฤดูใบไม้ผลิหรือเริ่มเข้าฤดูร้อน หรืออาจมีอัตราลดลงเมื่อเข้าสู่ฤดูร้อน (Ruess *et al.*, 1998) ในพืชเขตหนาวที่ขึ้นตาม

ธรรมชาติพบว่าในช่วงฤดูร้อนค่าศักย์ของน้ำในดินและอุณหภูมิดินเป็นปัจจัยภายนอกที่มีผลควบคุมพลวัตของรากพืช (Teskey and Hinckley, 1981) จึงพบว่า ปัจจัยของฤดูกาลมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อพลวัตของรากพืชในรอบปีและโดยเฉพาะในรากพืชขนาดเล็กจะมีการตอบสนองต่อฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลงได้เร็วกว่ารากขนาดใหญ่ระดับของการตอบสนองมีปัจจัยจากลักษณะทางพันธุกรรมของพืช อุณหภูมิตลอดจนลักษณะความสัมพันธ์ภายในพืช เช่น ลำต้นกับราก (Lyr and Hoffman, 1967)

นอกจากนี้รูปแบบการเจริญเติบโตของรากขนาดพืชเล็กโดยทั่วไปพบว่า การแผ่ขยายของรากจะลดลงในดินที่มีระดับความลึกมากขึ้น (Burke and Raynal, 1994) ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณของธาตุอาหารในดินมีอยู่น้อยหรือสัดส่วนของดินเหนียวดินร่วน ความหนาแน่นดิน การเคลื่อนที่ของอากาศในดิน ตลอดจนปริมาณของอินทรีย์วัตถุในดินมีอยู่น้อย นอกจากนี้ปัจจัยของฤดูกาลยังเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ในดินทำให้เกิดความแปรปรวนในดินที่ระดับความลึกต่างกันด้วย (Canadell *et al.*, 1996) ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างของระบบรากพืชรวมทั้งการทำหน้าที่ของรากพืชขนาดเล็กเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละฤดูกาล (Hutching and John, 2003) ค่าความหนาแน่นของความยาวราก (Root Length Density; RLD) และค่าความยาวรากจำเพาะ (Specific Root Length; SRL) สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดระดับความเป็นประโยชน์ในดินซึ่งจะแสดงในลักษณะของการเจริญเติบโตของรากพืชขนาดเล็กที่การเปลี่ยนแปลงในแต่ละฤดูกาล จากการรายงานของ Schenk and Jackson (2002) กล่าวว่า มวลชีวภาพของรากขนาดเล็กจะมีค่าลดลงเมื่อความลึกดินเพิ่มขึ้นและสัมพันธ์กับระดับความเป็นประโยชน์ในดินจะมีค่าลดลงในดินที่ลึกมากขึ้น เช่นเดียวกับ Cheng และคณะ (2006) พบว่า การเจริญเติบโตของรากต้นสน (*Larix gmelinii* L.) ในพื้นที่เขตหนาวมีค่าความหนาแน่นของความยาวราก (RLD) และค่าความยาวรากจำเพาะ (SRL) พบมากที่สุดชั้นผิวดินซึ่งทำหน้าที่ในการตรึงอาหารแต่ในดินที่ระดับความลึก 30 cm พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากมีขนาดใหญ่กว่าและมีความหนาแน่นน้อยกว่าชั้นผิวดินโดยมีหน้าที่ในการลำเลียงน้ำส่งผ่านไปยังส่วนของลำต้นเป็นหลัก (Burton *et al.*, 2000)

ความสัมพันธ์ของฤดูกาลต่อการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของรากต้นสนยังพบว่า ช่วงฤดูใบไม้ผลิประมาณเดือนพฤษภาคม พบความยาวราก มวลรากมีค่าสูงสุดและสนเริ่มแตกใบใหม่โดยช่วงนี้พืชมีความต้องการใช้อาหารเพื่อกระบวนการเจริญเติบโตจึงกระตุ้นให้รากต้องหาอาหารในดินแต่ในการศึกษากับพืชในเขตร้อนขึ้นพบว่าระยะเวลาระหว่างการแตกใบใหม่กับการเกิดรากใหม่พบว่ารากจะเกิดก่อนที่พืชเริ่มแตกใบ (Eissenstat and vom Rees, 1994) โดยเป็นกระบวนการที่พืชจะต้องเตรียมอาหารสำรองไว้เพื่อใช้ในการสร้างใบใหม่ ซึ่งพลังงานที่ได้จากการสังเคราะห์แสงก่อนที่พืชจะผลัดใบจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์โบไฮเดรตและเก็บสะสมไว้ที่รากก่อนที่พืชจะทิ้งใบแก่และภายหลังจากพืชแตกใบใหม่คาร์โบไฮเดรตที่เก็บสะสมในรากก่อนหน้านั้นจึงถูกดึงมาใช้

และใบที่เกิดใหม่จะเริ่มกระบวนการสังเคราะห์แสงอีกครั้ง (Pregitzer, 2003) เพื่อสร้างพลังงานต่อไป แต่เมื่อใบที่เกิดใหม่ส่วนหนึ่งจะใช้คาร์โบไฮเดรตที่เก็บสำรองไว้ในรากมาใช้ในระยะแรกที่ยังพัฒนาไม่เต็มที่ทำให้รากที่เก็บสะสมคาร์โบไฮเดรตเสื่อมสภาพจนกระทั่งตายในที่สุดและการตายของรากจะเกิดขึ้นอย่างช้า (Aderson *et al.*, 2003) จากนั้นเมื่อเข้าสู่ช่วงฤดูใบไม้ร่วง (autumn) การเจริญเติบโตทางด้านลำต้นของต้นสน (*Larix gmelini*) ลดลงในเดือนสิงหาคมและเริ่มทิ้งใบช่วงเดือนกันยายน ภายหลังจากใบร่วงแล้วนั้น พืชจะเก็บสะสมแป้งและคาร์โบไฮเดรตไว้ที่รากเพื่อเป็นแหล่งอาหารเมื่อเข้าสู่ช่วงฤดูใบไม้ผลิต่อไปและในช่วงที่ใบร่วงพบว่า การเจริญเติบโตของรากลดลงและค่อยๆ หมดสภาพเนื่องจากความต้องการใช้อาหารของพืชลดลง

5. ระบบรากของยางพารา

ยางพาราเป็นพืชยืนต้นที่มีระบบรากแก้ว รากแขนง รากฝอยประกอบรวมกัน ลักษณะหรือรูปแบบการเจริญเติบโตของระบบต้นยางพาราพบว่า มีความแตกต่างกันขึ้นกับภูมิประเทศที่ปลูก ลักษณะของดิน การเลือกใช้วัสดุปลูกในการขยายพันธุ์ แต่ข้อมูลการศึกษาเกี่ยวกับระบบรากยางพาราทั้งรูปแบบการเจริญเติบโตของรากหรือเปลี่ยนแปลงในรอบปี ในพื้นที่ปลูกแตกต่างกันมีการศึกษาเพียงเล็กน้อย และข้อมูลพลวัตของรากพาราในรอบปียังไม่ชัดเจน

การศึกษาของ Pathiratna (2006) เกี่ยวกับการเจริญเติบโตของรากยางพาราในประเทศศรีลังการายงานไว้ว่าการเพิ่มจำนวนของรากยางพารามีความสัมพันธ์กับอายุของต้นยางพารา คือ เมื่อต้นยางมีอายุ 2-3 ปี การแผ่ขยายของรากหาอาหารขนาดเล็กพบมากระยะห่างจากโคนต้นยางพาราประมาณ 2 m และในดินที่ระดับความลึก 20 cm ในช่วงอายุ 3-4 ปี จะพบว่า เป็นช่วงที่มีความหนาแน่นของรากมากที่สุดโดยพบในระยะปลูกระหว่างต้น ($207.8 - 312.3 \text{ cm cm}^{-2}$) แต่เมื่อต้นยางพารามีอายุเพิ่มขึ้นในปีที่ 7 กลับพบว่า ความหนาแน่นของรากลดลงและในปีที่ 18 พบความหนาแน่นของรากมีปริมาณค่อนข้างคงที่ (217.5 cm cm^{-2}) และภายหลังจากที่ต้นยางพาราผลิใบใหม่พบว่า ความหนาแน่นของรากยางพารามีจำนวนมากในชั้นผิวดินที่ระดับความลึก 20 cm โดยมีปัจจัยที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของรากยางพารา คือ ปริมาณความชื้นในแปลงปลูกยางพาราที่ค่อนข้างสูง การย่อยสลายมูลของใบยางพาราและอินทรีย์วัตถุทำให้มีปริมาณของธาตุอาหารสะสมในดินเพิ่มขึ้นเป็นตัวกระตุ้นให้รากยางพาราเพิ่มปริมาณและความยาวมากขึ้นความหนาแน่นของทรงพุ่มใบยางพาราที่ผลิใบใหม่ช่วยชะลอการคายระเหยน้ำจากดินไปสู่บรรยากาศและช่วยให้เกิดสภาวะอากาศเฉพาะในพื้นที่ระดับโคนต้นยางพารา (Micro climate) ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของรากและต้นยางพารา นอกจากนี้การปลูกพืชคลุมดินและพืชร่วมยาง เช่น เพอราเรียหรือต้นอบเชยมีส่วนช่วยทำให้ระดับของธาตุอาหารและอินทรีย์วัตถุที่ได้จากใบและลำ

ต้นที่ย่อยสลายเพิ่มขึ้น จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของรากยางพาราบริเวณชั้นผิวดิน อีกทั้งการใส่ปุ๋ยคอกยังช่วยกระตุ้นการสร้างรากของต้นยางพาราเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

การศึกษาของ Pierret และคณะ (2007) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดอาการหน้าตายตายหนึ่ง (TPN) ในยางพาราพันธุ์ RRIM 600 พื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยกับลักษณะการเจริญเติบโตของราก พบว่าในดินที่ระดับความลึกประมาณ 25 cm ต้นยางพาราที่สมบูรณ์พบการเจริญเติบโตของรากยางพารามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับต้นยางที่ปรากฏอาการหน้าตายตายหนึ่ง แต่รายงานการศึกษายังไม่สามารถระบุได้ถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอาการหน้าตายตายหนึ่งได้อย่างชัดเจนและการเกิดอาการดังกล่าวมักมีปัจจัยจากสภาพแวดล้อมเกี่ยวข้องโดยตรงอีกทั้งการศึกษาไม่ได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของต้นยางพาราทั้งการเจริญเติบโตทางลำต้น ผลผลิต และระบบรากอย่างต่อเนื่อง ซึ่งข้อสรุปที่ได้ยังไม่บ่งชี้ว่าความสัมพันธ์ของโรคที่เกิดขึ้นกับลักษณะของสายพันธุ์ยางพารา

6. พลวัตของรากยางพาราในรอบปี

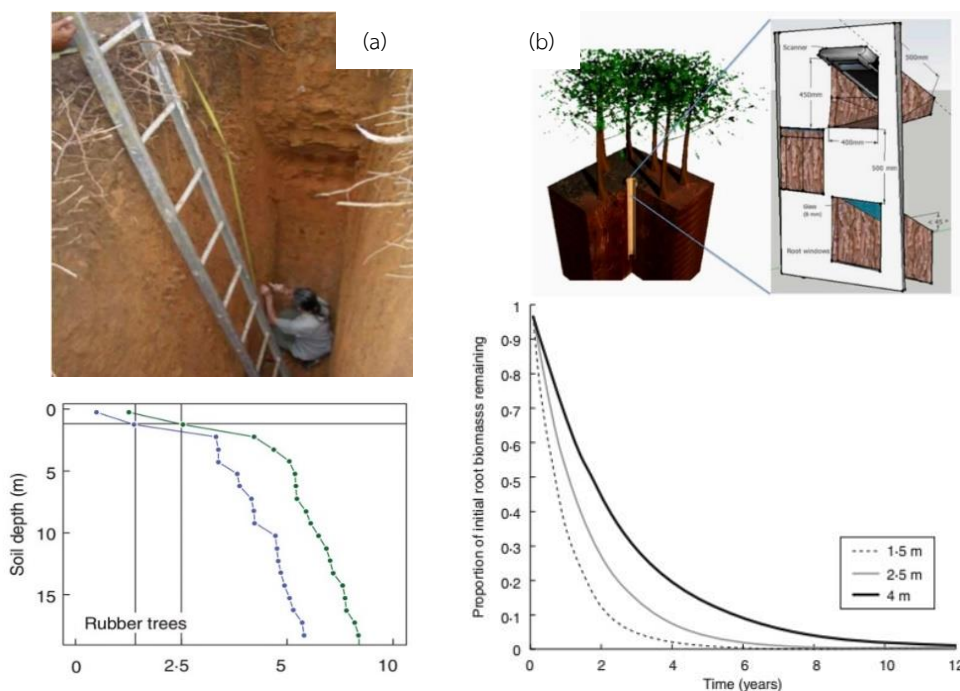
ยางพาราเป็นไม้ยืนต้นเจริญเติบโตในเขตร้อนชื้น มีการผลัดใบช่วงฤดูร้อน ข้อมูลการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างพลวัตของยางพาราที่ตอบสนองกับสภาพแวดล้อมมีการศึกษาเพียงเล็กน้อย โดยการศึกษาของ Chairungsee และคณะ (2013) ทดลอง ณ ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา จังหวัดฉะเชิงเทรา ศึกษาโดยใช้ต้นยางพาราอายุ 14 ปี ร่วมกับการใช้เทคนิคการศึกษารากพืชแบบเปิดหน้าตัดดิน (field rhizotron) เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของรากยางพาราขนาดเล็กในรอบปี พบว่า ในฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-มีนาคม) การตอบสนองของรากยางพาราจะหยุดการเจริญเติบโตชั่วคราวแต่เมื่อเข้าสู่ฤดูฝน (เมษายน-ตุลาคม) การตอบสนองของรากยางพารามีความยาวรากเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นผลของอิทธิพลปริมาณน้ำฝนและฤดูกาลเป็นปัจจัยควบคุมการตอบสนองของรากต้นยางพาราตามฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลงในรอบปี อย่างไรก็ตาม รายงานการศึกษายังไม่สรุปแน่ชัดถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนต่อการตอบสนองของรากยางพาราในช่วงระยะแต่ละสัปดาห์

รายงานการศึกษาของ Maeght และคณะ (2015) ใช้การฝังท่อซีเมนต์ลึก 4.5 m และเจาะช่องสำหรับใส่เครื่องสแกนเนอร์ เพื่อบันทึกภาพรากยางพาราภายในท่อซีเมนต์ หรือเรียกว่าเทคนิคการสแกนรากพืช (root scanner) โดยศึกษาที่จังหวัดบุรีรัมย์ ผลการศึกษาอิทธิพลของฤดูกาลในรอบปีต่อการตอบสนองของยางพาราในด้านการเกิดรากใหม่ และการหมุนเวียนของรากในดินที่ระดับความลึก 0-4.5 m พบว่า อัตราการเกิดรากใหม่สูงสุดในดินที่ระดับความลึก 0.5-2 m ปรากฏหลังจากฤดูฝนผ่านไป 3 เดือน ในขณะที่การเกิดรากใหม่ในดินที่ระดับความลึกมากกว่า 2-4.5 m ไม่พบความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนและการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล นอกจากนี้ ผลการศึกษาได้รายงาน

ถึงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่มีอายุ 30 เดือน สามารถเจริญเติบโตอยู่รอดได้ที่ระดับผิวดินและที่ระดับความลึก 2 m

การศึกษาของ Gonkhamdee และคณะ (2009) ใช้เทคนิค root window ติดตั้งในท่อซีเมนต์ลึก 4.5 m จากพื้นดินศึกษาพลวัตของระบบรากยางพาราในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยระยะเวลา 17 เดือน ที่ระดับความลึก 0-4.5 m จากพื้นดิน พบว่าการเจริญเติบโตของรากยางพาราที่ระดับความลึก 0-150 cm มีความสัมพันธ์ทางบวกกับปริมาณน้ำฝนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การเจริญเติบโตของรากที่ระดับความลึก 150-450 cm ค่าความหนาแน่นของ ความยาวราก (RLD) พบบริเวณผิวดินที่ระดับ 0-50 cm และมีค่าลดลงที่ระดับความลึกเพิ่มขึ้น การเจริญเติบโตของรากยางพาราที่ระดับความลึกมากกว่า 150 cm พบว่า รากที่ปรากฏใช้ระยะเวลา นานกว่ารากที่ระดับความลึก 0-50 cm ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากปริมาณของน้ำฝนมีผลต่อการ เจริญเติบโตของรากยางพาราบริเวณผิวดินมากที่สุดซึ่งเป็นรูปแบบการเจริญเติบโตของพืชในพื้นที่เขตร้อนชื้นทั่วไป (Green *et al.*, 2005)

Pierret และคณะ (2016) ได้รายงานการศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของรากยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่เปิดกรีดในพื้นที่จังหวัดสงขลาโดยใช้การเปิดหน้าดินที่ระดับความลึก 0-4 m จากผิวดินรวมกับการใช้เทคนิคเจาะดินแบบลึก (Deep soil coring) ที่ระดับความลึก 0-15 m พบว่า การแผ่ขยายของรากและการหยั่งลึกของรากยางพาราสามารถพบได้ถึงที่ระดับความลึก 15 m และมีการเจริญเติบโตของรากความหนาแน่นของรากพบมากที่สุดที่ระดับความลึก 1 m จากผิวดินและมีมวลรากรวมประมาณ 2.5 Mg C/ha (ภาพที่ 2a) การศึกษาเพิ่มเติมของ Maeght และคณะ (2013) ศึกษาการเจริญเติบโตของรากยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในจังหวัดบุรีรัมย์โดยการติดตั้งท่อซีเมนต์ขนาดใหญ่ในดินที่ระดับความลึก 0-4 m จากผิวดินและใช้เทคนิคการสแกนรากโดยการเปิดผนังท่อซีเมนต์ พบว่า การหยั่งลึกของรากยางพาราพบมากที่สุดที่ระดับความลึก 2.5 m รองลงมาที่ระดับความลึก 1 m และพบรากน้อยที่สุดที่ระยะ 4 m (ภาพที่ 2b)



ภาพที่ 2 การศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของรากยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่จังหวัดสงขลาโดยวิธีการเปิดหน้าดินลึก 0-4 m (a) และการศึกษาที่จังหวัดบุรีรัมย์โดยเทคนิคสแกนภาพรากยางพาราที่ระดับความลึก 0-4 m (b)

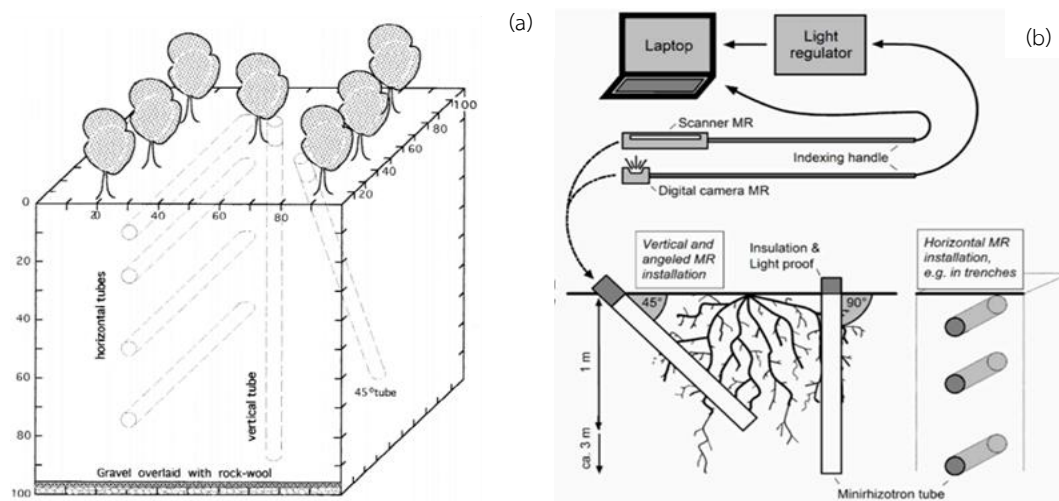
ที่มา : Pierret และคณะ (2016); Maeght และคณะ (2013)

7. การศึกษารากพืชด้วยเทคนิคมินิโรโซตรอน

การเจริญเติบโตของรากพืช ประกอบด้วยกระบวนการที่ซับซ้อนและมีรูปแบบเฉพาะของพืชแต่ละสายพันธุ์ ตั้งแต่อดีตนักวิจัยได้พัฒนาเครื่องมือ อุปกรณ์ และวิธีการศึกษารากพืชเพื่อเข้าใจถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลงของรากพืชที่เกิดขึ้นตั้งแต่พืชเจริญเติบโตจนกระทั่งเสื่อมสลายตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตามอิทธิพลของสภาพแวดล้อมที่หลากหลายเป็นข้อจำกัดที่สำคัญทำให้ต้องมีการปรับปรุงและประยุกต์วิธีการศึกษารากพืชมากกว่าหนึ่งวิธีการเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ อีกทั้งวิธีการต้องเหมาะสมกับข้อมูลรากที่ต้องการศึกษา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของรากอาจเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

Hendrick และ Pregitzer (1992) ให้ข้อบ่งชี้ว่าการเกิดรากและการตายของรากพืชเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง การศึกษาโดยการทำลายตัวอย่างรากพืชใช้วิธีการเจาะดิน (sequential soil coring) อาจทำให้ค่าที่ได้การประเมินต่ำกว่าค่าที่แท้จริง Brown and Upchurch (1987) ได้ให้คำนิยามวิธีการศึกษารากพืชโดยวิธีการมินิโรโซตรอนเอาไว้ว่าเป็นเทคนิคที่ใช้หลักการมองเห็นและติดตามการเปลี่ยนแปลงของรากพืชได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน โดยใช้การบันทึกภาพทั้งภาพเคลื่อนไหวและภาพนิ่งจากกล้องวิดีโอหรือกล้องถ่ายรูป (Richards, 1984) ผ่านท่อที่

ทำจากวัสดุโปร่งใสสามารถมองเห็นทะลุผ่านได้ เช่น อะคริลิก Plexiglas แก้ว เป็นต้น ซึ่งท่อที่ติดตั้งในดิน อาจมีรูปร่างเป็นท่อสี่เหลี่ยม ทรงกลม หรือเป็นลูกบาศก์ (van Noordwijk *et al.*, 1985) มีผลต่อการมองเห็นรูปร่างหรือคุณภาพของภาพที่ได้ การติดตั้งท่อมินิโรโซตรอนมีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงนั้น คือ มุมที่ติดตั้งกับพื้นดินซึ่งอาจฝังท่อในระนาบเดียวกันกับผิวดิน (Dubach and Russelle, 1995) แนวตั้งทำมุม 90 องศา กับพื้นดิน (Bragg *et al.*, 1983) หรือติดตั้งทำมุม 30 องศา (Upchurch and Ritchie, 1983) 45 องศา (Sanders and Brown, 1978) หรือ 60 องศา กับพื้นดิน (Johnson *et al.*, 1995) และในบางการศึกษาพบว่า การฝังท่อทำมุม 90 องศา กับพื้นดินมีความเหมาะสมมากกว่าการฝังท่อในแนวระนาบเมื่อใช้ประเมินการแผ่กระจายของราก ทั้งนี้การศึกษารากพืชในสภาพแปลงทดลอง การฝังท่อแบบทำมุมกับพื้นดินยังนิยมใช้แพร่หลายกว่าการฝังท่อแบบแนวระนาบ เนื่องจากมีความสะดวกในการปฏิบัติงาน ซึ่งการฝังท่อทำมุม 35 และ 45 องศา เป็นวิธีที่นักวิจัยเลือกใช้มากที่สุดและมีความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ทดลองเกือบทุกสภาพ เช่น ทะเลทราย พื้นที่ลุ่มน้ำท่วมขัง พื้นที่ป่าตามธรรมชาติหรือแม้แต่ในแปลงปลูกพืชทั่วไป (ภาพที่ 3)



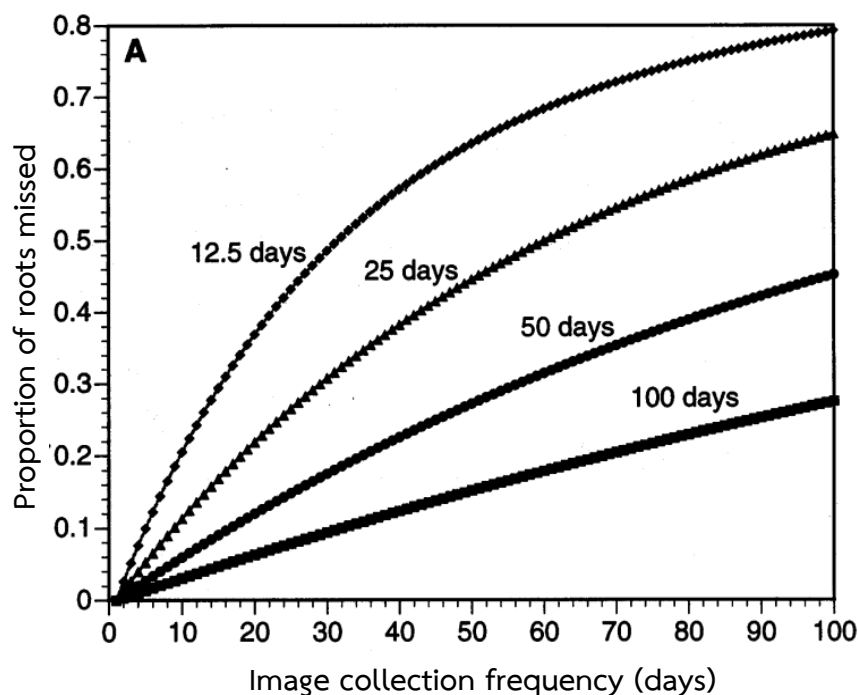
ภาพที่ 3 ตัวอย่างการศึกษารากพืชโดยติดตั้งท่อมินิโรโซตรอนที่ทำมุมในแนวนอน แนวตั้งฉาก และมุม 45 องศา กับพื้นดิน (a) ส่วนประกอบของอุปกรณ์มินิโรโซตรอนที่ใช้บันทึกภาพรากพืช ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและบันทึกข้อมูลภาพ กล้องถ่ายภาพรากและอุปกรณ์ควบคุมไฟส่องสว่าง (b)

ที่มา: Ephrath และคณะ (1999); Vamerli และคณะ (2012); Meaght และคณะ (2013)

จำนวนท่อที่ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับรากพืชนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรของสภาพแวดล้อมนั้น คือ ความหลากหลายของพื้นที่ ลักษณะของชุดดิน หรือความลาดชันของพื้นที่โดยหากการศึกษาในสภาพแปลงปลูกที่ทราบข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับชุดดิน ชนิดพืชและความลาดชัน จำนวนท่อมินิไรโซทรอนที่ใช้ศึกษาอาจใช้เพียง 5-6 ท่อต่อหนึ่งการทดลองซึ่งหากต้องการศึกษาในสภาพธรรมชาติหรือแปลงปลูกพืชแบบผสมผสานซึ่งมีพืชหลากหลายชนิดควรเพิ่มจำนวนท่อมินิไรโซทรอนที่ศึกษาให้เพิ่มมากขึ้น เพื่อใช้แทนจำนวนซ้ำการทดลองเป็นส่วนช่วยให้ข้อมูลการศึกษาเกี่ยวกับรากมีความถูกต้องลดความแปรปรวนที่จะเกิดขึ้นหรืออาจใช้เกณฑ์จำนวนท่อเพิ่มขึ้นตามความหลากหลายของสภาพแวดล้อมและชนิดพืชที่ศึกษา

การบันทึกภาพรากพืชโดยใช้กล้องดิจิตอลที่สามารถบันทึกได้ทั้งในรูปแบบภาพเคลื่อนไหวและภาพนิ่ง หลักสำคัญอีกประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ ความคมชัดและตำแหน่งที่บันทึกของภาพถ่ายราก เนื่องจากในการแปรผลภาพถ่ายหรือภาพเคลื่อนไหวของรากจะต้องใช้การสังเกตและวิเคราะห์รากที่ได้จากภาพ ซึ่งความคมชัดของภาพถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่อข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของรากพืช การตั้งค่าความละเอียดของภาพถ่ายต้องมีความละเอียดที่เพียงพอที่สามารถใช้จำแนกหว่างรากเดิมกับรากที่เกิดขึ้นใหม่หรือรากที่มีชีวิตกับรากที่ตายโดยใช้ดัชนีการเปลี่ยนแปลงของสีเป็นตัวประเมิน

การแปรผลจากภาพถ่ายเป็นข้อมูลการเจริญเติบโตของรากจะใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยคอมพิวเตอร์ (Smucker *et al.*, 1987) หรืออาจใช้วิธีนับจุดตัดของรากบนหน้าจอหรือจากภาพถ่าย (Vos and Groenwold, 1987) ส่วนความถี่ในการบันทึกภาพ Taylor (1987) สรุปว่าจากการศึกษากับพืชในแปลงทดลอง ความถี่ในการบันทึกภาพจะขึ้นกับตัวแปรที่ต้องการศึกษา ซึ่งอาจบันทึกภาพทุก ๆ สัปดาห์ (Forbes *et al.*, 1997) ทุก ๆ 2 สัปดาห์ (Thomas *et al.*, 1999) ทุก ๆ 4 สัปดาห์ (Weber and Dry, 1996) หรือเว้นช่วงประมาณ 6-16 สัปดาห์ (Day *et al.*, 1996) (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 ความแปรผันระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการบันทึกภาพถ่ายรากกับข้อมูลรากที่บันทึกได้
ที่มา : ดัดแปลงจาก Johnson และคณะ (2001)

นอกจากนี้ ข้อควรคำนึงในการติดตั้งท่อมินิไรโซทรอนอีกประการหนึ่ง คือ การปฏิบัติงานต้องลดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมโดยรอบพื้นที่ศึกษาน้อยที่สุดเนื่องจากพื้นที่ติดตั้งท่อมินิไรโซทรอนอาจมีรากที่เจริญเติบโตอย่างหนาแน่น การขุดดินหรือแรงกระทบกระเทือนต่อดินหรือพืชอาจส่งผลให้การเจริญเติบโตทางลำต้นหรือระบบรากของพืชได้รับความเสียหายได้ วิธีการศึกษารากพืชด้วยเทคนิคมินิไรโซทรอนยังสามารถติดตามและคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงของรากพืชได้อย่างต่อเนื่องโดยข้อมูลศึกษาได้ทั้งในเชิงปริมาณ เช่น ความยาวราก ความหนาแน่นราก พลวัตของราก การแผ่กระจายและความลึกของราก และยังสามารถใช้จำแนกลักษณะทางโครงสร้างของระบบรากพืชชนิดต่างๆ ได้ (McMicheal and Taylor, 1987) ส่วนข้อมูลเชิงคุณภาพที่ได้ประกอบด้วย สีของราก ขนาดของรากและการเสื่อมสภาพของราก (Hendrick and Pregitzer, 1992; Lussenhop *et al.*, 1991) อีกทั้งเทคนิคนี้มีประสิทธิภาพอย่างมากในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรากที่เกิดปัจจัยจากสภาพแวดล้อมทั้งในระบบนิเวศและพืชในพื้นที่เกษตรกรรม เช่น ปุ๋ย สภาวะน้ำท่วมหรือแห้งแล้ง ยาฆ่าแมลงหรือสารกำจัดวัชพืช การไถพรวนดินหรือการตัดแต่งทรงพุ่มพืช เป็นต้น (Pregitzer *et al.*, 1995) ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบวิธีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรากพืชด้วยเทคนิคมินิไรโซทรอนกับวิธีการอื่น ๆ (Majdi, 1996) เทคนิคมินิไรโซทรอนมีข้อดีในด้านการศึกษาระบบรากอย่างต่อเนื่องและสามารถเก็บบันทึกข้อมูลในรูปแบบของข้อมูลดิจิทัลที่มีความสะดวกในการ

นำไปแปรผลและที่สำคัญ คือ สามารถลดผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของระบบรากพืชและโครงสร้างดิน

ดังนั้น การศึกษาการตอบสนองของยางพาราที่แสดงออกส่วนบนดิน (ลำต้น และ ใบ) และส่วนที่อยู่ใต้ดิน (ราก) เพื่อเข้าใจถึงการตอบสนองลักษณะทางสรีรวิทยาของยางพาราภายใต้สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น สภาวะขาดน้ำ น้ำท่วมขัง จะเป็นประโยชน์ต่อการจัดการสวนยางในอนาคต ภายใต้ความแปรปรวนของสภาวะภูมิอากาศที่จะทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

1. ประเมินการเปลี่ยนแปลงด้านการตอบสนองทางสรีรวิทยาและพลวัตของรากยางพาราภายใต้สภาวะสภาวะขาดน้ำและน้ำท่วมขัง
2. ศึกษาพลวัตของรากยางพาราและประเมินความสัมพันธ์ของสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับพลวัตของรากยางพาราในรอบปี

บทที่ 2

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

การศึกษาแบ่งออกเป็น 3 การทดลองดังนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาและพลวัตของรากของต้น
ยางพาราภายใต้สภาวะขาดน้ำและการตอบสนองภายหลังการให้น้ำกลับคืน

1.1 วัสดุ และอุปกรณ์

- ต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุ 1 ปี
- หน้าดินใช้เป็นวัสดุปลูก
- กล่องศึกษารากพืช (rhizobox)
- ท่ออะคริลิกใส (ยาว 120 cm. เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 cm. หนา 0.3 cm.)
- แผ่นตาราง grid line ขนาด 1x1 ตารางcm.
- ท่อวัดความชื้นดิน (access tube, Delta-T Devices, UK)
- เครื่องบันทึกข้อมูลอากาศอัตโนมัติ บันทึกอุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ (CEM DT-172)
- ตลับเมตร, แผ่นฉนวนกันความร้อน, กล้องถ่ายภาพดิจิทัล
- กล้องมินิโรโซตรอนบันทึกภาพรากยางพารา
- มีดคัดเตอร์, กรรไกร, แวนขยาย, กระดาษทิชชู
- เครื่องวัดความชื้นดิน (Soil profile probe; PR2, Delta-T devices, UK)
- เครื่องวัดค่าการซึมน้ำปากใบ Porometer-AP4 (Delta-T Devices, UK)
- เครื่องวัดค่าศักย์ของน้ำในใบ Pressure Chamber Model 3115 (Soil moisture, USA)
- เครื่องวัดค่าความเขียวของใบ SPAD-502 (Konica-Minolta, Japan)
- ตู้อบตัวอย่างพืช

1.2 วิธีการศึกษา

การตอบสนองทางสรีรวิทยา และลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรากต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุ 1 ปี โดยวางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely randomized design) การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Statistix 10.0 (Analytical software, Tallahassee, FL, USA)

ทริตเมนต์ที่ใช้ คือ ต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 จำนวน 9 ต้น ปลูกในกล่องศึกษารากประกอบจากท่อพีวีซีและแผ่นอะคริลิกใส ขนาด กว้าง 60 cm. สูง 120 cm. หนา 15 cm. โดยแบ่งออกเป็น 3 ทริตเมนต์ๆ ละ 3 ซ้ำ ระยะเวลาในการศึกษาตั้งแต่เดือนธันวาคม 2557- มกราคม 2558

ทริตเมนต์ที่ 1 ต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ให้น้ำปกติ (ควบคุม)

ทริตเมนต์ที่ 2 ต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ให้น้ำทุก 4 วัน

ทริตเมนต์ที่ 3 ต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ให้น้ำทุก 8 วัน

1.3 ข้อมูลที่ศึกษาประกอบด้วย

1.3.1 ข้อมูลอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

- บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศสูงสุด-ต่ำสุด และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศโดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติตั้งค่าให้บันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 ชั่วโมง ตลอดการทดลอง

1.3.2 บันทึกข้อมูลการตอบสนองทางสรีรวิทยาประกอบด้วย

- ค่าการชักนำปากใบ (stomatal conductance; g_s) โดยใช้เครื่องวัดการเปิด-ปิดปากใบ AP4-Porometer (Delta-T Devices., UK) สุ่มวัดใบเพลสลาด ต้นละ 3 ค่า ช่วงเวลาวัดค่าในรอบวันทุก ๆ 2 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 08.00-12.00 น.

- ค่าศักย์ของน้ำในใบ (leaf water potential; LWP) วัดโดยใช้เครื่องวัดค่าศักย์ของน้ำในใบแบบ Pressure Chamber Model 3115 (Soil moisture., USA) สุ่มเลือกวัดใบเพลสลาด วัดค่าก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (Predawn) และวัดช่วงเที่ยง (Midday)

- ค่าความเขียวของใบ (SPAD-502) ใช้เครื่องวัดความเขียวของใบต้นยางพาราด้วยเครื่อง SPAD-502 (Konica-Minolta)

1.3.3 บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนทางกายภาพ

- ขนาดลำต้น วัดขนาดลำต้นโดยใช้ดิจิตอลเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ก่อนและหลังสิ้นสุดการทดลอง
- น้ำหนักแห้ง ภายหลังสิ้นสุดการทดลองล้างรากต้นยางพารา และตัดแบ่งส่วนของราก และลำต้นนำไปชั่งน้ำหนักสด และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมงจากนั้นบันทึกน้ำหนักแห้งแต่ละทริตเมนต์

1.3.4 บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของรากต้นยางพารา

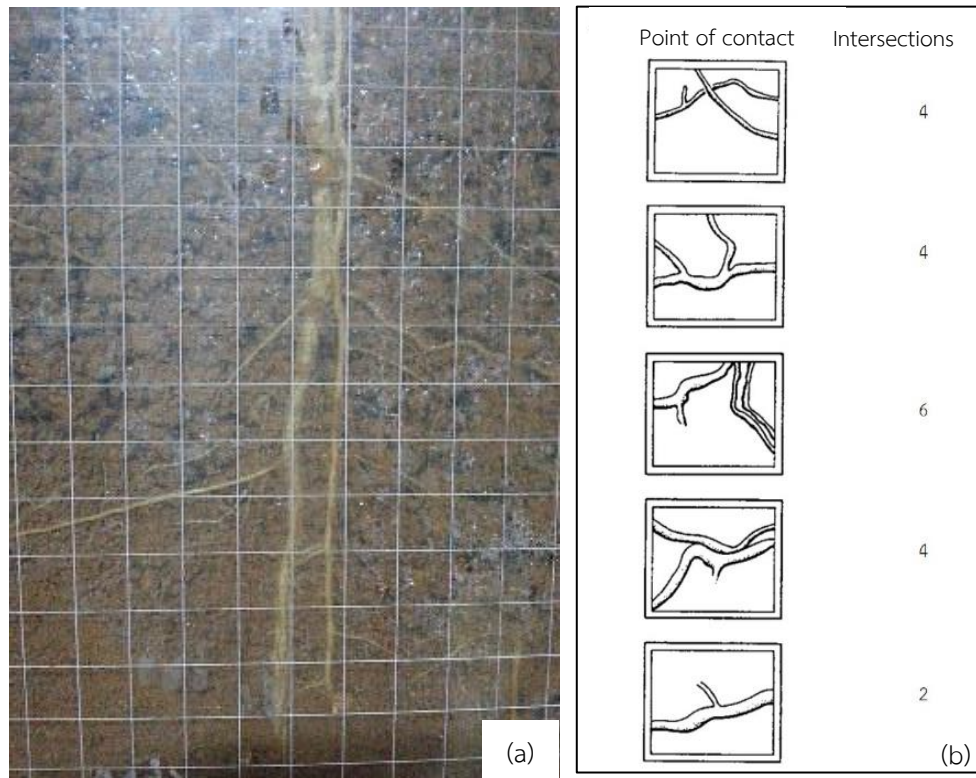
- บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของรากแต่ละทริตเมนต์โดยใช้กล้องมินิโรโซตรอนถ่ายภาพรากต้นยางพาราแต่ละทริตเมนต์ผ่านท่ออะคริลิก (ท่อมินิโรโซตรอน) ที่ติดตั้งขนานกับต้นยางพาราที่ปลูกใน rhizobox (ภาพที่ 5) บันทึกภาพที่ระดับความลึก 0-80 cm. จากนั้นนำภาพถ่ายวิเคราะห์ความยาวรากโดยใช้โปรแกรม Rootfly (www.ces.clemson.edu/~stb/rootfly/) Clemson University, Clemson, SC, USA) การแบ่งกลุ่มรากที่มีชีวิต และรากที่ตายหรือเสื่อมใช้สีเป็นตัวแปรในการพิจารณาโดยสีขาวหรือสีเหลือง เป็นรากที่มีชีวิต ส่วนรากที่มีสีน้ำตาลคล้ำหรือสีดำสนิทแยกเป็นรากที่ตาย (Hendrick and Pregitzer 1993; Burton *et al.*, 2000; Wells and Eissenstat, 2001; Norby *et al.*, 2004)
- บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของรากโดยวิธีการนับจุดตัดราก (Tennant, 1975) การนับจุดตัดรากใช้แผ่นอะคริลิกใสตีเส้นตารางแนวตั้งและแนวนอนให้มีขนาดตาราง 1x1 cm. วิธีการนับจุดตัดโดยนับรากที่มองเห็นตัดกับเส้นตารางที่ทาบบัว (ภาพที่ 6) และคำนวณความยาวรากดังสูตรที่ (1)

$$R = \frac{11}{14} n x \quad (1)$$

เมื่อ n คือ จำนวนจุดตัดที่รากตัดกับเส้นตาราง
 x คือ พื้นที่หน้าตัดตาราง (cm^2)



ภาพที่ 5 กล่องศึกษารากยางพารา (Rhizobox) ประกอบจากท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว ฝาเครื่องประกอบด้วยแผ่นอะคริลิกใสขนาด กว้าง 60 cm สูง 120 cm หนา 0.5 cm โดยภายในกล่อง rhizobox ใส่ท่อมินิโรโทรซอนที่ผลิตจากท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 cm ยาว 120 cm หนา 3 mm. เพื่อใช้บันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงของรากต้นยางพารา และท่อวัดความชื้น soil profile probe



ภาพที่ 6 การนับจำนวนรากที่ตัดกับเส้นจุดตัดขนาด 1x1 cm. โดยใช้ตารางนับจุดตัดราก (gridline)
(a) และตัวอย่างการนับจำนวนรากกับแนวเส้นตาราง (b)

ที่มา: ดัดแปลงจาก Buckland และคณะ (1993)

แปลผลความยาวรากที่ได้จากภาพที่บันทึกด้วยกล้องมิโครไซตรอนโดยใช้สูตร
ข้อมูลความยาวรากต่อพื้นที่ภาพถ่ายคำนวณโดยใช้สูตร (2)

$$\text{FRLD} = \frac{N}{A} \quad (2)$$

- เมื่อ
- FRLD = ความยาวรากต่อพื้นที่ภาพถ่าย (mm mm^{-2})
 - N = ความยาวรากที่วัดจากภาพถ่ายราก (mm)
 - A = พื้นที่ภาพถ่าย (mm^{-2})

การทดลองที่ 2 ศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาและระบบรากของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ภายใต้สภาวะน้ำท่วมขัง

2.1 วัสดุ และอุปกรณ์

- ต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 อายุ 6 เดือน พันธุ์ละ 9 ต้น
- หน้าดินสำหรับใช้เป็นวัสดุปลูก
- ถังพลาสติกปริมาตร 0.2 ลูกบาศก์เมตร สายยางรดน้ำ ปากกาเคมี
- มีดคัตเตอร์ กรรไกร กระดาษทิชชู ตลับเมตร ตู้อบตัวอย่างพีช
- ตีจิตอลเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ (Mitutoyo, Japan)
- เครื่องบันทึกอุณหภูมิอากาศ และความชื้นอัตโนมัติ (CEM-172)
- ท่อวัดความชื้นดิน (access tube; Delta-T Devices, UK)
- กล้องมินิไรโซทรอน PSU-ARDA Minirhizotron® (PSU, Hat Yai, Songkhla, Thailand)
- เครื่องวัดความชื้นดิน (Soil profile probe; PR2, Delta-T devices, UK)
- เครื่องวัดค่าการซึมน้ำปากใบ Porometer-AP4 (Delta-T Devices, UK)
- เครื่องวัดค่าศักย์ของน้ำในใบ Pressure Chamber Model 3115 (Soil moisture, USA)
- เครื่องวัดค่าความเขียวของใบ SPAD-502 (Konica-Minolta, Japan)
- อุปกรณ์เตรียมตัวอย่างเนื้อเยื่อสตรากต้นยางพาราได้แก่ มีดโกน สไลด์ กล้องจุลทรรศน์

2.2 แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลที่มี 2 ปัจจัย ได้แก่พันธุ์ยางพารา 2 พันธุ์ และ 3 ระดับการให้น้ำในแผนการทดลองแบบ CRD (Complete randomize design)

เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Statistix 10.0 (Analytical software, Tallahassee, FL, USA)

ทรีตเมนต์ที่ใช้ คือ ต้นยางพาราชำถุงพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 อายุ 6 เดือน (จำนวนใบ 2 ฉัตร) แบ่งออกเป็น 3 ทรีตเมนต์ ๆ ละ 3 ซ้ำ ได้แก่

ทรีตเมนต์ที่ 1 ต้นยางพาราที่ให้น้ำทุกวัน (ควบคุม)

ทรีตเมนต์ที่ 2 ต้นยางพาราที่ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดิน

ทรีตเมนต์ที่ 3 ต้นยางพาราที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน 10 cm

การทดลองใช้ต้นยางพาราย้ายปลูกในถังพลาสติกปริมาตร 0.2 m^3 จากนั้นติดตั้งท่อวัดความชื้นดิน (soil profile probe) ท่อมิเนโรไซตรอนโดยวางขนานกับต้นยางพาราและรองก้นถังด้วยหินคลุกและปิดทับอีกชั้นด้วยตาข่ายพลาสติก ระยะเวลาให้น้ำท่วมขัง 7 สัปดาห์ และปล่อยน้ำบันทึกข้อมูลต่อเนื่องอีก 3 สัปดาห์ (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 การเตรียมต้นยางพาราก่อนเริ่มการทดลอง โดยปลูกในถังพลาสติก ใช้หน้าดินเป็นวัสดุปลูกทดลองบริเวณเรือนกระจกคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

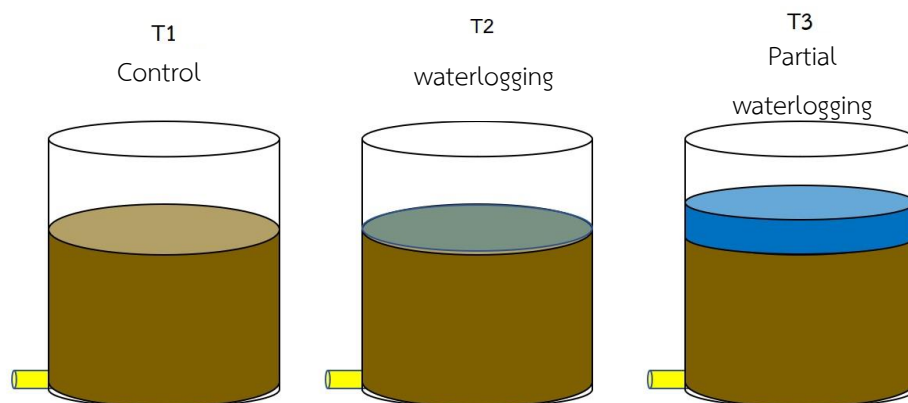
2.3 ข้อมูลที่ศึกษา

2.3.1 ข้อมูลทางสรีรวิทยา

- การเปิดปิดปากใบ บันทึกข้อมูลทุก ๆ 2 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 10.00-14.00 น. ด้วยเครื่อง AP4 leaf Porometer (Delta-T Devices., Ltd. UK.)
- ค่าศักย์ของน้ำในใบวัดปริมาณของน้ำในใบยางพารา โดยใช้เครื่อง Plant water status console 3115 (Soil moisture Equipment Crop., USA.)
- ค่าความเขียวของใบยางพาราวัดด้วยเครื่อง SPAD-502 (Minolta Co. Ltd., Japan) โดยสุ่มเลือกใบเพศลาด วัดทริตเมนต์ละ 3 ซ้ำ ตลอดการทดลอง
- น้ำหนักแห้งทั้งต้นประเมินน้ำหนักแห้งของต้นยางพาราแต่ละทริตเมนต์ ภายหลังสิ้นสุดการทดลองโดยแยกระหว่างส่วนยอดและราก เมื่อสิ้นสุดการทดลองนำรากยางพาราล้างด้วยน้ำจากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง นำตัวอย่างชั่งน้ำหนักและบันทึกข้อมูล

- ความชื้นในดิน วัดโดยเครื่อง Profile Probe PR2 (Delta-T Devices., Ltd. UK.) ที่ระดับความลึก 10 20 30 40 60 และ 100 cm. จากผิวดิน

- ข้อมูลทางสรีรวิทยา บันทึกข้อมูลการตอบสนองของต้นยางพาราทุก ๆ 3 วัน ตลอดการทดลองจนกระทั่งปล่อยน้ำขังออก และวัดระดับความชื้นในดินโดยติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน และท่อ soil profile probe สำหรับวัดความชื้นในดินขนานกับต้นยางที่ปลูกในถัง (ภาพที่ 8)



ภาพที่ 8 ภาพจำลองการให้น้ำทั้ง 3 ระดับการทดลอง T1 ทริตเมนต์ให้น้ำปกติ T2 ทริตเมนต์ให้น้ำท่วมขังผิวดินและ T3 ทริตเมนต์ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน

2.3.2 ข้อมูลรากต้นยางพารา

ก่อนย้ายปลูกเก็บตัวอย่างหน้าดินที่ใช้เป็นวัสดุปลูกวิเคราะห์สมบัติดินและศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรากต้นยางพาราแต่ละทริตเมนต์บันทึกข้อมูลทุกสัปดาห์ โดยใช้กล้อง PSU-ARDA Minirhizotron® บันทึกภาพที่ความลึก 0-50 cm. จากนั้นวิเคราะห์ภาพถ่ายที่ได้โดยใช้โปรแกรม Rootfly (www.ces.clemson.edu/~stb/rootfly/; Clemson University, Clemson, SC, USA) และประเมินการเจริญเติบโตของรากโดยวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงด้าน ความยาว ความหนาแน่นของรากในแต่ละทริตเมนต์ตลอดช่วงการทดลอง จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลความยาวราก จำนวนรากมีชีวิตและรากตาย โดยใช้เกณฑ์สีของรากเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1

ข้อมูลความยาวรากประเมินโดยใช้เทคนิคมินิไรโซตรอนโดยใช้สูตร (2)

ภายหลังสิ้นสุดการทดลองเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของเนื้อเยื่อรากของต้นยางพาราระหว่างทริตเมนต์ด้วยวิธีการเตรียมเนื้อเยื่อพืชสด

การทดลองที่ 3 ศึกษาพลวัตของรากยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในสภาพแปลงปลูกในจังหวัดสงขลา

3.1 วัสดุ อุปกรณ์

- ต้นยางพาราที่เปิดกรีด อายุ 16 ปี พันธุ์ RRIM 600 ระบบกรีด วันเว้นวัน กรีด 1 ใน 3 ของลำต้น (d/2, S1/3)
- กล้องมินิไรโซทรอน
- เครื่องวัดความชื้นดิน PR2
- กล้องถ่ายภาพทรงพุ่มพร้อมเลนส์ตาปลา (Fisheye camera)
- ท่อวัดความชื้นดิน จำนวน 3 ท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 ยาว 100 cm.
- ท่อมินิไรโซทรอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. ยาว 120 cm. หนา 3 mm.
- สว่านเจาะดินทรงกระบอก (Soil auger) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกเจาะ 10 cm.
- จอบ เสียม พลั่ว ถุงมือ ขาตั้งกล้อง (tripod) ท่อ PVC ตัดท่อนสำหรับกำหนดจุดถ่ายภาพทรงพุ่ม

3.2 ข้อมูลที่ศึกษาประกอบด้วย

- ข้อมูลพลวัตของรากยางพาราในรอบปี (Fine root production/ mortality)
- ข้อมูลสภาพอากาศ
- ข้อมูลผลผลิตยางพารา ได้แก่ น้ำหนักยางแห้ง (g/tree/tapping) เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (% DRC)
- ความชื้นในดิน วัดที่ระดับความลึก 10 20 30 40 60 และ 100 cm. จากผิวดิน ด้วยเครื่อง Soil profile probe; PR2 (Delta-T Devices., England)
- การเปลี่ยนแปลงของดัชนีพื้นที่ใบ (LAI)

3.3 วิธีการศึกษา และบันทึกข้อมูล

3.3.1 ข้อมูลสภาพอากาศ

ข้อมูลสภาพอากาศตลอดการศึกษา (2557 - 2558) ใช้ข้อมูลบันทึกโดยสถานีตรวจวัดอากาศสนามบินนานาชาติหาดใหญ่ อำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา ซึ่งอยู่ห่างจากแปลงทดลองประมาณ 5 กิโลเมตร ข้อมูลที่บันทึกประกอบด้วย

- อุณหภูมิอากาศสูงสุด - ต่ำสุด
- ค่าการคายระเหยน้ำ

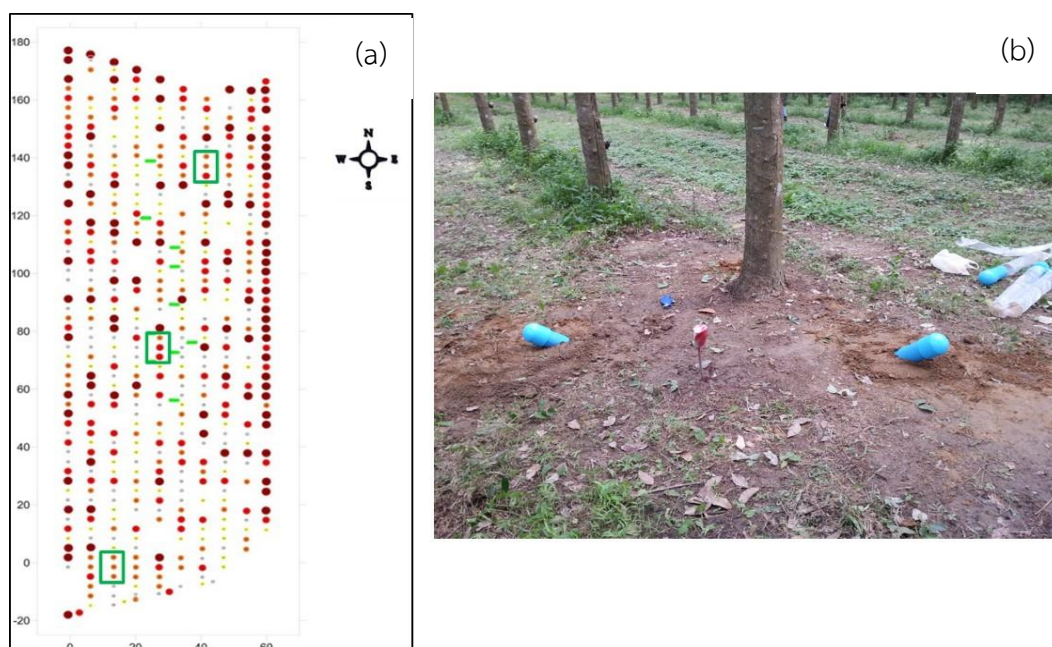
- ปริมาณน้ำฝน

3.3.2 สถานที่ทดลอง

แปลงปลูกยางพาราของเกษตรกร บ้านไร่อ้อย หมู่ 5 ตำบลฉลุง อำเภอลาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยคัดเลือกต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุ 16 ปี ที่มีขนาดเส้นรอบวงประมาณ 60 - 70 cm. วัดที่ความสูง 150 cm จากพื้นดิน จำนวน 3 ต้น โดยใช้วิธีการสุ่มเลือกต้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกัน

3.3.3 การศึกษารากยางพารา

ติดตั้งท่อมินิไรโซทรอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. หนา 3 mm. ยาว 120 cm. จำนวน 6 ท่อ ทำมุม 45 องศา กับพื้นดิน (2 ท่อ/ต้น) ห่างจากโคนต้นยางพาราที่ศึกษาประมาณ 100 cm. (ภาพที่ 9) บันทึกภาพที่ระดับความลึก 0-80 cm. จากผิวดิน จำนวนภาพถ่ายที่บันทึก 24 ภาพต่อท่อ การบันทึกข้อมูลเดือนละครั้งตลอดระยะเวลาการศึกษา ระหว่างเดือนมกราคม 2557 – พฤษภาคม 2558



ภาพที่ 9 แผนผังต้นยางพารา ตำแหน่งที่ติดตั้งท่อมินิไรโซทรอน และท่อวัดความชื้นดิน (a) การติดตั้งท่อมินิไรโซทรอนทำมุม 45 องศา กับแนวระดับบริเวณโคนต้นยางพารา (b)

3.3.4 ความชื้นดิน

บันทึกข้อมูลโดยฝังท่อวัดความชื้นดิน (Soil profile probe) ติดตั้งแนวตั้ง (ทำมุม 90 องศา) ห่างจากโคนต้นยางที่ใช้ศึกษา 1 เมตร และฝังอยู่ระหว่างท่อมินิไรโซทรอนความชื้นใน

ดินวัดโดยเครื่อง Profile Probe PR2 (Delta-T Devices., Ltd. UK.) ที่ระดับความลึก 10, 20, 30, 40, 60 และ 100 cm. จากผิวดิน

3.3.5 ประเมินดัชนีพื้นที่ใบ

ถ่ายภาพทรงพุ่มต้นยางพาราด้วยกล้อง Fisheye บันทึกภาพตลอดการทดลอง (เดือนละ 2 ครั้ง) นำภาพที่ได้วิเคราะห์ดัชนีพื้นที่ใบด้วยโปรแกรม GLA (Gap light analyzer) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของรากและการผลัดใบของต้นยางพารา

3.3.6 การแปรผลข้อมูลรากยางพาราจากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องมินิโรโซตรอน

วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Rootfly (www.ces.clemson.edu/~stb/rootfly/) ประกอบด้วยข้อมูล

- ความยาวรากต่อพื้นที่ภาพ ความยาวรากต่อหน่วยปริมาตร และการหมุนเวียนของราก (root turnover)

- รากที่มีชีวิตและรากตาย ($\text{mm mm}^{-2} \text{ month}^{-1}$)

เกณฑ์ในการจำแนกรากที่มีชีวิตออกจากรากตาย ใช้ลักษณะสีของรากเป็นเกณฑ์ โดยรากที่มีสีขาว สีเหลืองหรือน้ำตาล นิยามให้เป็นรากที่มีชีวิต ส่วนรากที่ปรากฏสีน้ำตาลเข้มหรือสีดำจัดในกลุ่มรากตาย (Hendrick and Pregitzer 1993; Burton *et al.*, 2000; Wells and Eissenstat, 2001; Norby *et al.*, 2004)

ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของรากยางพาราในรอบปีที่ได้จากการแปรผลภาพถ่ายนำมาคำนวณในหน่วยของอัตราความยาวรากเฉลี่ยต่อเดือน (Shi *et al.*, 2008) ดังสูตร (3)

$$RLD_{P,M} = \frac{RLD_{n+1} - RLD_n}{T} \quad (3)$$

เมื่อ RLD_P = อัตราการเพิ่มขึ้นของความยาวรากต่อพื้นที่ภาพถ่าย (mm mm^{-2})

RLD_M = อัตราการตายของรากต่อพื้นที่ภาพถ่าย (mm mm^{-2})

RLD_{n+1} = ความยาวรากในระยะเริ่มต้น

RLD_n = ความยาวรากที่เปลี่ยนแปลงรายเดือน ($\text{mm mm}^{-2} \text{ month}^{-1}$)

T = ระยะเวลาที่บันทึกข้อมูล (วัน) ในการทดลองกำหนดเก็บข้อมูลทุก ๆ 30 วัน

ข้อมูลความยาวรากที่ได้จากสูตร (3) ใช้ในการคำนวณอัตราส่วนของรากในสภาพแวดล้อมที่สัมพันธ์กับการตรึงคาร์บอน กระบวนการหมุนเวียนคาร์บอนในดิน และธาตุอาหารในดิน (Nepstad *et al.*, 1994; Jackson *et al.*, 1997)

3.3.7 การเปลี่ยนแปลงของดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf Area Index; LAI)

ประเมินดัชนีพื้นที่ใบ โดยใช้การถ่ายภาพทรงพุ่มยางพาราด้วยกล้องถ่ายรูปพร้อมเลนส์ตาปลา (Fish eye) (Nikon Coolpix P8400) เดือนละ 1 ครั้ง จากนั้นวิเคราะห์ภาพถ่ายเพื่อหาค่าดัชนีพื้นที่ใบ โดยใช้โปรแกรม Gap Light Analyzer: GLA และนำค่าดัชนีพื้นที่ใบที่ได้วิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของรากลยางพารา

3.3.8 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ประเมินความสัมพันธ์จากอิทธิพลของสภาพแวดล้อมที่ศึกษาต่อการเปลี่ยนแปลงของรากลยางพารา โดยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Pearson correlation efficient) ข้อมูลทางสถิติวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Statistix 10.0 (Analytical software, Tallahassee, FL, USA)

บทที่ 3

ผล

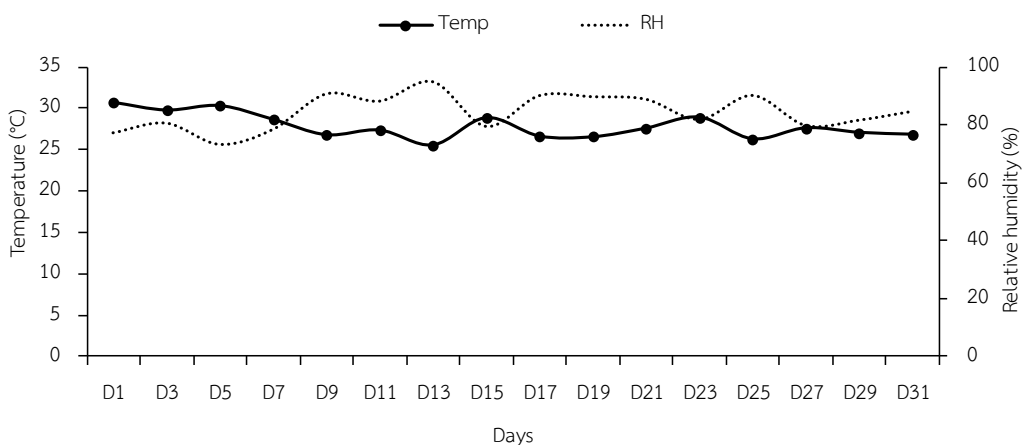
3.1 ผลการทดลองที่ 1

1 ค่าวิเคราะห์คุณสมบัติดิน

ผลการวิเคราะห์สมบัติของดินที่นำมาใช้เป็นวัสดุปลูกจากศูนย์ปฏิบัติการวิเคราะห์กลาง คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พบว่า ไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 0.07 % ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เท่ากับ 2.68 mg/kg โพแทสเซียม 20.88 mg/kg ความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 5.12 และการจำแนกลักษณะทางกายภาพของเนื้อดินจัดเป็นดินเหนียวปนทราย

2 ข้อมูลสภาพอากาศ

การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศตลอดการศึกษประกอบด้วยอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยพบว่า อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยตลอดการทดลองมีค่าระหว่าง 25.6-30.7 องศาเซลเซียส ขณะที่การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์อากาศอยู่ระหว่าง 73-95 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามแนวโน้มของอุณหภูมิอากาศมีแนวโน้มลดลงเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ขณะที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น (ภาพที่ 10)

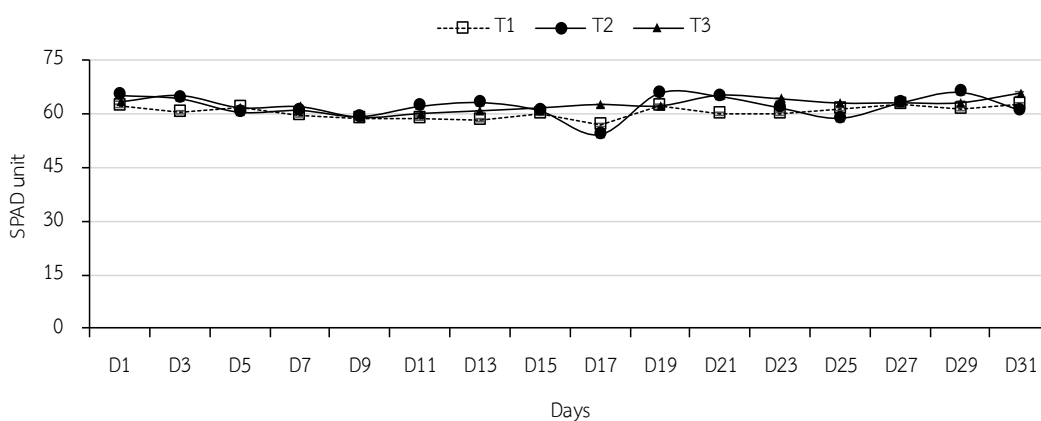


ภาพที่ 10 ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศที่บันทึกตลอดการทดลองโดยเครื่องบันทึกอุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแบบอัตโนมัติ

3 การตอบสนองทางสรีรวิทยา

3.1 ค่าความเขียวของใบ

ค่าความเขียวของใบยางพาราตลอดการทดลอง วัดค่าโดยใช้เครื่อง SPAD-502 สุ่มวัดใบยางในระยะเวลาเพลสลาดแต่ละทรีตเมนต์ พบว่า ค่าความเขียวของใบยางพาราของต้นยางพาราทั้งสามทรีตเมนต์ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยในทรีตเมนต์ควบคุมพบว่า ค่าความเขียวของใบยางพารามีค่าระหว่าง 56.10- 65.40 ในขณะที่ค่าความเขียวของใบยางพาราที่ให้น้ำทุก 4 และ 8 วันมีค่าเท่ากับ 54.07 - 66.05 และ 58.78 - 68.10 ตามลำดับ (ภาพที่ 11)



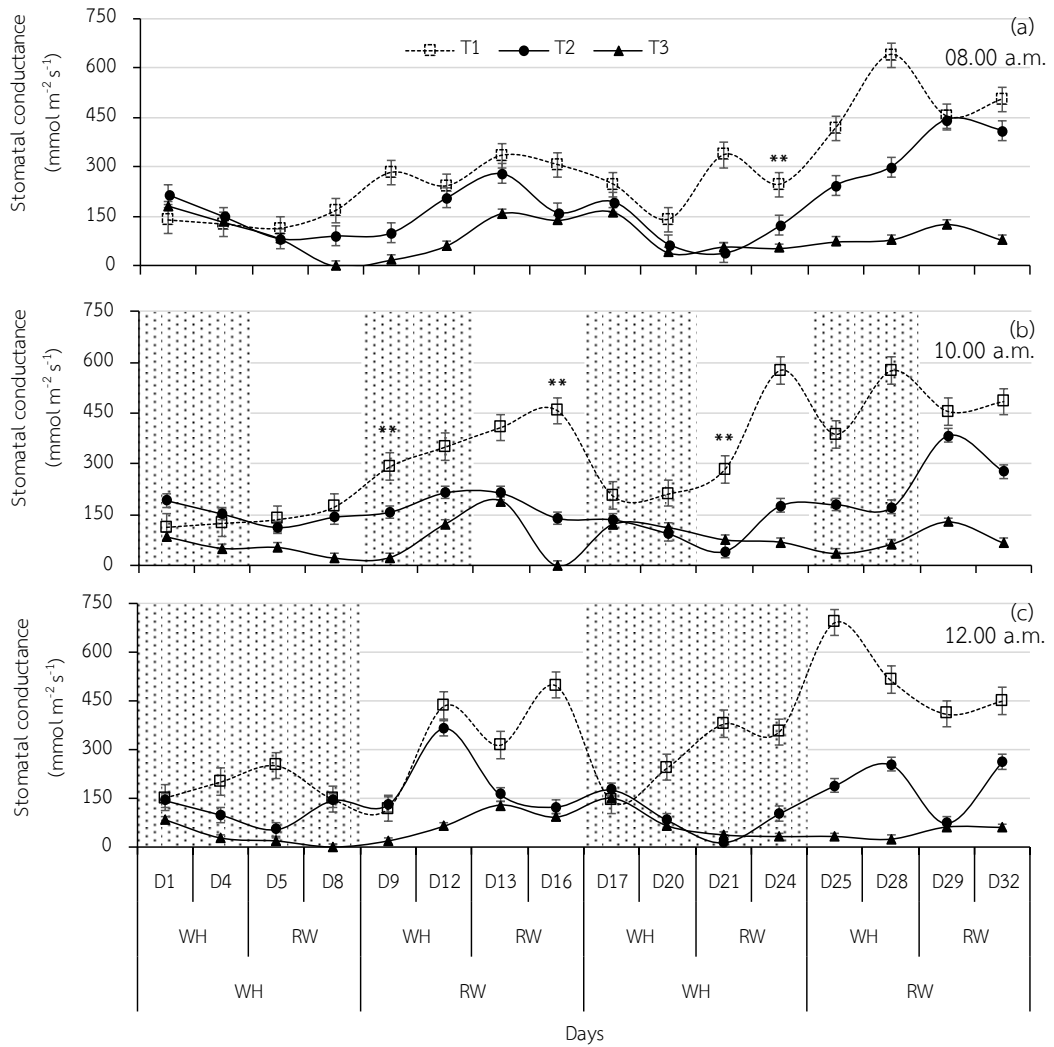
ภาพที่ 11 ค่าความเขียวของใบยางพาราตลอดการทดลองวัดค่าโดยเครื่องคลอโรฟิลล์มิเตอร์ SPAD-502

3.2 ค่าการชักนำปากใบ

การเปลี่ยนแปลงของค่าการชักนำปากใบรอบวันที่บันทึกข้อมูล เวลา 08.00, 10.00 และ 12.00 น. พบว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราการชักนำปากใบในช่วง 08.00 น. ในทรีตเมนต์ควบคุมที่ให้น้ำปกติ อัตราการชักนำปากใบเฉลี่ยในระยะแรกของการทดลองมีค่าเปลี่ยนแปลงค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นในระยะหลังของการทดลอง (D20-D32) โดยมีค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ $640.3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ในวันที่ 28 ของการทดลอง และค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ $294.0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 4 วัน พบว่าค่าการชักนำปากใบเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกับทรีตเมนต์ควบคุม โดยค่าการชักนำปากใบสูงสุดเท่ากับ $444.3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ เมื่อผ่านการทดลองไป 29 วัน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ $197.7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 8 วัน พบว่าค่าการชักนำปากใบสูงสุดเท่ากับ $183.3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และค่าเฉลี่ยเท่ากับ $92.1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

ค่าการชักนำปากใบรอบ 10.00 น. ของต้นยางพาราที่ควบคุมเพิ่มขึ้น ลดลงสลับกันและพบค่าสูงสุดเท่ากับ $576 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ในวันที่ 26 ของการทดลอง และค่าเฉลี่ยเท่ากับ $327.8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ที่ให้น้ำทุก 4 วันพบว่าค่าการชักนำปากใบเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบกว่าที่ควบคุมโดยค่าสูงสุดพบหลังการให้น้ำในวันที่ 29 หลังการทดลองเท่ากับ $384.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ $174.7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ส่วนที่ให้น้ำทุก 8 วันพบว่าค่าการชักนำปากใบเปลี่ยนแปลงโดยค่าลดลงเมื่อเริ่มการให้น้ำในรอบแรก (D1-D8) และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อให้น้ำในรอบแรก (D9 - D16) โดยพบว่าค่าการชักนำปากใบสูงสุดเท่ากับ $191.7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และมีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ $77.2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

การตอบสนองของค่าการชักนำปากใบที่เวลาเที่ยงวัน 12.00 น. พบว่า ที่ควบคุมค่าการชักนำมีความแปรปรวนตลอดการทดลองและมีค่าสูงสุดเมื่อเข้าสู่การทดลองในวันที่ 25 เท่ากับ $692.7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และพบว่าค่าเฉลี่ยเท่ากับ $331.6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ขณะที่การตอบสนองของต้นยางพาราที่ให้น้ำทุก 4 วันพบว่าค่าการชักนำปากใบเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบ ซึ่งค่าการชักนำปากใบลดลงเมื่องดการให้น้ำและค่อยปรับค่าสูงสุดหลังจากการให้น้ำกลับคืนซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นลักษณะใกล้เคียงทั้ง 4 ช่วงของการทดลองและค่าการชักนำปากใบสูงสุดเท่ากับ $366 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $148 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ในวันที่ 12 ของการทดลอง ส่วนการให้น้ำแก่ต้นยางพาราทุก 8 วัน พบว่าการตอบสนองของค่าการชักนำปากใบเมื่องดการให้น้ำในระยะแรกจะมีค่าลดลง (D1-D4) และค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อให้น้ำกลับคืนในช่วง D5-D8 อย่างไรก็ตาม ในช่วงที่สองของการงดให้น้ำ (D17-D24) พบว่าค่าการชักนำปากใบลดลงและมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแม้ให้น้ำในภายหลัง (D25-D32) ค่าการชักนำปากใบสูงสุดพบช่วงที่สองของการงดให้น้ำวันที่ D17 ของการทดลองเท่ากับ $148.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และค่าเฉลี่ยการชักนำปากใบเท่ากับ $55.4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ภาพที่ 12)

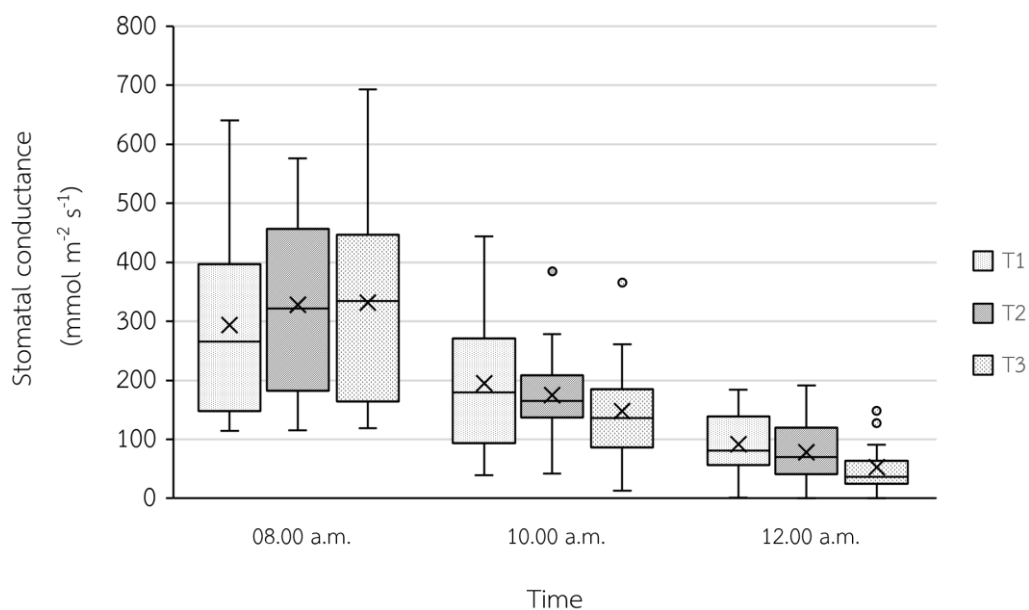


หมายเหตุ: ** = แตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

WH = Withholding water, RW=Rewatering

ภาพที่ 12 การตอบสนองของค่าการซึมน้ำปากใบของพาราที่ระดับการให้น้ำพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3) ในรอบวัน เวลา 08.00 น. (a) 10.00 น. (b) และ 12.00 น. (c)

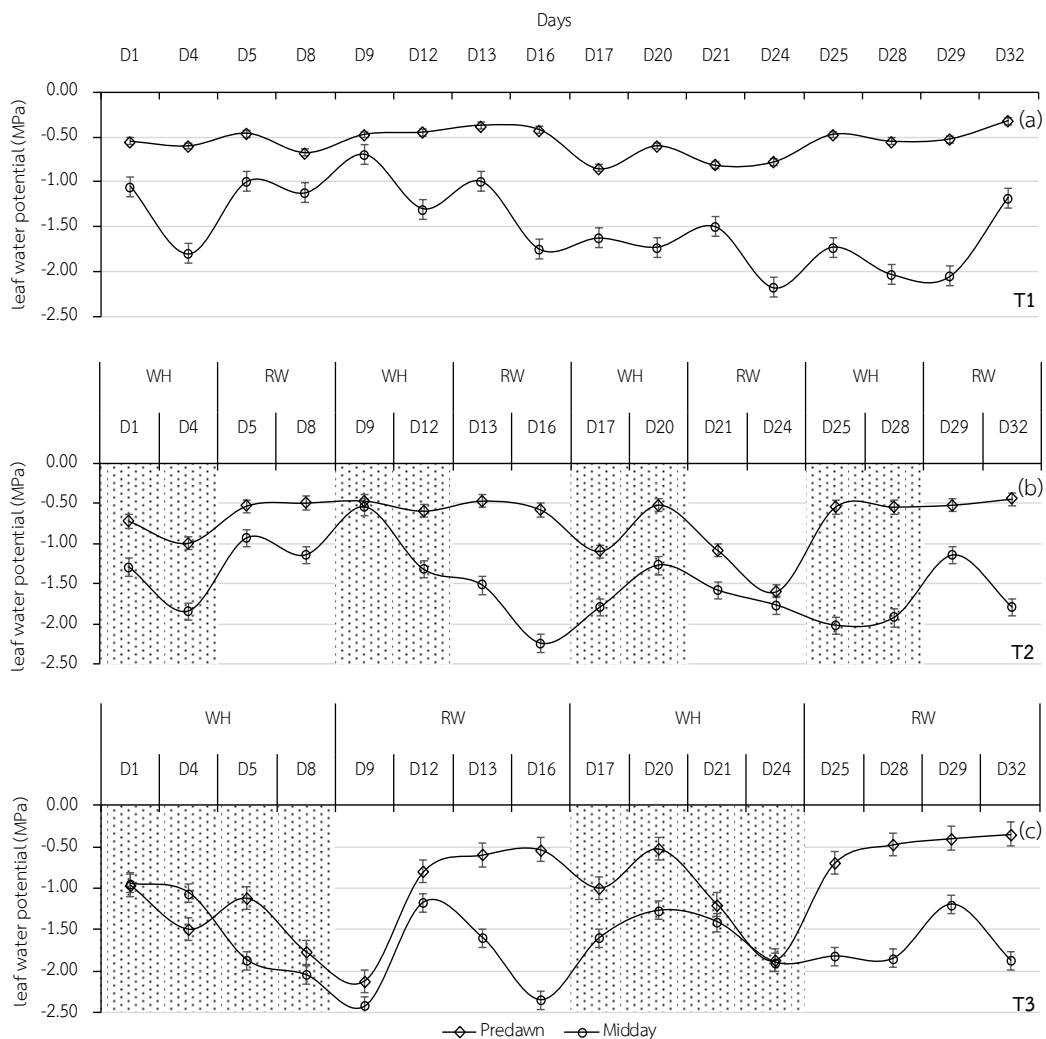
การตอบสนองของค่าการชักนำปากใบเปรียบเทียบระหว่างรอบที่วัดข้อมูล 08.00 น. 10.00 น. และ 12.00 น. พบว่า ต้นยางพาราทั้งสามระดับการให้น้ำมีการตอบสนองของค่าการชักนำปากใบที่เวลา 08.00 น. สูงที่สุดโดยต้นยางทรีตเมนต์ควบคุม ค่าการชักนำปากใบอยู่ที่ระหว่าง 114.13 - 640.33 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 4 วัน และ ทุก 8 วันมี 115.0 - 576.0 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และ 118.58 - 692.67 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ตามลำดับ ช่วงเวลา 10.00 น. ค่าการชักนำปากใบพบว่าทรีตเมนต์ควบคุมมีค่าการเปลี่ยนแปลงในช่วงเท่ากับ 39.48-444.33 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ขณะที่ทรีตเมนต์ให้น้ำทุก 4 วันมีการเปลี่ยนแปลงช่วงแคบเท่ากับ 42.20 - 278.17 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 8 วันมีค่าระหว่าง 12.73 - 261.50 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และช่วงเที่ยงวันพบว่าการตอบสนองของค่าการชักนำปากใบทรีตเมนต์ควบคุมมีค่า 1.35 - 183.33 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ อยู่ในช่วงสูงกว่าทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 4 และ 8 วัน เท่ากับ 0 - 191.67 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และ 0 - 90.92 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (ภาพที่ 13)



ภาพที่ 13 กราฟ box plot การตอบสนองของค่าการชักนำปากใบยางพาราที่ระดับการให้น้ำที่แตกต่างกันในรอบวันที่เวลา 08.00 น. 10.00น. และ 12.00น.

การเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ของน้ำในใบยางพาราจากการเก็บตัวอย่างใบยางพาราวัดในระยะเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (predawn) และช่วงเที่ยงวัน (midday) พบว่าทรีตเมนต์ควบคุมการค่าศักย์ของน้ำในใบช่วง predawn มีค่าเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง โดยค่าต่ำสุดพบในวันที่ 17 ของการทดลองเท่ากับ -0.85 MPa ขณะที่การเปลี่ยนแปลงในช่วงเที่ยงวันพบว่ามีค่าต่ำสุดในช่วงหลังของการทดลอง (D24-D29) โดยค่าต่ำสุดพบวันที่ 24 ของการทดลองเท่ากับ -2.18 MPa ขณะที่ทรีตเมนต์ที่มีการให้น้ำทุก 4 วันค่าศักย์ของน้ำในใบช่วง Predawn เมื่อถึง

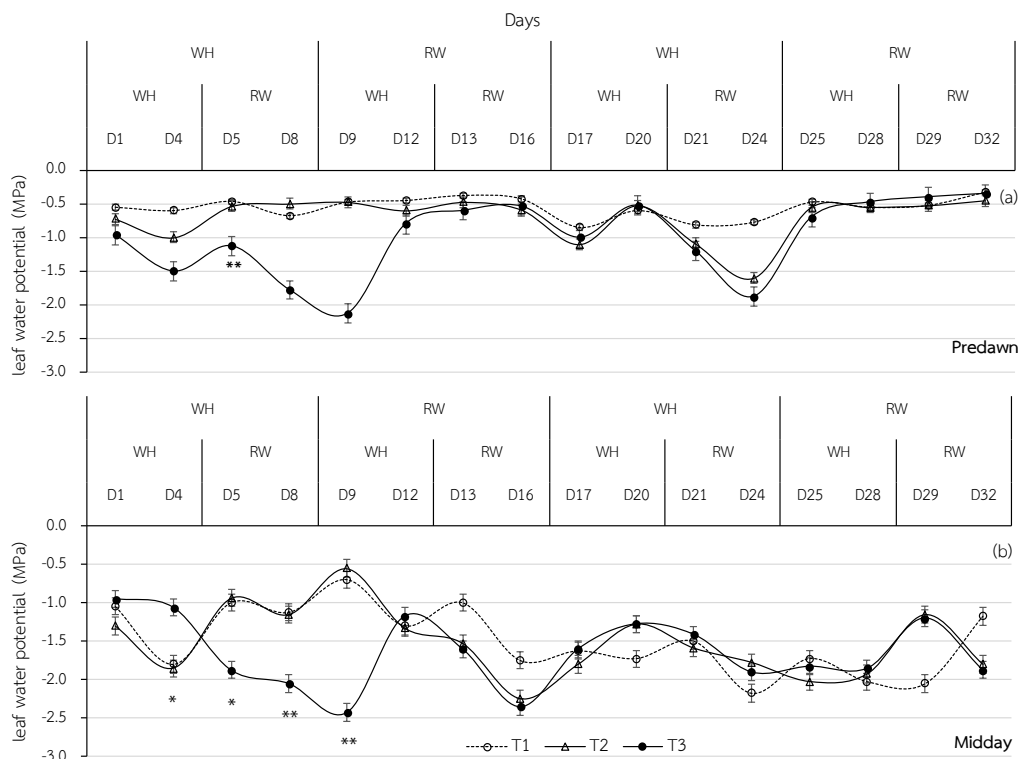
การให้น้ำจะมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นในช่วงที่การให้น้ำกลับคืน และพบว่าค่าต่ำสุดพบวันที่ 24 ของการทดลองมีค่า -1.59 MPa และในช่วงงดน้ำช่วงที่ 4 วันที่ D25-D28 พบว่าการชักนำปากใบมีค่าใกล้เคียงกันแม้งดการให้น้ำ (-0.45 ถึง -0.55 MPa) ขณะที่ช่วงเที่ยง (Midday) พบว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ของน้ำในใบจะเปลี่ยนแปลงโดยค่าลดลงในระยะที่งดการให้น้ำ และปรับค่าเพิ่มขึ้นเมื่อให้น้ำกลับคืนตลอดการทดลอง ค่าต่ำสุดเท่ากับ -2.25 MPa ในวันที่ 16 ของการทดลอง ส่วนการให้น้ำทุก 8 วันพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ของน้ำในใบลดลงอย่างชัดเจนในระยะแรกของการงดให้น้ำ เมื่อเข้าสู่วันที่ 9 ของการทดลองโดยค่าที่วัดในช่วง Predawn และ Midday ลดลงเท่ากับ -2.13 และ -2.43 MPa ตามลำดับ และปรับค่าสูงขึ้นเมื่อได้รับน้ำกลับคืน (ภาพที่ 14)



หมายเหตุ: WH = Withholding water, RW=Re-watering

ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ของน้ำในใบของพาราที่มีกรการให้น้ำทุกวัน (a) ให้น้ำทุก 4 วัน (b) และให้น้ำทุก 8 วัน (c) ตลอดการทดลอง

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ของน้ำในใบยางพาราที่วัดค่าในช่วง predawn พบว่าทรีตเมนต์ที่มีการให้น้ำปกติการเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ของน้ำในก่อนช่วงใกล้เคียงกันตลอดการทดลองขณะที่ทรีตเมนต์ที่มีการให้น้ำทุก 4 วัน และ 8 วัน การงดน้ำและให้น้ำกลับคืนสลับกันในสองระยะแรกมีค่าใกล้เคียงกับทรีตเมนต์ควบคุม โดยพบว่าค่าศักย์ของน้ำในใบในทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 8 วันมีค่าต่ำกว่าทรีตเมนต์ควบคุมและทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 4 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าค่าศักย์ของน้ำในใบกลับเพิ่มขึ้นในภายหลังจากการได้รับน้ำกลับคืน ขณะที่การเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ของน้ำในใบที่วัดรอบเที่ยง (midday) พบว่าค่าของทรีตเมนต์ควบคุมและทรีตเมนต์ที่มีการให้น้ำปกติมีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง ยกเว้นทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 8 วันพบว่าค่าศักย์ของน้ำในใบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างรวดเร็วในระยะแรกของการงดน้ำ (D1-D9) และเมื่อได้รับน้ำกลับคืน ค่าปรับเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับค่าศักย์ของน้ำในใบของต้นยางทรีตเมนต์ควบคุม และให้น้ำทุก 4 วัน (ภาพที่ 15)

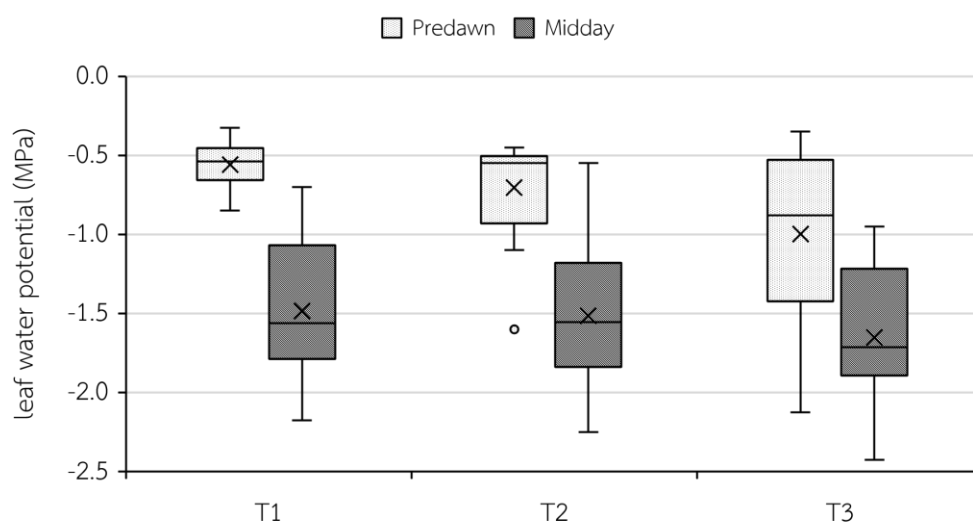


หมายเหตุ: *,** = ต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

WH = Withholding water, RW=Re-watering

ภาพที่ 15 เปรียบค่าเฉลี่ยของค่าศักย์ของน้ำในใบยางพารา ยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3) ช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (Predawn) (a) และช่วงเที่ยงวัน (Midday) (b)

การตอบสนองของค่าศักย์ของน้ำในใบเปรียบเทียบระหว่างทรีตเมนต์พบว่า ระยะก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (predawn) ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำปกติมีค่าอยู่ระหว่าง -0.83 ถึง -0.33 MPa ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 4 และ 8 วันมีค่าระหว่าง -1.1 ถึง -0.45 MPa และ -1.41 ถึง -0.35 MPa ขณะที่การตอบสนองในช่วงเที่ยงวันพบว่า ค่าอยู่ในช่วงกว้างทั้งสามทรีตเมนต์โดยทรีตเมนต์ที่ให้น้ำปกติพบค่าอยู่ระหว่าง -2.18 ถึง -0.70 MPa ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 4 วัน มีค่าระหว่าง -2.55 ถึง -0.55 MPa และทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 8 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง -2.43 ถึง -0.95 MPa ตามลำดับ (ภาพที่ 16)

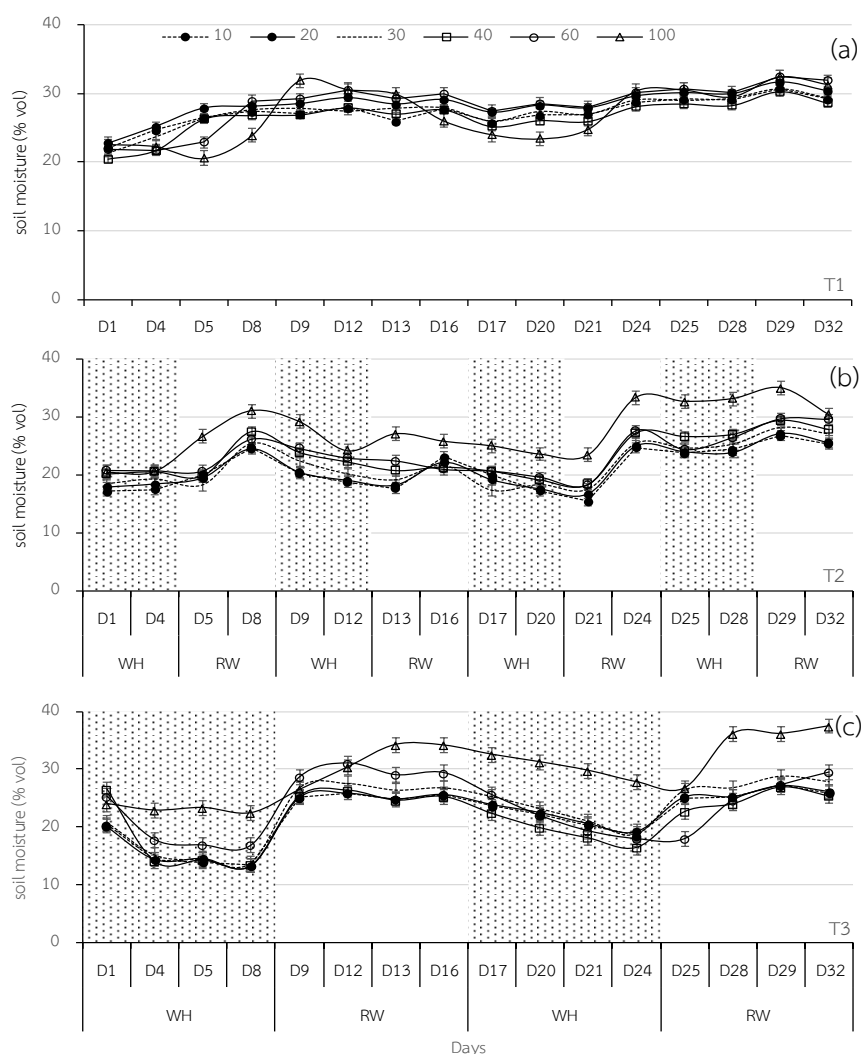


ภาพที่ 16 กราฟ box plot แสดงค่าเฉลี่ยของค่าศักย์ของน้ำในใบของพาราที่ระดับการให้น้ำพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3)

4. การเปลี่ยนแปลงของความชื้นดิน และความยาวราก

ความชื้นดินศึกษาที่ระดับความลึก 0-100 cm พบว่าการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินเฉลี่ยทรีตเมนต์ที่ให้น้ำปกติพบค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง เปอร์เซ็นต์ความชื้นดินเฉลี่ยที่ระดับความลึก 10,20,30,40,60 และ 100 cm เท่ากับ 27.25, 28.47, 27.33, 26.63, 28.37 และ 27.14 เปอร์เซ็นต์ ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 4 วันเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินในระยะที่งดการให้น้ำมีค่าลดลง (D1-D4 และ D9-D12) และเพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้น้ำกลับคืน (D5-D8, D21-D24 และ D29-D32) โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ระดับ 10,20,30,40,60 cm มีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับ 21.00, 21.16, 21.69, 23.20, 23.43 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นดินเฉลี่ยสูงสุดพบที่ระดับความลึก 100 cm เท่ากับ 28.7 เปอร์เซ็นต์ และการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินในทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 8 วัน พบว่า มีค่าค่อยลดลงในระยะแรกทั้งดให้น้ำ (D1-D8) ขณะที่ภายหลังการให้น้ำ (D9-D16) เปอร์เซ็นต์ความชื้นเพิ่มขึ้น ในดินทุกระดับความลึก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในระยะ

ที่สอง (D17-D32) ที่งดให้น้ำรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของความชื้นดินสอดคล้องกับระยะแรก (D1-D16) ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่ระดับความลึกระหว่าง 10-60 cm มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 21.59, 21.81, 22.65, 20.79 และ 23.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่ระดับความลึก 100 cm มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 30.21 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 17)

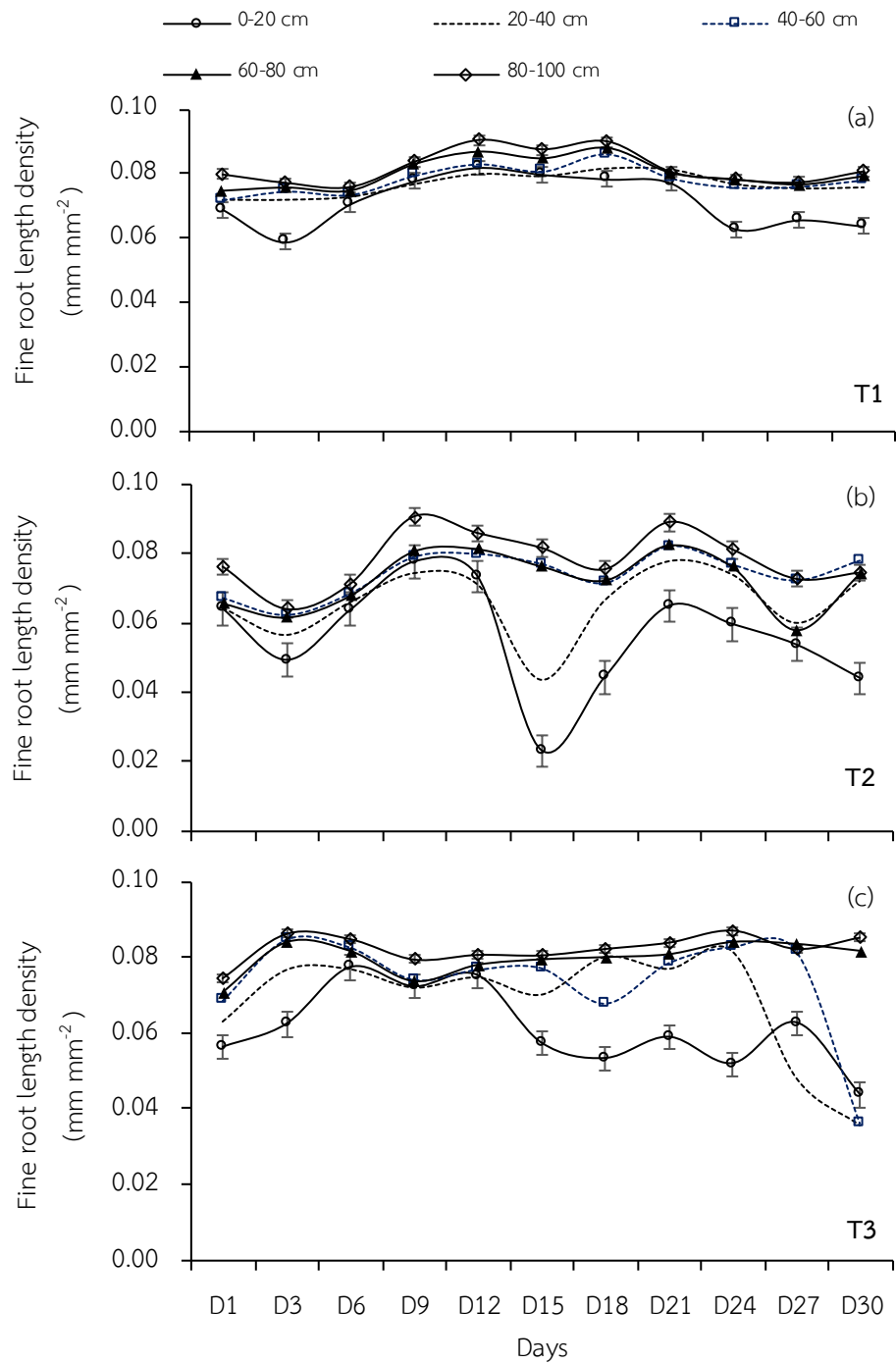


หมายเหตุ: WH = Withholding water, RW=Rewatering

ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงความชื้นดินของยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (a) ให้น้ำทุก 4 วัน (b) และ ให้น้ำทุก 8 วัน (c) ตลอดการทดลอง

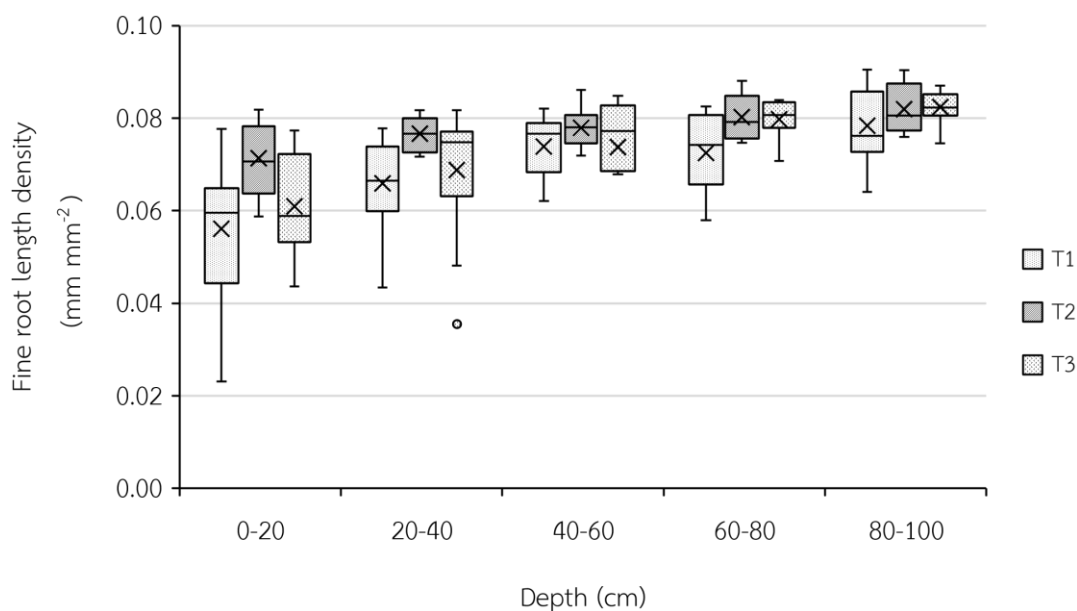
ความยาวรากยางพาราศึกษาโดยวิธีการใช้ภาพถ่ายบันทึกภาพรากยางพาราที่เปลี่ยนแปลงตลอดการทดลองพบว่า ทรินเมนต์ควบคุมรากที่ระดับความลึก 0-20 cm พบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงสูงที่สุด ขณะที่รากที่ระดับความลึก 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm รูปแบบการเจริญเติบโตอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันและไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าเฉลี่ยความยาวรากเท่ากับ 0.071, 0.077, 0.078, 0.080 และ 0.082 mm mm⁻² ขณะที่ความยาวรากของ

ยางพาราที่ให้น้ำทุก 4 วัน พบว่าความยาวรากเริ่มลดลงในระยะแรกของการให้น้ำทุกช่วงความลึก 0-100 cm และปรับตัวเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับน้ำกลับคืนในรอบถัดไป อย่างไรก็ตามพบว่า การเปลี่ยนแปลงความยาวรากที่ระดับความลึก 0-20 และ 20-40 cm ภายหลังจากงดน้ำในระยะที่สอง (D12-D15) มีค่าลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับความยาวรากที่ระดับความลึก 40-60 และ 80-100 cm ทั้งนี้ภายหลังจากการให้กลับคืนพบว่าความยาวรากมีค่าเพิ่มขึ้น (D21- D24) และพบว่าความยาวรากลดลงอีกครั้งเมื่องดให้น้ำ และให้น้ำกลับคืน โดยค่าเฉลี่ยความยาวรากที่ระดับความลึก 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.056, 0.066, 0.074, 0.072 และ 0.078 mm mm⁻² ตามลำดับ ส่วนต้นยางที่ให้น้ำทุก 8 วันพบว่า การเปลี่ยนแปลงด้านความยาวรากพบว่าที่ระดับความลึกผิวดิน 0-20 cm มีค่าลดลงภายหลังจากให้น้ำกลับคืนในระยะแรก (D15) จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของความยาวรากที่ระดับความลึก 20-40 cm พบว่า มีค่าลดลงเมื่อเข้าสู่ระยะการให้น้ำกลับคืนในรอบที่สอง (D27-D30) ส่วนความยาวรากที่ระดับความลึก 40 - 60 cm ลดลงในช่วงสุดท้ายของการทดลอง โดยค่าเฉลี่ยความยาวรากที่ระดับความลึก 20 - 40, 40 -60, 60 - 80 และ 80 - 100 cm มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.061, 0.069, 0.073, 0.080 และ 0.082 mm mm⁻² ตามลำดับ (ภาพที่ 18)



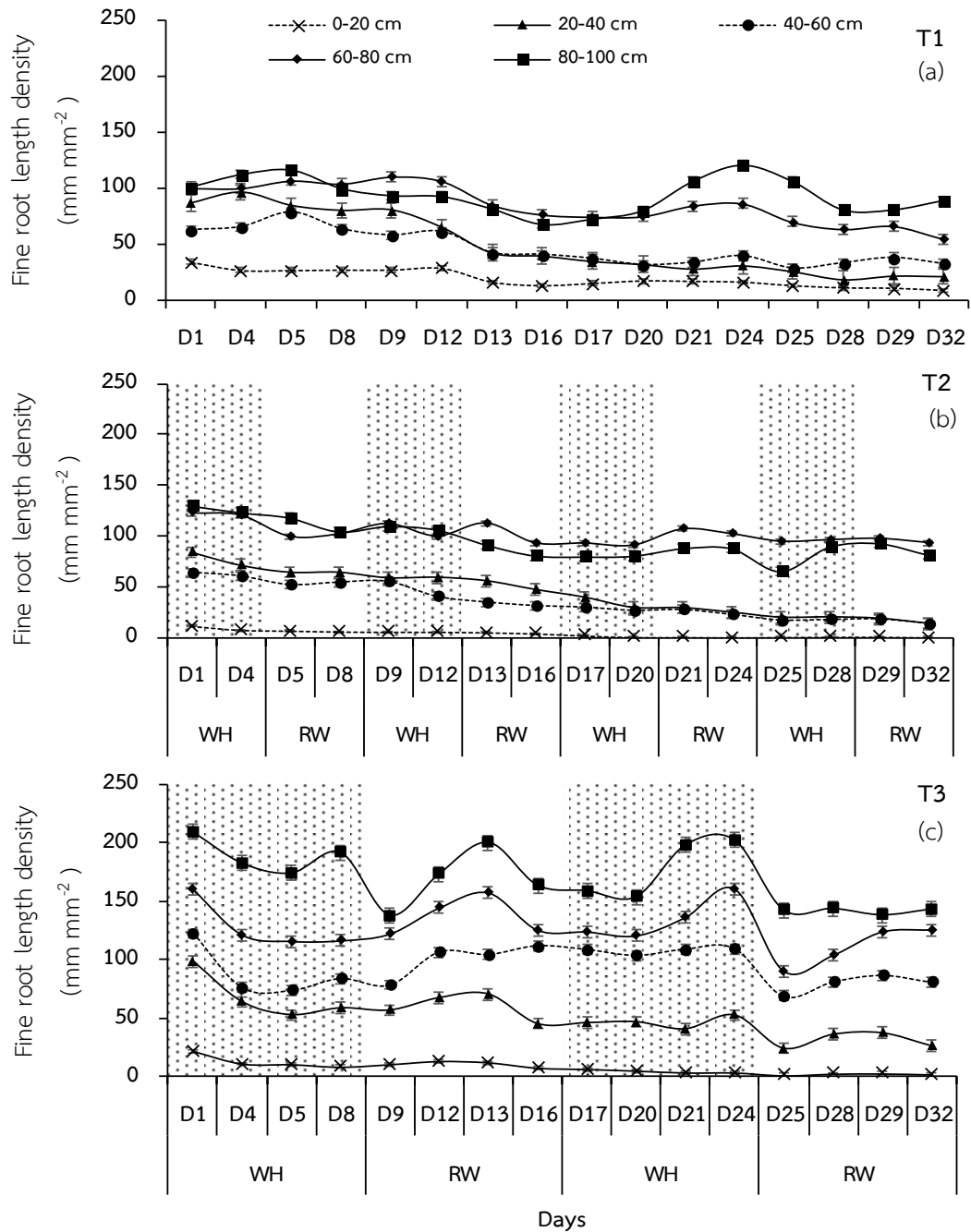
ภาพที่ 18 ค่าเฉลี่ยความยาวรากยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (a) ให้น้ำทุก 4 วัน (b) และให้น้ำทุก 8 วัน (c) ที่ระดับความลึก 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm โดยใช้กล้องมิโครไซตรอน

การเปลี่ยนแปลงของรากยางพาราที่ระดับการให้น้ำแตกต่างกัน พบว่า การเปลี่ยนแปลงของความยาวรากที่ระดับความลึก 0 - 20 cm ยางพาราในทรีตเมนต์ควบคุม ทรีตเมนต์ให้น้ำทุก 4 วัน และ 8 วัน มีค่าความยาวรากระหว่าง 0.023 - 0.078 mm mm⁻² 0.059 - 0.082 mm mm⁻² และ 0.043 - 0.077 mm mm⁻² ตามลำดับ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงสูงสุด ขณะที่ความยาวรากที่ระดับความลึก 20 - 40 cm ยางพาราทรีตเมนต์ควบคุม ทรีตเมนต์ให้น้ำทุก 4 วัน และ 8 วัน มีค่าความยาวรากระหว่าง 0.043 - 0.778 mm mm⁻² 0.072 - 0.082 mm mm⁻² และ 0.048 - 0.082 mm mm⁻² ตามลำดับ ขณะที่ความยาวรากที่ระดับความลึก 40-60 cm ยางพาราทรีตเมนต์ควบคุม ทรีตเมนต์ให้น้ำทุก 4 วัน และ 8 วัน มีค่าความยาวรากระหว่าง 0.062 - 0.082 mm mm⁻² 0.072 - 0.086 mm mm⁻² และ 0.068 - 0.085 mm mm⁻² ตามลำดับ ที่ระดับความลึก 60 - 80 cm ยางพาราทรีตเมนต์ควบคุม ทรีตเมนต์ให้น้ำทุก 4 วัน และ 8 วัน มีค่าความยาวรากระหว่าง 0.058 - 0.082 mm mm⁻² 0.075 - 0.088 mm mm⁻² และ 0.071-0.084 mm mm⁻² และ 80 - 100 cm ยางพาราทรีตเมนต์ควบคุม ทรีตเมนต์ให้น้ำทุก 4 วัน และ 8 วัน มีค่าความยาวรากระหว่าง 0.064 - 0.090 mm mm⁻² 0.076 - 0.090 mm mm⁻² และ 0.075 - 0.087 mm mm⁻² ตามลำดับ (ภาพที่ 19)



ภาพที่ 19 กราฟ box plot แสดงค่าเฉลี่ยความยาวรากยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3) ที่ระดับความลึกที่ระดับความลึก 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm

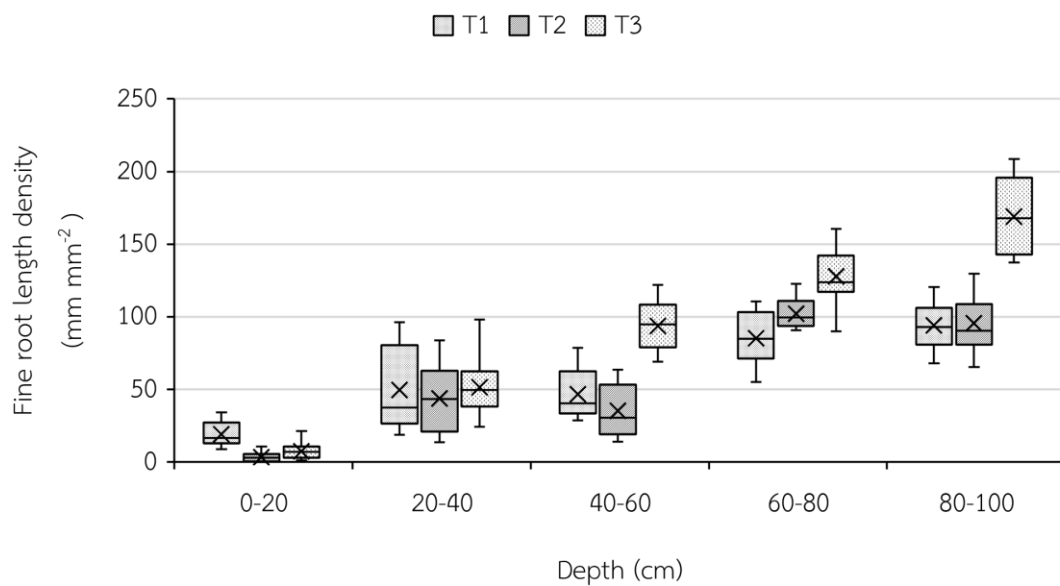
การศึกษาเปลี่ยนแปลงของรากลอยพารามีชีวิตโดยพิจารณาความยาวรากด้วยวิธีการนับจุดตัด (grid line) โดยการใช้แผ่นอะคริลิก 1 cm^{-2} ทาบกับผนังของไรโซบ็อกที่ระดับความลึก 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm พบว่า ทริตเมนต์ที่ให้น้ำปกติ (T1) ความยาวรากที่ระดับความลึก 0-20 cm มีค่าต่ำที่สุดตลอดระยะเวลาทดลอง (19.25 cm cm^{-2}) ขณะที่รากที่ระดับความลึก 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm ความยาวรากมีชีวิตมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปแบบคล้ายคลึงกันโดยแนวโน้มความยาวรากมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อยเมื่อสิ้นสุดการทดลองเปรียบเทียบกับความยาวรากในระยะแรกๆ ที่เริ่มการทดลองและค่าเฉลี่ยของความยาวรากในดินที่ระดับความลึก 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 49.40, 46.80, 85.35 และ 93.89 cm cm^{-2} ขณะที่ความยาวรากตายของต้นยางพาราที่ให้น้ำทุก 4 วัน พบว่า ที่ระดับความลึก 0-20 cm มีค่าต่ำสุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.26 cm cm^{-2} ขณะที่ความยาวรากที่ระดับความลึก 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm การเปลี่ยนแปลงตลอดการทดลองความยาวรากตายมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับทริตเมนต์ควบคุม โดยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 43.64, 35.13, 102.29 และ 95.41 cm cm^{-2} ส่วนการเปลี่ยนแปลงของรากลอยพาราในทริตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 8 วัน พบว่า ความยาวรากตายที่ระดับความลึก 0-20 cm มีค่าเฉลี่ยค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง (7.40 cm cm^{-2}) แต่ความยาวรากที่ระดับความลึก 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm พบว่ารูปแบบการเปลี่ยนของรากลอยพารามีชีวิตลดลงเมื่องดการให้น้ำในระยะแรก (D1-D8) และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการให้น้ำกลับคืน (D9-D12) อย่างไรก็ตามพบว่าในระยะสุดท้ายที่ให้น้ำกลับคืน (D25-D32) ความยาวรากที่มีชีวิตลดลงในทุกระดับความลึก ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยความยาวรากมีชีวิตมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 51.28, 93.83, 127.74 และ $169.11 \text{ cm cm}^{-2}$ (ภาพที่ 20)



หมายเหตุ: WH = Withholding water, RW=Rewatering

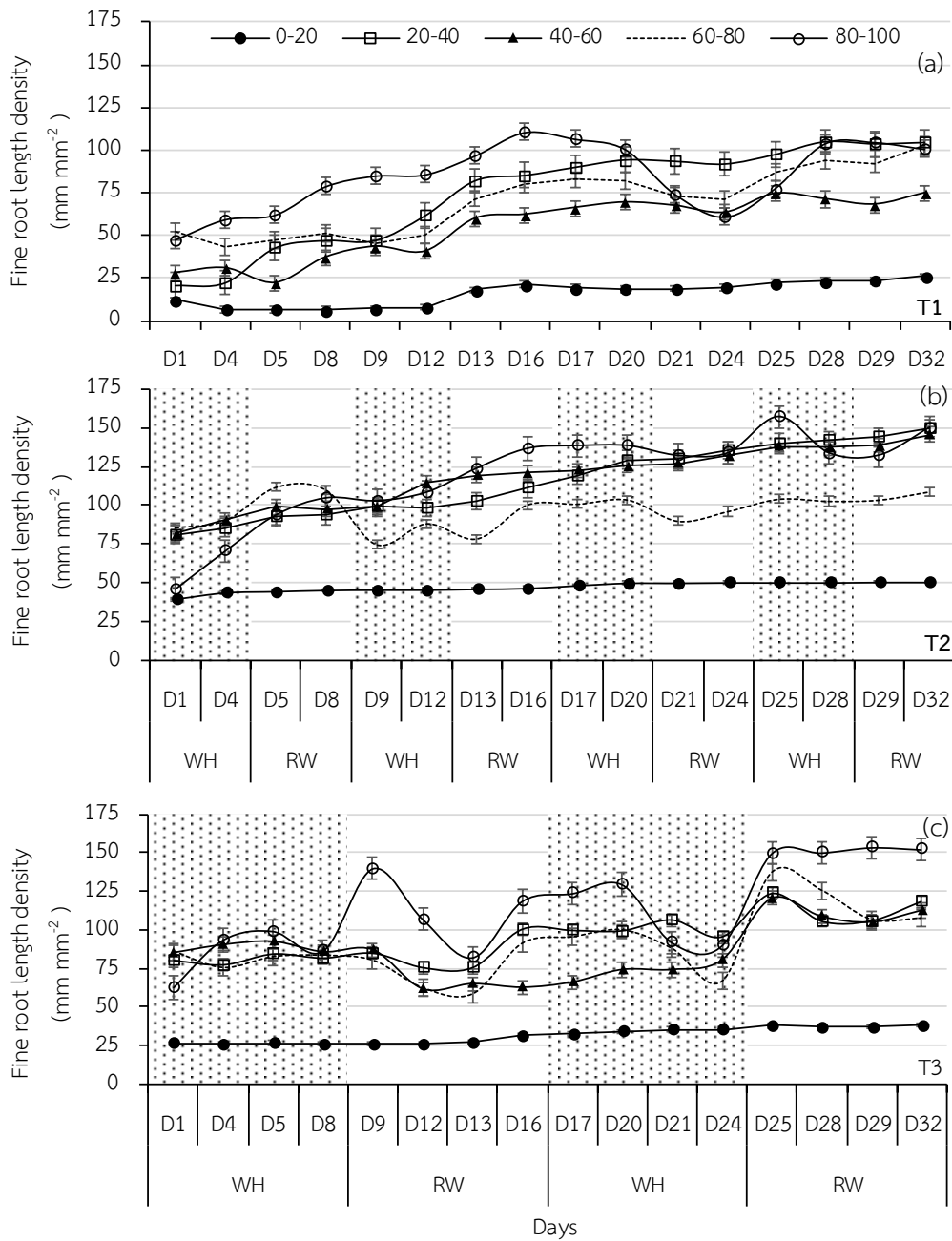
ภาพที่ 20 ค่าเฉลี่ยความยาวรากมีชีวิตที่ประเมินโดยวิธีการนับจุดตัดรากยาวพาราที่ียงพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3) ตลอดการทดลอง

ข้อมูลความยาวรากมีชีวิตเปรียบเทียบระหว่างทรีตเมนต์พบว่า ที่ระดับความลึก 0-20 cm มีค่าความยาวรากต่ำสุดทั้งสามทรีตเมนต์ ขณะที่ระดับความลึก 20 - 40 cm ข้อมูลความยาวรากของทั้ง 3 ระดับการให้น้ำมีค่าเกาะกลุ่มใกล้เคียงกัน ทรีตเมนต์ควบคุม ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 4 วัน และให้น้ำทุก 8 วัน มีค่าความยาวรากระหว่าง 8.64 - 34.18 cm cm⁻² 13.36 - 83.84 cm cm⁻² และ 24.06 - 98.21 cm cm⁻² ตามลำดับ ขณะที่ต้นยางพาราที่ให้น้ำทุก 4 วัน ข้อมูลความยาวรากมีชีวิตพบที่ระดับความลึก 60-80 และ 80-100 cm สูงที่สุด (90.62 - 122.81 cm cm⁻² และ 65.21 - 129.64 cm cm⁻²) และที่ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 8 วัน พบว่า ช่วงข้อมูลความยาวรากพบสูงสุดในดินที่ระดับความลึก 80-100 cm (137.50 - 208.74 cm cm⁻²) (ภาพที่ 21)



ภาพที่ 21 กราฟ box plot ความยาวรากมีชีวิตที่ระดับความลึก 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm เปรียบเทียบระหว่างทรีตเมนต์ให้น้ำทุกวัน (T1) ทรีตเมนต์ให้น้ำทุก 4 วัน และทรีตเมนต์ให้น้ำทุก 8 วัน

อัตราการตายของรากโดยพิจารณาความยาวรากด้วยวิธีการนับจุดตัด (grid line) โดยการใช้แผ่นอะคริลิก 10 cm ทาบกับผนังของไรโซบ็อกที่ระดับความลึก 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm ผลการศึกษาพบว่าทริตเมนต์ที่ให้น้ำทุกวัน (T1) ความยาวรากที่ระดับความลึก 0-20 cm มีค่าต่ำที่สุดตลอดระยะเวลาทดลอง ขณะที่รากที่ระดับความลึก 20-100 cm ความยาวรากเปลี่ยนแปลงรูปแบบคล้ายคลึงกันโดยแนวโน้มความยาวรากมีค่าเปลี่ยนแปลงค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ค่าเฉลี่ยของรากในดินที่ระดับความลึก 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 16.08, 74.35, 54.78, 70.27 และ 84.59 cm cm⁻² ขณะที่ความยาวรากตายของต้นยางพาราที่ให้น้ำทุก 4 วัน พบว่าที่ระดับความลึก 0-20 cm มีค่าต่ำสุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 47.60 cm cm⁻² ขณะที่ความยาวรากที่ระดับความลึก 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm การเปลี่ยนแปลงตลอดการทดลองความยาวรากตายมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกับทริตเมนต์ควบคุม โดยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 115.76, 117.96, 96.77 และ 118.89 cm cm⁻² ส่วนการเปลี่ยนแปลงของรากยางพาราในทริตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 8 วันพบว่า ความยาวรากตายที่ระดับความลึก 0-20 cm มีค่าเฉลี่ยค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง (31.59 cm cm⁻²) แต่ความยาวรากที่ระดับความลึก 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm พบว่า รูปแบบการเปลี่ยนของรากตายเพิ่มขึ้นเมื่องดการให้น้ำในระยะแรก (D1-D8) และมีค่าลดลงเมื่อมีการให้น้ำกลับคืน (D9-D12) อย่างไรก็ตาม พบว่า ในระยะสุดท้ายที่ให้น้ำกลับคืน (D25-D32) ความยาวรากตายมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยความยาวรากตายมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 94.47, 85.69, 90.31 และ 114.26 cm cm⁻² (ภาพที่ 22)

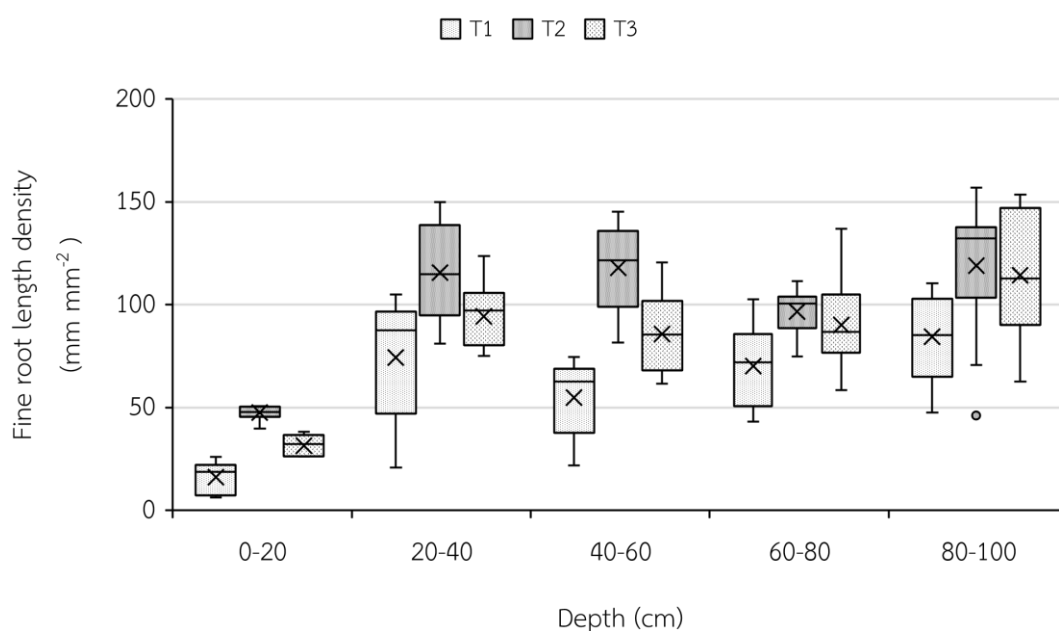


หมายเหตุ: WH = Withholding water, RW=Rewatering

ภาพที่ 22 ค่าเฉลี่ยความยาวรากตายที่ประเมินโดยวิธีการนับจุดตัดรากยาวพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน

(a) ให้น้ำทุก 4 วัน (b) และให้น้ำทุก 8 วัน (c) ตลอดการทดลอง

ข้อมูลความยาวรากตายเปรียบเทียบระหว่างทริตเมนต์ พบว่า ที่ระดับความลึก 0-20 cm มีค่าความยาวรากต่ำสุดทั้งสามทริตเมนต์เช่นเดียวความยาวรากมีชีวิต ขณะที่ระดับความลึก 20-40 cm ช่วงข้อมูลความยาวรากตายของทริตเมนต์ที่ให้น้ำตามปกติ มีค่าระหว่าง 20.82-104.89 cm cm⁻² ขณะที่ต้นยางพาราที่ให้น้ำทุก 4 วัน ช่วงข้อมูลความยาวรากมีชีวิตพบที่ระดับความลึก 20-40 และ 40-60 cm 81.19-149.81 cm cm⁻² และ 81.71-145.36 cm cm⁻² ที่ทริตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 8 วัน พบว่า ช่วงข้อมูลความยาวรากพบสูงสุดในดินที่ระดับความลึก 80-100 cm (62.60-153.48 cm cm⁻²) (ภาพที่ 23)

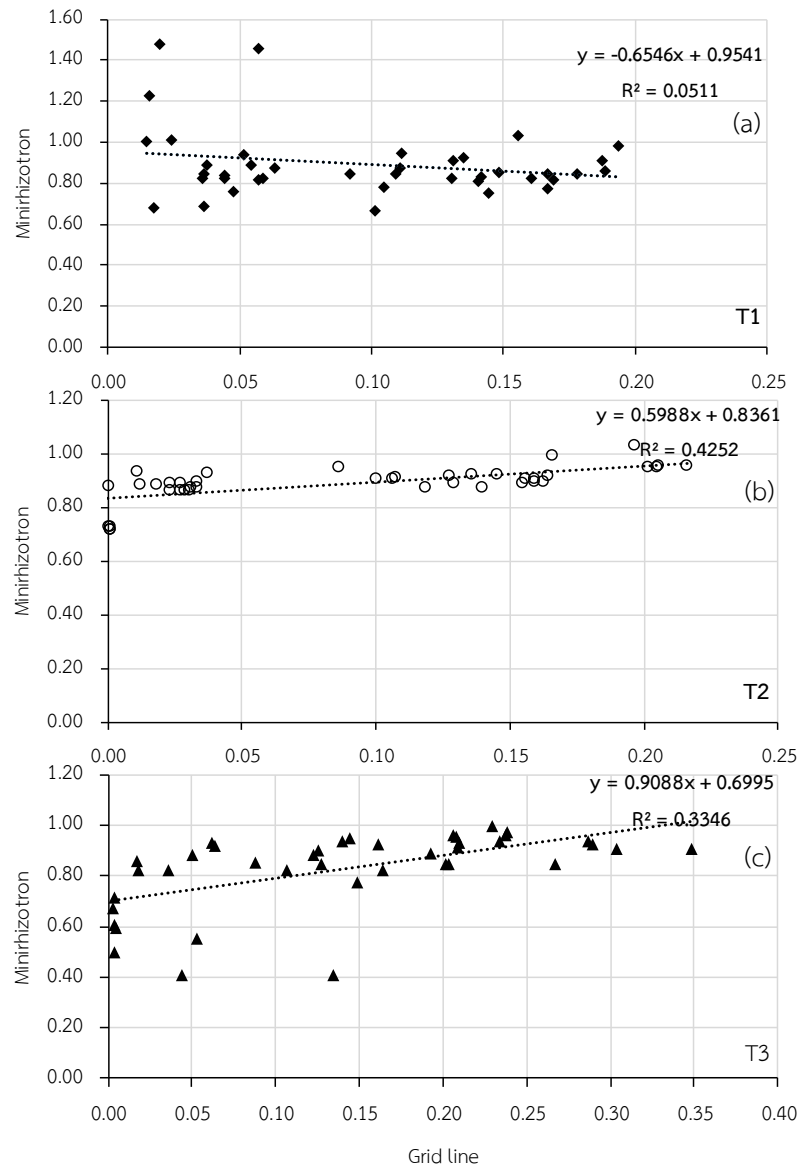


ภาพที่ 23 กราฟ box plot ความยาวรากตายที่ประเมินด้วยวิธีการนับจุดตัดราก ที่ระดับความลึก 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 และ 80-100 cm เปรียบเทียบระหว่างทริตเมนต์ให้น้ำทุกวัน (T1) ทริตเมนต์ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และทริตเมนต์ให้น้ำทุก 8 วัน (T3)

5. ความสัมพันธ์ของความยาวรากที่ประเมินด้วยเทคนิคมินิไรโซตรอนและวิธีนับจุดตัดราก

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรากยางพาราภายใต้ระดับการให้น้ำที่แตกต่างกัน โดยใช้เทคนิคมินิไรโซตรอนและวิธีการนับจุดตัดราก ประเมินการเปลี่ยนแปลงของรากที่ระดับความลึก 0-100 cm พบว่า ในทริตเมนต์ควบคุมความยาวรากที่ได้จากการประเมินด้วยเทคนิคมินิไรโซตรอนมีความสัมพันธ์กับความยาวรากที่ได้จากวิธีการนับจุดตัดรากต่ำ ($R^2 = 0.051$) โดยทริตเมนต์ที่มี 2 พบว่าความสัมพันธ์ของความยาวรากทั้งสองวิธีการมีค่าความสัมพันธ์ปานกลาง ($R^2 = 0.425$)

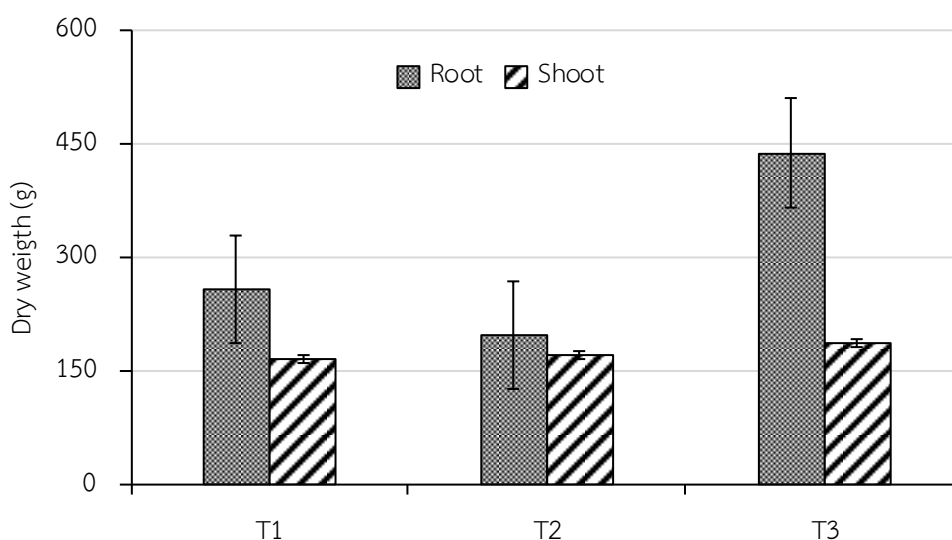
ในขณะที่ที่รืตเมนต์ที่ 3 ความยาวรากที่ประเมินได้มีความสัมพันธ์ระดับต่ำถึงปานกลาง ($R^2 = 0.335$) (ภาพที่ 24)



ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความยาวรากที่ระดับความลึก 0-100 cm ประเมินโดยใช้การนับจุดตัดราก (Gridline) และการใช้เทคนิคมินิไรโซตรอน เปรียบเทียบระหว่างรืตเมนต์ให้น้ำทุกวัน (a) รืตเมนต์ให้น้ำทุก 4 วัน (b) และรืตเมนต์ให้น้ำทุก 8 วัน (c)

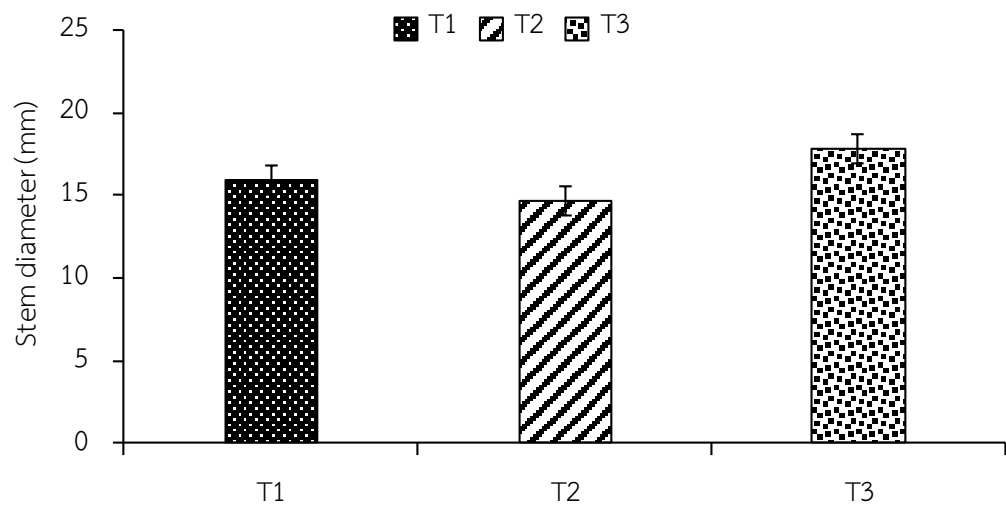
5.1 มวลชีวภาพของต้นยางพารา

น้ำหนักแห้งของต้นยางพาราที่ระดับการให้น้ำแตกต่างกันพบว่าในทรีตเมนต์ที่มีการให้น้ำปกติ (T1) ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของรากมีค่าสูงกว่าส่วนของยอด (257.78 และ 166.13 g) ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) น้ำหนักแห้งของรากมีค่ามากกว่ายอดเล็กน้อยเท่ากับ 197.81 และ 171.32 g ขณะที่ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำทุก 8 วัน (T3) พบว่า น้ำหนักแห้งของรากและยอดมีค่าสูงสุดโดยน้ำหนักแห้งของรากและยอดเท่ากับ 437.90 และ 186.46 g อย่างไรก็ตามความแตกต่างของน้ำหนักแห้งของรากและยอดไม่พบความแตกต่างทางสถิติทั้ง 3 ทรีตเมนต์ (ภาพที่ 25)



ภาพที่ 25 ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของรากและยอดต้นยางพาราทั้งยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3) ที่ภายหลังสิ้นสุดการทดลอง

นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นยางพาราทั้ง 3 ทรีตเมนต์ ไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติ โดยต้นยางที่ให้น้ำทุก 8 วันมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นมากที่สุด รองลงคือต้นยางที่ให้น้ำปกติ และต้นยางที่ให้น้ำทุก 4 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 17.84 15.95 และ 14.69 mm ตามลำดับ (ภาพที่ 26)



ภาพที่ 26 ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นยางพาราที่มีการให้น้ำทุกวัน (T1) ให้น้ำทุก 4 วัน (T2) และให้น้ำทุก 8 วัน (T3) ภายหลังสิ้นสุดการทดลอง

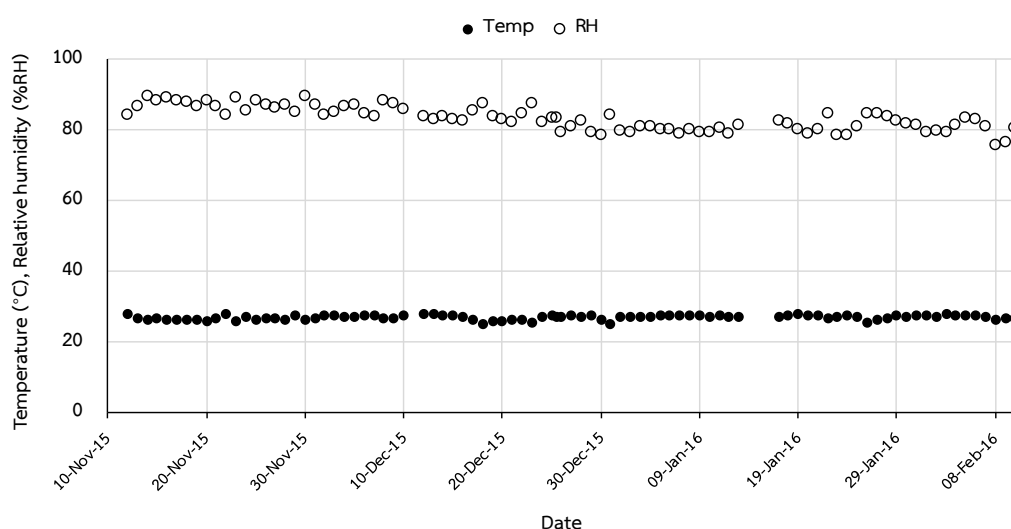
3.2 ผลการทดลองที่ 2

1. ข้อมูลคุณสมบัติของดิน

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินที่นำมาใช้เป็นวัสดุปลูกจากศูนย์ปฏิบัติการวิเคราะห์กลาง คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ พบว่า ไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 0.04 % ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เท่ากับ 15.85 mg/kg โพแทสเซียม 51.08 mg/kg ความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 6.02 และการจำแนกลักษณะทางกายภาพของเนื้อดินจัดเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย

2. ข้อมูลอากาศระหว่างทดลอง

ข้อมูลอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ด้วยเครื่องวัดและบันทึกแบบอัตโนมัติทุกชั่วโมง ตลอดการทดลอง (พฤศจิกายน 2558 – กุมภาพันธ์ 2559) พบว่า ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 31.3 °C และอุณหภูมิต่ำสุด 24.8 °C ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ยต่ำสุด-สูงสุด เท่ากับ 75.6 และ 89.5 เปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศตลอดการทดลองในช่วงรอบวันพบว่าช่วงเช้าสภาพอากาศเปิดแต่มีฝนตกในช่วงบ่ายถึงเย็นซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดจากอิทธิพลของลมมรสุมประจำปีในพื้นที่ภาคใต้ฝั่งตะวันออก ดังจะเห็นได้ว่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม 2558 มีค่าเฉลี่ยค่อนข้างสูง (85 เปอร์เซ็นต์) (ภาพที่ 27)

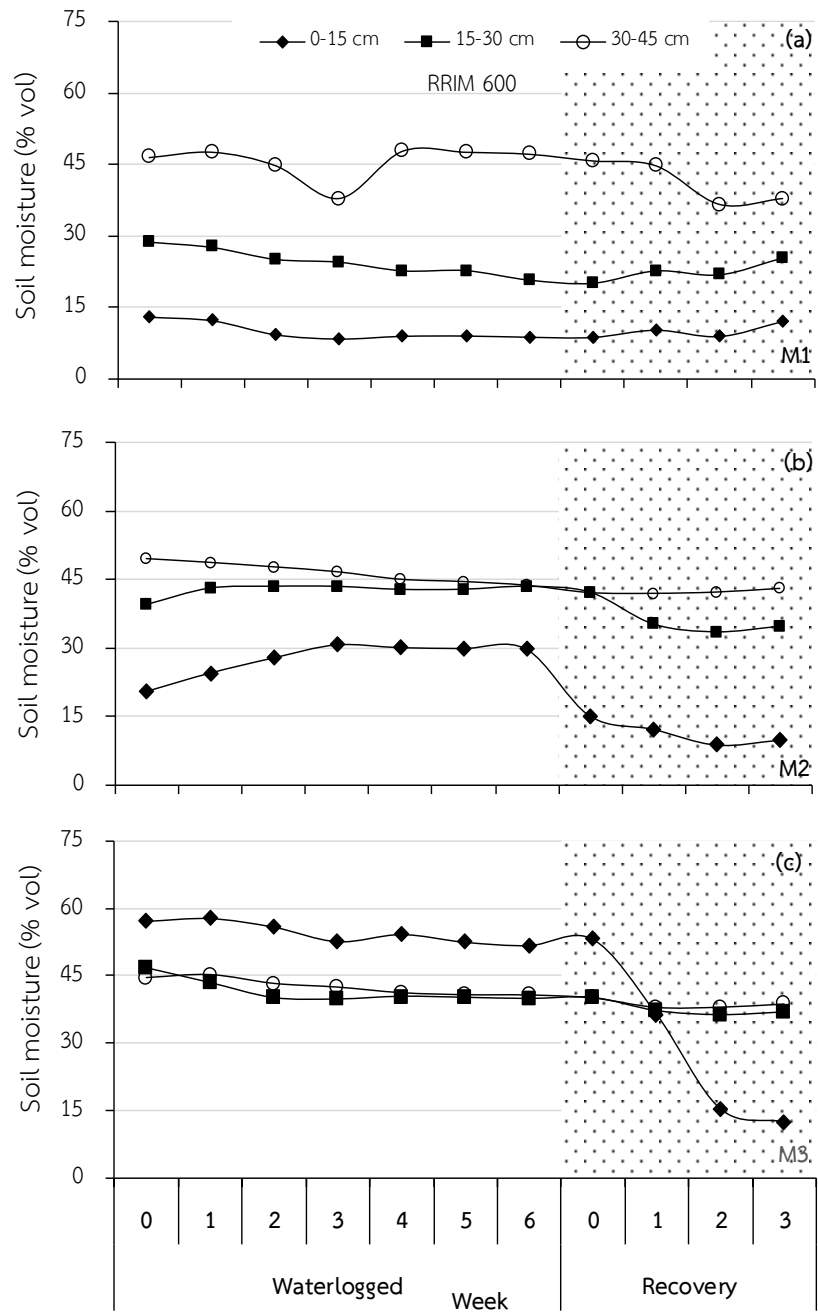


ภาพที่ 27 ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ (°C) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) เฉลี่ยรายวัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง บันทึกโดยเครื่องตรวจวัดอุณหภูมิอากาศ และความชื้นอัตโนมัติ

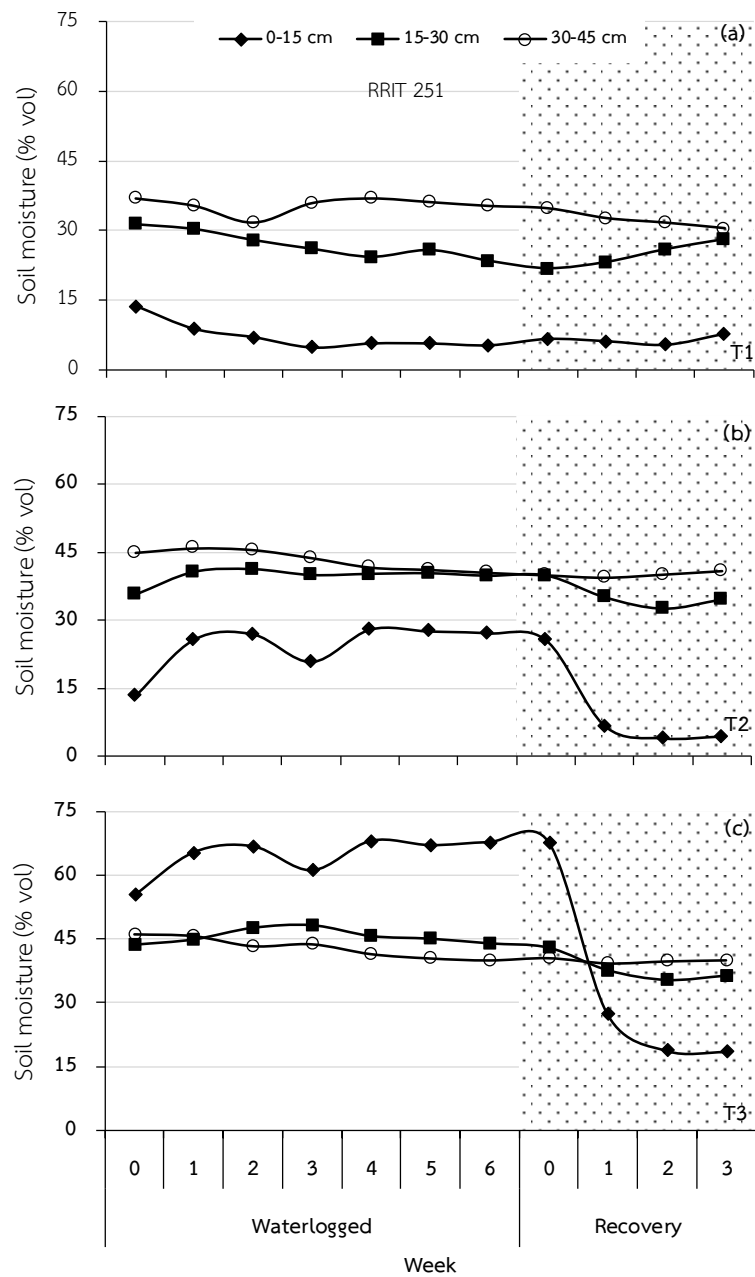
3. ความชื้นดิน

การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดินที่ระดับความลึก 0-15, 15-30 และ 30-45 cm ของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ตลอดการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่ทดลองของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ทริตเมนต์ควบคุมที่ให้น้ำปกติ (M1) เปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่ระดับความลึก 0-15, 15-30 และ 30-45 cm มีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง โดยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.83, 23.73 และ 43.01 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทริตเมนต์ที่ให้น้ำขังระดับผิวดิน (M2) เปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่ระดับความลึก 0-15, 15-30 และ 30-45 cm ในระยะ 6 สัปดาห์ที่ให้น้ำขังมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.66, 42.61 และ 46.52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และภายหลังสัปดาห์ที่ 6 ปล่อยน้ำขัง ความชื้นที่ระดับความลึก 0-15 ลดลงเหลือเฉลี่ยเท่ากับ 11.58 ที่ระดับความลึก 15-30 และ 30-45 cm เท่ากับ 36.44 และ 42.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนทริตเมนต์ที่ให้น้ำขังเหนือระดับผิวดิน (M3) เปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่ระดับความลึก 0-15 cm มีค่าสูงสุดในระยะที่ให้น้ำขัง ความชื้นดินที่ระดับความลึก 0-15, 15-30 และ 30-45 cm ในระยะ 6 สัปดาห์ที่ให้น้ำขังมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 54.56 41.49 และ 42.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และภายหลังสัปดาห์ที่ 6 ปล่อยน้ำขัง ความชื้นที่ระดับความลึก 0-15 ลดลงเหลือเฉลี่ยเท่ากับ 13.29 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความลึก 15-30 และ 30-45 cm เท่ากับ 37.53 และ 38.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 28)

ต้นยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ทริตเมนต์ควบคุมที่ให้น้ำปกติ (T1) เปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่ระดับความลึก 0-15, 15-30 และ 30-45 cm มีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง โดยที่ระดับความลึก 0-15 cm ค่าเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 7.02 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ระดับความลึก 15-30 และ 30-45 cm ค่าเฉลี่ยความชื้นดินการทดลองเท่ากับ 26.25 และ 34.43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทริตเมนต์ที่ให้น้ำขังระดับผิวดิน (T2) เปอร์เซ็นต์ ความชื้นดินที่ระดับความลึก 0-15, 15-30 และ 30-45 cm ในระยะ 6 สัปดาห์ที่ให้น้ำขังมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 24.33 39.68 และ 43.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และภายหลังสัปดาห์ที่ 6 ปล่อยน้ำขัง ความชื้นที่ระดับความลึก 0-15 ลดลงเหลือเฉลี่ยเท่ากับ 10.24 ที่ระดับความลึก 15-30 และ 30-45 cm เท่ากับ 35.57 และ 40.13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนทริตเมนต์ที่ให้น้ำขังเหนือระดับผิวดิน (T3) เปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่ระดับความลึก 0-15 cm มีค่าสูงสุดในระยะที่ให้น้ำขัง ความชื้นดินที่ระดับความลึก 0-15, 15-30 และ 30-45 cm ในระยะ 6 สัปดาห์ที่ให้น้ำขังมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 64.46 และ 45.46 เปอร์เซ็นต์ และภายหลังสัปดาห์ที่ 6 ปล่อยน้ำขัง ความชื้นที่ระดับความลึก 0-15 ลดลงเหลือเฉลี่ยเท่ากับ 17.23 ที่ระดับความลึก 15-30 และ 30-45 เท่ากับ 38.01 และ 39.58 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 29)



ภาพที่ 28 การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในยางพาราที่ให้น้ำปกติ (a) ยางพาราที่ให้น้ำข้างผิวดิน (b) และยางพาราที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (c) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขัง และระยะปล่อยน้ำข้าง



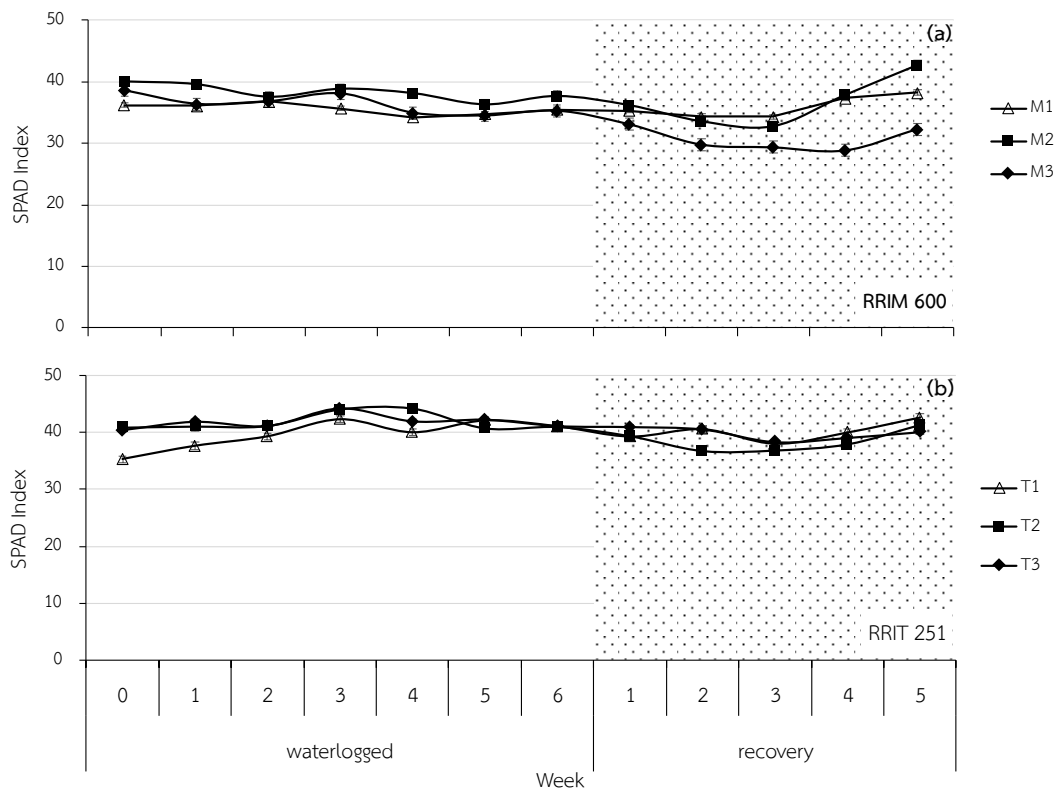
ภาพที่ 29 การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ในยางพาราที่ให้น้ำปกติ (a) ยางพาราที่ให้น้ำขังผิวดิน (b) และยางพาราที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (c) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขัง และระยะปล่อยน้ำขัง

4. การตอบสนองทางสรีรวิทยา

4.1 ดัชนีความเขียวของใบ (SPAD index)

ค่าความเขียวของใบต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 เปรียบเทียบระหว่างทรีตเมนต์ควบคุม ทรีตเมนต์ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดิน และทรีตเมนต์ท่วมขังเหนือผิวดิน ที่ระยะเวลาให้น้ำท่วมขัง 6 สัปดาห์ และระยะปล่อยน้ำจัดการให้น้ำท่วมขัง 5 สัปดาห์ โดยพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าความเขียวใบยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ทั้งสามทรีตเมนต์มีค่าใกล้เคียงทั้งในระยะให้น้ำขังและภายหลังปล่อยน้ำขัง แต่ในทรีตเมนต์ที่ให้น้ำขังเหนือผิวดิน (T3) พบว่า ค่าความเขียวของลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับทรีตเมนต์ให้น้ำปกติ (M1) และให้น้ำขังระดับผิวดิน (M2) แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 35.4 37.63 และ 33.99 SPAD index ตามลำดับ (ภาพที่ 30a)

การเปลี่ยนแปลงของค่าความเขียวใบของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างทรีตเมนต์ โดยค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองของทรีตเมนต์ให้น้ำปกติ (M1) ให้น้ำขังระดับผิวดิน (M2) และให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (M3) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 39.86 40.44 และ 41.04 SPAD index ตามลำดับ (ภาพที่ 30b)

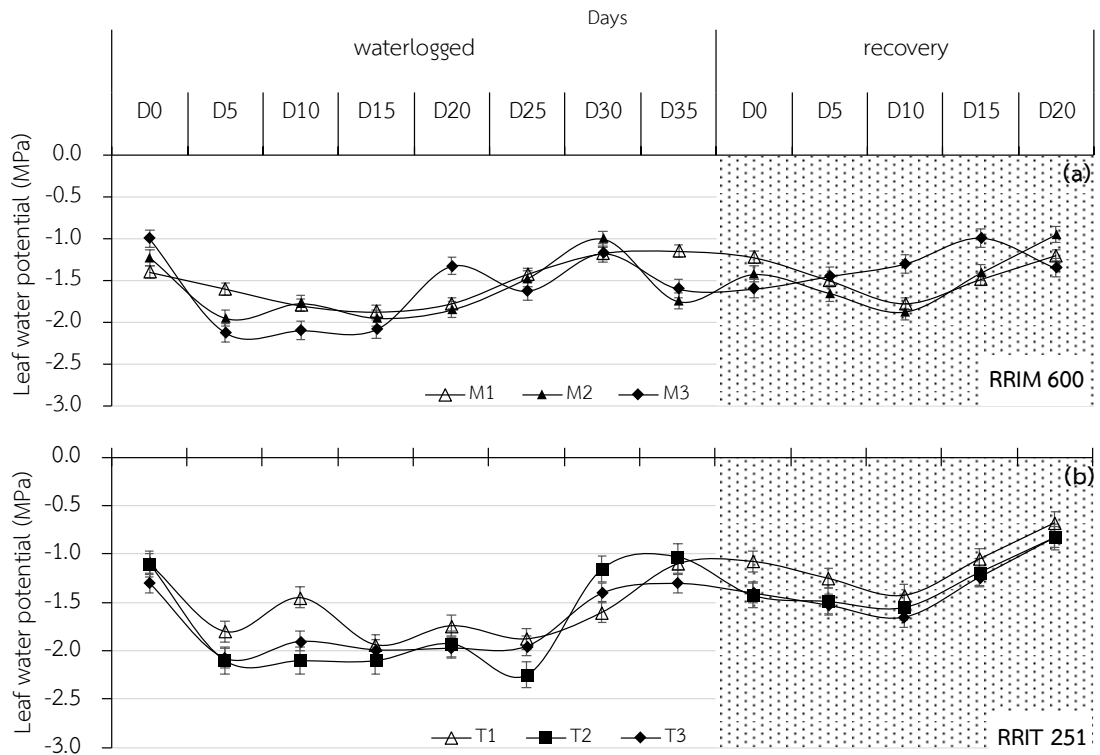


ภาพที่ 30 ค่าความเขียวของใบต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 เปรียบเทียบระหว่าง ทริตเมนต์ควบคุม (M1,T1) ทริตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดิน (M2,T2) และทริตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (M3,T3) ตลอดระยะเวลาการทดลองให้น้ำขังและภายหลังจากการปล่อยน้ำขัง

4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ของน้ำในใบ (Leaf water potential)

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในต้นยางพาราประเมินในรูปของการวัดค่าศักย์ของน้ำในใบ พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ของน้ำในใบต้นยางพาราทั้งสองพันธุ์มีการตอบสนองที่คล้ายคลึงกัน โดยค่าศักย์ของน้ำในใบของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ทั้งสามระดับการให้น้ำมีค่าลดลงในวันที่ 5 ภายหลังจากการทดลอง จากนั้นค่าการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกันจนกระทั่งระยะที่ปล่อยน้ำขังผ่านไป 10 วัน ค่าศักย์ของน้ำในใบทริตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดินมีค่าเพิ่มขึ้น (-1.30 MPa) ส่วนค่าศักย์ของน้ำในทริตเมนต์ควบคุมและให้น้ำขังผิวดินการเปลี่ยนแปลงของน้ำในใบมีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -1.57 MPa -1.56 MPa และ -1.48 MPa ตามลำดับ (ภาพที่ 31a) การเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ของน้ำในใบยางพาราพันธุ์ RRIT 251 พบว่า ค่าศักย์ของน้ำในใบลดลงเมื่อผ่านการให้น้ำขัง 5 วัน จนกระทั่งวันที่ 20 พบว่า ค่าศักย์ของน้ำในทริตเมนต์ที่มีการให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน

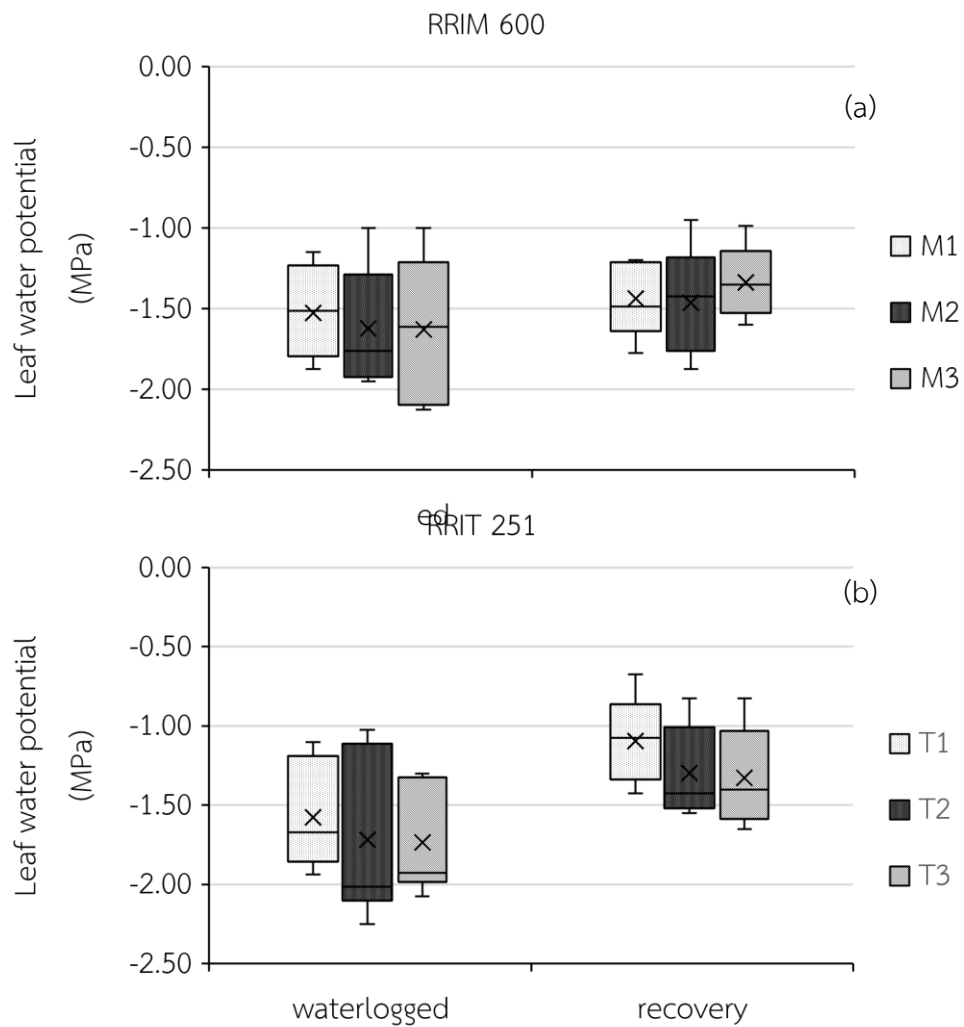
ดินมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับทรีตเมนต์ควบคุม และทรีตเมนต์ให้น้ำขังเหนือผิวดินมีค่าตอบสนองเพิ่มขึ้นในวันที่ 25 ระหว่างที่ให้น้ำท่วมขัง โดยในระยะปล่อยน้ำขังค่าศักย์ของน้ำในใบมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงในทุกทรีตเมนต์ ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองของทรีตเมนต์ให้น้ำปกติ ให้น้ำขังผิวดิน และท่วมเหนือผิวดินเท่ากับ -1.46 MPa -1.56 MPa และ -1.69 MPa ตามลำดับ (ภาพที่ 31b)



ภาพที่ 31 การตอบสนองของค่าศักย์ของน้ำในใบของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 เปรียบเทียบระหว่างทรีตเมนต์ควบคุม (M1,T1) ทรีตเมนต์ให้น้ำขังระดับผิวดิน (M2,T2) และทรีตเมนต์ให้น้ำขังเหนือผิวดิน (M3,T3) ในระยะทดลองให้น้ำท่วมขัง และภายหลังการปล่อยน้ำขัง

การตอบสนองของค่าการชักนำปากใบของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ระยะให้น้ำท่วมขังและหลังให้น้ำขัง (ระยะฟื้นตัว) พบว่าในระยะให้น้ำขัง 42 วัน การตอบสนองของยางพาราที่ได้รับน้ำปกติ น้ำท่วมขังผิวดิน และให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดินพบว่ามีค่าศักย์ของน้ำในใบของทรีตเมนต์ควบคุม (M1) ให้น้ำขังผิวดิน (M2) และน้ำท่วมเหนือผิวดิน (M3) ใกล้เคียงกันไม่พบความแตกต่างทางสถิติ โดยในระยะให้น้ำขัง ค่าการชักนำปากใบมีค่าระหว่าง -1.79 ถึง -1.15 MPa -1.95 ถึง -1.0 MPa และ -2.13 ถึง -1.0 MPa ตามลำดับ และการตอบสนองในระยะฟื้นตัว การตอบสนองของยางพาราที่ได้รับน้ำปกติ น้ำท่วมขังผิวดิน และให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดินมีค่าศักย์ของน้ำในใบใกล้เคียงกันกับระยะที่ให้น้ำขังค่าการตอบสนองอยู่ระหว่าง -1.78 ถึง -1.20 MPa -1.88 ถึง -0.95 MPa และ -1.60 ถึง -0.99 MPa ตามลำดับ (ภาพที่ 32a)

ค่าการตอบสนองของค่าการชักนำปากใบของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่ระยะให้น้ำท่วมขังและหลังให้น้ำขัง (ระยะฟื้นตัว) พบว่า ในระยะให้น้ำขัง 42 วัน ยางพาราที่ได้รับน้ำปกติ (T1) น้ำท่วมขังผิวดิน (T2) และให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (T3) พบว่ามีค่าศักย์ของน้ำในใบใกล้เคียงกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติ โดยในระยะให้น้ำขัง ค่าการชักนำปากใบมีค่าระหว่าง -1.94 ถึง -1.10 MPa -2.25 ถึง -1.03 MPa และ -2.08 ถึง -1.30 MPa ตามลำดับ และการตอบสนองในระยะฟื้นตัว การตอบสนองของยางพาราที่ได้รับน้ำปกติ (T1) น้ำท่วมขังผิวดิน (T2) และให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (T3) พบว่า มีค่าศักย์ของน้ำในใบใกล้เคียงกันกับระยะที่ให้น้ำขังค่าการตอบสนองอยู่ระหว่าง -1.34 ถึง -0.68 MPa -1.52 ถึง -0.83 MPa และ -1.65 MPa ถึง -0.83 MPa ตามลำดับ (ภาพที่ 32b)

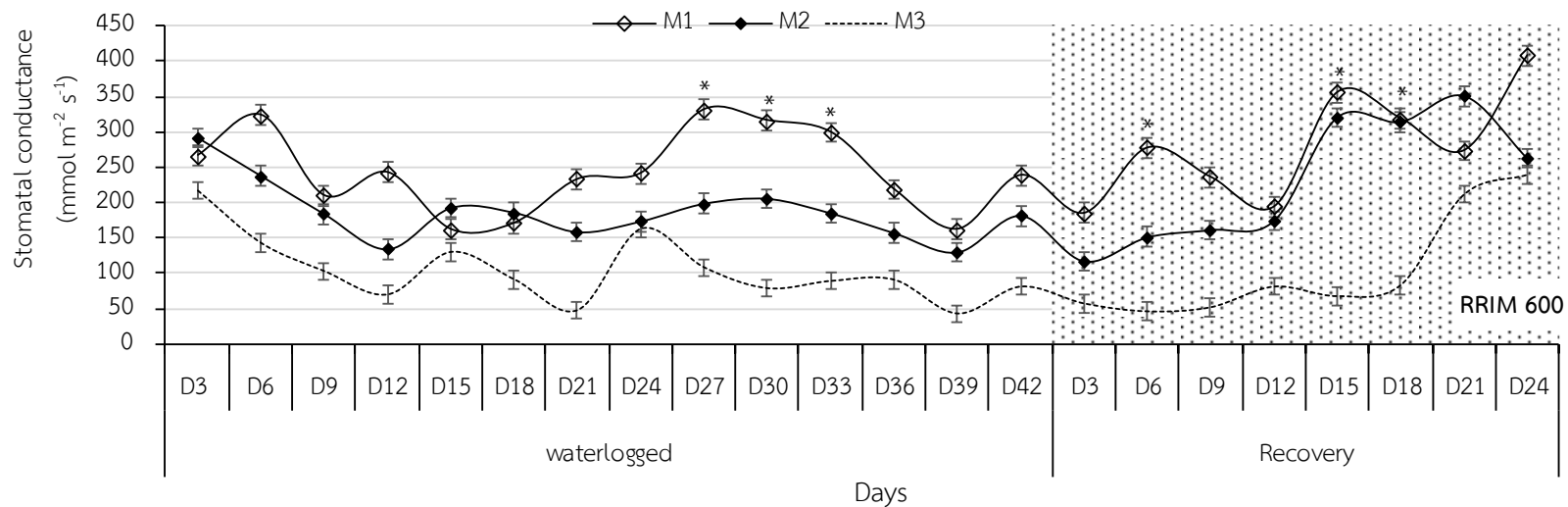


ภาพที่ 32 กราฟ box plot การตอบสนองของค่าศักย์ของน้ำในใบยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำปกติ (M1,T1) ทรีตเมนต์ให้น้ำขังผิวดิน (M2,T2) และทรีตเมนต์ให้น้ำขังเหนือผิวดิน (M3,T3) เปรียบเทียบระหว่างระยะให้น้ำท่วมขัง และระยะฟื้นตัว

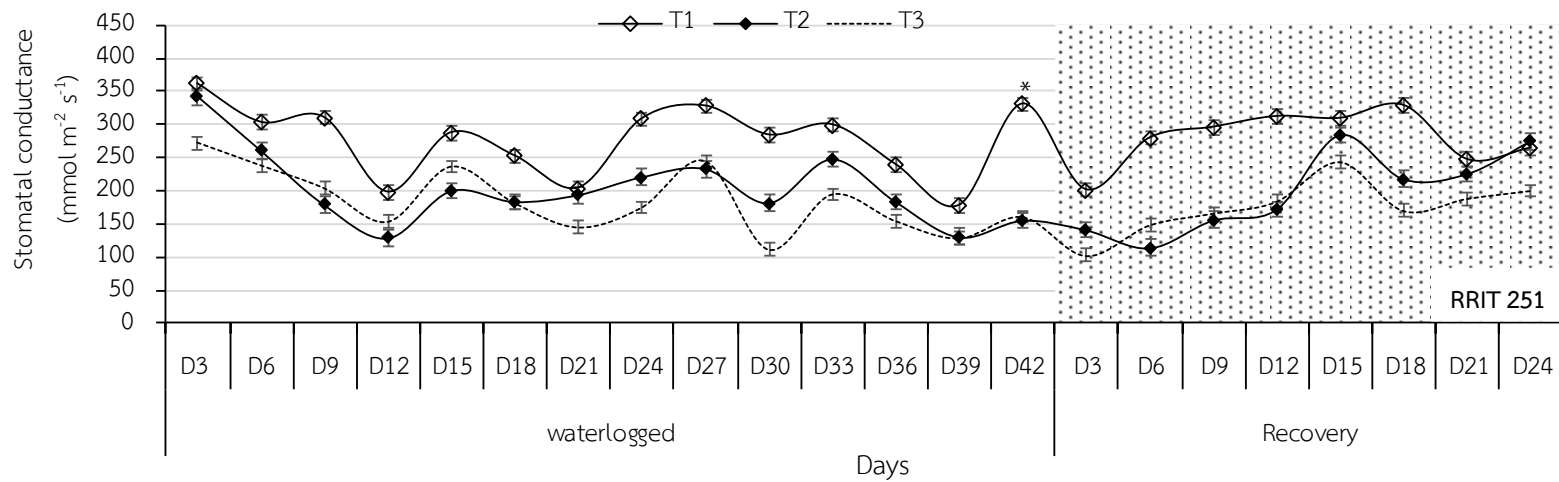
4.3 ค่าการชักนำปากใบ (Stomatal conductance)

การตอบสนองของการแลกเปลี่ยนก๊าซโดยวัดอัตราการเปิดปิดปากใบในระยะให้น้ำท่วมขังและระยปล่อยน้ำขัง พบว่า การตอบสนองของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำปกติมีค่าการตอบสนองสูงสุดตลอดการทดลองขณะที่ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำขังเหนือผิวดิน และให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดินมีค่าการตอบสนองต่ำกว่าทรีตเมนต์ที่ให้น้ำปกติโดยที่การเปลี่ยนแปลงพบรูปแบบคล้ายกัน ซึ่งในระยะแรกค่าการชักนำปากใบทั้งสามทรีตเมนต์มีค่าลดลงจนกระทั่งถึงวันที่ 12 ของการทดลอง การชักนำปากใบของ ทรีตเมนต์ให้น้ำปกติ (M1) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกับทรีตเมนต์ให้น้ำขังผิวดิน (M2) และเหนือผิวดิน (M3) จากนั้นการเปลี่ยนแปลงเกิดสลับกันต่อเนื่องจนกระทั่งถึงระยะเริ่มปล่อยน้ำขัง พบว่า การชักนำปากใบของทรีตเมนต์ให้น้ำปกติ (M1) และน้ำขังผิวดิน (M2) มีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 6 หลังจากให้น้ำขัง (277.06 และ $151.0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ขณะที่ทรีตเมนต์ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (M3) มีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังให้น้ำ 21 วัน ($211.25 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (ภาพที่ 33)

การตอบสนองของค่าการเปิดปิดปากใบของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 พบว่าการชักนำปากใบในระยะให้น้ำขังในระยะแรกค่าลดลงทุกทรีตเมนต์จนกระทั่งวันที่ 12 ของการทดลอง และมีค่าเพิ่มขึ้น ลดลงสลับกันตลอดระยะให้น้ำท่วมขัง ขณะที่การตอบสนองเมื่อปล่อยน้ำขังพบว่าทรีตเมนต์ควบคุมการตอบสนองสูงสุด ขณะที่ทรีตเมนต์ให้น้ำขังระดับผิวดิน (T2) และน้ำท่วมเหนือผิวดิน (T3) มีค่าเพิ่มขึ้นหลังผ่านไป 15 วัน (283.70 และ $242.86 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (ภาพที่ 34)



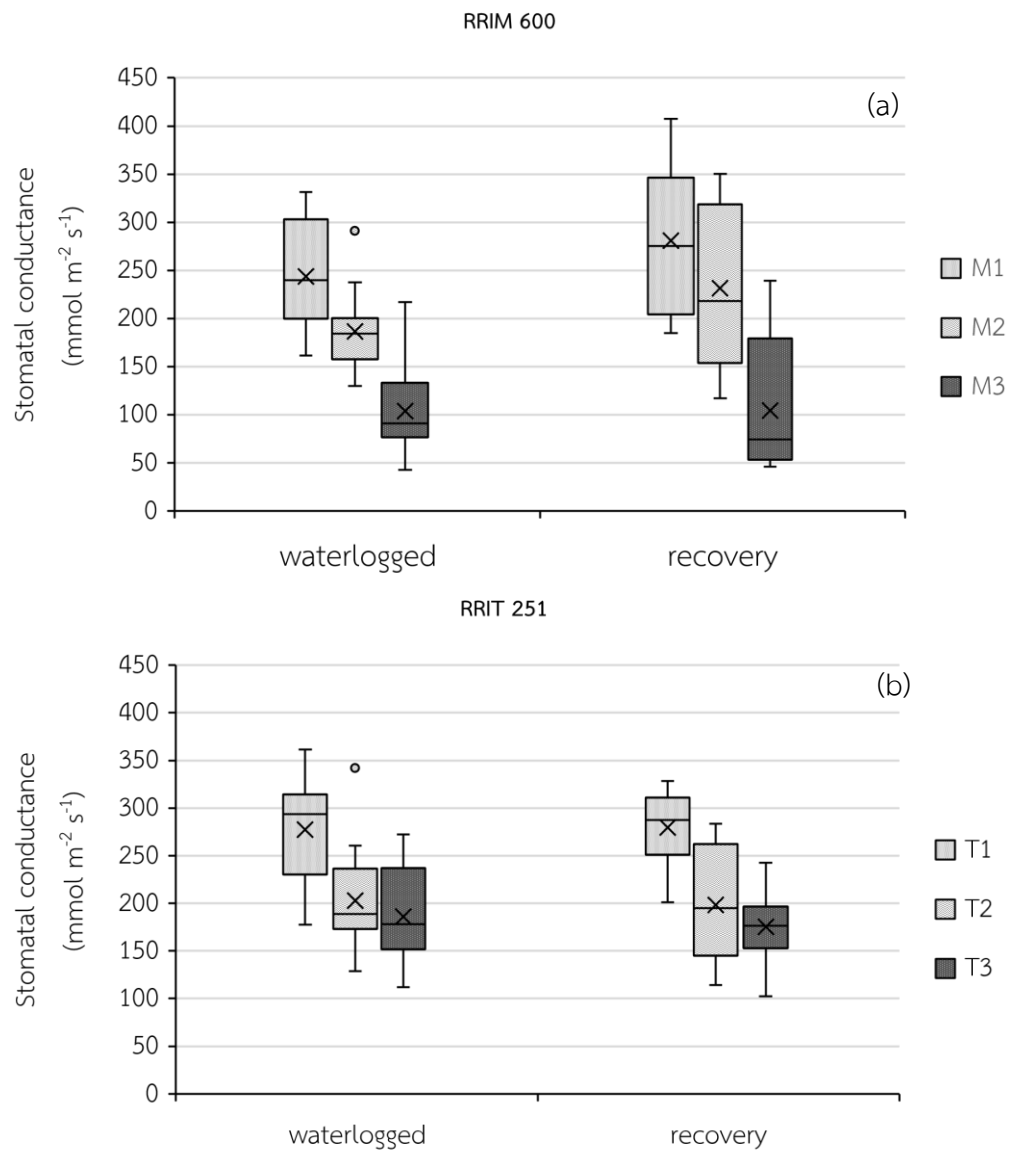
ภาพที่ 33 การเปลี่ยนแปลงของค่าการซึมน้ำปากใบของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ให้น้ำปกติ (M1) ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดิน (M2) และให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (M3) เปรียบเทียบที่ระยะเวลาให้น้ำท่วมขัง และระยะปลดน้ำขัง



ภาพที่ 34 การเปลี่ยนแปลงของค่าการชักนำปากใบของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่ให้น้ำปกติ (T1) ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดิน (T2) และให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (T3) เปรียบเทียบที่ระยะเวลาให้น้ำท่วมขัง และระยะปล่อยน้ำขัง

ค่าการชักนำปากใบเปรียบเทียบระหว่างระยะให้น้ำท่วมขังและภายหลังจากการปล่อยน้ำขังของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 พบว่า ในระยะให้น้ำท่วมขังค่าการตอบสนองการชักนำปากใบในทริตเมนต์ให้น้ำปกติ (M1) มีค่าสูงกว่าทริตเมนต์ให้น้ำขังผิวดิน และท่วมเหนือผิวดิน โดยมีค่าระหว่าง $161.75 - 331.39 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ทริตเมนต์ให้น้ำขังผิวดิน (M2) มีค่าต่ำกว่า และการตอบสนองการชักนำปากใบแนวโน้มลดลงมีค่าระหว่าง $129.75 - 237.47 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และทริตเมนต์ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (M3) มีค่าต่ำที่สุด $42.83 - 216.89 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ขณะที่ภายหลังจากการปล่อยน้ำขังการตอบสนองการชักนำปากใบของยางพาราทั้งสามระดับการให้น้ำมีค่าเพิ่มขึ้น โดยการตอบสนองของทริตเมนต์ให้น้ำปกติ (M1) ยังคงมีระดับการชักนำปากใบสูงสุดมีค่าระหว่าง $184.72 - 407.71 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ทริตเมนต์ให้น้ำขังผิวดิน (M2) ค่าการตอบสนองของการชักนำปากใบสูงขึ้นจากระยะให้น้ำท่วมขังเท่ากับ $117.05 - 350.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และทริตเมนต์ให้น้ำขังเหนือผิวดิน (M3) ค่าการชักนำปากใบมีค่าตอบสนองสูงขึ้นเช่นเดียวกันมีค่าระหว่าง เท่ากับ $45.83 - 239.29 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ภาพที่ 35a)

การชักนำปากใบของต้นยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ทั้งสามระดับการให้น้ำพบว่า ระยะให้น้ำขัง ทริตเมนต์ให้น้ำปกติ (T1) มีการชักนำปากใบสูงสุดมีค่าระหว่าง $177.83 - 361.43 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ทริตเมนต์ให้น้ำขังผิวดิน (T2) และเหนือผิวดิน (T3) มีค่าการชักนำปากใบใกล้เคียงกัน โดยมีค่าระหว่าง $129.11 - 260.75 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และ $112.17 - 272.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ ส่วนการตอบสนองของปากใบภายหลังจากปล่อยน้ำขัง พบว่า ทริตเมนต์ให้น้ำปกติ (T1) ค่าการตอบสนองปากใบมีค่าใกล้เคียงกับระยะที่ให้น้ำขังมีเท่ากับ $201.32 - 328.57 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ทริตเมนต์ให้น้ำขังผิวดิน (T2) เท่ากับ $(114.27 - 283.7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ และทริตเมนต์ให้น้ำขังเหนือผิวดิน (T3) มีค่าระหว่าง $102.61 - 242.88 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ (ภาพที่ 35b)



ภาพที่ 35 กราฟ box plot เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าการชักนำปากใบของต้นยางพารา พันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ทรีตเมนต์ให้น้ำปกติ (M1,T1) ทรีตเมนต์ให้น้ำท่วมขัง ระดับผิวดิน (M2,T2) และทรีตเมนต์ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (M3,T3) ในระยะให้น้ำท่วมขัง และระยะฟื้นตัว

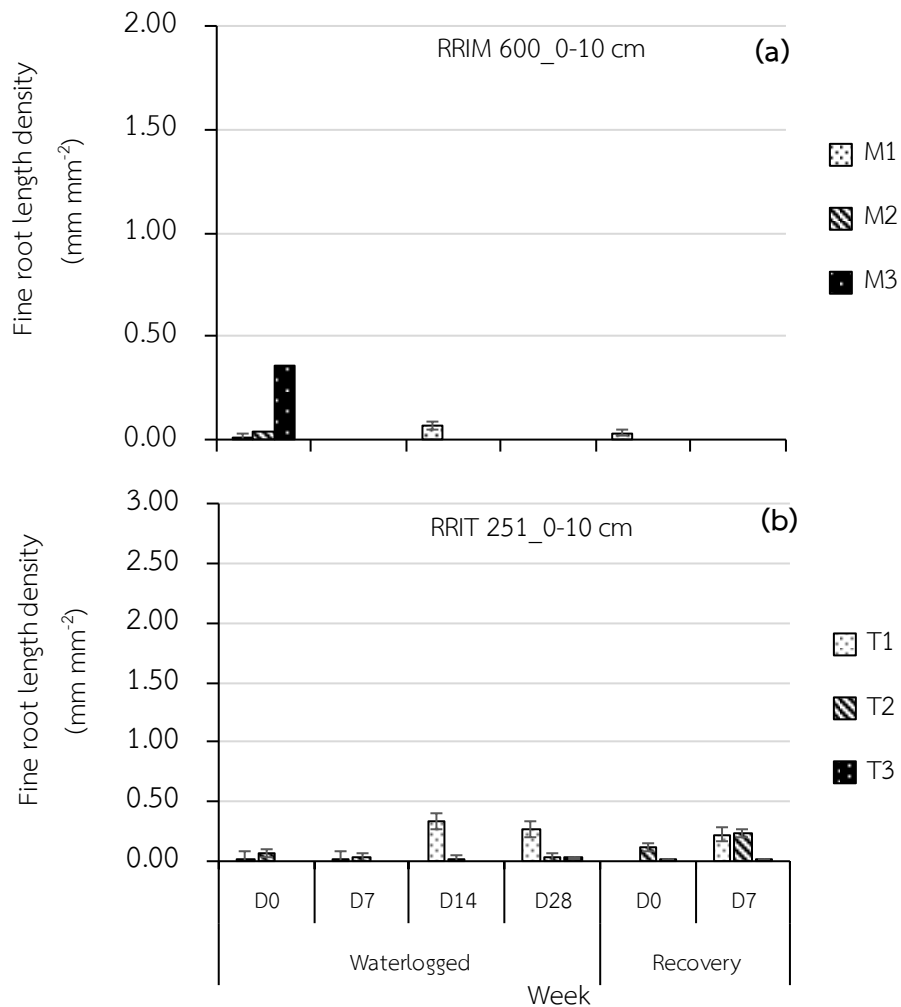
5. ความยาวรากที่มีชีวิต และรากตายของต้นยางพารา RRIM 600 และ RRIT

251

ผลการวิเคราะห์ความยาวรากของต้นยางพารา RRIM 600 และ RRIT 251 โดยการจำแนกระหว่างรากที่มีชีวิต (รากสีขาวหรือสีน้ำตาลอ่อน) กับรากที่ตาย (รากสีดำ) ที่ระดับความลึก 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 และ 40-50 cm ตลอดการทดลอง

5.1 ความยาวรากที่มีชีวิตเปรียบเทียบระหว่างต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ศึกษาที่ระดับความลึก 0-50 cm

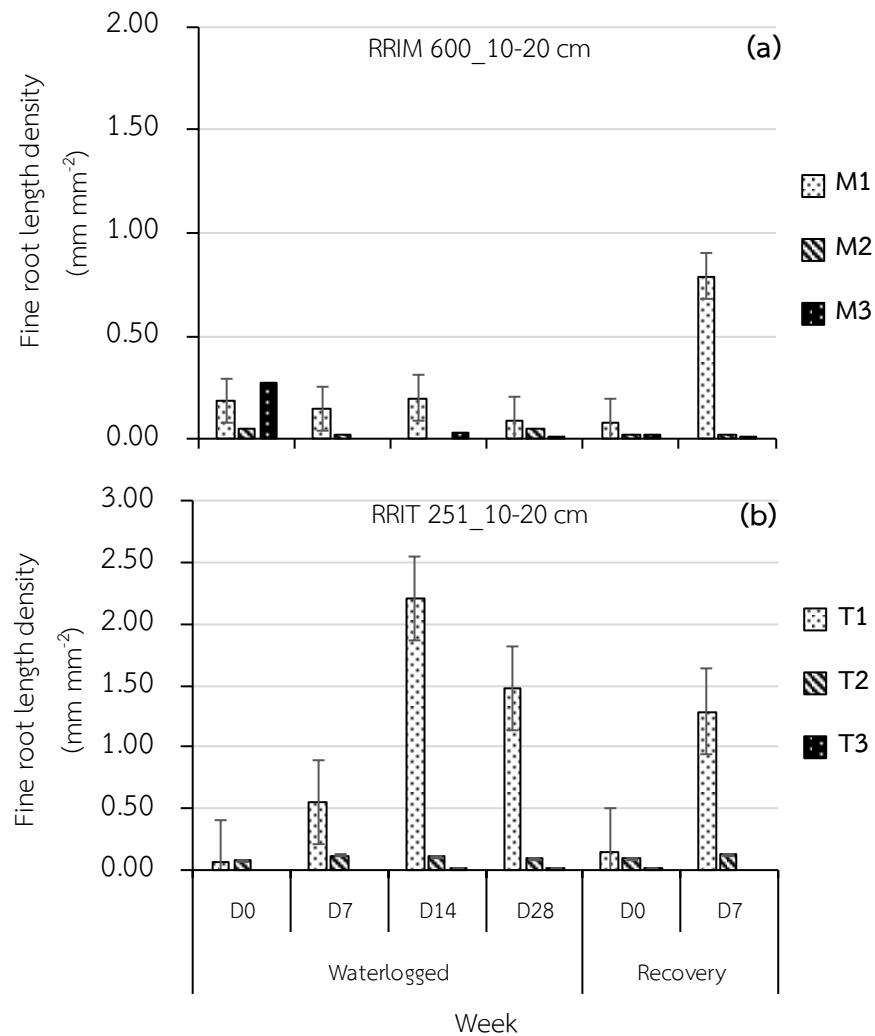
การเจริญเติบโตของรากยางพาราที่ไรต์เมนต์ควบคุมที่ให้น้ำปกติ พบว่ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 ความยาวรากพบมากที่สุดในช่วงสัปดาห์แรกของการทดลองในไรต์เมนต์ให้น้ำขังเหนือผิวดิน (M3) 0.356 mm mm^{-2} และภายหลังจากการปล่อยน้ำขังไม่ปรากฏการเจริญเติบโตของรากที่ให้น้ำขังทั้งสองระดับยกเว้นรากในไรต์เมนต์ควบคุม ส่วนรากของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 พบว่าความยาวรากในระยะแรกที่ให้น้ำขังพบว่าความยาวรากพบในไรต์เมนต์ให้น้ำปกติ และไรต์เมนต์ให้น้ำขังผิวดิน ตลอดระยะให้น้ำขังไรต์เมนต์ควบคุมการให้น้ำปกติมีความยาวรากสูงสุดตลอดการทดลองโดยค่าสูงสุดพบวันที่ 14 ของการทดลอง (0.326 mm mm^{-2}) ไรต์เมนต์ให้น้ำขังผิวดินพบการเจริญเติบโตของรากในระยะแรกที่ให้น้ำขัง แต่ภายหลังจากปล่อยน้ำพบว่าต้นยางมีการเจริญโตของรากเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในสัปดาห์แรกของการทดลองและมีความยาวเพิ่มขึ้นเมื่อการปล่อยน้ำออกจากกระถางทดลอง (0.115 และ 0.227 mm mm^{-2}) (ภาพที่ 36)



ภาพที่ 36 ความยาวรากมีชีวิตที่ระดับความลึก 0-10 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว

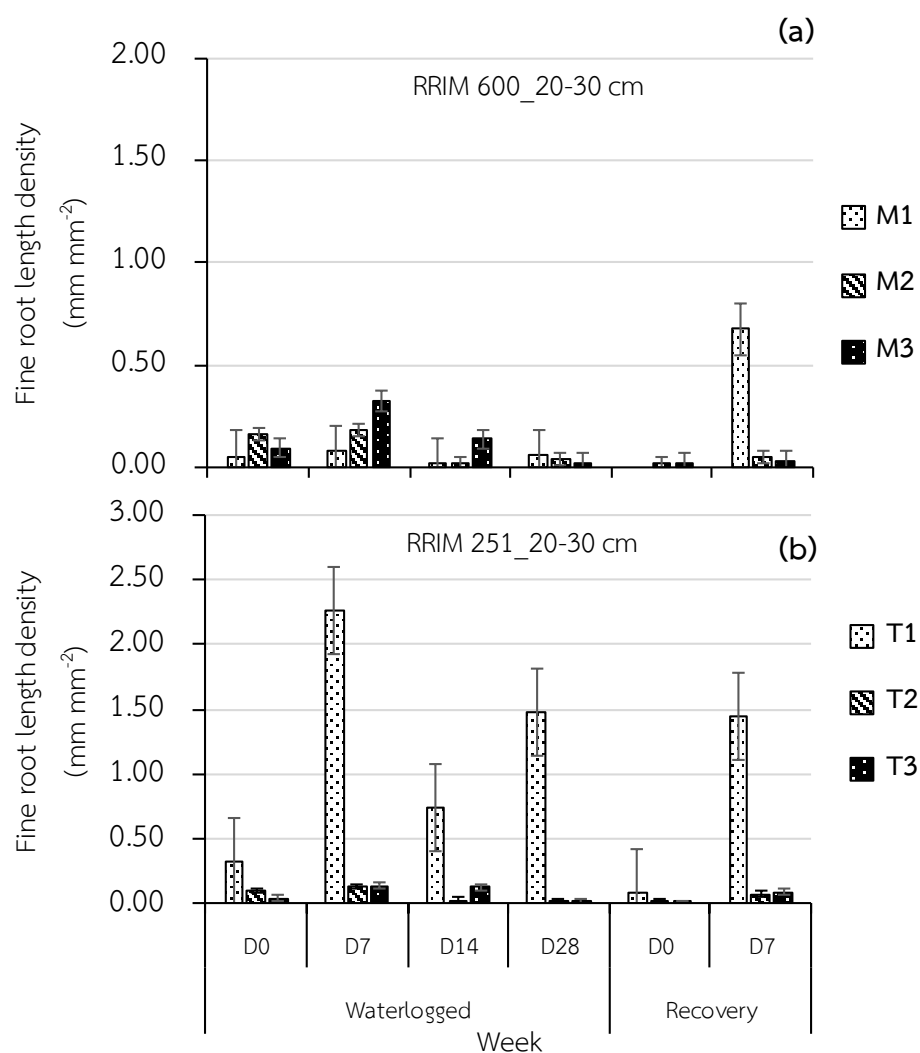
การเจริญเติบโตของรากที่ระดับความลึก 10-20 cm พบว่าความยาวรากทั้งสามทรีตเมนต์ (M1-M3) พบความยาวเพียงเล็กน้อยในสัปดาห์แรกของระยะให้น้ำขัง (0.186 0.051 และ 0.275 mm mm⁻²) และภายหลังการปล่อยน้ำพบความยาวรากเพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 2 ของการศึกษา ความยาวรากเฉลี่ยเท่ากับ 0.790 mm mm⁻² ในทางตรงข้ามความยาวรากของต้นยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ในระยะให้น้ำขังทรีตเมนต์ควบคุมมีความยาวรากพบตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยความยาว

รากสูงสุดพบในสัปดาห์ที่ 3 เท่ากับ 2.203 mm mm^{-2} ส่วนที่ริตเมนต์ที่ให้น้ำขังระดับผิวดิน ความยาวรากพบตลอดระยะเวลาที่ทดลอง ($0.076\text{-}0.125 \text{ mm mm}^{-2}$) (ภาพที่ 37)



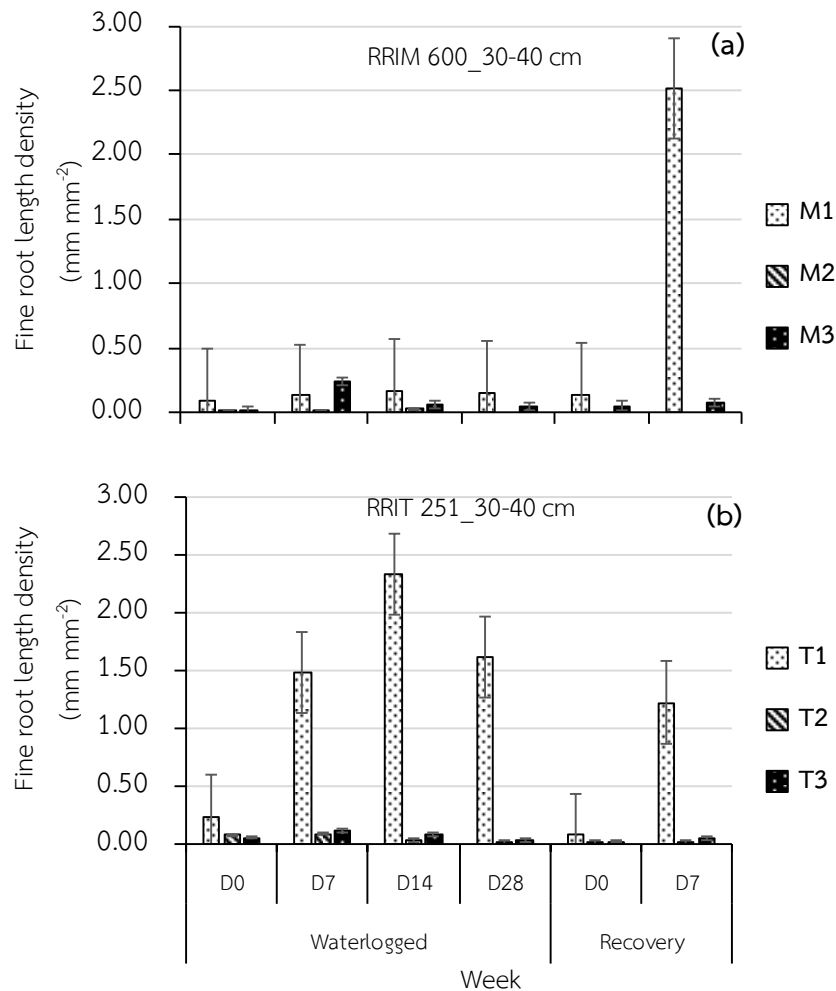
ภาพที่ 37 ความยาวรากมีชีวิตที่ระดับความลึก 10-20 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว

การเจริญเติบโตของรากของพาราที่ระดับความลึก 20-30 cm พบว่า ความยาวรากของพาราพันธุ์ RRIM 600 ในระยะเริ่มต้นมีค่าค่อนข้างต่ำทั้งสามทริตเมนต์ (0.055 0.159 และ 0.095 mm mm⁻²) และภายหลังปล่อยน้ำขัง ความยาวรากของพาราในทริตเมนต์ให้น้ำปกติ มีค่าสูงสุด (0.676 mm mm⁻²) ความยาวรากของพาราพันธุ์ RRIT 251 พบว่าทริตเมนต์ให้น้ำปกติการตอบสนองของความยาวรากพบสูงสุดในสัปดาห์ที่สองของการทดลอง (2.269 mm mm⁻²) และความยาวรากของทริตเมนต์ให้น้ำขังผิวดินและเหนือผิวดิน ความยาวรากอยู่ในระดับต่ำตลอดการทดลอง (ภาพที่ 38)



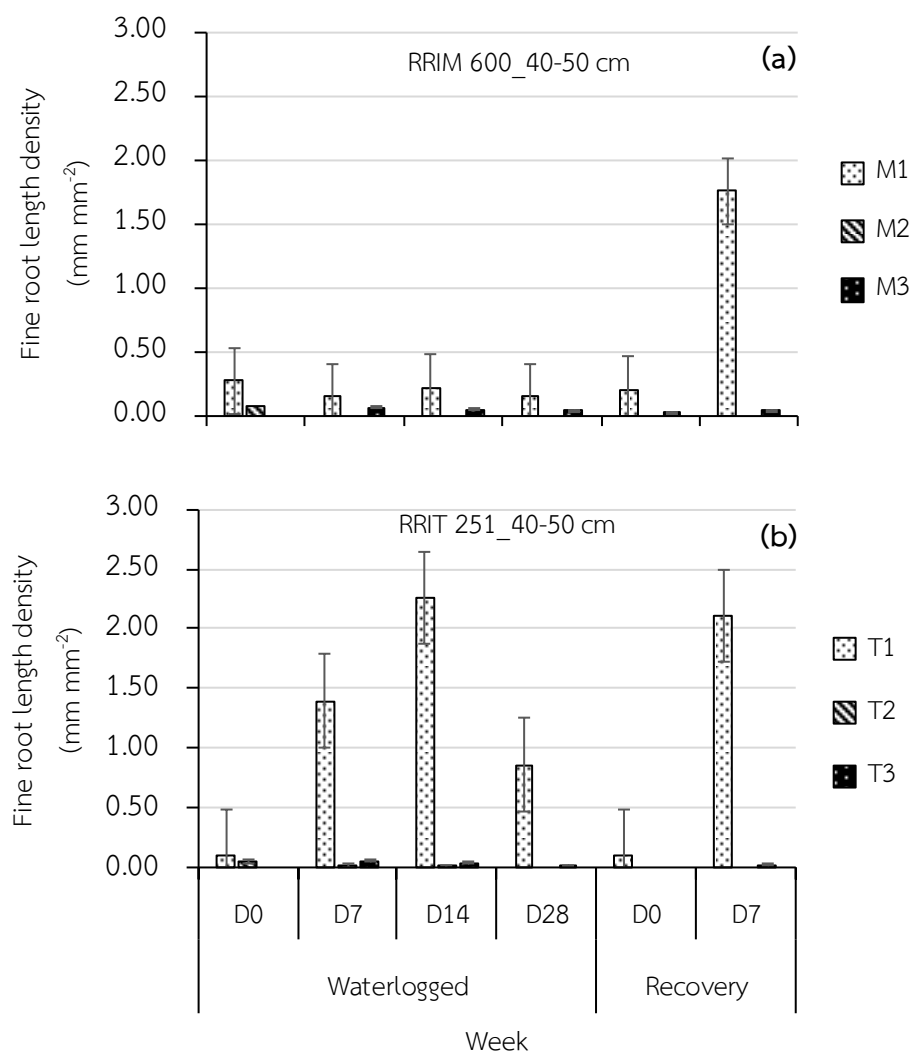
ภาพที่ 38 ความยาวรากมีชีวิตที่ระดับความลึก 20-30 cm ของพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว

ขณะที่ความยาวรากยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ที่ระดับความลึก 30-40 cm ความยาวรากสูงสุดพบในยางพาราที่ให้น้ำปกติ (2.515 mm mm^{-2}) ในสัปดาห์ที่สองหลังการงดน้ำช่วง ส่วนความยาวรากของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ทริตเมนต์ให้น้ำปกติพบว่าความยาวรากค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะที่ทดลองโดยมีความยาวรากสูงสุดในวันที่ 14 ของระยะให้น้ำท่วมขัง (ภาพที่ 39)



ภาพที่ 39 ความยาวรากมีชีวิตที่ระดับความลึก 30-40 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว

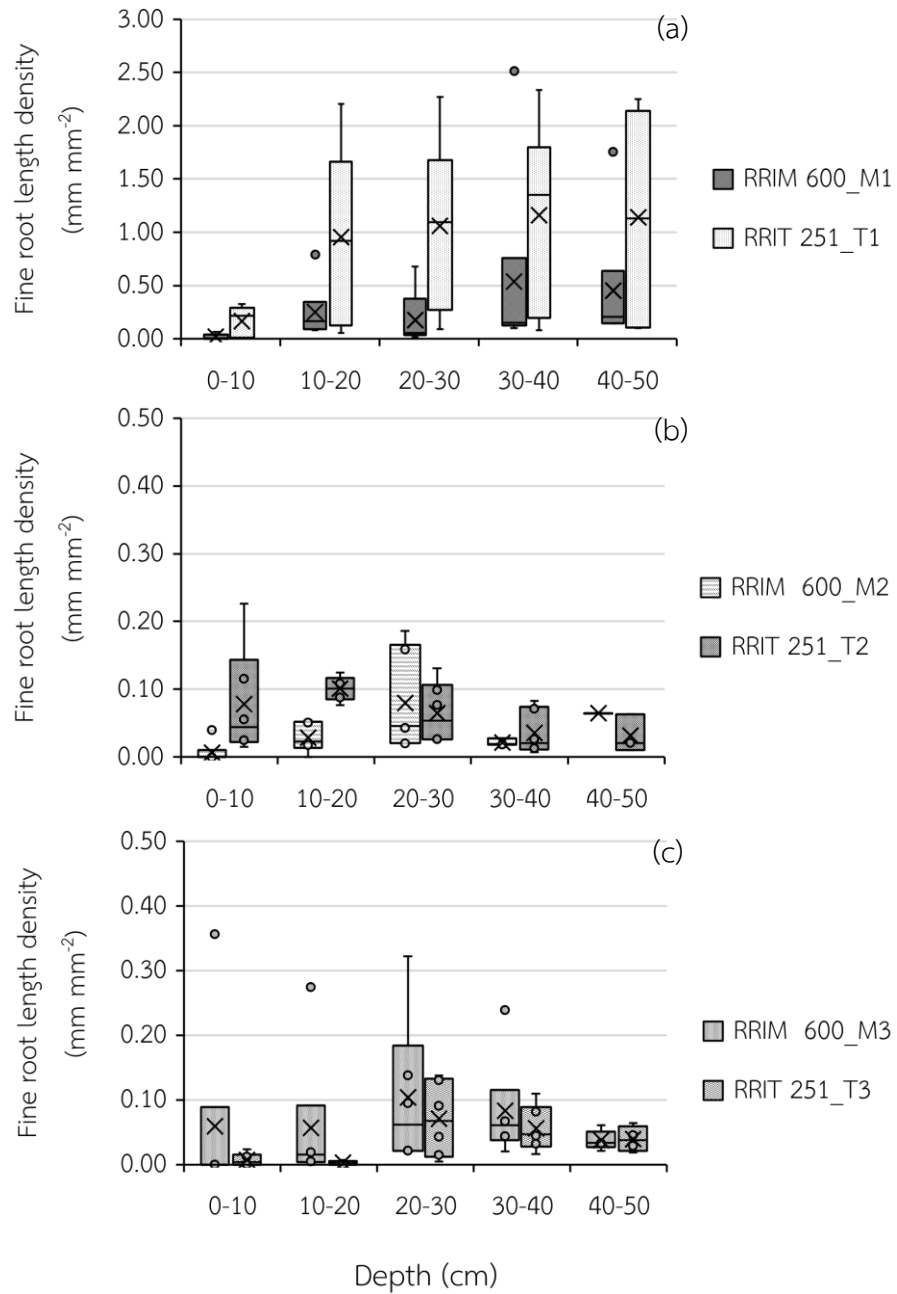
ความยาวรากยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ที่ระดับความลึก 40-50 cm ความยาวรากสูงสุดพบในยางพาราที่ให้น้ำปกติ (1.755 mm mm^{-2}) ในสัปดาห์ที่สองหลังการรดน้ำช่วง ขณะที่ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำขังผิวดิน และท่วมเหนือผิวดิน ความยาวรากอยู่ในระดับต่ำและความยาวรากของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ทรีตเมนต์ให้น้ำปกติมีความยาวรากเพิ่มขึ้นตามระยะที่ทดลอง โดยมีความยาวรากสูงสุดในวันที่ 14 ของระยะให้น้ำท่วมขังและความยาวรากทรีตเมนต์ให้น้ำขังผิวดิน ความยาวรากสูงสุดพบในสัปดาห์แรกของการทดลอง (0.063 mm mm^{-2}) และทรีตเมนต์ให้น้ำขังเหนือผิวดินพบความยาวรากสูงสุดในสัปดาห์แรกของการให้น้ำขัง (0.064 mm mm^{-2}) (ภาพที่ 40)



ภาพที่ 40 ความยาวรากมีชีวิตที่ระดับความลึก 40-50 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว

การเปรียบเทียบความยาวรากมีชีวิตตลอดการทดลองของยางพาราทั้งสามระดับการให้น้ำขังของทรีตเมนต์ควบคุมที่ให้น้ำปกติความยาวรากมีชีวิตของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (RRIM 600_M1) น้อยกว่ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 (RRIT 251_T1) ทุกระดับความลึก (0-50 cm) โดยที่ความยาวรากของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 พบสูงสุดที่ระดับความลึก 30-40 cm มีค่าระหว่าง 0.101-0.759 mm mm⁻² และความยาวรากสูงสุดของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 พบความยาวมากที่สุดที่ระดับความลึก 40-50 cm มีค่าระหว่าง 0.108-2.252 mm mm⁻²

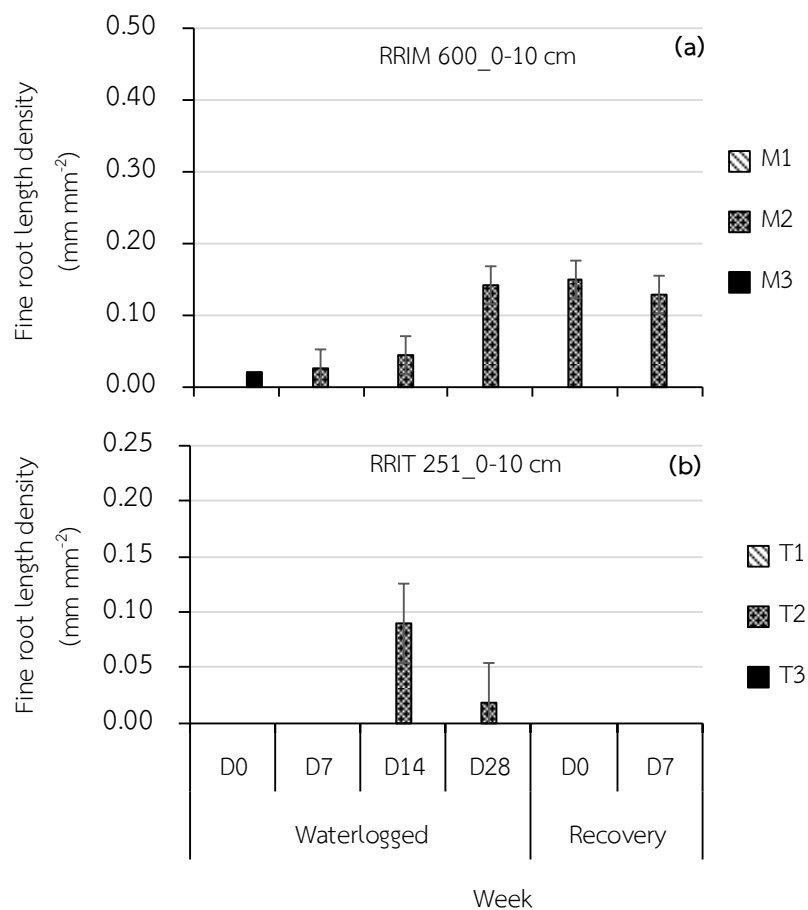
ความยาวรากของยางพาราในทรีตเมนต์ที่ได้รับน้ำขังผิวดินพบว่ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 (RRIM 600_M2) ความยาวรากพบมากที่สุดที่ระดับความลึก 20-30 cm โดยมีค่าระหว่าง 0.020-0.186 mm mm⁻² ขณะที่ความยาวรากของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 (RRIT 251_T2) พบสูงสุดที่ระดับความลึก 0-10 cm มีค่าระหว่าง 0.022-0.227 mm mm⁻² และมีค่าลดลงเมื่อระดับความลึกเพิ่มขึ้น ความยาวรากมีชีวิตของทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมเหนือผิวดินของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (RRIM 600_M3) พบในระดับความลึก 0-30 cm และความยาวรากพบสูงสุดที่ระดับ 20-30 cm มีค่าระหว่าง 0.021-0.322 mm mm⁻² แต่ความยาวรากของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 (RRIT 251_T3) พบความยาวรากที่ระดับความลึก 20-50 cm และพบสูงสุดเฉพาะที่ระดับความลึก 20-30 cm มีค่าระหว่าง 0.004-0.133 mm mm⁻² (ภาพที่ 41)



ภาพที่ 41 กราฟ box plot แสดงความยาวรากมีชีวิตรูที่ระดับความลึก 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 และ 40-50 cm เปรียบเทียบระหว่างยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ที่มีการให้น้ำปกติ (a) ทริตเมนต์ให้น้ำขังระดับผิวดิน (b) และทริตเมนต์ให้น้ำขังเหนือผิวดิน (c)

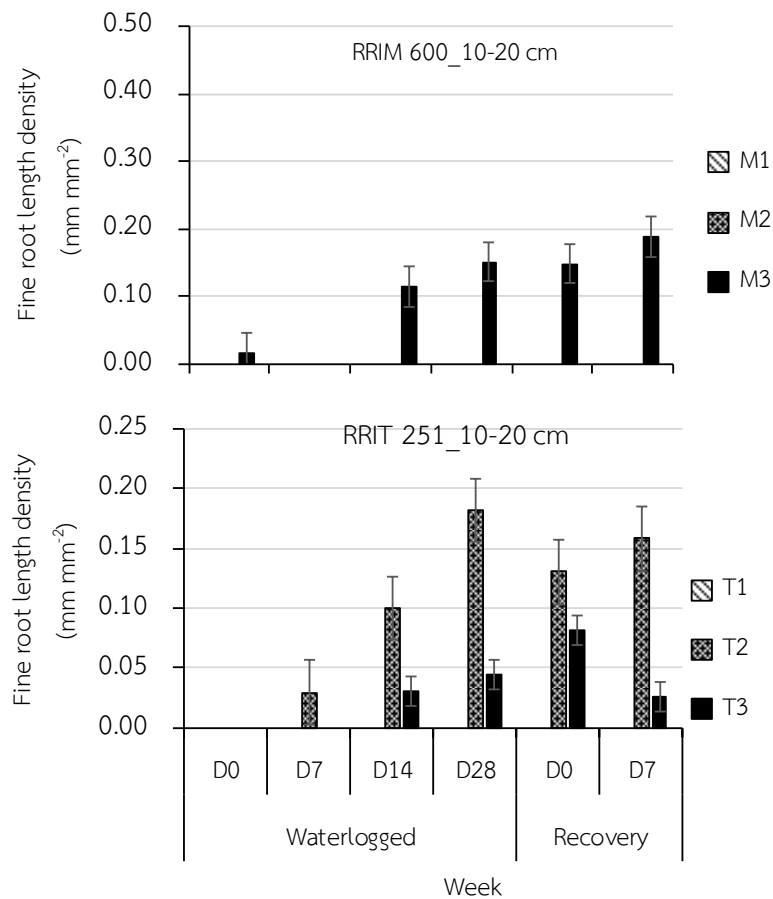
5.2 ความยาวรากตายเปรียบเทียบระหว่างต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ศึกษาที่ระดับความลึก 0-50 cm

การประเมินรากตายที่พบตลอดการทดลองโดยการวิเคราะห์ภาพถ่ายรากยางพารา จากกล้องมินิโรโซตรอนพบว่า ที่ระดับความลึก 0-10 cm ยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ความยาวรากตายของทริตเมนต์ให้น้ำขังผิวดิน (M2) มีรากตายปรากฏมากที่สุดตั้งแต่สัปดาห์แรกที่เริ่มให้น้ำขัง และเพิ่มขึ้นจนถึงระยะปล่อยน้ำขังความยาวรากตายสูงสุดพบหลังจากการปล่อยน้ำขัง เท่ากับ 0.15 mm mm^{-2} ส่วนในยางพาราพันธุ์ RRIT 251 รากตายที่พบในทริตเมนต์ที่ให้น้ำขังระดับผิวดิน แต่พบในระยะที่ให้น้ำขังโดยความยาวรากที่พบเท่ากับ 0.09 mm mm^{-2} (ภาพที่ 42)



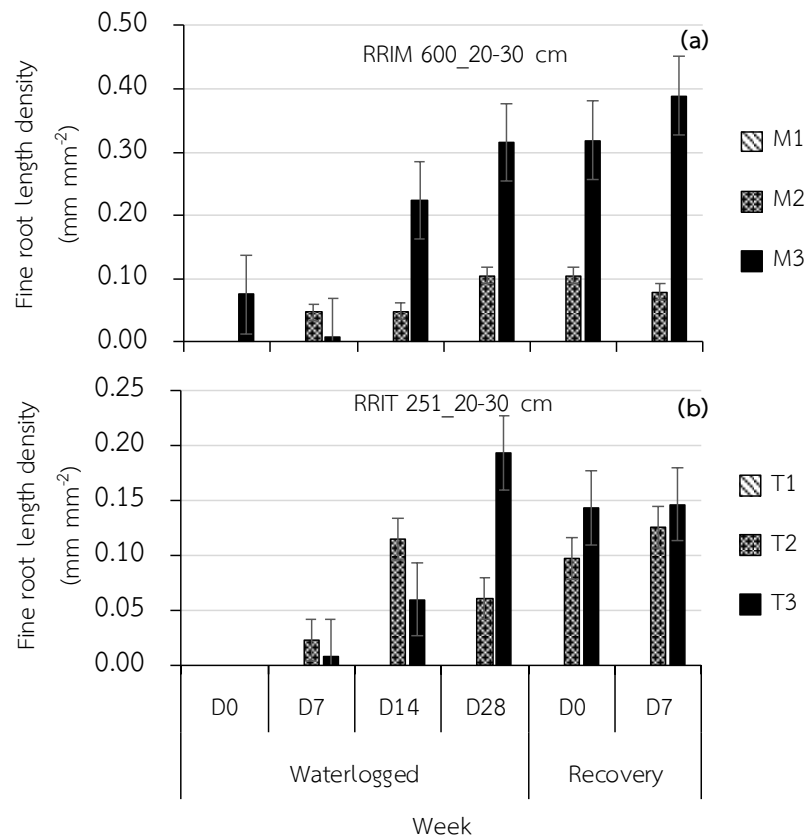
ภาพที่ 42 ความยาวรากตายที่ระดับความลึก 0-10 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว

ความยาวรากตายที่ระดับความลึก 10-20 cm พบว่ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 ความยาวรากตายพบมากที่สุดในทรีตเมนต์ที่ให้น้ำขังเหนือผิวดินโดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเริ่มการให้น้ำขัง จนกระทั่งความยาวรากสูงสุดพบในสัปดาห์สุดท้ายในระยะปล่อยน้ำขัง เท่ากับ 0.19 mm mm^{-2} ในขณะที่รากตายของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 พบทั้งในทรีตเมนต์ที่ให้น้ำขังผิวดิน (T2) และให้น้ำขังท่วมเหนือผิวดิน (T3) โดยที่ความยาวรากสูงสุดพบในช่วงสุดท้ายของการให้น้ำขัง วันที่ 28 เท่ากับ 0.182 mm mm^{-2} และช่วงแรกของการปล่อยน้ำขัง 0.65 mm mm^{-2} (ภาพที่ 43)



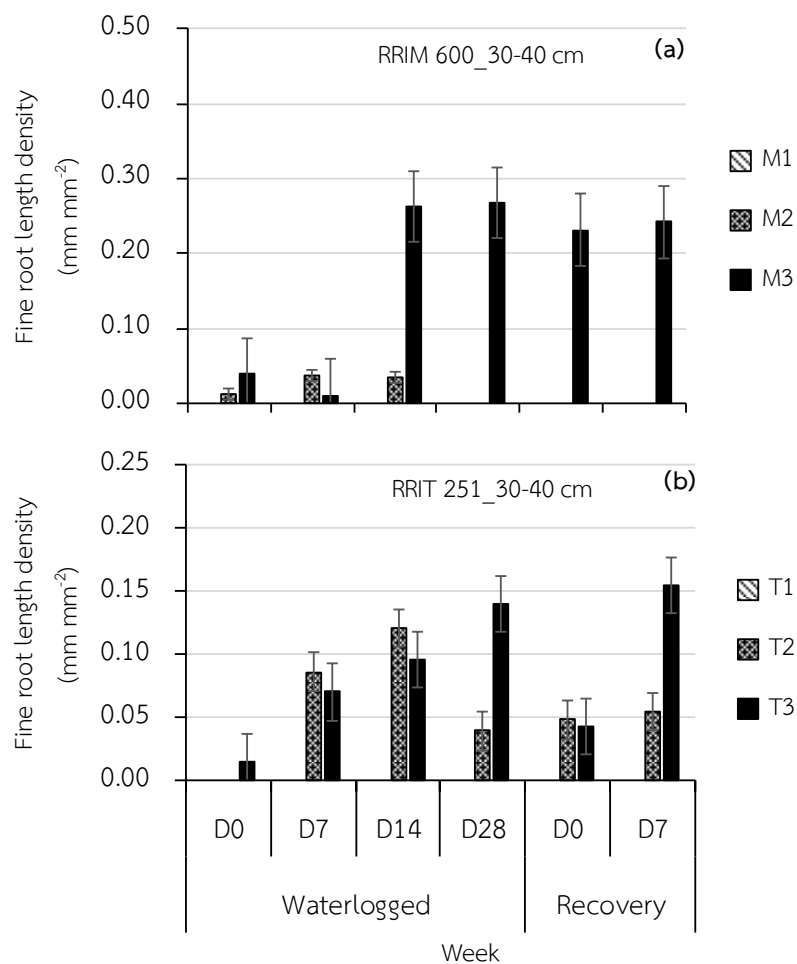
ภาพที่ 43 ความยาวรากตายที่ระดับความลึก 10-20 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว

รากตายที่พบที่ระดับความลึก 20-30 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 พบสูงสุดในทรีตเมนต์ที่ให้น้ำขังเหนือผิวดิน (M3) และรองลงมาคือทรีตเมนต์ที่ให้น้ำขังระดับผิวดิน (M2) โดยที่รากตายที่พบทั้งสองทรีตเมนต์พบมากที่สุดในระยะให้น้ำขังละลายเข้าสู่ช่วงปล่อยน้ำขัง ความยาวรากตายสูงสุดของทรีตเมนต์ให้น้ำขังผิวดิน (M2) เท่ากับ 0.104 mm mm^{-2} และทรีตเมนต์ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (M3) เท่ากับ 0.39 mm mm^{-2} (ภาพที่ 44)



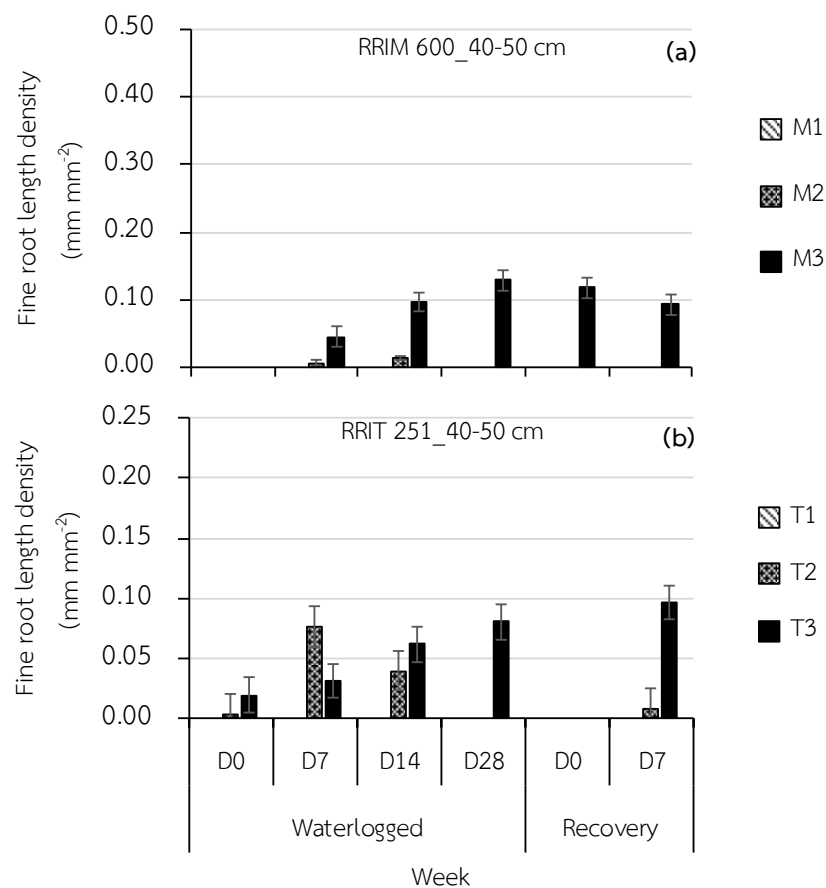
ภาพที่ 44 ความยาวรากตายที่ระดับความลึก 20-30 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว

ระดับความลึก 30-40 cm พบว่า รากตายของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 พบในช่วงสุดท้ายของการให้น้ำขังและเข้าสู่ระยะปล่อยน้ำขัง โดยความยาวรากตายสูงสุดของทริตเมนต์ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดินเท่ากับ 0.268 mm mm^{-2} พบในวันที่ 28 ของการให้น้ำขัง ส่วนรากตายของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 พบว่าความยาวรากที่พบในทริตเมนต์ให้น้ำขังผิวดิน (T2) ความยาวรากตายสูงสุดพบในวันที่ 14 ของระยะให้น้ำขัง เท่ากับ 0.121 mm mm^{-2} และทริตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (T3) ความยาวรากตายพบที่ในระยะเวลาสุดท้ายหลังจากปล่อยน้ำขังสูงสุด 0.154 mm mm^{-2} (ภาพที่ 45)



ภาพที่ 45 ความยาวรากตายที่ระดับความลึก 20-30 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว

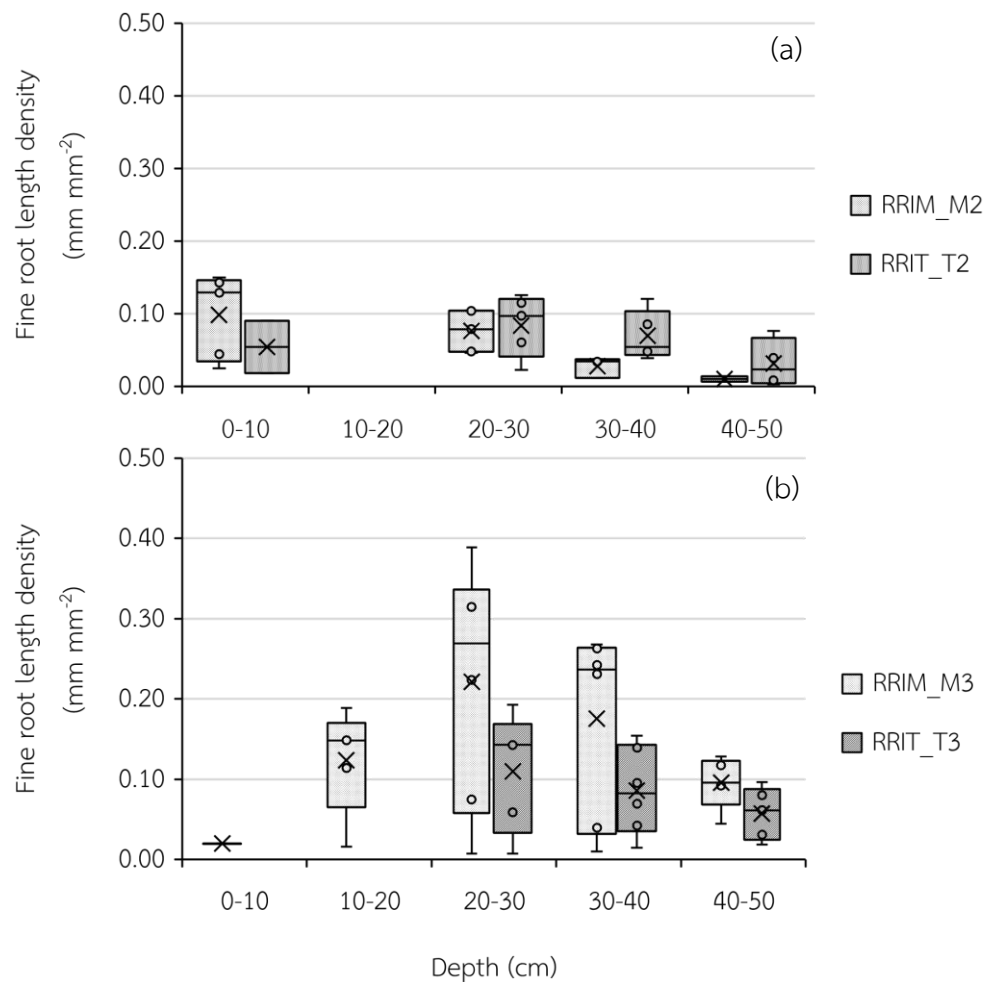
ความยาวรากตายของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ระดับความลึก 40-50 cm พบในทรีตเมนต์ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (M3) ระยะให้น้ำขังและปล่อยน้ำขังโดยมีความยาวรากตายสูงสุดเท่ากับ 0.129 mm mm^{-2} ความยาวรากตายของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ในทรีตเมนต์ให้น้ำขังผิวดิน (T2) ความยาวรากตายสูงสุดในระยะแรกของการให้น้ำขังมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.076 mm mm^{-2} และทรีตเมนต์ที่ให้น้ำขังท่วมผิวดิน (T3) เท่ากับ 0.096 mm mm^{-2} ในวันสุดท้ายของการปล่อยน้ำขัง (ภาพที่ 46)



ภาพที่ 46 ความยาวรากตายที่ระดับความลึก 20-30 cm ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (a) และ RRIT 251 (b) ในระยะที่ให้น้ำท่วมขังและระยะฟื้นตัว

ความยาวรากตายเปรียบเทียบกับแต่ละระดับของการให้น้ำ พบว่า ทริตเมนต์ที่ให้น้ำปกติไม่พบรากตายปรากฏตลอดการศึกษา แต่ในทริตเมนต์ที่ให้น้ำขังผิวดิน พบว่า ความยาวรากตายตลอดการ ศึกษาของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (RRIM 600_M2) พบมากที่สุดที่ระดับความลึก 0-10 cm มีค่าระหว่าง 0.025-0.145 mm mm⁻² และลดลงที่ระดับความลึก 20-50 cm ส่วนความยาวรากตายของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 (RRIT 251_T2) พบที่ระดับความลึก 0-10 cm 20-50 cm โดยที่ระดับความลึก 20-30 cm รากตายสูงสุดมีค่าระหว่าง 0.022 - 0.126 mm mm⁻²

ทริตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดินความยาวรากตายพบมากกว่ายางพาราในทริตเมนต์ที่ให้น้ำขังระดับผิวดิน ยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (RRIM 600_M3) ความยาวรากตายพบตลอดระดับความลึก 20-50 cm และพบมากที่สุดที่ระดับความลึก 20-30 cm มีค่าระหว่าง 0.008-0.389 mm mm⁻² และความยาวรากตายที่ระดับความลึกเดียวกันของยางพาราพันธุ์ RRIT (RRIT 251_T3) พบการตายของรากสูงสุดมีค่าระหว่าง 0.007-0.193 mm mm⁻² และลดลงที่ระดับความลึก 30-50 cm (ภาพที่ 47)



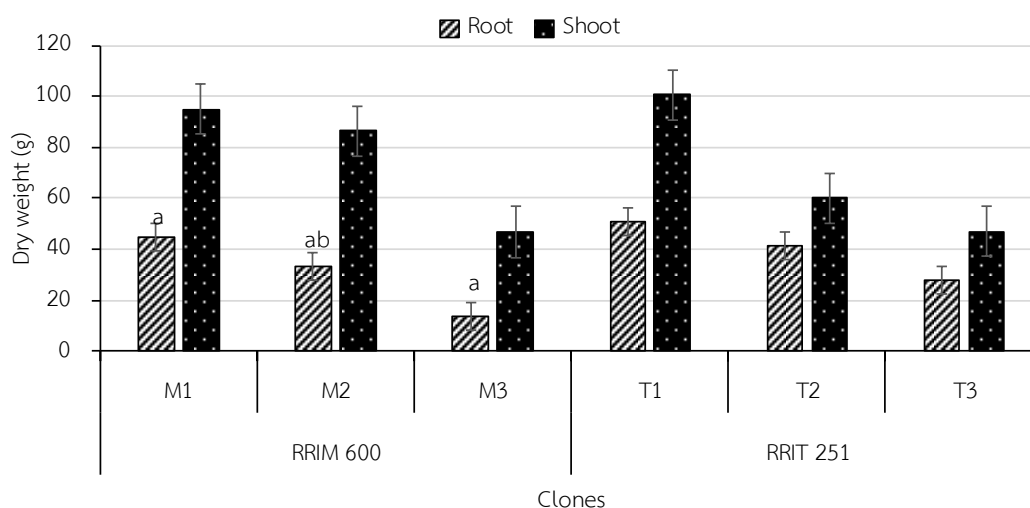
ภาพที่ 47 กราฟ box plot แสดงความยาวราก) ตายที่ระดับความลึก 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 และ 40-50 cm เปรียบเทียบระหว่างยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ที่มีการให้น้ำขังระดับผิวดิน (a) และทรีตเมนต์ให้น้ำขังเหนือผิวดิน (b)

6. ลักษณะทางกายภาพ

ภายหลังสิ้นสุดการทดลอง นำต้นยางพาราข้างทำความสะอาดจากนั้นนำไปอบแห้งเพื่อหามวลน้ำหนักแห้งรากและยอดของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 พบว่า ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของรากในทรีตเมนต์ควบคุมมีน้ำหนักสูงสุดแตกต่างทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับต้นยางพาราที่ให้น้ำท่วมขังผิวดิน และท่วมขังเหนือผิวดิน มีค่าเท่ากับ 44.72 33.50 และ 13.64 กรัม ตามลำดับ น้ำหนักแห้งของยอดมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในทรีตเมนต์ควบคุมแต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบระหว่างทรีตเมนต์มีค่าเท่ากับ 94.98 86.51 และ 46.77 กรัม ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของรากและยอดในทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดินมีค่าต่ำที่สุด เช่นเดียวกับต้นยางพาราพันธุ์ RRIT

251 มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของรากสูงสุดในทรีตเมนต์ควบคุมมีค่าลดลงในทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังผิวดินและพบต่ำสุดในทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างทรีตเมนต์ โดยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 50.94 41.39 และ 27.96 กรัม ตามลำดับ ขณะที่น้ำหนักแห้งของยอดมีแนวโน้มค่าเฉลี่ยเช่นเดียวน้ำหนักของรากเท่ากับ 100.76 60.20 และ 47.06 กรัม ตามลำดับ

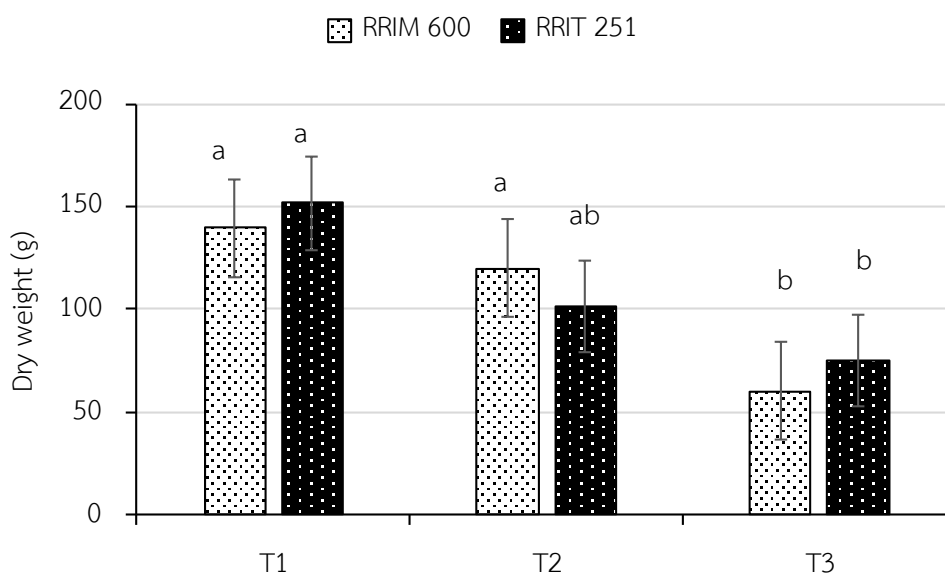
เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของรากและยอดระหว่างทรีตเมนต์ของต้นยางพาราทั้งสองพันธุ์ พบว่า ทรีตเมนต์ควบคุมของต้นยางพาราพันธุ์ RRIT 251 มีค่าเฉลี่ยมากกว่าต้นยางพารา RRIM 600 ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังพบค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของยอดในต้นยางพารา RRIM 600 มากกว่าต้นยางพารา RRIT 251 แต่ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของรากต้นยางพารา RRIT 251 มีค่ามากกว่าต้นยางพารา RRIM 600 พบความแตกต่างทางสถิติ ส่วนทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งของต้นยางพารา RRIT 251 มีค่ามากกว่าต้นยางพารา RRIM 600 อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทรีตเมนต์ระหว่างพันธุ์ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ (ภาพที่ 48)



ภาพที่ 48 น้ำหนักแห้งของยอดและรากของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ที่ระดับน้ำท่วมขังแตกต่างกัน

น้ำหนักแห้งรวมรากและยอดเปรียบเทียบระหว่างทรีตเมนต์ของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 พบว่าในทรีตเมนต์ควบคุม และให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดินน้ำหนักแห้งรวมของต้นยางพารา RRIT 251 มีค่ามากกว่า RRIM 600 (226.73 และ 200.10 กรัม) ยกเว้นทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดินที่น้ำหนักแห้งของต้นยางพารา RRIM 600 มีค่าสูงกว่า RRIT 251 (120.01 และ 101.59 กรัม) แต่น้ำหนักแห้งเปรียบเทียบระหว่างทรีตเมนต์ และระหว่างพันธุ์ ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ (ภาพที่ 49)

ข้อมูลน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของมวลชีวภาพ (ใบ ลำต้น ราก และต้นตอ) ของต้นยางพาราทั้งสองสายพันธุ์ภายหลังจากอบแห้ง เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าน้ำหนักแห้งของ ใบ ลำต้น ราก และต้นตอของยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ มีค่าสูงสุดในทรีตเมนต์ควบคุม ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังผิวดิน และ ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำขังเหนือผิวดินตามลำดับ สำหรับต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 พบว่าน้ำหนักแห้งในทรีตเมนต์ควบคุมและทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังผิวดินมีค่าใกล้เคียงกัน (27.57 และ 27.28 กรัม) และทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดินมีค่าน้อยที่สุด (15.83 กรัม)

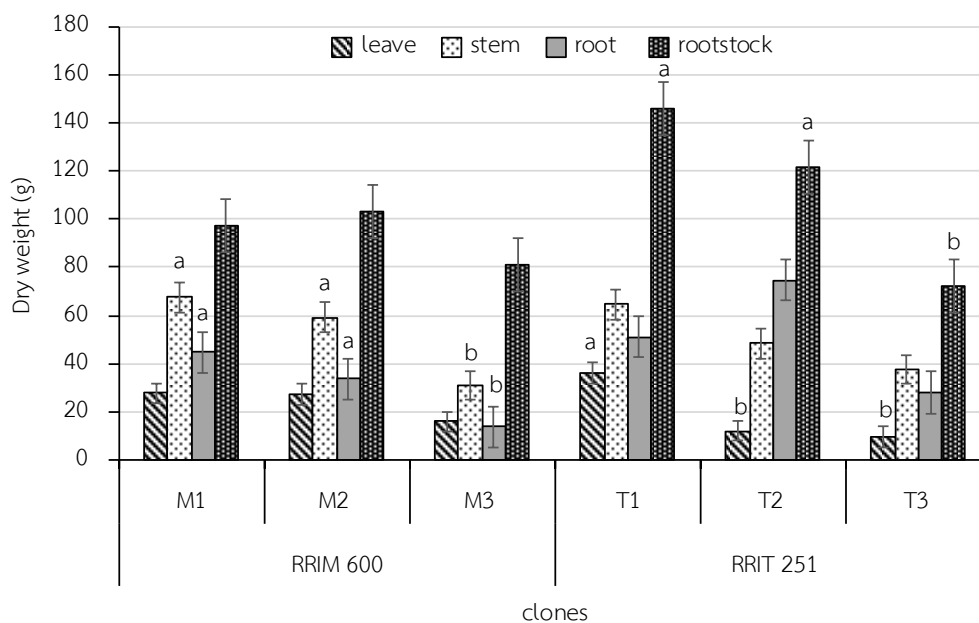


ภาพที่ 49 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยน้ำหนักแห้งรวมของรากและยอดระหว่างต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ภายหลังจากสิ้นสุดการทดลอง

น้ำหนักแห้งของลำต้นมีค่าเท่ากับ 67.41 59.23 และ 30.93 กรัม น้ำหนักแห้งของ รากมีค่า 44.72 33.50 และ 13.64 กรัม ตามลำดับ แต่ขณะที่น้ำหนักแห้งของต้นตอกลับพบว่า ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดินมีน้ำหนักสูงสุดรองลงมาคือทรีตเมนต์ควบคุมและ ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (97.17 102.95 และ 81.11 กรัม) ตามลำดับ

น้ำหนักแห้งของใบ ลำต้น ราก และต้นตอมีน้ำหนักมากที่สุดในทรีตเมนต์ควบคุม ทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังผิวดิน และน้ำขังเหนือผิวดิน น้ำหนักแห้งของใบมีค่าเท่ากับ 36.15 11.90 และ 9.62 กรัม น้ำหนักแห้งของลำต้นมีค่า 64.61 48.30 และ 37.45 กรัม น้ำหนักแห้งของ ราก มีค่า 50.94 74.72 และ 27.96 กรัม และน้ำหนักแห้งของต้นตอมีค่าเท่ากับ 146.29 121.98 และ 72.11 กรัม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามน้ำหนักแห้งของรากในทรีตเมนต์ควบคุม และทรีตเมนต์ที่ให้น้ำขังผิวดิน

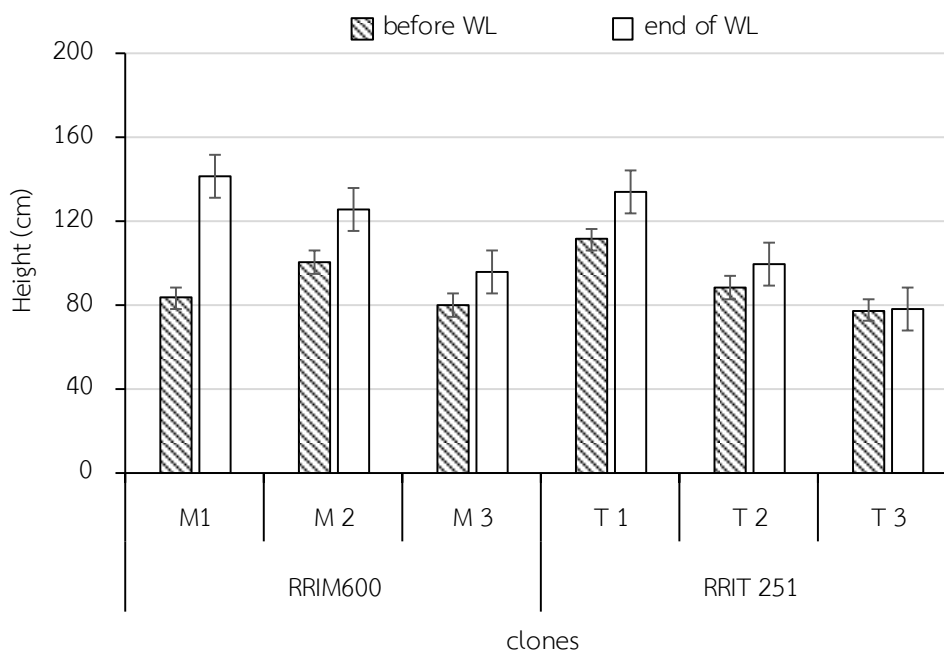
ของต้นยางพาราพันธุ์ RRIT 251 มีค่าสูงกว่าพันธุ์ RRIM 600 นอกจากนี้ น้ำหนักแห้งของแต่ละปัจจัยเมื่อเปรียบระหว่างทรีตเมนต์และระหว่างพันธุ์ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ (ภาพที่ 50)



ภาพที่ 50 น้ำหนักแห้งของ ใบ ลำต้น ราก และต้นตอ ของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ภายหลังสิ้นสุดการทดลอง

พัฒนาด้านการเจริญเติบโตทางด้านความสูงของลำต้นยางพาราทั้งสองพันธุ์ระหว่างการทดลองพบว่า ยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ความสูงของลำต้นในระยะก่อนเริ่มการทดลอง จนกระทั่งระยะงดการให้น้ำท่วมขังมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกทรีตเมนต์ แต่ในทรีตเมนต์ควบคุม ความสูงลำต้นระหว่างการทดลองและภายหลังสิ้นสุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน (141.33 และ 142.0 cm) ส่วนความสูงของยาง พารา RRIT 251 พบว่าความสูงของลำต้นเพิ่มขึ้นในทุกทรีตเมนต์เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งพบว่าในทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดินพบว่าความสูงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระยะก่อนเริ่มการทดลองโดยที่ค่าเท่ากับ 77.33 และ 77.67 cm ตามลำดับ (ภาพที่ 51)

ลักษณะการเจริญเติบโตด้านการพัฒนาส่วน ต้น และยอดของต้นยางพาราพันธุ์ RRIT 251 พบว่า ความสูงของลำต้น จำนวนใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น ความหนาแน่นรวมถึง การแผ่ขยายของราก มีความแตกต่างกันชัดเจน ในต้นยางพาราที่ให้น้ำปกติ (T1) มีการเจริญเติบโตดีที่สุด ส่วนต้นยางพาราในทรีตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดิน (T2) และท่วมเหนือผิวดิน (T3) พบว่าต้นยางพารามีขนาดลำต้นเล็ก แคระแกร็น ความหนาแน่นรากน้อย และการหยั่งลึกของรากอยู่พบอยู่ในช่วงความลึกในดินที่ 0-60 cm น้อยกว่าต้นยางพาราที่มีการให้น้ำปกติซึ่งพบว่าการแผ่ขยาย และการหยั่งลึกของรากอยู่ที่ระดับ 0-100 cm (ภาพที่ 52a)



ภาพที่ 51 การเจริญเติบโตด้านความสูงของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ในระยะก่อนให้น้ำท่วมขัง (before waterlogged) และภายหลังให้น้ำท่วมขัง (end of waterlogged)

การเจริญเติบโตของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ภายใต้การให้น้ำปกติ (M1) ระดับน้ำท่วมขังผิวดิน (M2) และน้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (M3) พบว่าจำนวนใบและจำนวนฉัตรในทริตเมนต์ที่ให้น้ำปกติ มีจำนวนมากที่สุด ในขณะที่ขนาดความสูงของลำต้น และเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันทั้งสามสิ่งการทดลอง อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของราก และการหยั่งลึกของรากพบว่าทริตเมนต์ที่ให้น้ำตามปกติมีปริมาณสูงที่สุด คือการหยั่งลึกของรากอยู่ในช่วง 0-100 cm และในทริตเมนต์ที่ให้น้ำท่วมขังทั้งสองระดับความหนาแน่นและการหยั่งลึกของรากน้อยกว่าทริตเมนต์ควบคุม พบอยู่ในช่วง 0-60 cm (ภาพที่ 52b)

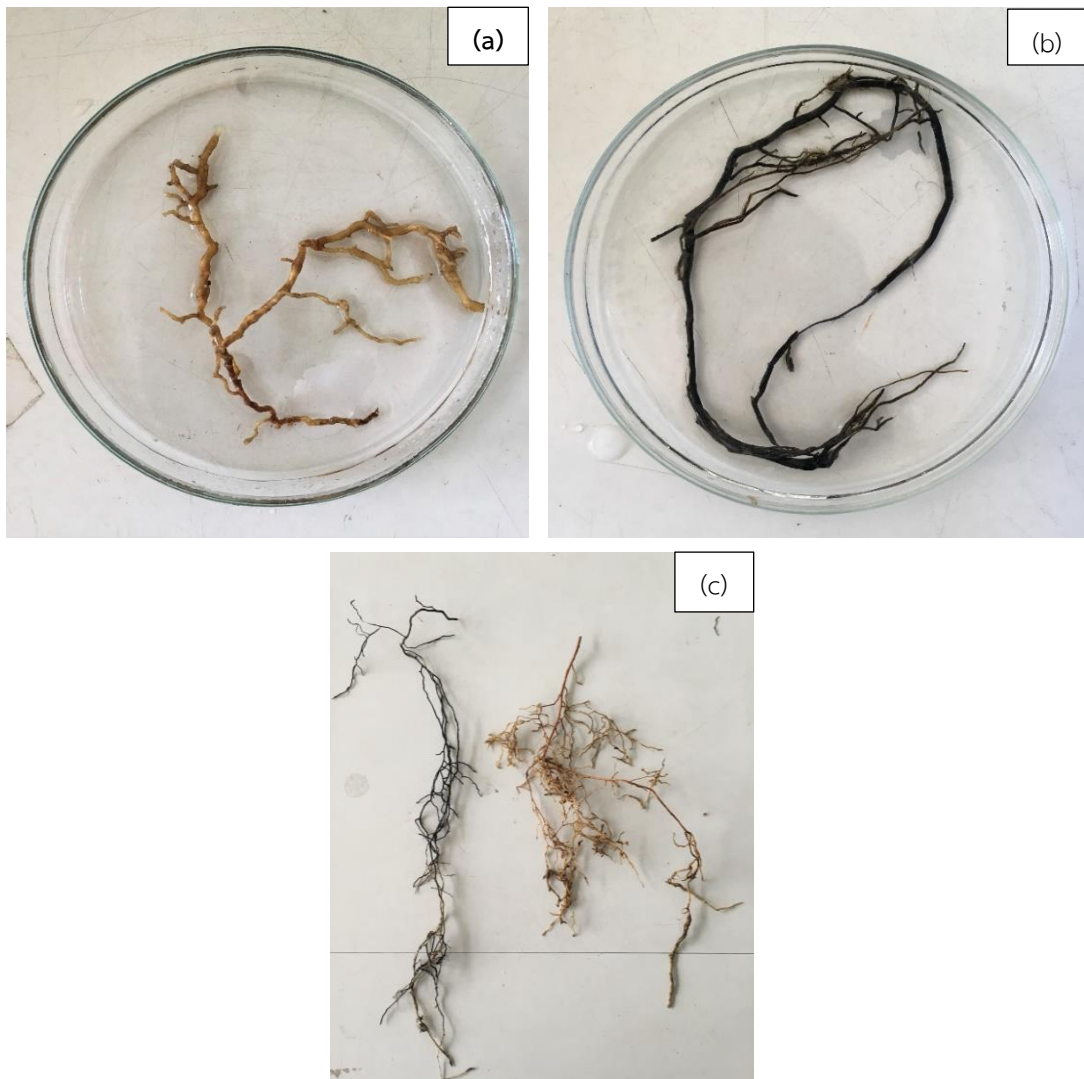


ภาพที่ 52 ลักษณะการเจริญเจริญเติบโตส่วนของยอดและรากของต้นยางพาราพันธุ์ RRIT 251 (a) และต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 (b) ที่ระดับน้ำท่วมขังแตกต่างกันภายหลังสิ้นสุดการทดลอง

7. การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายวิภาคของรากต้นยางพารา RRIM 600 และ RRIT 251 ที่ระดับการให้น้ำแตกต่างกัน

7.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรากต้นยางพาราภายหลังสิ้นสุดการทดลอง

ลักษณะของรากในทรีตเมนต์ควบคุมที่มีการให้น้ำปกติพบว่าการเจริญเติบโตของรากมีความยาว และความหนาแน่นมากที่สุด สีของรากที่พบมีขาว สีเหลืองอ่อน และน้ำตาลอ่อน ส่วนการแตกแขนงของลำดับชั้นราก (root order) มีจำนวนมาก ซึ่งแตกต่างกับต้นยางพาราในทรีตเมนต์ที่ได้รับน้ำท่วมขังระดับผิวดิน และเหนือผิวดิน พบว่าสีของรากที่พบ รากเปลี่ยนแปลงเป็นสีดำคล้ำ บางส่วนเปื่อยยุ่ย (ภาพที่ 53) ความหนาแน่นและความยาวรากมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับทรีตเมนต์ควบคุม อย่างไรก็ตามลักษณะการปรับตัวของเซลล์ปลายรากมีการขยายใหญ่ขึ้น และพบการสร้างรากพิเศษ (adventitious root) เกิดขึ้นเหนือระดับน้ำท่วมขัง ในทรีตเมนต์ที่ได้รับน้ำท่วมขังระดับผิวดินส่วนทรีตเมนต์ที่ได้รับน้ำท่วมขังเหนือผิวดินพบว่าเปลือกบริเวณโคนต้นยางพารามีลักษณะพองออกและโคนต้นยางพารามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าต้นยางพาราในทรีตเมนต์ควบคุม (ภาพที่ 54)



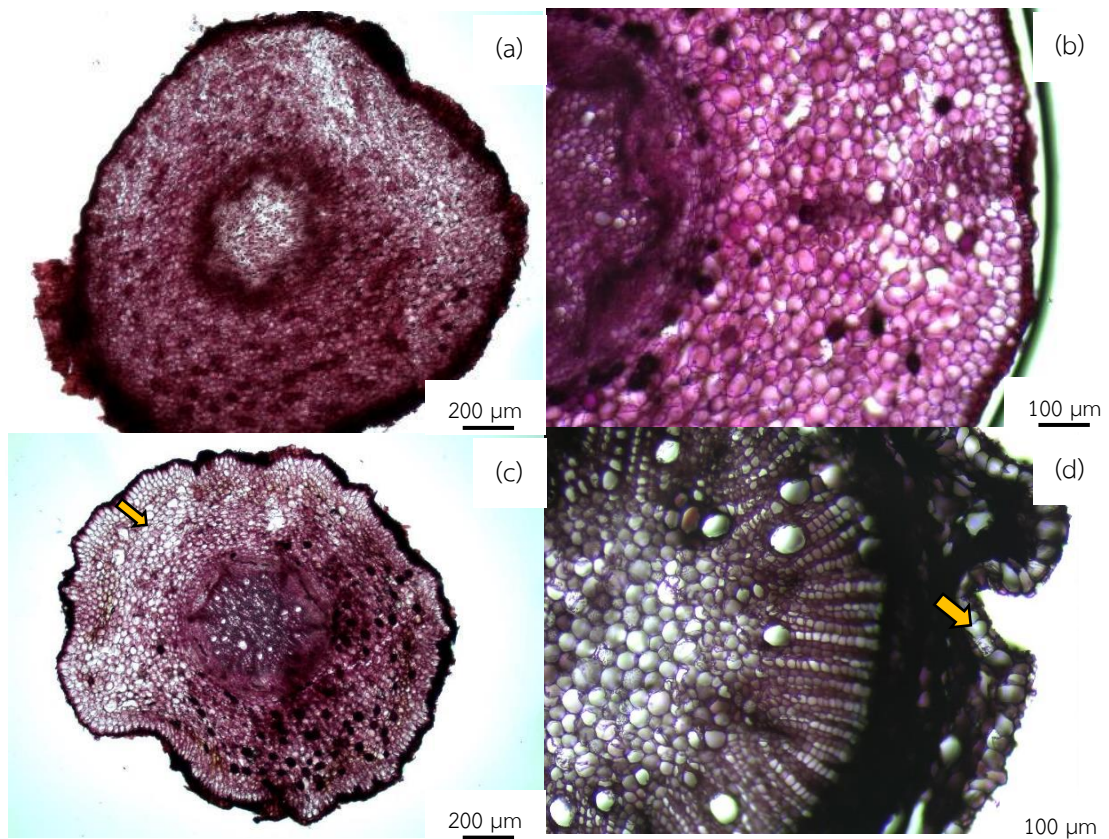
ภาพที่ 53 ลักษณะของรากต้นยางพาราเปรียบเทียบระหว่างทรีตเมนต์ควบคุม (a) และทรีตเมนต์ที่ได้รับน้ำท่วมขังระดับผิวดิน และท่วมขังเหนือผิวดิน (b) และแสดงความแตกต่างสีของราก ความหนาแน่น และการแตกแขนงของรากที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัดระหว่างทรีตเมนต์ควบคุม และทรีตเมนต์ให้น้ำท่วมขัง (c)



ภาพที่ 54 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของลำต้นต้นยางพาราของทริตเมนต์ควบคุม (a) ทริตเมนต์ที่ให้ น้ำท่วมขังระดับผิวดิน (b) และทริตเมนต์ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดิน (c) ภายหลังจากสิ้นสุดการ ทดลอง

7.2 ลักษณะทางกายวิภาคของรากยางพารา

การศึกษาลักษณะทางกายวิภาคของรากต้นยางพาราเปรียบเทียบกับระหว่างทรีตเมนต์ควบคุมที่ให้น้ำปกติ กับทรีตเมนต์ที่ได้รับน้ำท่วมขังผิวดินและเหนือผิวดิน โดยเทคนิคการทำสไลด์ตัวอย่างเนื้อพืชสด (freehand section) ลักษณะของรากในทรีตเมนต์ที่มีการให้น้ำปกติ (ภาพที่ 55 a,b) พบว่าขนาดของเซลล์ภายในท่อลำเลียงน้ำ (xylem) มีขนาดที่สม่ำเสมอ การกระจายตัวของเซลล์ท่อลำเลียงพบทั่วบริเวณทั้งหน้าตัดราก ขณะที่รากของต้นยางพาราที่อยู่ภายใต้สภาวะน้ำท่วมขังพบว่าบริเวณผนังเซลล์ภายนอกมีลักษณะเป็นสีดำคล้ำ และมีการเกิด aerenchyma บริเวณเซลล์ท่อลำเลียง เพิ่มขึ้นโดยรอบ นอกจากนี้ยังพบการขยายขนาดของเซลล์บริเวณผนังของผิวรากลักษณะเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 55 c,d)

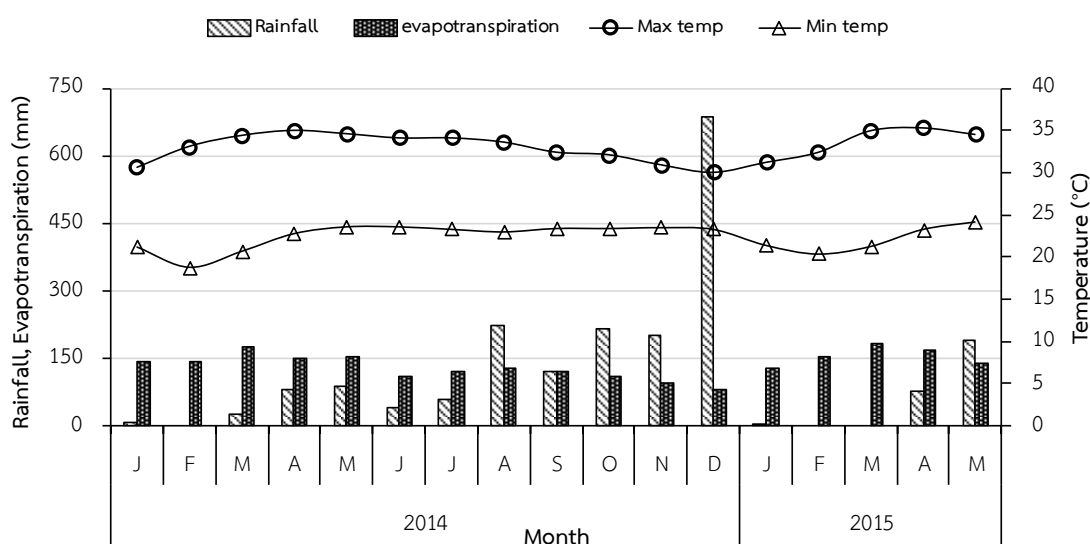


ภาพที่ 55 ลักษณะตัวอย่างเนื้อเยื่อรากยางพาราที่ปรากฏหลังสิ้นสุดการทดลองรากยางพาราทรีตเมนต์ควบคุม(a,b) และรากยางพาราที่ให้น้ำท่วมขังระดับผิวดินและเหนือผิวดิน (c,d)

3.3 ผลการทดลองที่ 3

1 ข้อมูลอากาศ

ข้อมูลสภาพอากาศรายเดือนบันทึกข้อมูลระหว่างเดือนมกราคม 2557 - พฤษภาคม 2558 ประกอบด้วย อุณหภูมิอากาศสูงสุด-ต่ำสุด ปริมาณน้ำฝน และค่าการคายระเหยน้ำ ข้อมูลที่บันทึกพบว่า ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิต่ำสุด และอุณหภูมิสูงสุด มีค่าระหว่าง 18.8 - 24.2 °C และ 30.0 - 35.3 °C ตามลำดับ ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 119.1 mm และปริมาณฝนสูงสุดพบระหว่างเดือนสิงหาคม - ธันวาคม 2557 โดยมีปริมาณน้ำฝนสะสม 1,448.3 mm ค่าการคายระเหยน้ำเฉลี่ยรายเดือนตลอดการทดลอง 135.6 mm (ภาพที่ 56)

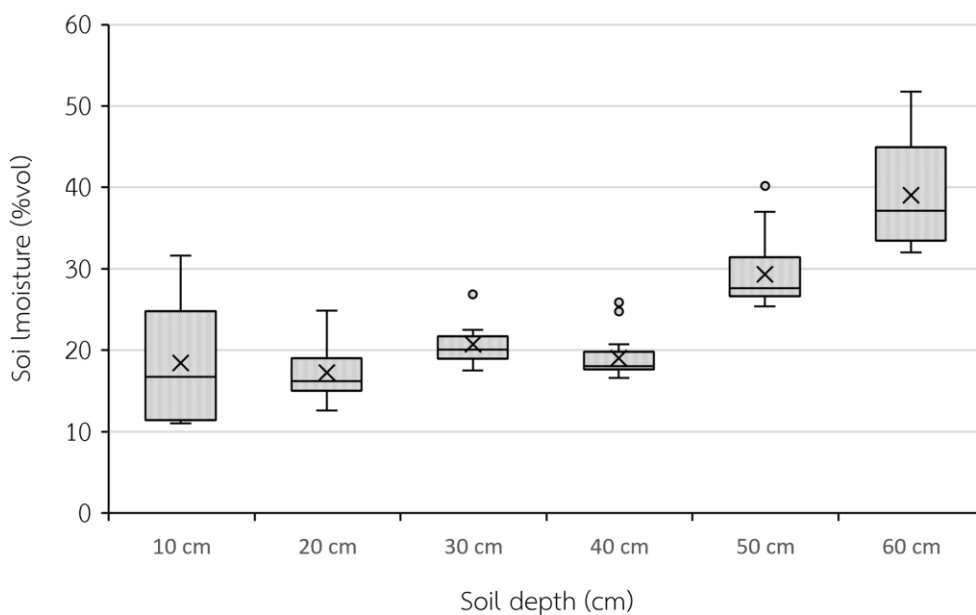


ภาพที่ 56 ข้อมูลสภาพอากาศประกอบด้วย ปริมาณน้ำฝน ค่าการคายระเหยน้ำ อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิต่ำสุดที่บันทึกตลอดการทดลอง (มกราคม 2557 - พฤษภาคม 2558)

2. ความชื้นดิน

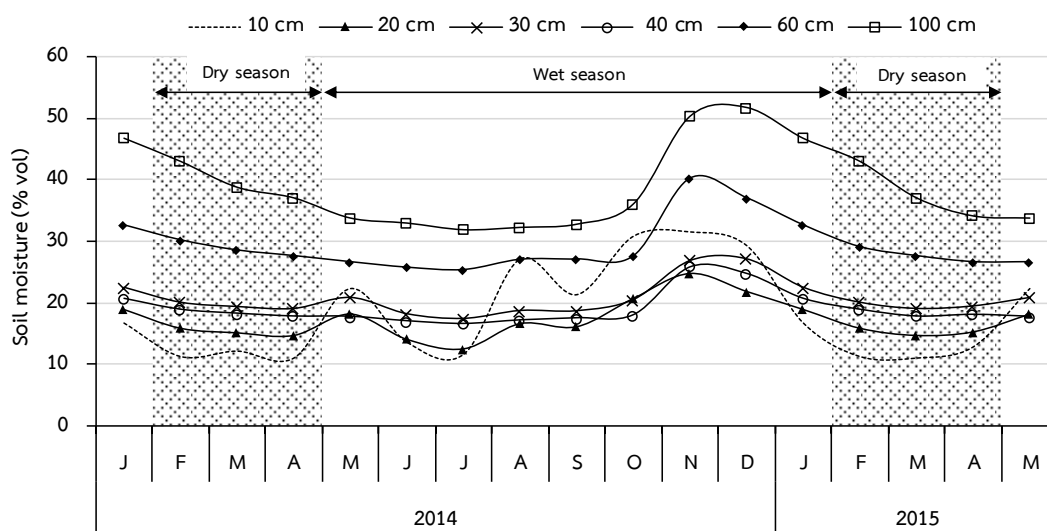
การเปลี่ยนแปลงของความชื้นดินที่บันทึกตลอดการทดลองที่ระดับความลึก 10 20 30 40 60 และ 100 cm โดยเครื่องวัดความชื้นดิน soil profile probe พบว่า ผลจากปริมาณน้ำฝนที่ตกกระจายในพื้นที่ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นดินที่ระดับผิวดินที่ระดับความลึก 10 cm พบว่า ปริมาณความชื้นดินต่ำสุด - สูงสุด เท่ากับ 11.01 - 31.62 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความชื้นดินที่ระดับความลึก 20 30 และ 40 cm มีค่าเท่ากับ 12.64 - 24.86, 17.51 - 27.16 และ 16.60 - 25.90

เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ความชื้นดินที่ระดับความลึก 60 และ 100 cm มีค่าเฉลี่ยความชื้นสูงสุดตลอดการทดลอง มีค่าระหว่าง 25.39 - 40.20 และ 32.00 - 51.80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพที่ 57)



ภาพที่ 57 กราฟ box plot เปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่เปลี่ยนแปลงตลอดการทดลองบันทึกที่ระดับความลึก 10 20 30 40 60 และ 100 cm

ปริมาณความชื้นดินในรอบปี พบว่า ระยะแรกที่เริ่มการทดลองเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินลดลงทุกระดับความลึก เนื่องจากเข้าสู่ช่วงฤดูแล้ง และเป็นช่วงการผลิตใบยางในรอบปีระหว่างปลายเดือน มกราคม-มีนาคม และเมื่อเริ่มเข้าสู่ฤดูฝนปลายเดือนเมษายน 2557 เปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่ระดับความลึกผิวดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นดินที่ระดับความลึกมากขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงของความชื้นดินที่ระดับความลึก 20-40 cm มีค่าใกล้เคียงกันจนกระทั่งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่เดือนตุลาคม 2557 เช่นเดียวกับที่ระดับความลึก 60 และ 100 cm โดยเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินที่พบสูงสุดระหว่างเดือนพฤศจิกายน - ธันวาคม 2557 และมีค่าลดลงเมื่อเข้าสู่รอบของฤดูแล้งในปี 2558 โดย ปริมาณฝนตกชุกในช่วงฤดูฝนตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2557 และพบปริมาณฝนตกสูงสุดในเดือนธันวาคม 2557 (684.8 mm) เกิดจากอิทธิพลของมรสุมประจำปีที่ส่งผลให้ปริมาณน้ำฝนในพื้นที่สูงกว่าปกติเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำฝนที่ตรวจวัดได้ในปี 2556 ที่พบปริมาณน้ำฝนสูงสุดเดือนพฤศจิกายน 2556 (501.6 mm) (ภาพที่ 58)



ภาพที่ 58 เปรี่เซ็นต์ความชื้นดินตลอดการทดลองวัดที่ระดับความลึก 10 20 30 40 60 และ 100 cm (เดือนกุมภาพันธ์ - เมษายน 2557 และ กุมภาพันธ์ - เมษายน 2558 เป็นช่วงฤดูแล้ง และระหว่างเดือนพฤษภาคม 2557 - มกราคม 2558 กำหนดเป็นฤดูฝน ตามเกณฑ์ของกรมอุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก)

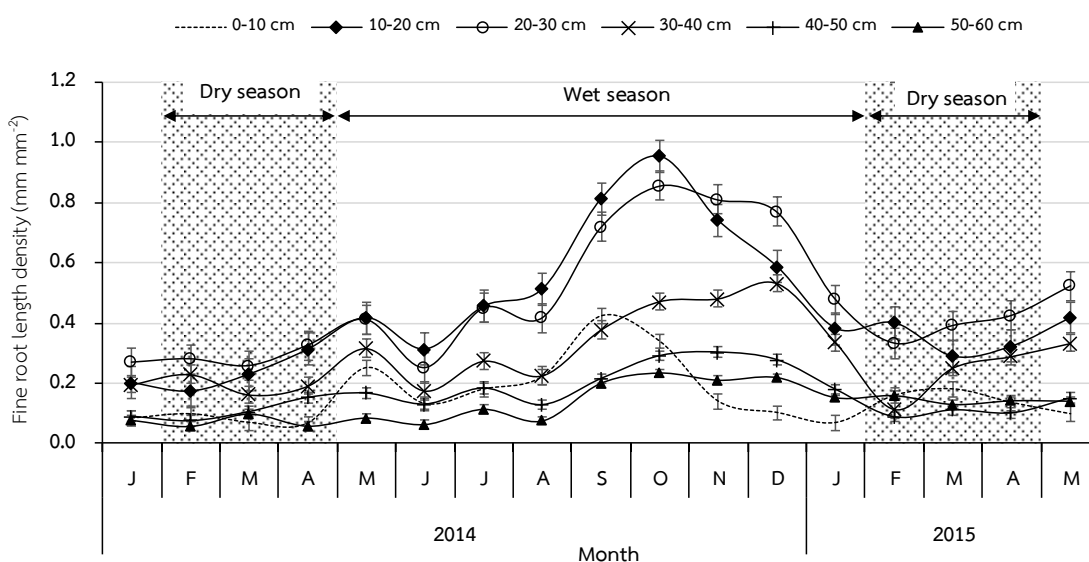
3. พลวัตของรากยางพาราในรอบปี

ข้อมูลพลวัตการเปลี่ยนแปลงของรากยางพาราที่ศึกษาโดยใช้เทคนิคมินิไรโซทรอนบันทึกภาพรากยางพาราผ่านท่ออะคริลิกใสที่ระดับความลึก 0-60 cm ระหว่างเดือนมกราคม 2557 - พฤษภาคม 2558 และนำภาพถ่ายวิเคราะห์เพื่อหาความยาวรากที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้เกณฑ์การจำแนกรากที่มีชีวิต หมายถึงรากที่ยังมีการเจริญเติบโต และพบการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่อง และรากตายหรือรากที่เสื่อมสภาพ การจำแนกรากใช้เกณฑ์จากการเปลี่ยนแปลงของสีรากเป็นเกณฑ์ โดยรากยางพาราที่มีชีวิตคือ รากที่มีสีขาว สีเหลืองอ่อน สีครีม เป็นต้น ขณะที่รากตายหรือเสื่อมสภาพใช้เกณฑ์สีของรากยางพาราที่มีสีน้ำตาลคล้ำ และสีดำเป็นหลักในการจำแนก

ข้อมูลความยาวรากที่บันทึกตลอดการทดลองพบว่า ความยาวรากมีชีวิตศึกษาที่ระดับ 0 - 60 cm มีค่าค่อนข้างคงที่ฤดูแล้งระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ - เมษายน 2557 และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงฤดูฝนในช่วงเดือนพฤษภาคม 2557 อย่างไรก็ตาม ความยาวรากที่ระดับความลึก 0 - 10 cm มีความแปรปรวนมากที่สุดตลอดการทดลอง พบว่า ค่าเฉลี่ยความยาวรากในระยะแรกที่เริ่มศึกษามีค่าเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างเดือนเมษายน - พฤษภาคม 2557 พบสูงสุดในเดือนกันยายน 2557 (0.22 mm mm^{-2}) และมีค่าลดลงเมื่อเข้าสู่เดือนพฤศจิกายน 2557 ขณะที่การเปลี่ยนของรากที่ระดับ

ความลึก 10 - 20 และ 20 - 30 cm พบว่า ความยาวรากมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในเดือนเมษายน 2557 และมีค่าสูงสุด พบในเดือนตุลาคม 2557 (0.96 และ 0.86 mm mm⁻²) และมีค่าลดลงจนกระทั่งเดือนเมษายน 2558 ความยาวรากที่ระดับความลึก 30-40 cm มีความยาวรากเริ่มเพิ่มขึ้นในเดือนเมษายน 2557 และสูงสุดในเดือนธันวาคม 2557 (0.53 mm mm⁻²) หลังจากนั้นความยาวรากลดลงจนกระทั่งเดือนเมษายน 2558 และความยาวรากที่ระดับความลึก 50-60 cm พบว่า ความยาวรากที่เพิ่มขึ้นและลดลงพบว่ามีค่าแปรปรวนน้อยกว่าที่ระดับความลึก 0-40 cm โดยความยาวรากที่พบสูงสุดระหว่างเดือนกรกฎาคม - ธันวาคม 2557

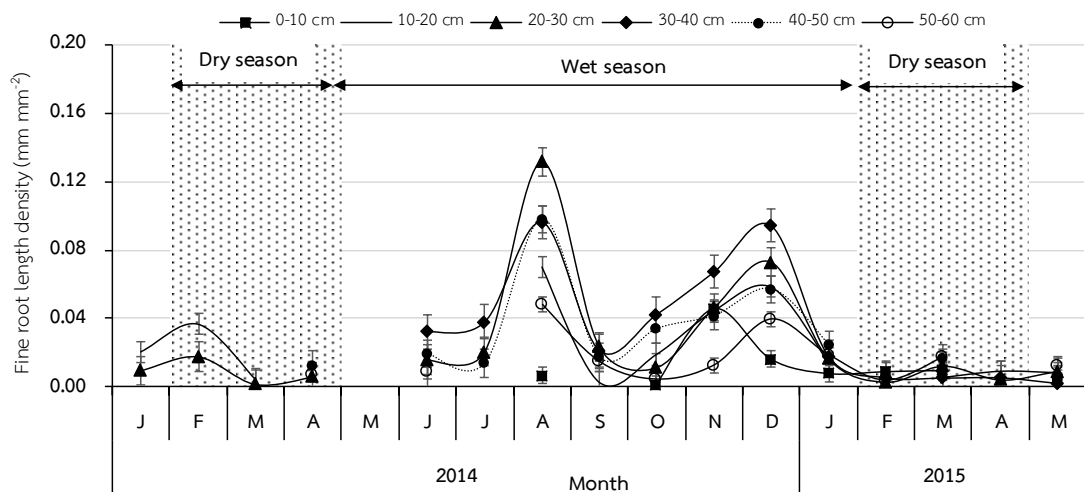
ทั้งนี้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของความยาวรากที่ศึกษาเกิดขึ้นเป็นพลวัตที่ใกล้เคียงกันคือ ในฤดูแล้ง (กุมภาพันธ์ - เมษายน 2557) พบความยาวรากต่ำสุดจากนั้นเมื่อเข้าสู่ฤดูฝน (พฤษภาคม 2557 - มกราคม 2558) ความยาวรากเพิ่มขึ้นและลดลงอีกครั้งเมื่อเข้าสู่ฤดูแล้งในรอบปีถัดไป (กุมภาพันธ์ - เมษายน 2558) (ภาพที่ 59)



ภาพที่ 59 การเปลี่ยนแปลงของรากมีชีวิตที่ระดับความลึกทุก ๆ 10 cm (0-60 cm) ตลอดการศึกษา ตั้งแต่เดือน มกราคม 2557-พฤษภาคม 2558

อัตราการเปลี่ยนแปลงของรากตายตลอดการศึกษาพบว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงมีลักษณะคล้ายกับรากมีชีวิต ซึ่งพบว่าในช่วงแรกของการศึกษาในช่วงฤดูแล้ง (กุมภาพันธ์ - เมษายน 2557) พบการอัตราการเกิดรากตายพบที่ระดับความลึก 10 - 20 และ 20 - 30 cm มีค่าเท่ากับ 0.02 และ 0.009 mm mm⁻² ตามลำดับ และเมื่อเข้าสู่ฤดูฝนระหว่างเดือน พฤษภาคม 2557 - มกราคม 2558 พบว่า การตายของรากพบว่าที่ค่าสูงสุดเป็นสองระยะคือ เดือนสิงหาคมที่ระดับความลึก 20 - 30 cm (0.13 mm mm⁻²) และเดือนธันวาคม 2557 ที่ระดับความลึก 30 - 40 cm (0.09 mm mm⁻²) และเมื่อ

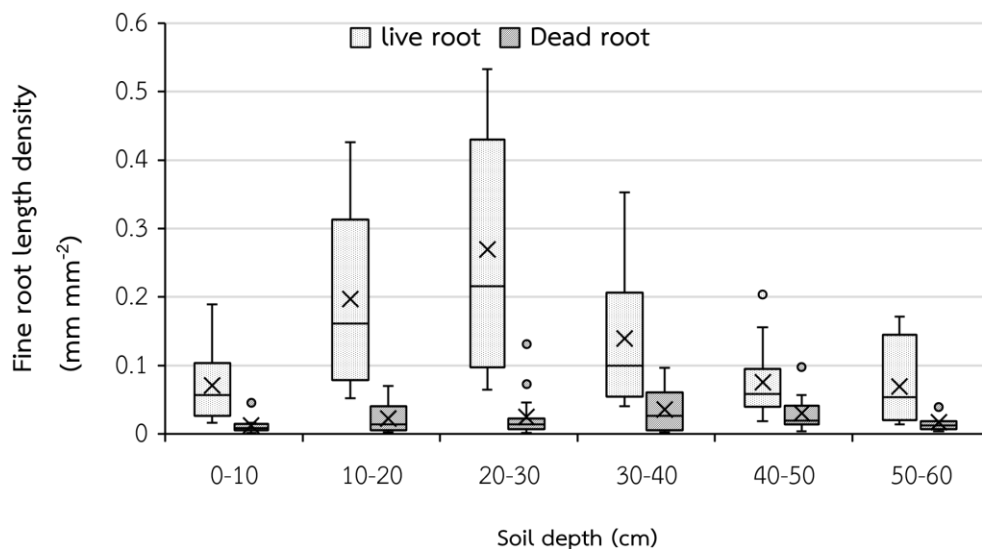
เข้าสู่ช่วงฤดูแล้งในรอบเดือนกุมภาพันธ์ - เมษายน 2558 ความยาวรากตายมีค่าลดลง และรากที่ระดับความลึก 20 - 30 และ 30 - 40 cm พบมีรากตายมากที่สุดตลอดการศึกษา (0.007 และ 0.005 mm mm^{-2}) ตามลำดับ (ภาพที่ 60)



ภาพที่ 60 การเปลี่ยนแปลงของรากตายที่ระดับความลึกทุก ๆ 10 cm (0-60 cm) ตลอดการศึกษา ตั้งแต่เดือนมกราคม 2557-พฤษภาคม 2558

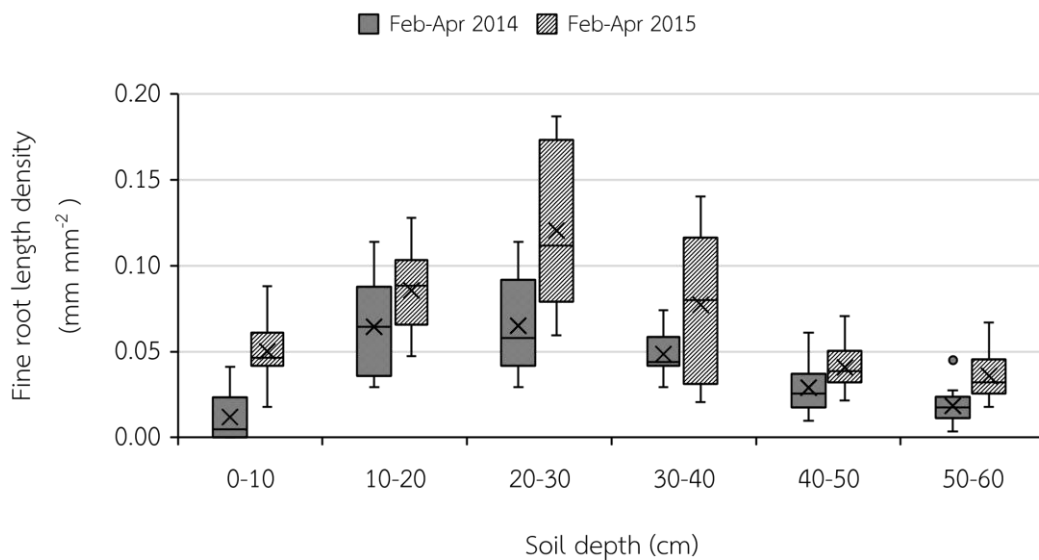
ความยาวรากศึกษาที่ระดับความลึก 0-60 cm พบว่า ที่ระดับความลึก 10 - 20, 20 - 30 และ 30 - 40 cm ความยาวรากเปลี่ยนแปลง มีค่าระหว่าง $0.053 - 0.427$, $0.065 - 0.533$ และ $0.404 - 0.353 \text{ mm mm}^{-2}$ ตามลำดับ ส่วนความยาวรากที่ระดับความลึก 40-50 cm พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่าความยาวรากน้อยที่สุด ($0.019 - 0.156 \text{ mm mm}^{-2}$) และที่ระดับความลึก 50 - 60 cm มีค่าเฉลี่ยความยาวรากเท่ากับ $0.015 - 0.172 \text{ mm mm}^{-2}$

การเปลี่ยนแปลงของรากตายที่ระดับความลึก 10-20 และ 30-40 cm มีค่ามากกว่า รากตายที่ระดับความลึกอื่น ($0.006 - 0.070$ และ $0.002 - 0.096 \text{ mm mm}^{-2}$) (ภาพที่ 61)

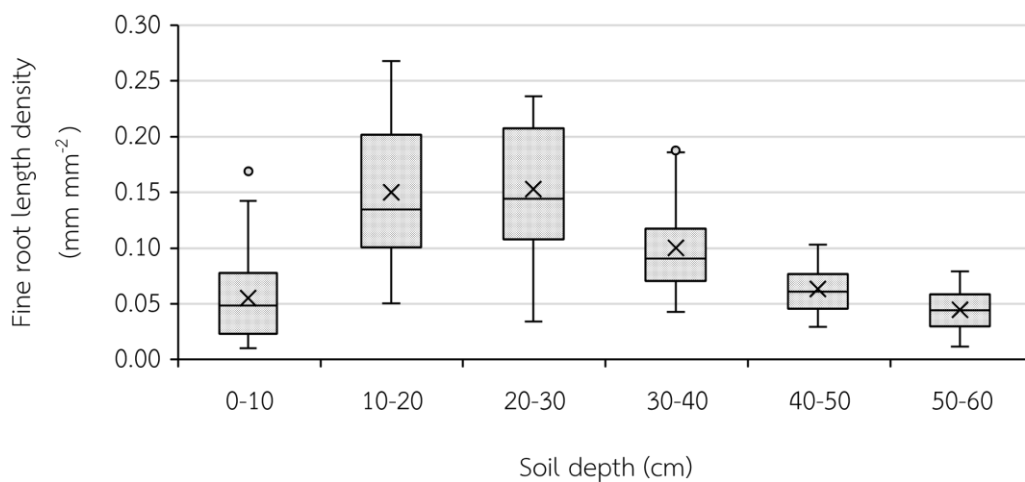


ภาพที่ 61 กราฟ box plot ของความยาวรากมีชีวิตและรากตาย ศึกษาที่ระดับความลึก 0-60 cm ตลอดการศึกษา (มกราคม 2557 – พฤษภาคม 2558)

การศึกษากการเจริญเติบโตของรากยางพาราที่ระดับความลึกทุกๆ 10 cm ตั้งแต่ 0 - 60 cm เปรียบเทียบระหว่างฤดูแล้ง 2 ช่วงระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ - เมษายน 2557 และ เดือนกุมภาพันธ์ - เมษายน 2558 พบว่าความยาวรากยางพาราฤดูแล้งปี 2557 มีค่าน้อยกว่าปี 2558 ในทุกระดับความลึก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความยาวรากที่ระดับความลึก 10 - 20, 20 - 30 และ 30 - 40 cm มีค่าระหว่าง 0.03 - 0.11 และ 0.03 - 0.7 mm mm⁻² ตามลำดับ ขณะที่ความยาวรากที่ระดับความลึกเดียวกันในปี 2558 มีค่าระหว่าง 0.05 - 0.13, 0.06 - 0.19 และ 0.02 - 0.14 mm mm⁻² ตามลำดับ (ภาพที่ 62) ความยาวรากที่ศึกษาช่วงฤดูฝนระหว่างเดือนพฤษภาคม 2557- มกราคม 2558 พบว่าความยาวรากมีพบมากที่สุดที่ระดับความลึก 10 - 20 และ 30 - 40 cm โดยมีค่าระหว่าง 0.05 - 0.27 และ 0.03 - 0.24 mm mm⁻² ตามลำดับ (ภาพที่ 63)



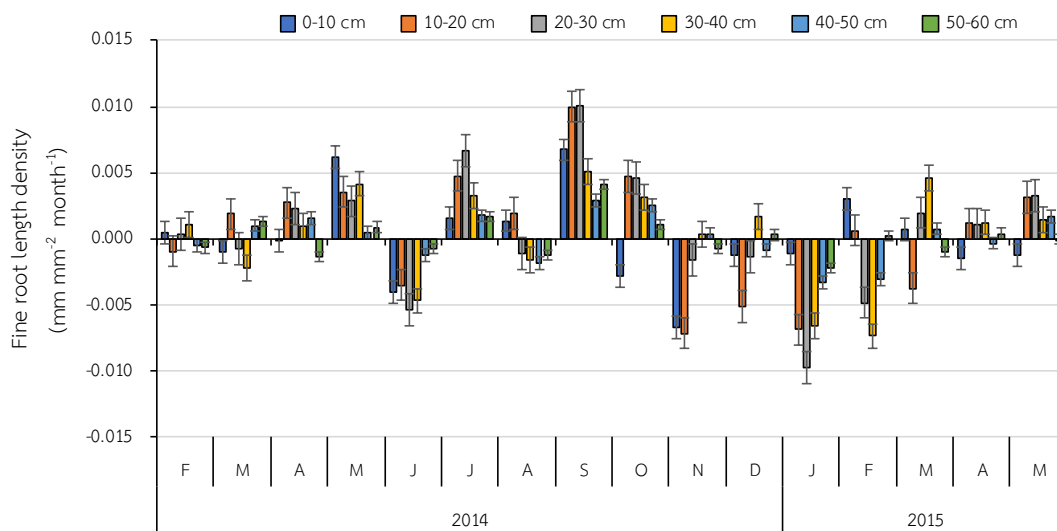
ภาพที่ 62 กราฟ box plot รากยาวพาราที่ระดับความลึก 0 - 60 cm เปรียบเทียบระหว่างฤดูแล้งปี 2557 (กุมภาพันธ์ - เมษายน 2557) และ ปี 2558 (กุมภาพันธ์ - เมษายน 2558)



ภาพที่ 63 กราฟ box plot ความยาวรากที่ระดับความลึก 0 - 60 cm ช่วงฤดูฝนระหว่างเดือน พฤษภาคม 2557 - มกราคม 2558

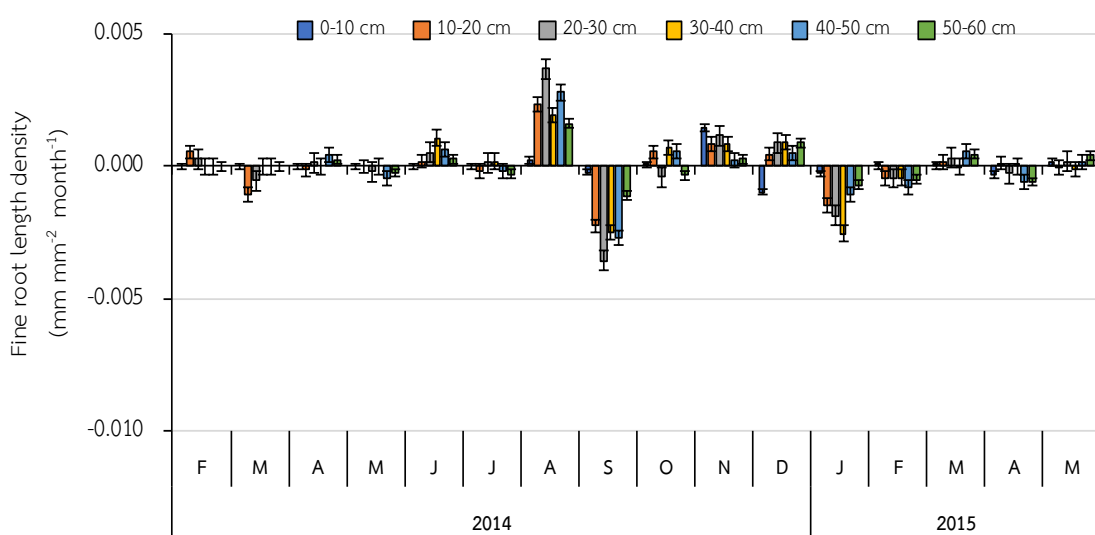
4. อัตราการเจริญเติบโตของรากมีชีวิต และอัตราการตายของรากยางพาราเฉลี่ยรายเดือน

จากการประเมินการเพิ่มขึ้นของความยาวรากเฉลี่ยรายเดือนจากภาพถ่ายรากยางพาราตลอดการศึกษา โดยข้อมูลเดือนมกราคม 2557 เป็นข้อมูลหลักในการคำนวณอัตราการเพิ่มความยาวราก ดังนั้นข้อมูลแสดงตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์ 2557 - พฤษภาคม 2558 พบว่า อัตราการความยาวรากที่ระดับความลึก 0 - 60 cm พบสูงสุดในเดือนกันยายน 2557 โดยเฉพาะอย่างยิ่งรากที่ระดับความลึก 10 - 20 และ 20 - 30 cm อัตราความยาวรากเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.009 และ 0.01 $\text{mm mm}^{-2} \text{month}^{-1}$ ขณะที่เดือนพฤศจิกายน 2557 พบว่า อัตราความยาวรากเริ่มลดลงจนกระทั่งเดือน มกราคม 2558 ความยาวรากลดลงต่ำสุดทุกระดับความลึก (0 - 60 cm) และที่ระดับความลึก 20-30 cm ความยาวรากลดลงเท่ากับ 0.01 $\text{mm mm}^{-2} \text{month}^{-1}$ และเมื่อเข้าสู่เดือนมีนาคม 2558 ความยาวรากมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง (ภาพที่ 64)



ภาพที่ 64 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการความยาวรากเฉลี่ยรายเดือนที่ระดับความลึกทุก 10 cm (0 - 60 cm) ตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์ 2557 - พฤษภาคม 2558

นอกจากนี้ผลการศึกษาอัตราการตายของรากที่ศึกษาในช่วงเดียวกันพบว่า การตายของรากพบค่าสูงสุด เดือนสิงหาคม 2557 โดยรากที่ระดับความลึก 10 – 20 20 – 30 30 – 40 และ 40 – 50 cm อัตราการตายของรากเท่ากับ 0.002, 0.004, 0.003 และ 0.002 $\text{mm mm}^{-2} \text{month}^{-1}$ ตามลำดับ ขณะที่เดือนกันยายน 2557 พบว่าอัตราการตายของรากมีค่าต่ำสุด โดยรากที่ระดับความลึก 10 – 20, 20 – 30, 30 – 40 และ 40 – 50 cm โดยมีค่าเท่ากับ -0.002 -0.004 -0.003 และ -0.003 $\text{mm mm}^{-2} \text{month}^{-1}$ ตามลำดับ และการตายของรากเพิ่มขึ้นในเดือน ตุลาคม - ธันวาคม 2557 จนกระทั่งเข้าสู่เดือน มกราคม 2558 อัตราการตายของรากเริ่มลดลง (ภาพที่ 65)

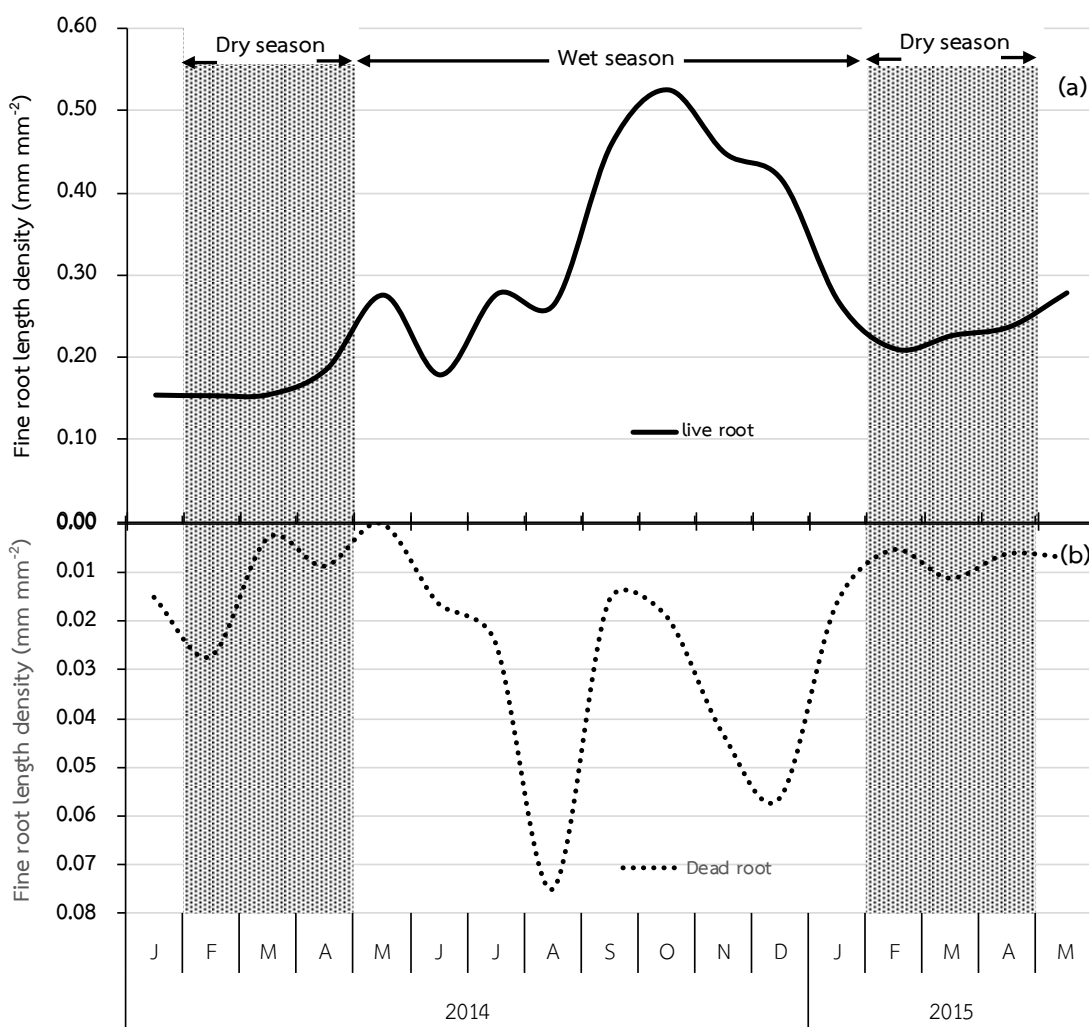


ภาพที่ 65 การเปลี่ยนแปลงของอัตราการตายของรากยาวรากเฉลี่ยรายเดือนที่ระดับความลึกทุก ๆ 10 cm (0 - 60 cm) ตลอดการศึกษาตั้งแต่เดือนมกราคม 2557 - พฤษภาคม 2558

ค่าเฉลี่ยของรากมีชีวิตและรากตายตลอดการศึกษา พบว่า รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของรากมีชีวิตและรากตายในระยะแรกที่ศึกษาตั้งแต่เดือนมกราคม 2557 พบว่าในช่วงฤดูแล้ง ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ - เมษายน 2557 ความยาวรากเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำ ($0.16 \text{ mm mm}^{-2} \text{ month}^{-1}$) ขณะที่เข้าสู่ฤดูฝนระหว่างเดือนพฤษภาคม 2557 - มกราคม 2558 การเปลี่ยนแปลงของความยาวรากมีชีวิตมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ($0.33 \text{ mm mm}^{-2} \text{ month}^{-1}$) และการเปลี่ยนแปลงพลวัตของรากพบสูงสุดในเดือน ตุลาคม 2557 ($0.52 \text{ mm mm}^{-2} \text{ month}^{-1}$) จากนั้นความยาวรากเฉลี่ยจึงมีอัตราลดลง เมื่อเข้าสู่ฤดูแล้ง ในปี 2558 ระหว่างเดือน กุมภาพันธ์-เมษายน 2558 มีค่าเฉลี่ยความยาวรากเท่ากับ ($0.22 \text{ mm mm}^{-2} \text{ month}^{-1}$)

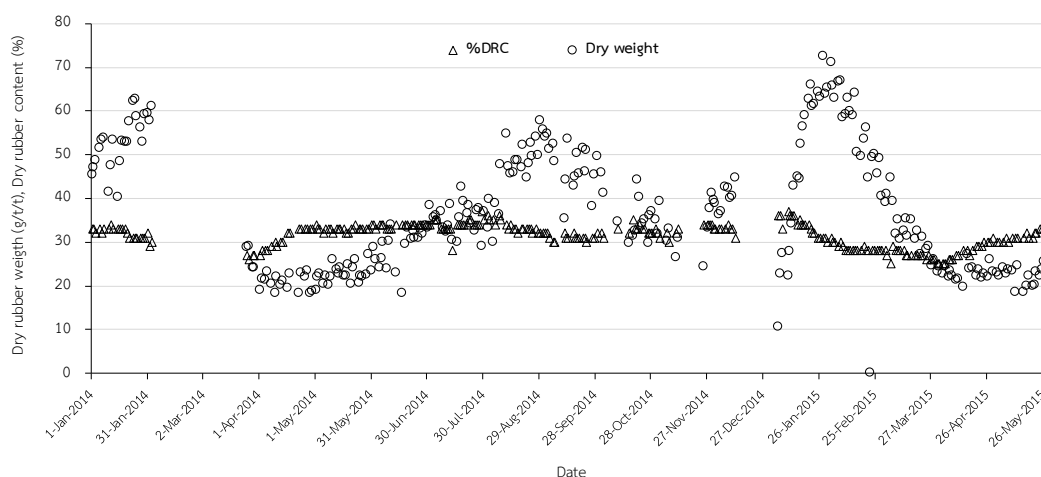
ขณะที่ค่าเฉลี่ยความยาวรากของรากตายที่ศึกษาพบว่าในช่วงฤดูแล้ง เดือนกุมภาพันธ์ -เมษายน 2557 ค่าเฉลี่ยความยาวรากตายอยู่ในระดับต่ำ ($0.013 \text{ mm mm}^{-2} \text{ month}^{-1}$)

เมื่อเข้าสู่ฤดูฝนระหว่างเดือนพฤษภาคม 2557 - มกราคม 2558 ค่าเฉลี่ยความยาวรากตายเพิ่มขึ้นสองช่วงได้แก่ เดือนสิงหาคม 2557 และเดือนตุลาคม 2557 มีค่าเฉลี่ยความยาวรากเท่ากับ 0.08 และ 0.06 mm mm⁻² month⁻¹ ตามลำดับ และเมื่อเข้าสู่ฤดูแล้งในปี 2558 ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ - พฤษภาคม 2558 ค่าเฉลี่ยความยาวรากตายมีค่าลดลง 0.008 mm mm⁻² month⁻¹ (ภาพที่ 66)



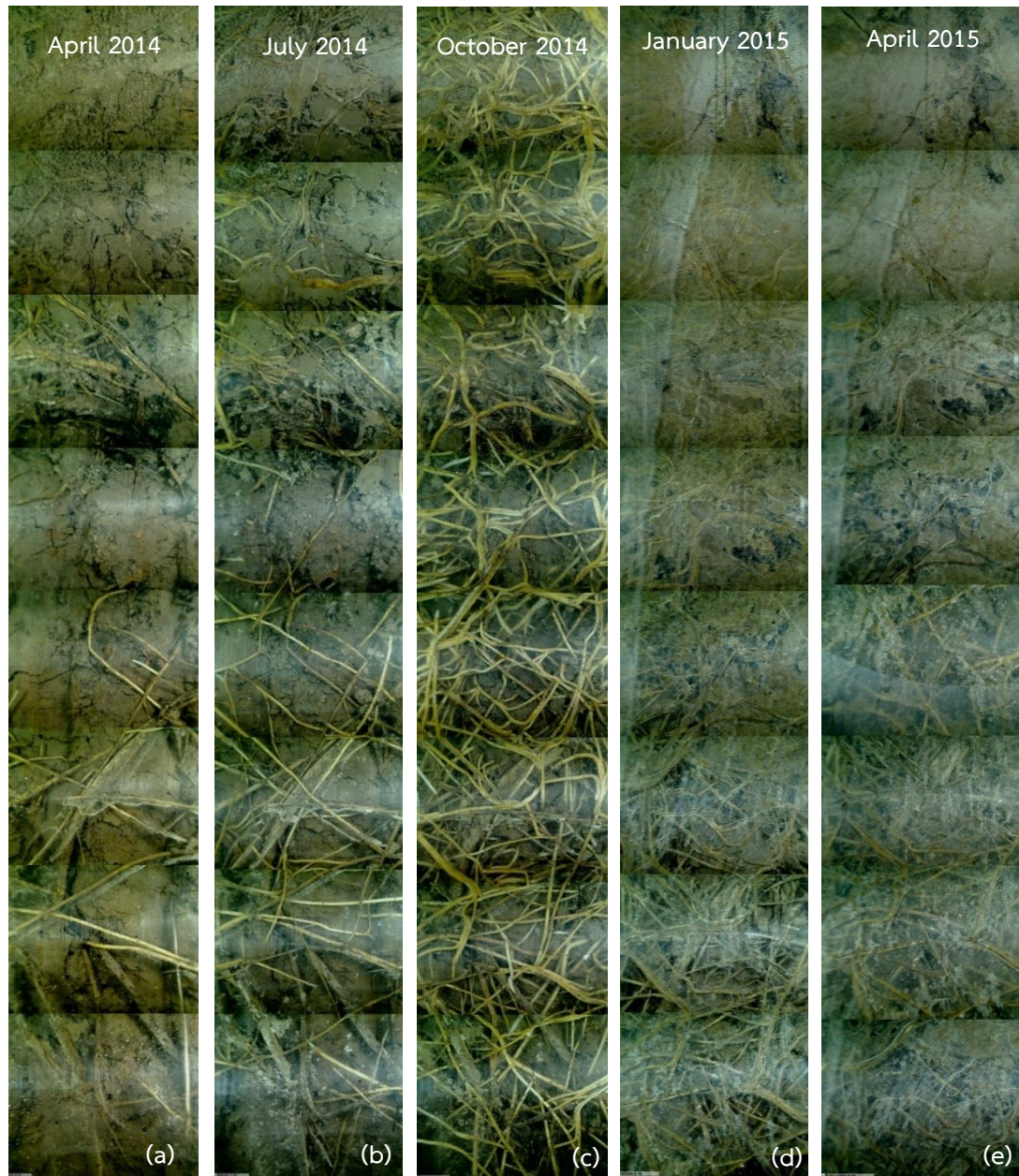
ภาพที่ 66 ค่าเฉลี่ยความยาวรากมีชีวิต (a) และรากตาย (b) ที่ระดับความลึก 0 - 60 cm ตลอดระยะเวลาการศึกษาระหว่างเดือนมกราคม 2557 - พฤษภาคม 2558

ข้อมูลผลผลิตยางพาราที่ศึกษาตลอดการทดลองประกอบด้วยน้ำหนักเนื้อยางแห้ง และเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง พบว่า ในระยะแรกที่ศึกษาเริ่มสู่ระยะผลัดใบของยางพารา น้ำหนักยางแห้งเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่ปลายเดือนมกราคม 2557 และในระยะแรกของการเปิดกรีดเดือนมีนาคม 2557 น้ำหนักยางแห้งอยู่ในระดับต่ำจนกระทั่งเข้าสู่ระยะแรกของช่วงฤดูฝนเดือนพฤษภาคม 2557 มีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งช่วงกลางฤดูฝน ระหว่างเดือนกรกฎาคม - ตุลาคม 2557 ในช่วงฝนตกชุกระหว่างเดือนธันวาคม 2557 ถึงต้นเดือนมกราคม 2558 ต้องหยุดกรีด เมื่อเกษตรกรเริ่มเปิดกรีดใหม่ พบว่า น้ำหนักยางแห้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงยางผลัดใบระหว่างเดือน มกราคม-กุมภาพันธ์ 2558 ค่าเฉลี่ยตลอดการศึกษาเท่ากับ 37 g/tree/tapping ขณะที่เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งที่ได้จากการอบน้ำยางสด พบว่า ระดับของเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งเฉลี่ยตลอดการศึกษามีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบกับการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเนื้อยางแห้ง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 31 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 67)



ภาพที่ 67 การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักยางแห้ง (g/t) และเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (%DRC) มกราคม 2557 - พฤษภาคม 2558

การเปลี่ยนแปลงของรากยางพาราที่ศึกษาโดยกล้องมิโครไซตรอนพบว่าความหนาแน่นของรากในระยะแรกที่เริ่มศึกษา การเจริญเติบโตของรากยางพาราค่อย ๆ เพิ่มขึ้น โดยความหนาแน่น และขนาดของรากเพิ่มมากขึ้น จากในช่วงฤดูแล้งเดือนเมษายน 2557 พบสูงสุดเดือนตุลาคม 2557 และลดลงเมื่อเข้าสู่ช่วงฤดูแล้งรอบปีถัดไป มกราคม - เมษายน 2558 (ภาพที่ 68)

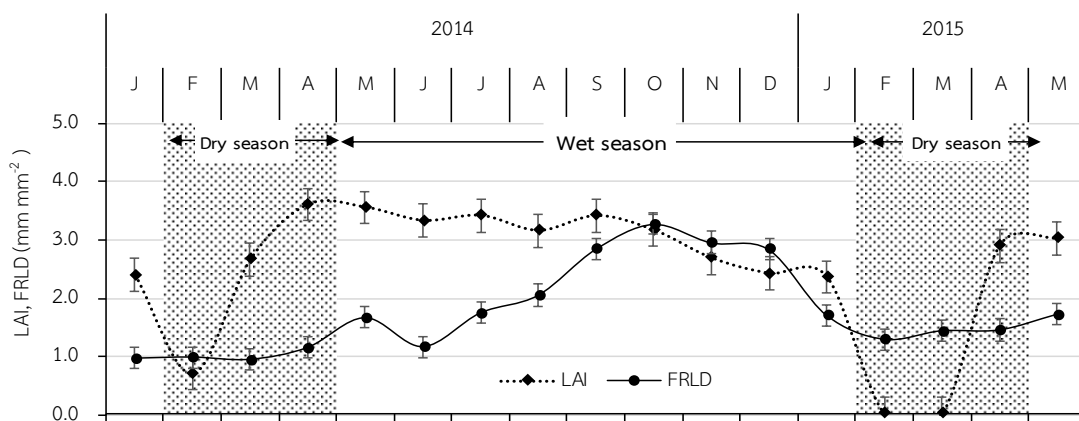


ภาพที่ 68 ตัวอย่างภาพถ่ายพัฒนาการรากยางพาราที่ระดับความลึก 10 - 20 และ 20 - 30 cm แสดงเดือนเมษายน 2557 (a) กรกฎาคม 2557 (b) ตุลาคม 2557 (c) มกราคม 2558 (d) และ เมษายน (e) บันทึกภาพโดยใช้กล้องมินิโรโซตรอน

5. ความยาวรากและดัชนีพื้นที่ใบ

ความสัมพันธ์ระหว่างพัฒนาการของค่าดัชนีพื้นที่ใบและความยาวรากรวมที่ระดับความลึก 0-60 cm ตลอดการศึกษาพบว่าในระยะแรกที่เข้าสู่ช่วงฤดูแล้งการผลัดใบของพาราเริ่มช่วงปลายเดือนมกราคม - มีนาคม 2557 โดยดัชนีพื้นที่ใบต่ำสุดพบในเดือนกุมภาพันธ์ 2557 (0.69) และพัฒนาการของใบของพาราเพิ่มสูงขึ้นจากเดือนมีนาคม จนกระทั่งสูงสุดในเดือนเมษายน 2557 (3.59) ระหว่างเดือนเมษายน - กันยายน 2557 ค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นที่ใบเท่ากับ 3.40 และลดลงเดือนตุลาคม 2557 จนกระทั่งเข้าสู่รอบการผลัดใบของพารา ระหว่างเดือนมกราคม - มีนาคม 2558 โดยการพัฒนาใบของพาราเพิ่มขึ้นในเดือนเมษายน 2558 (2.89) ทั้งนี้ระยะเวลาในการผลัดใบจากการศึกษาทั้งสองช่วงพบว่า ระหว่างเดือนมกราคม-มีนาคม 2557 และ เดือนมกราคม - มีนาคม 2558 ค่าดัชนีพื้นที่ใบและระยะเวลาการผลัดใบในปี 2557 พัฒนาการของใบของพาราเร็วกว่าพาราในปี 2558

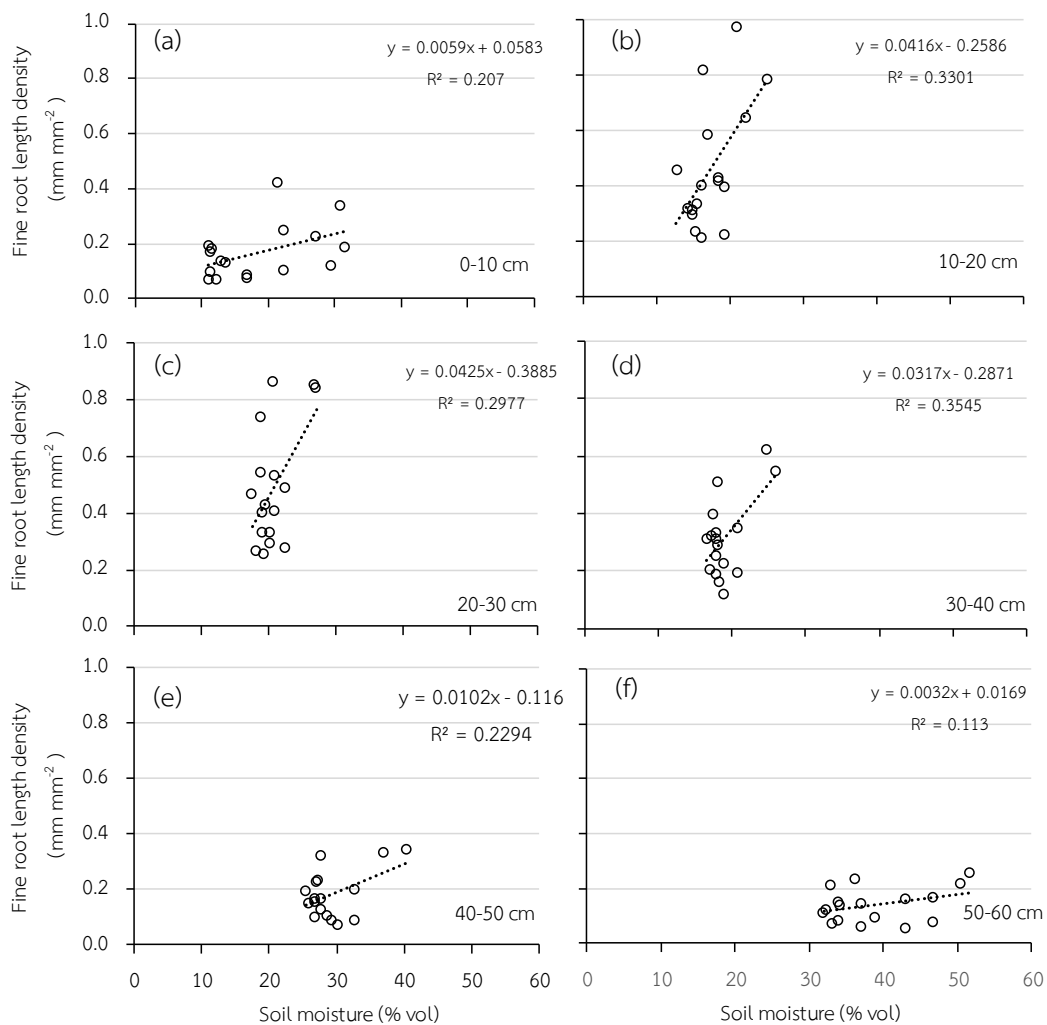
พลวัตของรากของพาราศึกษาที่ระดับความลึก 0 - 60 cm พบว่า ระยะแรกของการศึกษาระหว่างเดือนมกราคม - มีนาคม 2557 ความยาวรากค่อนข้างคงที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.99 mm mm^{-2} จากนั้นเมื่อเข้าสู่เดือนพฤษภาคม 2557 ความยาวรากเพิ่มขึ้น (1.65 mm mm^{-2}) และลดลงอีกครั้งในเดือน มิถุนายน 2557 (1.15 mm mm^{-2}) การเปลี่ยนแปลงความยาวรากของพาราเพิ่มขึ้นหลังจากเดือนมิถุนายน จนกระทั่งเดือนตุลาคม 2557 มีความยาวรากสูงสุด 3.15 mm mm^{-2} จากนั้นลดลงเมื่อเข้าสู่เดือนมกราคม 2558 จนกระทั่งสิ้นสุดการศึกษาในเดือนพฤษภาคม 2558 ซึ่งค่าเฉลี่ยความยาวรากระหว่างเดือนมกราคม - พฤษภาคม 2558 เท่ากับ 1.51 mm mm^{-2} ทั้งนี้ระยะพัฒนาการของดัชนีพื้นที่ใบและรากของพารา พบว่า เมื่อพัฒนาการของพื้นที่ใบของพารา มีความหนาแน่นของทรงพุ่มสูงสุดในเดือนเมษายน 2557 ขณะที่ความยาวรากที่เพิ่มขึ้นพบในเดือนพฤษภาคม 2558 ซึ่งช้ากว่าประมาณ 1 เดือน ในขณะที่รอบการผลัดใบที่ 2 ในปี 2558 พบว่า ความหนาแน่นของทรงพุ่มสูงสุดพบภายหลังการผลัดใบในเดือน พฤษภาคม 2558 (3.01) ขณะที่ความยาวรากเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน (1.71 mm mm^{-2}) (ภาพที่ 69)



ภาพที่ 69 การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และความยาวรากรวม (0-60 cm) ตลอดการศึกษา (มกราคม 2557-พฤษภาคม 2558)

6. ประเมินความสัมพันธ์ของรากและความชื้นดิน

การประเมินความสัมพันธ์จากข้อมูลความชื้นดินที่บันทึกข้อมูลตลอดการศึกษา (มกราคม 2557-พฤษภาคม 2558) โดยใช้สมการเชิงเส้น พบว่าความสัมพันธ์ของความชื้นดินและความยาวรากที่ระดับความลึกทุก ๆ 10 cm (0 - 60 cm) มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ ความสัมพันธ์ของความยาวรากและความชื้นดินที่ระดับความลึก 30 - 40 cm มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ $R^2 = 0.355$ ขณะที่ความสัมพันธ์ต่ำที่สุดพบที่ระดับ 50-60 cm $R^2 = 0.113$ และที่ระดับความลึก 0 - 10, 10 - 20, 20 - 30, และ 40 - 50 cm มีค่าเท่ากับ $R^2 = 0.207$, $R^2 = 0.330$, $R^2 = 0.298$ และ $R^2 = 0.230$ ตามลำดับ (ภาพที่ 70)



ภาพที่ 70 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้น ระหว่างความยาวรากและความชื้นดิน ที่ระดับความลึก 0-10cm (a), 10-20 cm (b) 20-30 cm (c) 30-40 cm (d) 40-50 cm (e) และ 50-60 cm (f) ตลอดการศึกษา (มกราคม 2557-พฤษภาคม 2558)

7. ประเมินปัจจัยของสภาพแวดล้อมต่อการเจริญเติบโตของรากยางพารา

ประเมินความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝน ค่าการคายระเหยน้ำ ปริมาณความชื้นดิน ผลผลิตยางพาราในรูปของน้ำหนักยางแห้ง (g/tree/tapping) เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (% DRC) และค่าดัชนีพื้นที่ใบ กับการเจริญเติบโตของรากยางพาราที่ระดับความลึก 0 - 10, 10 - 20, 20 - 30, 30 - 40, 40 - 50 และ 50 - 60 cm โดยวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แยกเป็นช่วงฤดูแล้ง (กุมภาพันธ์ - เมษายน 2557) และฤดูฝน (พฤษภาคม 2557 - มกราคม 2558) และความสัมพันธ์ในรอบปี (กุมภาพันธ์ 2557 - มกราคม 2558) จากการศึกษาพบว่าในช่วงฤดูแล้ง ปัจจัยของปริมาณน้ำฝน ค่าการคายระเหยน้ำ ความชื้นดิน น้ำหนักยางแห้ง เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง และดัชนีพื้นที่ใบไม่พบความสัมพันธ์ทางไม่มีความสัมพันธ์กันทางสถิติกับการเจริญเติบโตของรากในดินที่ระดับความลึก 0 - 60 cm และช่วงฤดูฝนพบว่า ปริมาณน้ำฝนมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการเจริญเติบโตของรากที่ระดับความลึก 30 - 40 cm ความชื้นดินพบว่ามีสัมพันธ์ทางสถิติที่เชิงบวกกับรากที่ระดับความลึก 20 - 30 และ 50 - 60 cm และมีความสัมพันธ์กันอย่างยิ่งที่ระดับความลึก 30 - 40 และ 40 - 50 cm ตามลำดับขณะที่ค่าดัชนีพื้นที่ใบพบว่ามีสัมพันธ์เชิงลบกับการเจริญเติบโตของรากที่ระดับความลึก 30 - 40 และ 40 - 50 cm แต่ค่าการคายระเหยน้ำ และผลผลิตยางแห้งไม่พบความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของรากในทุกๆ ระดับความลึกที่ศึกษา

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรากและปัจจัยจากสภาพแวดล้อมที่ศึกษาในรอบปีพบว่า ปริมาณน้ำฝนมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการเจริญเติบโตของรากที่ระดับความลึก 30 - 60 cm ค่าการคายระเหยน้ำมีความสัมพันธ์ทางสถิติอย่างยิ่งในเชิงลบที่ระดับความลึก 10 - 60 cm ความชื้นพบว่ามีสัมพันธ์เชิงบวกกับการเจริญเติบโตของรากที่ระดับความลึก 20 - 30, 40 - 60 cm และพบความสัมพันธ์อย่างยิ่งที่ระดับความลึก 30 - 40 cm อย่างไรก็ตาม ผลผลิตยางแห้ง เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งและค่าดัชนีพื้นที่ใบไม่พบความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของรากในทุกๆ ระดับความลึก (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณน้ำฝน ค่าการคายระเหยน้ำ (ETo) ความชื้นดิน น้ำหนักรากแห้ง เปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้ง และค่าดัชนีพื้นที่ใบ เปรียบเทียบกับรากยางพารา ที่ระดับความลึกทุก ๆ 10 cm (0-60 cm) ระหว่างเดือนมกราคม-ธันวาคม 2557

Dry season	FRLD 10	FRLD 20	FRLD 30	FRLD 40	FRLD 50	FRLD 60
	cm	cm	cm	cm	cm	cm
Rainfall (mm)	-0.991	0.626	-0.113	-0.938	0.705	0.705
ETo (mm)	-0.146	-0.576	-0.986	-0.593	-0.486	0.876
Soil moisture (%vol)	0.928	-0.930	-0.392	0.643	-0.964	-0.263
Dry rubber weight (g/t/t)	0.937	-0.920	-0.369	0.663	-0.956	-0.287
(%) DRC	0.362	0.381	0.925	0.757	0.280	-0.961
LAI	-0.965	0.879	0.280	-0.730	0.925	0.376
Wet season						
Rainfall (mm)	-0.387	0.170	0.502	0.714*	0.583	0.584
ETo (mm)	0.305	-0.439	-0.570	-0.610	-0.707	-0.642
Soil moisture (%vol)	-0.206	0.522	0.771*	0.895**	0.873**	0.746*
Dry rubber weight (g/t/t)	0.397	0.495	0.464	0.264	0.323	0.485
(%) DRC	-0.759*	-0.680	-0.604	-0.437	-0.364	-0.620
LAI	0.464	-0.353	-0.661	-0.820*	-0.819*	-0.694
All season						
Rainfall (mm)	-0.033	0.379	0.563	0.671*	0.645*	0.640*
ETo (mm)	-0.391	-0.727**	-0.758**	-0.780**	-0.822**	-0.726**
Soil moisture (%vol)	0.020	0.487	0.683*	0.777**	0.666*	0.690*
Dry rubber weight (g/t/t)	0.139	0.057	0.109	0.071	-0.115	0.149
(%) DRC	0.291	0.353	0.331	0.399	0.436	0.211
LAI	0.412	0.317	0.146	0.040	0.292	0.116

* = significant different at $P \leq 0.05$

** = significant different at $P \leq 0.01$

บทที่ 4

วิจารณ์

1. การตอบสนองทางสรีรวิทยาและรากยางพาราในสภาวะขาดน้ำ

ค่าความเครียดของใบยางพาราตลอดการทดลองที่มีการให้น้ำแตกต่างกัน ไม่พบความแตกต่างกันตลอดการศึกษา การเปลี่ยนแปลงของค่าการชักนำปากใบ และค่าศักย์ของน้ำในใบยางพาราที่ระดับการให้น้ำแตกต่างกันพบว่า การตอบสนองในรอบวันของค่าชักนำปากใบของยางพาราที่ให้น้ำปกติ ให้น้ำทุก 4 วัน และทุก 8 วัน มีค่าสูงสุดในช่วงเช้า (08.00 น.) $114.13-640.33 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ $115.0-576.0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และ $118.58-692.67 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของการชักนำปากใบมีค่าลดลงเมื่อมีการให้น้ำและปรับค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้น้ำกลับคืนแก่ต้นยางพารา ช่วงการทดสอบเมื่อรอบการรดน้ำและให้น้ำสลับกันมีผลให้การฟื้นตัวของอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซตอบสนองแตกต่างกันซึ่งในระยะแรกของต้นยางพาราพาราที่ให้น้ำทุก 4 วัน ค่าศักย์ของน้ำในใบยางที่วัดช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับต้นยางพาราที่มีการให้น้ำปกติ แต่เมื่อมีการให้น้ำเข้าสู่ระยะที่สอง ค่าศักย์ของน้ำในใบจึงลดลง เช่นเดียวกับต้นยางพาราที่ให้น้ำทุก ๆ 8 วัน ค่าศักย์ของน้ำในใบระยะแรกเริ่มลดลงจนกระทั่งเข้าสู่วันที่ 8 ค่าลดลงต่ำสุด (-2.13 MPa) ซึ่งอาจเป็นจุดวิกฤตที่ทำให้ระบบการลำเลียงน้ำในต้นยางพาราเกิดฟองอากาศแทรกตัวในเซลล์ท่อลำเลียง การศึกษาของ กฤษดา (2558) กล่าวถึงสภาพการเกิดช่องว่างของอากาศในท่อลำเลียงน้ำเมื่อต้นยางพาราขาดน้ำ โดยประเมินประมาณน้ำในใบ พบว่า ค่าศักย์ของน้ำในใบที่ทำให้เกิดช่องว่างของอากาศในท่อลำเลียงอยู่ที่ -2.0 MPa ฟองอากาศที่ขวางการลำเลียงน้ำส่งผลต่อการนำน้ำจากรากไปยังส่วนของบนของพืช ซึ่งมีผลต่ออัตราการสังเคราะห์แสงและสภาพการนำน้ำของปากใบ

พืชที่เจริญเติบโตในพื้นที่กึ่งแล้งผลกระทบของสภาวะแล้งและการให้น้ำกลับในระยะฟื้นตัวของพืช มีการตอบสนองและการปรับตัวในระดับที่แตกต่างกันจากการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล (Gazanchian *et al.*, 2007; Izanloo *et al.*, 2008) ส่วน Gomes และคณะ (2008) รายงานว่า แม้พืชที่ได้รับสภาวะขาดน้ำจะได้รับการให้น้ำกลับคืนอีกครั้ง การฟื้นตัวของพืชอาจเกิดได้ไม่สมบูรณ์เนื่องจากแรงควัตลุ่มที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์แสงถูกทำลายบางส่วนในระยะเวลาที่ขาดน้ำ รายงานการศึกษาถึงการตอบสนองของการเปิดปิดปากใบภายใต้สภาวะเครียดน้ำและการให้น้ำกลับคืน พบว่า การตอบสนองมีรูปแบบที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างพันธุ์พืช รูปแบบการเจริญเติบโตและพฤติกรรมของปากใบ (Potts *et al.*, 2006; Galmés *et al.*, 2007; Brodribb and Cochard, 2009) ขณะเดียวกัน Galle และคณะ (2007) พบว่า ความสัมพันธ์ของการเปิดปิดปากใบและการสังเคราะห์แสงของต้นโอ๊ค (*Quercus pubescens*) มีค่าเพิ่มขึ้นภายหลังการให้น้ำกลับคืนภายใน 2 สัปดาห์ และมีค่าอยู่ในระดับเดียวกับต้นที่ได้รับน้ำปกติภายในระยะเวลา

4 สัปดาห์ หลังการให้น้ำต่อเนื่อง ทั้งนี้พืชที่เจริญเติบโตในสภาวะที่แห้งแล้งมีการปรับรูปแบบการใช้น้ำเพื่อให้สามารถมีชีวิตรอดอยู่ได้ทำให้ระดับน้ำในต้นมีการแปรปรวนตลอดระยะที่ขาดน้ำ อีกทั้งมีการแลกเปลี่ยนระหว่างระดับการตอบสนองทางสรีรวิทยาและการสะสมน้ำหนักแห้ง เช่น การรักษาระดับของอัตราการสังเคราะห์แสงไว้เป็นผลให้การเจริญเติบโตทางด้านลำต้นลดลง (Xu *et al.*, 2007)

ผลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรากต้นยางพาราพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ให้น้ำทุก 4 และ 8 การเจริญเติบโตของรากที่ระดับความลึก 0-40 cm ลดลงเมื่อผ่านไป 12 วันของการทดลอง (ภาพที่21) แต่รากที่ระดับความลึก 40-100 cm ยังมีการเจริญเติบโตคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งเป็นผลมาจากความชื้นดินที่ระดับชั้นบนลดลงจากการสูญเสียโดยการระเหยในอากาศและการใช้น้ำของรากบางส่วน ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้เทคนิคมิไรโซทรอน ประเมินการเจริญโตของรากที่ระดับความลึก 0-100 cm และวิธีการนับจุดตัดราก มีความสัมพันธ์อยู่ในระดับปานกลางในทรีตเมนต์ที่มีการให้น้ำทุก 4 และ 8 วัน ($R^2=0.425$ และ $R^2 = 0.335$) แต่ไม่พบความสัมพันธ์ของต้นยางพาราที่ให้น้ำปกติ ซึ่งผลการประเมินความยาวรากทั้ง 2 วิธีการอาจจะสามารถใช้ทดแทนกันได้ในกรณีของการปลูกทดสอบพืชภายใต้สภาวะเครียดน้ำได้ อย่างไรก็ตาม การศึกษาในขั้นต้นนี้อาจต้องปรับความถี่การบันทึกภาพรากและเลือกอายุพืชทดลองที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาระยะการพัฒนารากของพืช (phenology) ที่เหมาะสมและให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองวิธีการศึกษาราก (Pregitzer, 2002)

2. การตอบสนองทางสรีรวิทยาของยางพาราภายใต้สภาวะน้ำท่วมขัง

การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของยางพาราที่ให้สภาวะน้ำท่วมขังการชักนำปากใบ และค่าศักย์ของน้ำในใบของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 มีการเปลี่ยนแปลงในระดับใกล้เคียงกันทั้งในระยะที่ให้น้ำขังและระยะปล่อยน้ำขัง การเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ของน้ำในใบในภายหลังปล่อยน้ำขังของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 มีค่าปรับสูงขึ้นเล็กน้อยจากระยะให้น้ำขัง เช่นเดียวกับในยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ค่าศักย์ของน้ำในใบภายหลังการปล่อยน้ำขังมีแนวโน้มที่สูงขึ้นจากระยะที่ให้น้ำขัง การชักนำปากใบระยะที่ปล่อยน้ำขังมีค่าเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกันของยางพาราทั้งสองพันธุ์ ระดับของการแลกเปลี่ยนและค่าศักย์ของน้ำในใบที่เปลี่ยนจากผลการศึกษา อาจเนื่องจากความสามารถในการปรับตัวของต้นยางพาราพาราทั้งสองพันธุ์เมื่ออยู่ภายใต้ น้ำขัง ซึ่งกลไกการปรับตัวของพืชโดยส่วนใหญ่ พบว่า จะลดระดับการสังเคราะห์แสง อัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซ และปิดปากใบเพื่อการป้องกันน้ำสูญเสียออกจากต้น การให้น้ำขังเป็นระยะเวลา 42 วัน พบว่า ต้นยางพาราพาราสามารถเจริญเติบโตได้ แต่ลักษณะทางกายภาพเมื่อเปรียบเทียบกับต้นยางพาราที่ให้น้ำปกติ พบต้นแคระแกร็น เกิดอาการใบเหลืองบางส่วนเช่นเดียวกับการศึกษาของ สมยศ และสุรพล (2557) รายงานว่า การให้น้ำขังเป็นเวลา 28 วัน ต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 แสดงอาการ

ใบเหลืองบางส่วนและร่วงหล่นภายในระยะเวลา 14-21 วัน แต่การตอบสนองทางสรีรวิทยาไม่แตกต่างกันระหว่างพันธุ์

พลวัตของรากยางพาราที่เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะน้ำท่วมขังจากการประเมินโดยใช้ภาพถ่ายด้วยกล้องมินิไรโซทรอน พบการปรับตัวของต้นยางพาราพาราที่ให้น้ำปกติมีความยาวรากสูงสุดตลอดการทดลอง ในขณะที่ต้นยางพาราที่ให้น้ำขังผิวดินความยาวรากมีชีวิตลดลงตลอดความลึกที่ศึกษาและรากตายเพิ่มมากขึ้นในดินชั้นบนที่ระดับ 0-10 cm และการเปลี่ยนแปลงของรากที่ให้น้ำขังเหนือผิวดินพบว่ารากตายพบมากที่สุดที่ระดับความลึก 30-50 cm และการให้น้ำขังทั้งสองระดับแก่ต้นยางพาราพาราทั้งสองพันธุ์พบว่าเมื่อเข้าสู่วันที่ 7 พบรากตายเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง อีกทั้งน้ำหนักแห้งรากและยอดยังลดลงในยางพาราทั้งสองพันธุ์ที่ให้น้ำขัง ผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากในสภาพดินโดยทั่วไปมีอากาศแทรกตัวในอนุภาคดิน แต่เมื่อเกิดน้ำขังช่องว่างในดินถูกแทนที่ด้วยโมเลกุลของน้ำหากระยะเวลาน้ำท่วมขังยาวนานขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียออกซิเจนที่อยู่ในดิน ซึ่งมีความสำคัญต่อการหายใจของรากและจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์กับการเจริญเติบโตของราก เช่น Mycorrhiza เมื่อปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลงส่งผลให้อัตราการหายใจของรากลดลงรากจะเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนและมีการสะสมของกรดแลคติก (Taiz and Zeiger, 1991) ที่เป็นสารอนุมูลอิสระทำลายเซลล์ราก เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของรากจากสีเขียวช้ำเป็นสีดำคล้ำ การปรับตัวของต้นยางพาราเพื่อรักษาระดับของการแลกเปลี่ยนก๊าซและการลำเลียงน้ำจากรากไปยังส่วนของยอดภายหลังการให้น้ำขังเป็นเวลา 42 วัน พบว่า มีการสร้างรากพิเศษ (adventitious root) บางส่วน และการเกิดเซลล์ aerenchyma ในเนื้อเยื่อของราก เซลล์ aerenchyma ที่พืชสร้างขึ้นพบได้โดยทั่วไปในพืชยืนต้นและเป็นการปรับตัวของพืชเพื่อต้านทาน หรือเพื่อมีชีวิตรอดเมื่อเกิดน้ำขังในดิน (Kludze *et al.*, 1994; Pezeshki, 1996) และเกิดการปริแตกของเปลือกบริเวณโคนต้น (lenticels) เพื่อเป็นช่องอากาศพิเศษทดแทนหน้าที่ของรากที่อยู่ในดินเพื่อสร้างแรงดึงในการลำเลียงไปเลี้ยงลำต้นด้านบน (Parent *et al.*, 2008) นอกจากนี้ ช่องอากาศบริเวณเปลือกที่แตกออกยังมีหน้าที่ในการระบายสารพิษที่เกิดขึ้นจากผลผลิตส่วนเกินที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แสง (phytotoxic) สารพิษที่เกิดจากจุลินทรีย์บางชนิดทำให้เกิดก๊าซพิษ เช่น methane หรือ ethanol บริเวณรากให้ออกไปยังบรรยากาศ เพื่อลดความรุนแรงที่อาจทำลายเนื้อเยื่อและระบบการสังเคราะห์แสง (Visser *et al.*, 1997; Visser and Pierik, 2007) และเป็นการเพิ่มการหมุนเวียนของออกซิเจนให้แก่เซลล์เนื้อเยื่อรากเพื่อรักษาระดับการหายใจ (Evan, 2004) จากการล้างรากภายหลังสิ้นสุดการทดลองพบว่ายังมีรากบางส่วนที่มีเนื้อไม้เกิดขึ้น สามารถมีชีวิตอยู่รอดได้ แต่รากขนาดเล็กมีลักษณะสีดำคล้ำเปื่อยยุ่ยที่เกิดจากการที่เซลล์ขาดออกซิเจนและอาจเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนในดิน

3. พลวัตของรากยางพาราในรอบปี

การเปลี่ยนแปลงพลวัตของรากยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในสภาพแปลงปลูก ประเมินโดยเทคนิคมิโนไรโซทรอนที่ระดับความลึก 0-60 cm พบว่า พลวัตของรากที่เปลี่ยนแปลงในรูปของความยาวรากพบมากที่สุดที่ระดับความลึก 20-30 cm โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเจริญเติบโตของรากพบมากที่สุดในช่วงฤดูฝน เดือนระหว่างเดือน กันยายน - ตุลาคม 2557 ความยาวรากที่พบในดินชั้นบนสอดคล้องกับการรายงานการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่า พลวัตของรากพืชเกิดการหมุนเวียนในรูปของการสร้างรากใหม่ การย่อยสลายของรากที่หมดหน้าที่เป็นอินทรีย์วัตถุในดินที่เกิดขึ้นเป็นวัฏจักรพบมากที่สุดในดินระดับความลึก 0-50 cm (Hendrick and Pregitzer, 1996; Jimenez *et al.*, 2004) และการผลการศึกษาของ Chairungsee (2014) พบว่า การเจริญเติบโตของรากกว่า 55% พบที่ระดับความลึก 10 cm

รูปแบบการเจริญเติบโตของรากระหว่างฤดูกาลในรอบปี ในระยะแรกที่ศึกษาช่วงฤดูแล้ง (กุมภาพันธ์-เมษายน 2557) อัตราการเจริญเติบโตของรากทุกระดับความลึกอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งเกิดจากเปอร์เซ็นต์ความชื้นในดินลดลงหรือการปลดปล่อยธาตุอาหารในดินที่พืชต้องการถูกจำกัดไว้แต่เมื่อเปลี่ยนฤดูเข้าสู่ช่วงฤดูฝน เดือนพฤษภาคม 2557 ปริมาณฝนที่เริ่มตกในระยะแรกเป็นตัวกระตุ้น (trigger) ให้พืชเกิดการแตกรากขึ้นใหม่และมีการส่งสัญญาณจากส่วนของรากไปยอดโดยการเปลี่ยนแปลงระดับของฮอร์โมนเป็นตัวชักนำให้เกิดการแตกรากใหม่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของรากที่เจริญเติบโตในดินระดับลึกยังมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของรากในช่วงฤดูแล้ง (Gewin, 2010) และรายงานการศึกษาโดยส่วนใหญ่ พบว่า ความหนาแน่นของรากขนาดเล็กและกระบวนการหมุนเวียนของราก (fine root turnover) มีปริมาณลดลงที่ระดับความลึกดินเพิ่มขึ้น (Joslin *et al.*, 2006; Germon *et al.*, 2015) โดยการประเมินอายุขัยของรากพบว่ารากที่อยู่ในดินระดับลึกมีอายุยาวนานกว่ารากที่อยู่ในดินระดับตื้นและยังทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมอาหารสำรองเพื่อเคลื่อนย้ายไปให้รากที่มีขนาดเล็กเจริญเติบโต การศึกษาของ Maeght และคณะ (2015) รายงานว่า อัตราการหมุนเวียนของรากยางพาราเกิดในดินที่ระดับความลึกจากผิวดินจนถึงที่ระดับความลึก 3 เมตร ขณะที่ผลการศึกษาของ Gonkhamdee และคณะ (2010) พบว่า การอัตราการเพิ่มขึ้นของความยาวรากยางพาราในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยพบในดินชั้นบนมากกว่าดินที่ระดับลึกมากกว่า 2 เมตร และอัตราการเจริญเติบโตพบระหว่างเดือนเมษายน-พฤษภาคม ทั้งนี้กระบวนการเปลี่ยนแปลงของรากอาจเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันขึ้นกับชนิดพืช และองค์ประกอบของสภาพแวดล้อมที่พืชเจริญเติบโตอีกด้วย (McCormack and Guo, 2014)

รายงานการศึกษาประสิทธิภาพการใช้น้ำของยางพาราที่ปลูกในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย และตอนกลางของประเทศไทย แม้ในช่วงฤดูแล้งความชื้นในดินลดลง การปรับตัวของต้น

ยางพาราพารายังคงสามารถรักษาระดับประสิทธิภาพการใช้น้ำได้โดยการลำเลียงน้ำจากรากที่อยู่ในดินระดับลึกจะทำหน้าที่ทดแทนรากในดินชั้นบนและการประเมินอัตราการคายน้ำของต้นยางพาราเมื่อผ่านช่วงฤดูแล้ง พบว่า ดินที่ระดับความลึก 1.7 เมตรเป็นแหล่งใช้น้ำที่สำคัญของต้นยางพาราพารา (Giambelluca *et al.*, 2016)

4. ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของรากและทรงพุ่ม

การเจริญเติบโตของรากและทรงพุ่มในช่วงฤดูแล้งทั้งสองระยะที่ศึกษาพบว่า การประเมินดัชนีพื้นที่ใบตั้งแต่การผลัดใบจนกระทั่งการพัฒนาพื้นที่ใบเต็มที่ พบระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ - เมษายน 2557 ใช้ระยะเวลาประมาณ 3 เดือน ขณะที่ปี 2558 เนื่องจากปริมาณฝนตกชุกในช่วงฤดูฝนทำให้เกิดการเข้าทำลายของเชื้อไฟทอปเทอร่าส่งผลให้ใบยางพาราถูกทำลายจากเชื้อและร่วงหล่นตั้งแต่ปลายเดือนตุลาคม 2557 จนกระทั่งเข้าสู่ช่วงการผลัดใบเดือนมกราคม 2558 การพัฒนาของดัชนีพื้นที่ใบตั้งแต่ระยะผลัดใบจนกระทั่งการพัฒนาพื้นที่ใบเต็มที่ พบระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ - เมษายน 2558 ใช้ระยะเวลาประมาณ 3 เดือน เช่นเดียวกับปี 2557 โดยการการแตกใบใหม่จนกระทั่งพื้นที่ทรงพุ่มแผ่ขยายเต็มพื้นที่เกิดก่อนที่การเจริญเติบโตของรากจะมีความยาวเพิ่มขึ้นประมาณ 1 เดือน (เมษายน 2557 และ เมษายน 2558) การศึกษาของของ Sopharat (2015) พบว่า ภายหลังจากทรงพุ่มของต้นยางพาราพัฒนาเต็มที่ น้ำหนักยางแห้งเพิ่มขึ้นภายในระยะเวลา 80 วัน ปัจจัยที่มีผลต่อพัฒนาการของทรงพุ่มและผลผลิตน้ำยางจากการศึกษาของ Silpi และคณะ (2007) รายงานว่า ก่อนที่ต้นยางพาราเข้าสู่ระยะผลัดใบ กระบวนการสะสมอาหารสำรองเกิดการเคลื่อนย้ายคาร์โบไฮเดรตจากใบ กิ่ง ก้านเคลื่อนย้ายไปสะสมส่วนของลำต้นและราก ซึ่งพบว่าระยะเดือนมกราคม-มีนาคม 2557 และมกราคม-มีนาคม 2558 น้ำหนักยางแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเทียบระยะเวลาในรอบปี แต่น้ำหนักยางแห้งระหว่างเดือน มกราคม-มีนาคม 2558 มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบช่วงเดียวกันในปี 2557 (45.37 และ 45.67 g/t) ซึ่งเนื่องมาจากกลางเดือนธันวาคม 2557 ถึงต้นเดือน มกราคม 2558 เกษตรกรต้องหยุดกรีดยางเนื่องจากฝนตก และใบยางเสียหายจากการเข้าทำลายของเชื้อไฟทอปเทอร่าซึ่งมีผลต่อกระบวนการสร้างอาหารด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสงทำให้ปริมาณอาหารสำรองที่ต้นยางพาราต้องใช้กักเก็บเพื่อสำรองไว้ลดลง นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์เนื้อเยื่อแห้งที่ลดลง ต้นยางพาราอาจดึงเอาคาร์โบไฮเดรตที่สำรองไว้เพื่อใช้ในการสร้างใบชุดใหม่และการแตกตาดอกมาใช้โดยแหล่งสะสมส่วนของรากจะถูกเคลื่อนย้ายนำมาใช้ก่อน ทั้งนี้ก่อนระยะแตกใบและตาดอกส่วนของคาร์โบไฮเดรตในรูปของ Total nonstructural carbohydrate (TNC) จะเก็บไว้บริเวณส่วนปลายของกิ่งและตาดอกสูงสุดในรอบปี (Silpi, 2005)

นอกจากนี้ระยะเวลาและการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลมีผลต่อระดับของการสะสมแป้งและน้ำตาลในเนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ในต้นยูคาลิปตัส (*Eucalyptus obliqua*) การสะสมเกิดขึ้นในช่วงปลายฤดูใบไม้ผลิ และช่วงเข้าฤดูฤดูร้อน โดยที่อัตราการสะสมแป้งและน้ำตาลลดลงในช่วงเข้าสู่ฤดูหนาว และปริมาณน้ำตาลสะสมสูงสุดพบในส่วนของเนื้อไม้ ต่ำสุดพบที่ส่วนของเปลือกไม้ ปริมาณน้ำตาลสะสมสูงสุดส่วนของรากปรากฏในช่วงแรกของฤดูร้อน (Kite, 1981 อ้างโดย Kozlowski, 1992)

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของน้ำในสภาพแวดล้อมต่อการเจริญเติบโตของพืชมีระดับการตอบสนองที่แตกต่างกัน และการประเมินความสัมพันธ์ทางสรีรวิทยาเป็นตัวแปรบ่งชี้ถึงสถานะน้ำในต้นพืชที่ในระยะต่าง ๆ ได้ อย่างไรก็ตามการผนวกเอาวิธีการศึกษารากพืชด้วยเทคนิคมินิไรโซทรอนเพื่อศึกษาการปรับตัวของพืช หรือผลของสภาพแวดล้อมที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของรากลอยพารานั้นนับว่าเป็นวิธีการศึกษาแบบใหม่ที่ได้ทดลองกับยางพาราในประเทศไทย แม้ว่าวิธีการนี้จะถูกคิดค้นและพัฒนามาหลายทศวรรษ แต่ศาสตร์ด้านรากพืชยังต้องมีการพัฒนาวิธีการ เทคนิค และอุปกรณ์ให้เหมาะสมต่อชนิด พันธุ์พืช และสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันเพื่อเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงของรากพืชที่เป็นระบบตลอดช่วงอายุของพืช อีกทั้งส่วนสำคัญในการประยุกต์ใช้เทคนิคมินิไรโซทรอนเพื่อการศึกษา คัดเลือกพืชที่มีมูลค่าสำคัญทางเศรษฐกิจ เช่น พืชอาหาร พืชพลังงาน ที่สามารถปรับตัวได้ดีในสภาพอากาศที่มีความแปรปรวนมากขึ้นในปัจจุบัน และเป็นการสร้างองค์ความรู้เพื่อสร้างระบบการจัดการสวน หรือการจัดการแปลงปลูกในเชิงอุตสาหกรรมเกษตรอย่างยั่งยืน

บทที่ 5

สรุป

การตอบสนองทางสรีรวิทยาของต้นยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่มีการให้น้ำทุก 8 วัน ส่งผลต่อการตอบสนองของค่าการชักนำปากใบและค่าศักย์ของน้ำในใบยางพาราลดลงต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การให้น้ำทุก 4 วัน และการให้น้ำปกติ การตอบสนองของค่าการชักนำปากใบพบค่าสูงสุดช่วงเวลา 08.00 น. ความยาวรากยางพาราที่ระดับความลึก 0-20 cm ของต้นยางพาราที่ให้น้ำทุก 4 และ 8 วัน มีค่าลดลงต่ำสุดและความสัมพันธ์ในการประเมินความยาวรากระหว่างเทคนิคมินิโรโซตรอนและการนับจุดตัดรากอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง

การตอบสนองทางสรีรวิทยาของต้นยางพาราที่ให้น้ำท่วมขังเปรียบเทียบระหว่างยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ค่าศักย์ของน้ำในใบยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในระยะให้น้ำขัง มีแนวโน้มสูงกว่ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 ค่าการชักนำปากใบของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในระยะให้น้ำขังมีการตอบสนองต่ำกว่ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 และการตอบสนองของค่าการชักนำปากใบในระยะปล่อยน้ำขังของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 มีแนวโน้มสูงกว่ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 การเปลี่ยนแปลงพลวัตของรากยางพาราทั้งสองพันธุ์ของต้นยางที่ให้น้ำปกติมีค่าสูงสุดตลอดการทดลองโดยไม่พบรากตาย ขณะที่ต้นยางที่ให้น้ำขังมีรากตายเพิ่มขึ้นภายหลังการให้น้ำขังผ่านไป 7 วัน พบที่ระดับความลึก 0-10 และ 20-50 cm ยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดินพบรากตายมากกว่ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่ระดับความลึก 20-50 cm น้ำหนักแห้งของยอดและราก ความสูงของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ลดลงในต้นยางที่ให้น้ำขังผิวดินและท่วมเหนือผิวดิน การปรับตัวของต้นยางพาราพบการสร้าง lenticel บริเวณโคนต้นระดับที่ผิวน้ำท่วมขัง และช่องอากาศ aerenchyma ในราก

พลวัตของรากยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในรอบปี การเปลี่ยนแปลงของความยาวรากในช่วงฤดูแล้ง ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์-เมษายน 2557 และ กุมภาพันธ์-เมษายน 2558 มีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม 2557-มกราคม 2558) พลวัตของรากมีการเปลี่ยนแปลงสูงที่สุดที่ระดับความลึก 10-20 และ 20-30 cm และพบสูงสุดในช่วงฤดูฝน เดือนตุลาคม 2558 อัตราการเจริญเติบโตของราก รายเดือนมีความยาวรากสูงสุด 0.009 และ 0.01 mm mm⁻² month⁻¹ พบที่ระดับ 10-20 และ 20-30 cm ในเดือนกันยายน 2557 และการตายของรากพบสูงสุด 0.02 และ 0.009 mm mm⁻² month⁻¹ ในเดือนสิงหาคม 2557 การเจริญเติบโตของรากยางพาราเพิ่มขึ้นหลังจากทรงพุ่มพัฒนาเต็มที่ประมาณ 30 วัน ปัจจัยของสภาพแวดล้อมที่สัมพันธ์กับเจริญเติบโตของรากในช่วงฤดูฝน และรอบปี คือปริมาณน้ำฝน ความชื้นดินมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับรากที่ระดับความลึก 30-60 เซนติเมตร

เอกสารอ้างอิง

- กฤษดา สังข์สิงห์. 2558. การแสดงออกทางสรีรวิทยาของต้นยางพาราอายุ 1 ปี เมื่อประสบกับสภาวะความเครียดน้ำ. วารสารยางพารา ฉบับอิเล็กทรอนิกส์ 21 : 28-35.
- จันทร์จิรา สมจันทร์ และ สายัณห์ สดุดี. 2551. ผลของการให้น้ำต่อการตอบสนองทางสรีรวิทยาและผลผลิตน้ำยางของยางพาราในช่วงรอบปี. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 39(3) : 35-39.
- สมยศ มิฉา และ สุรพล จิตธิธนากุล. 2557. การเจริญเติบโตและการปรับตัวของยางพารา (*Hevea brasiliensis*) อายุ 1 ปี พันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ในสภาวะน้ำท่วมขัง. วารสารแก่นเกษตร 42(3) : 362-367.
- Anderson, L. J., Comas, L. H., Lakso, A. N. and Eissenstat, D. M. 2003. Multiple risk factors in root survivorship: A 4-year study in Concord grape. *New Phytologist* 158 : 489-501.
- Ashraf, M. 2003. Relationships between leaf gas exchange characteristics and growth of differently adapted populations of Blue panicgrass (*Panicum antidotale* Retz.) under salinity or waterlogging. *Plant Science* 165 : 69-75.
- Ashraf, M. and Harris, P. J. C. 2013. Photosynthesis under stressful environments: an overview. *Photosynthetica* 51 : 163-190.
- Atkinson, C. J., Policarpo, M., Webster, A. D. and Kingswell, G. 2000. Drought tolerance of clonal *Malus* determined from measurements of stomatal conductance and leaf water potential. *Tree Physiology* 20(8) : 557-563.
- Atkinson, D. 1996. Why study roots. *Agroforestry* 7 : 22-24.
- Bates, T. R. and Lynch, J. P. 1996. Stimulation of root hair elongation in *Arabidopsis thaliana* by low phosphorus availability. *Plant Cell and Environment* 19: 529-538.
- Block, R. M. A., Rees, K. C. J. and Knight, J. D. 2006. A review of fine root dynamics in *Populus* plantations. *Agroforestry Systems* 67 : 73-84.
- Bloomfield, J., Vogt, K. and Wago, P. M. 1996. Tree root turnover and Senescence. *In* Roots The Hidden Half 2nd edition. (eds. Y. Waisel., A. Eshel. and U. Kafkafi.) pp. 363-381, New York: Marcel Dekker Inc.
- Böhm, W. 1979. Methods of studying root systems. Berlin. Germany : Springer.

- Bragg, P. L., Govi, G. and Cannell, R. Q. 1983. A comparison of methods, including angled and vertical minirhizotrons, for studying root growth and distribution in a spring oat crop. *Plant and Soil* 73 : 435-440.
- Brodribb, T. J. and Cochard, H. 2009. Hydraulic failure defines the recovery and point of death in water stressed conifers. *Plant Physiology* 149 : 575-584.
- Brown, D. A. and Upchurch, D. R. 1987. Minirhizotrons: a summary of methods and instruments in current use. *In* Minirhizotron observation tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics. (ed. H. M. Taylor) American Society of Agronomy, pp. 15-30. Madison, WI. USA : Springer-Verlag.
- Brunner, I., Herzog, C., Dawes, M. A., Arend, M. and Sperisen, C. 2015. How tree roots respond to drought. *Frontier of Plant Science* 6: 1-13.
- Burke, M. K. and Raynal, D. J. 1994. Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant and Soil* 162 : 135-146.
- Burton, A. J., Pregitzer, K. S. and Hendrick, R. L. 2000. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia* 125: 389-399.
- Cai, Z. Q., Chen, Y. J. Guo, Y. H. and Cao, K. F. 2005. Responses of two field grown coffee species to drought and re-hydration. *Photosynthetica* 43: 187-193.
- Canadell, J., Djema, A., López, B., Lloret, F., Sabaté, S., Siscart, D. and Gracia, C. A. 1999. Structure and dynamics of the root system. *In* Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. (eds. F. Rodà., J. Retana., C. A. Gracia. and J. Bellot.). pp. 48-59. Berlin, Heidelberg, Germany : Springer-Verlag.
- Carmo-Silva, A. E., Gore, M. A., Andrade-Sanchez, P., French, A. N., Hunsaker, D. J. and Salvucci, M. E. 2012. Decreased CO₂ availability and inactivation of Rubisco limit photosynthesis in cotton plants under heat and drought stress in the field. *Environmental and Experimental Botany* 83 : 1-11.
- Chairungsee, N., Gay, F., Thaler, P., Kasemsap, 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 : 1-11.
- Chapin, F. S., Matson, P. A. and Mooney, H. A. 2002. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer. 16.

- Charles-Edwards, D. A. 1982. Physiological Determinants of Crop Growth. London: Academic Press.
- Chaves, M. M. and Oliveira, M. M. 2004. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *Journal of Experimental Botany* 55: 2365-2384.
- Chaves, M. M., Flexas, J. and Pinheiro, C. 2009. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany* 103 : 551-560.
- Chen, J. W., Zhang, Q., Li, X. S. and Cao, K. F. 2009. Independence of stem and leaf hydraulic traits in six *Euphorbiaceae* tree species with contrasting leaf phenology. *Planta* 230 : 459-468.
- Cheng, Y., Han, Y., Wang, Q. and Wang Z. 2006. Seasonal dynamics of fine root biomass, root length density, specific root length, and soil resource availability in a *Larix gmelinii* plantation. *Frontiers of Biology in China* 3 : 310-317.
- Cochard, H. 2002. Xylem embolism and drought-induced stomatal closure in maize. *Planta* 215 : 466-471.
- Comas, L. H., Anderson, L. J., Dunst, R. M., Lakso, A. N. and Eissenstat, D. M. 2005. Canopy and environmental control of root dynamics in a long-term study of Concord grape. *New Phytologist* 167 : 829-840.
- Cote, B., Hendershot, W. H. and Fyles, J. W. 1998. The phenology of fine root growth in a maple dominated ecosystem: relationships with some soil properties. *Plant and Soil* 201 : 59-69.
- Crawford, M. M. M. 2003. Seasonal differences in plant responses to flooding and anoxia. *Canadian Journal of Botany* 81 : 1224-1246.
- da Silva, A. P., Kay, B. D. and Perfect, E. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of American Journal* 58 : 1775-1781.
- Davies, W. J. and Zhang, J. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 42 : 55-76.

- Day, F. P., Weber, E. P., Hinkle, C. R. and Drake, B.G. 1996. Effects of elevated atmospheric CO₂ on fine root length and distribution in an oak palmetto scrub ecosystem in central Florida. *Global Change Biology* 2 : 143–148.
- de Carvalho, P. A., Lira, J. M. S., de Oliveira, J. E. M., de Carvalho, J. N., Domiciano, D. and Cárdenas, H. B. D. 2015. Nitrate addition improves photosynthesis and flooding tolerance of rubber tree plants. *Australian Journal of Crop Science* 9(7) : 684-689.
- Dubach, M. and M. P. Russelle. 1995. Reducing the cost of estimating root turnover with horizontally installed minirhizotrons. *Agronomy Journal* 87 : 258-263.
- Eissenstat, D. M. and Van Rees, K. C. J. 1994. The growth and function of fine roots. *Ecological bulletin* 43 : 76-91.
- Eissenstat, D. M., McCormack, M. L. and Du, Q. 2013. Global change and root lifespan. *In Plant Roots: The Hidden Half* 4th Edition. (eds A. Eshel and T. Beeckman). pp. 1–11. New York. USA : CRC Press.
- Eissenstat, D. M., Wells, C. E., Yanai, R. D. and Whitbeck, J. L. 2000. Building roots in a changing environment: implications for root longevity. *New Phytologist* 147 : 33-42.
- Else, M. A., Tiekstra, A. E., Croker, S.J., Davies, W. J. and Jackson, M. B. 1996. Stomatal closure in flooded tomato plants involves abscisic acid and a chemically unidentified antitranspirant in xylem sap. *Plant Physiology* 112 : 239-247.
- 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.
- Fan, M., Bai, R., Zhao, X. and Zhang, J. 2007. Aerenchyma formed under phosphorus deficiency contributes to the reduced root hydraulic conductivity in maize roots. *Journal of Integrative Plant Biology* 49: 598-604.
- FAO. (2013). FAOSTAT Online Statistical Service. Available from <http://faostat.fao.org>. [Accessed March 2015.]
- Feng, A., K. Lingxue, G. Lidan, W. Zhenhui and L. Weifu. 2011. Involvement of rootstock and their hydraulic conductance in the drought resistance of graft rubber tree. *African Journal of Biotechnology* 10 (51) : 10393-10404.

- Flexas, J., Bota, J., Galmes, J., Medrano, H. and Ribas-Carbo, M. 2006. Keeping a positive carbon balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress. *Journal of Plant Physiology* 127 : 343–352.
- Forbes, P. J., Black, K. E. and Hooker, J. E. 1997. Temperature induced alteration to root longevity in *Lolium perenne*. *Plant and Soil* 190 : 87-90.
- Fox, J. and Castella, J. C. 2013. Expansion of rubber (*Hevea brasiliensis*) in mainland Southeast Asia: What are the prospects for smallholders? *Journal of Peasant Studies* 40 : 155-170.
- Froux, F., Huc, R., Ducrey, M. and Dreyer, E. 2002. Xylem hydraulic efficiency versus vulnerability in seedlings of four contrasting Mediterranean tree species (*Cedrus atlantica*, *Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis* and *Pinus nigra*). *Annual of Forest Science* 59 : 409-418.
- Fuchs, E. E. and Livingston, N. J. 1996. Hydraulic control of stomatal conductance in Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco) and alder (*Alnus rubra* Bong) seedlings. *Plant Cell and Environment* 19 : 1091-1098.
- Galmés, J., Flexas, J., Save, R. and Medrano, H. 2007. Water relations and stomatal characteristics of Mediterranean plants with different growth forms and leaf habits: responses to water stress and recovery. *Plant and Soil* 290 : 139-155.
- Giambelluca, T. W., Mudd, R. G., Liu, W., Ziegler, A. D., Kobayashi, N. and Kumagai, T. 2016. Evapotranspiration of rubber (*Hevea brasiliensis*) cultivated at two plantation sites in Southeast Asia. *Water Resources Research* 52 : 660-679.
- Gill, R. A. and Jackson, R. B. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist* 147 : 13-31.
- Gomez, J. B. and Hamzah, S. B. 1980. Variations in leaf morphology and anatomy between clones of *Hevea*. *Journal of the Research Institute of Malaysia* 28 : 157-172.
- 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.

- Green, J. J., Dawson, L. A., Proctor, J., Duff, E. I. and Elston, D. A. 2005. Fine root dynamics in a tropical rain forest is influenced by rainfall. *Plant and Soil* 276 : 23-32.
- Guardiola-Claramonte, M., Troch, P. A., Ziegler, A. D., Giambelluca, T. W., Vogler, J. B. and Nullet, M. A. 2008. Local hydrologic effects of introducing non-native vegetation in a tropical catchment. *Ecohydrology* 1 : 13-22.
- Guo, D., Xia, M., Wei, X., Chang, W., Liu, Y. and Wang, Z. 2008. Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species. *New Phytologist* 180 : 673-683.
- Gururaja Rao, G., Sanjeeva Rao, P., Rajagopal, R., Devakumar, A. S., Vijayakumar, K. R. and Sethuraj, M. R. 1990. Influence of soil, plant and meteorological factors on water relations and yield in *Hevea brasiliensis*. *International Journal of Biometereology* 34(3) : 175-180.
- Halter, R., Sands, R., Nambiar, E. K. S. and Ashton, D. H., 1996. Elongation of *Eucalyptus* roots during day and night. *Tree Physiology* 16 : 877-881.
- Head, G. C. 1966. Estimating seasonal change in the quantity of white unsuberized root on fruit trees. *Journal of Horticultural Science* 41 : 197-206.
- Hendrick, R. L. and Pregitzer, K. S. 1992. Spatial variation in root distribution and growth associated with minirhizotrons. *Plant and Soil* 143 : 283-288.
- Hendrick, R. L. and Pregitzer, K. S. 1993. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forests. *Nature* 361 : 59-61.
- Hubbard, R. M., Ryan, M. G., Stiller, V. and Sperry, J. S. 2001. Stomatal conductance and photosynthesis vary linearly with plant hydraulic conductance in ponderosa pine. *Plant Cell and Environment* 24 : 113-121.
- Hutchings, M. J., John, E. A. and Wijesinghe, D. K. 2003. Towards an understanding of the consequences of patchy distribution of soil-based resources for populations and communities of plants. *Ecology* 84 : 2322-2334.
- Imada, S., Yamanaka, N. and Tamai, S. 2008. Water table depth affects *Populus alba* fine root growth and whole plant biomass. *Functional Ecology* 22 : 1018-1026.

- Imada, S., Yamanaka, N. and Tamai, S. 2010. Fine-root growth, fine root mortality, and leaf morphological change of *Populus alba* response to fluctuating water tables. *Trees* 24 : 499-506.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. Climate Change 2013-The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Isarangkool Na Ayutthaya, S., Do, F., Pannangpetch, K., Junjittakarn, J., Maeght, J. L., Rocheteau, A. and Cochard, H. 2011. Water loss regulation in mature *Hevea brasiliensis*: effects of intermittent drought in the rainy season and hydraulic regulation. *Tree Physiology* 31(7) : 751-762.
- Islam, M. A. and Macdonald, S. E. 2004. Ecophysiological adaptations of black spruce (*Picea mariana*) and tamarack (*Larix laricina*) seedlings to flooding. *Trees* 18 : 35-42.
- Iversen, C. M. 2014. Using root form to improve our understanding of root function. *New Phytologist* 203 : 707-709.
- Iversen, C. M., Murphy, M. T., Allen, M. F., Childs, J., Eissenstat, D. M., Lilleskov, E. A., Sarjala, T. M., Sloan, V. L. and Sullivan, P. F. 2011. Advancing the use of minirhizotrons in wetlands. *Plant and Soil* 352 : 23-39.
- Jackson, M. B., Saker, L. R., Crisp, C. M., Else, M. A. and Janowiak, F. 2003. Ionic and pH signaling from roots to shoots of flooded tomato plants in relation to stomatal closure. *Plant and Soil* 253 : 103-113.
- Johnson, M. G., Tingey, D. T., Storm, M. J. and Phillips, D. L. 1995. Patterns of ponderosa pine fine root growth as affected by elevated CO₂: initial results. *Plant Physiology* 14: 81-88.
- Johnson, M. G., Tingey, D. T., Phillips, D. L., Storm, M. J. 2001. Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental and Experimental Botany* 45(3) : 263-289.
- Joslin, J. D., Wolfe, M. H. and Hanson, P. J. 2001. Factors controlling the timing of root elongation intensity in a mature upland oak stand. *Plant and Soil* 228 : 201-212.
- Kozlowski, T. T. 1992. Carbohydrate sources and sinks in woody plants. *The Botanical Review* 58 : 107-222.

- Kursar, T. A., Engelbrecht, B. M. J., Burke, A., Tyree, M. T., El Omari, B. and Giraldo, J. P. 2009. Tolerance to low leaf water status of tropical tree seedlings is related to drought performance and distribution. *Functional Ecology* 23 : 93-102.
- Lawlor, D. W. and Cornic, G. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant Cell and Environment* 25 : 275-294.
- Lenssen, J. P. M., Van de Steeg, H. M. and de Kroon, H. 2004. Does Disturbance favour weak competitors? Mechanisms of changing plant abundance after flooding. *Journal of Vegetation Science* 15 : 305-314.
- Li, H., Aide, T. M., Ma, Y., Liu, W. and Cao, M. 2007. Demand for rubber is causing the loss of high diversity rain forest in SW China. *Biodiversity and Conservation* 16(6) : 1731-1745.
- Li, H., Ma, Y., Aide, T. M. and Liu W. 2008. Past, present and future land use in Xishuangbanna, China and the implications for carbon dynamics. *Forest Ecology and Management* 255(1) : 16-24.
- Li, Z. and Fox, J. M. 2012. Mapping rubber tree growth in mainland Southeast Asia using time-series MODIS 250 m NDVI and statistical data. *Application Geography* 32 : 420-432.
- Luo, F. L., Nagel, K. L., Schar, H. Zeng, B. Schurr, U. and Matsubara, S. 2010. Recovery dynamics of growth, photosynthesis and carbohydrate accumulation after de-submergence: A comparison between two wetland plants showing escape and quiescence strategies. *Annals of Botany* 107 : 49-63.
- Lussenhop, J., Fogel, R. F. and Pregitzer, K. S. 1991. A new dawn for soil biology: video analysis of root-soil microbial-faunal interactions. *Agriculture Ecosystems and Environment* 34 : 235-249.
- Lyr, H. and Hoffman, G. 1967. Growth rates and growth periodicity of tree roots. *International Journal of Forestry Research* 2 : 181-236.
- M'Bou, A. T., Jourdan, C., Deleporte, P., Nouvellon, Y., Saint-André, L., Bouillet, J. P., Mialoundama, F., Mabiata, A. and Epron, D. 2008. Root elongation in tropical Eucalyptus plantations: effect of soil water content. *Annals of Forest Science* 65 : 609.

- Ma, Z., Bielenberg, D. G., Brown, K. M. and Lynch, J. P. 2001. Regulation of root hair density by phosphorus availability in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell and Environment* 24 : 459-467.
- Maeght, J. L., Clement, C. and Gonkhamdee, S. 2015. Empirical evidence of the contribution of fine deep roots to terrestrial carbon stocks. Regional Forum on Climate Change (RFCC) Low Carbon and Climate Resilient Societies: Bridging Science, Practice, and Policy. Asian Institute of Technology, Thailand. 1–3 July 2015.
- Maeght, J. L., Rewald, B. and Pierret, A. 2013. How to study deep roots – and why it matters. *Frontiers in Plant Science* 4 : 299.
- Majdi, H. 1996. Root sampling methods applications and limitations of minirhizotron technique. *Plant and Soil* 185 : 255-258.
- Malik, A. I., Colmer, T. D., Lambers, H. and Schortemeyer, M. 2001. Changes in physiological and morphological traits of roots and shoots of wheat in response to different depths of waterlogging. *Australian Journal of Plant Physiology* 28 : 1121-1131.
- Manzur, M.E., Grimoldi, A.A., Insausti, P. and Striker G.G. 2009. Escape from water or remain quiescent? *Lotus tenuis* changes its strategy depending on depth of submergence. *Annals of Botany* 104 : 1163–1169.
- Martinez-Vilalta, J., Prat, E., Oliveras, I. and Pinol J. 2002. Xylem hydraulic properties of roots and stems of nine Mediterranean woody species. *Oecologia* 133 : 19-29.
- Martins, M. B. G. and Zieri, R. 2003. Leaf anatomy of rubber-tree clones. *Scientia Agricola* 60 (4) : 709-713.
- Matamala, R., Gonzalez-Meler, M. A., Jastrow, J. D., Norby, R. J. and Schlesinger, W. H. 2003. Impacts of fine root turnover on forest NPP and soil C sequestration potential. *SCIENCE* 302 : 1385-1387.
- McCormack, M. L., Adams, T. S., Smithwick, E. A. and Eissenstat, D. M. 2012. Predicting fine root lifespan from plant functional traits in temperate trees. *New Phytologist* 195 : 823-831.
- McMichael, B. L. and Taylor, H. M. 1987. Applications and limitations of rhizotrons and minirhizotrons to quantify root development of field-grown potatoes. *Plant and Soil* 182 : 301-312.

- Mollard, F. P. O., Striker, G. G., Ploschuk, E. L. and Insausti, P. 2010. Subtle topographical differences along a floodplain promote different plant strategies among *Paspalum dilatatum* subspecies and populations. *Austral Ecology* 35 : 189-196.
- Monteny, B. A. and Barigah, S. 1985. Effect of leaf age and water deficit on the leaf photosynthetic rate of *Hevea brasiliensis*. Proceedings of the International Rubber Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 21–25 October 1985, pp. 1-11.
- Murray, S. J., Foster, P. N. and Prentice, I. C. 2012. Future global water resources with respect to climate change and water withdrawals as estimated by a dynamic global vegetation model. *Journal of Hydrology* 448 : 14-29.
- Nadelhoffer, K. J. 2000. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems. *New Phytologist* 147 : 131-139.
- Nadelhoffer, K. J. and Reich, J. W. 1992. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Ecology* 73 : 1139-1147.
- Nardini, A., Salleo, S. and Raimondo, F. 2003. Changes in leaf hydraulic conductance correlate with leaf vein embolism in *Cercis siliquastrum* L. *Trees* 17 : 529-534.
- Norby, R. J. and Jackson, R. B. 2000. Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective. *New Phytologist* 147 : 3-12.
- Nugawela, A., Long, S. P. and Aluthewage, R. K. 1995. Genotypic variation in nonsteady state photosynthetic carbon dioxide assimilation of *Hevea brasiliensis*. *Indian Journal of Natural Rubber Research* 10 : 266-275.
- Pakianathan, S.W., Haridas, G. and d'Auzac, J. 1989. Water relations and latex flow. *In* Physiology of Rubber Tree Latex. (eds. J. L. Jacob. and H. Chrestin). pp. 233-256. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press Inc.
- Parent, C., Capelli, N., Berger, A., Crevecoeur, M. and Dat, J. F. 2008. An overview of plant responses to soil waterlogging. *Plant Stress* 2(1) : 20-27.
- Pathiratna, L. S. S. 2006. Some aspect of the proliferation and distribution of fine roots in rubber (*Hevea*). *Bulletin of the Rubber Research Institute of Sri Lanka* 47-59.
- Pezeshki, S. R. and DeLaune, R. D. 1998. Responses of seedlings of selected woody species to soil oxidation–reduction conditions. *Environmental and Experimental Botany* 40 : 123-133.

- Pierret, A., Doussan, C., Pages, L., Do, F. C., Gonkhamdee, S., Maeght, J. L., Chintachao, W., and Nandris, D. 2007. Is impeded root growth related to the occurrence of rubber tree Trunk Phloem Necrosis (TPN)? Preliminary results from NE Thailand. Proceedings of the IRRDB Annual Meeting, Siem Reap, Cambodia, 12-16 November 2007, pp. 489-498.
- Perret, J. S., Al-Belulshi, M. E., and Deadman, M. 2007. Non-destructive visualization and quantification of roots using computed tomography. *Soil Biology and Biochemistry*. 39 : 391-399.
- Pierret, A., Maeght, J. L., Clément, C., Montoroi, J. P., Hartmann, C. and Gonkhamdee, S. 2016. Understanding deep roots and their functions in ecosystems: an advocacy for more unconventional research. *Annals of Botany* 118(4) : 621–635.
- Prachaya, J. 2015. Rubber economist quarterly report. First quarter 2015. The Rubber Economist Ltd., London and Bangkok
- Prasannakumari, P., Jessy, M. D. and Annamalainathan, K. 2010. Potassium and silicon help young rubber plants to tide over transient drought. Workshop on Climate Change and NR-2010, 28- 30 July 2010, IRRDB.
- Pregitzer, K. S. 2002. Fine roots of trees a new perspective. *New Phytologist* 154 : 267–270.
- Pregitzer, K. S., DeForest, J. L., Burton, A. J., Allen, M. F., Ruess R. W. and Hendrick, R. L. 2002. Fine root architecture of nine North American trees. *Ecological Monographs* 72 : 293–309.
- Pregitzer, K. S., Hendrick, R. L. and Fogel, R. 1993. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen. *New Phytologist* 125 : 575-580.
- Pregitzer, K. S., King, J. S. and Burton, A. J. 2000. Response of tree fine roots to temperature. *New Phytologist* 147 : 105-115.
- Pregitzer, K. S., Zak, D. R., Curtis, P. S., Kubiske, M. E., Teeri, J. A. and Vogel, C. S. 1995. Atmospheric CO₂, soil nitrogen and turnover of fine roots. *New Phytologist* 129 : 579-585.
- Priyadarshan, P. M. and Clément-Demange, A. 2004. Breeding *Hevea* rubber: formal and molecular genetics. *Advances in Genetics* 52 : 51-115.

- Priyadarshan, P. M., Hoa, T. T. T., Huasun, H. and Goncalves, P. S. 2005. Yielding potential of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) in sub-optimal environments. *In* Genetic and Production Innovations in Field Crop Technology: New Developments in Theory and Practice. (ed. M. S. Kang). pp. 221-247. New York : Haworth Press.
- Rao, P. S., Jayarathnam, K. and Sethuraj, M. R. 1993. An index to assess areas hydrothermally suitable for rubber cultivation. *Journal of Rubber Research* 6 : 80-91.
- Reich, P. B. and Bolstad, P. 2001. Productivity of evergreen and deciduous temperate forests. *In* Terrestrial global productivity. (eds. J. Roy., B. Saugier. and H. A. Mooney). pp 245-283. San Diego. USA : Academic Press.
- Resco, V., Ewers, B. E., Sun, W., Huxman, T. E., Weltzin, J. F. and Williams, D. G. 2009. Drought induced hydraulic limitations constrain leaf gas exchange recovery after precipitation pulses in the C3 woody legume, *Prosopis velutina*. *New Phytologist* 181 : 672-680.
- Ribas-Carbo, M., Taylor, N. L., Giles, L., Busquets, S., Finnegan, P. M., Day, D. A., Lambers, H., Medrano, H., Berry, J. A. and Flexas, J. 2005. Effects of water stress on respiration in soybean leaves. *Plant Physiology* 139 : 466-473.
- Richards, J. H., 1984. Root growth response to defoliation in two *Agropyron* bunchgrasses: field observations with an improved root periscope. *Oecologia* 64 : 21-25.
- Rivero, R. M., Shulaev, V. and Blumwald, E. 2009. Cytokinin dependent photorespiration and the protection of photosynthesis during water deficit. *Plant Physiology* 150 : 1530-1540.
- Robinson, D., Hodge, A., and Fitter, A. 2003. Constraints on the form and function of root systems. *In* Root Ecology. (eds. H. de Kroon and E. J. W. Visser) pp. 1-31. New York : Springer-Verlag.
- Rodrigo, V. H. L., Stirling, C. M., Silva, T. U. K. and Pathirana, P. D. 2005. The growth and yield of rubber at maturity is improved by intercropping with banana during the early stage of rubber cultivation. *Field Crops Research* 91 : 23-33.

- Ruess, R. W., Hendrick, R. L. and Bryant, J. P. 1998. Regulation of fine root dynamics by mammalian browsers in early successional Alaskan taiga forests. *Ecology* 79 : 2706-2720.
- Samsuddin, Z. 1980. Differences in stomatal density, dimension and conductances to water vapour diffusion in seven *Hevea* species. *Biologia Plantarum* 22 : 154-156.
- Samsuddin, Z. and Impens, I. 1979. Photosynthetic rates and diffusion resistances of seven *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. clones. *Biologia Plantarum* 21 : 154-156.
- Sanders, J. L. and Brown, D. A. 1978. A new fiber optic technique for measuring root growth of soybeans under field conditions. *Agronomy Journal* 70 : 1073-1076.
- Sangsing, K., Kasemsap, P., Thanisawanyangkura, S., Sangkhasila, K., Gohet, E., Thaler, P. and Cochard, H. 2004. Xylem embolism and stomatal regulation in two rubber clones (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). *Trees, Structure and Function* 18 : 109-114.
- Shibata, H., Hiura, T., Tanaka, Y., Takagi, K. and Koike, T. 2005. Carbon cycling and budget in a forested basin of southwestern Hokkaido northern Japan. *Ecological Research* 20 : 325-331.
- Silpi, U., Thaler, P., Kasemsap, P., Lacoite, A., Chantuma, A. and Adam, B. 2006. Effect of tapping activity on the dynamics of radial growth of *Hevea brasiliensis* trees. *Tree Physiology* 26 : 1579-1587.
- Sittichai, S. and Sdoodee, S. 2014. Difference in physiological responses to water stress between two rubbers (*Hevea brasiliensis*) clones of RRIM 600 and RRIT 251. *International Journal of Agricultural Technology* 10 : 743-754.
- Smucker, A. J. M., Ferguson, J. C., DeBruyn, W. P., Belford, R. K. and Ritchie, J. T. 1987. Image analysis of video recorded plant root systems. *In* Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics. (ed. H. M. Taylor). pp. 67-80. Madison, Wisconsin, USA : American Society of Agronomy Special Publication Number 50.
- Sperry, J. S. and Saliendra, N. Z. 1994. Intra and inter-plant variation in xylem cavitation in *Betula occidentalis*. *Plant Cell and Environment* 17 : 1233-1241.
- Striker, G. G., Insausti, P., Grimoldi, A. A., Ploschuk, E. L. and Vasellati, V. 2005. Physiological and anatomical basis of differential tolerance to soil flooding of *Lotus corniculatus* L. and *Lotus glaber* Mill. *Plant and Soil* 276 : 301-311.

- Striker, G. G., Manzur, M. E. and Grimoldi, A. A. 2011. Increasing defoliation frequency constrains regrowth of *Lotus tenuis* under flooding: The role of crown reserves. *Plant and Soil* 343 : 261-272.
- Taiz, L. and Zeiger, E. 1991. Assimilation of mineral nutrients. In: *Plant Physiology*, Chap. 12. (eds. L. Taiz. and E. Zeiger.). pp. 292-317., San Francisco, CA, USA : The Benjamin Cummings Publication.
- Taylor, H. M. 1987. Minirhizotron observation tubes: Methods and applications for measuring rhizosphere dynamics. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA: ASA Special Publication Number 50.
- Tennant, D. 1975. A Test of a modified line intersect method of estimating root length. *The Journal of Ecology* 63 : 995-1001.
- Teskey, R. O. and Hinckley, T. M. 1981. Influence of temperature and water potential on root growth of white oak. *Physiologia Plantarum* 52 : 363-369.
- Tezara, W., Mitchell, V. J., Driscoll, S. D. and Lawlor D. W. 1999. Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. *Nature* 401 : 914-917.
- Thomas, S. M., Whitehead, D., Reid, J. B., Cook, F. J., Adams, J. A. and Leckie, A. C. 1999. Growth, loss, and vertical distribution of *Pinus radiate* fine roots growing at ambient and elevated CO₂ concentration. *Global Change Biology* 5 : 107-121.
- Tierney, G. L., Fahey, T. J., Groffman, P. M., Hardy, J. P., Fitzhugh, R. D. and Driscoll, C. T. 2003. Environmental control of fine root dynamics in a northern hardwood forest. *Global Change Biology* 9 : 670-679.
- Toselli, M., Baldi, E., Marcolini, G., Malaguti, D., Quartieri, M., Sorrenti, G. and Marangoni, B. 2009. Response of potted grapevines to increasing soil copper concentration. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 15 : 85-92.
- Tournaire-Roux, C., Sutka, M., Javot, H., Gout, E., Gerbeau, P., Luu, D. T., Richard Bligny, R. and Maurel, C. 2003. Cytosolic pH regulates root water transport during anoxic stress through gating of aquaporins. *Nature* 425 : 393-397.
- Upchurch, D. R. and Ritchie, J. R. 1983. Root observations using a video recording system in minirhizotrons. *Agronomy Journal* 75 : 1009-1015.

- Vamerali, T., Bandiera, M. and Mosca, G. 2012. Minirhizotrons in modern root studies. *In* Measuring roots. (ed. S. Mancuso). pp. 341-361. Berlin, Heidelberg, Germany : Springer
- van Noordwijk, M., de Jager, A. and Floris, J. 1985. A new dimension to observations in vertical minirhizotrons, for studying root-growth and distribution in a spring oat crop. *Plant and Soil* 37 : 435-440.
- van Zyl, J. L. 1984. Response of Colombar grapevines to irrigation as regards quality aspects and growth. *South African Journal of Enology and Viticulture* 5 : 19-28..
- Verdoucq, L., Grondin, A. and Maurel, C. 2008. Structure-function analyses of plant aquaporin AtPIP2;1 gating by divalent cations and protons. *The Biochemical Journal* 415 : 409-416.
- Vogt, K. A., Vogt, D. J., Palmiotto, P. A., Boon, P., O'Hara, J. and Asbjornsen, H. 1996. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil* 187 : 159-219.
- Vos, J. and Groenwold, J. 1987. The relation between root growth along observation tubes and in bulk soil. *In* Minirhizotron Observation Tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics. (ed. H. M. Taylor). pp. 39-49. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy Special Publication No. 50.
- Waisel, Y., Eshel, A. and Kafkafi, U. 2002. *Plant Roots-The Hidden Half* 3rd Edition. New York: Marcel Dekker Inc.
- Wang, Y. M., Chen, T. C., Yeh, K. J. and Shue, M. F. 2001. Stabilization of an elevated heavy metal contaminated site. *Journal of Hazardous Materials* 88 (1) : 63-74.
- Warren-Thomas, E., Dolman, P. M. and Edwards, D. P. 2015. Increasing demand for natural rubber necessitates a robust sustainability initiative to mitigate impacts on tropical biodiversity. *Conservation Letters* 8(4) : 230-241.
- Watson, G. A. 1989. Climate and soil. *In* Rubber (eds. C.C. Webster and W. J. Baulkwill). pp. 124-164. Essex, UK : Longman Scientific and Technical.
- Weber, E. P. and Day, F. P. 1996. The effect of nitrogen fertilization on the phenology of roots in a barrier island sand dune community. *Plant and Soil* 182 : 139-148.

- Whalley, W. R., Leeds-Harrison, P. B., Clark, L. J. and Gowing, D. J. G. 2005. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. *Soil and Tillage Research* 84 : 18-27.
- Whitmore, A. P. and Whalley, W. R. 2009. Physical effects of soil drying on roots and crop growth. *Journal of Experimental Botany* 60 : 2845-2857.
- Xia, M., Guo, D. and Pregitzer, K. S. 2010. Ephemeral root modules in *Fraxinus mandshurica*. *New Phytologist* 188 : 1065-1074.
- Xu, Z., Zhou, G. and Shimizu, H. 2010. Plant responses to drought and rewatering. *Plant Signal and Behavior* 5 : 649-654.
- Yordanova, R., Christov, K. and Popova, L. 2004. Antioxidative enzymes in barley plants subjected to soil flooding. *Environmental and Experimental Botany* 51 : 93-101.
- Young, I. M., Montagu, K., Conroy, J. and Bengough, A. G. 1997. Mechanical impedance of root growth directly reduces leaf elongation rates of cereals. *New Phytologist* 135 : 613-619.
- Zhang, M., Fu, X.-U., Feng, W.-T. and Zou, X. 2007. Soil organic carbon in pure rubber and tea-rubber plantations in South-western China. *Tropical Ecology* 48(2) : 201-207.
- Ziegler, A. D., Bruun, T. B., Guardiola-Claramonte, M. Giambelluca, T. W., Lawrence, D. and Lam, N.T. 2009. Environmental consequences of the demise in Swidden agriculture in SE Asia: hydrology and geomorphology. *Human Ecology* 37 : 361-373.
- Zingaretti, S. M., Inácio, M. S., Pereira, L. M., Paz, T. A. and França, S. C. 2013. Water Stress and Agriculture. *In Responses of Organisms to Water Stress*. (ed. S. Akinci). pp. 151-179. Rijeka, Croatia : Intech.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายศักดิ์อนันต์ แซ่ลิ่ม

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5410630018

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เกษตรศาสตร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พืชศาสตร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2554

ทุนการศึกษา

- มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (National Research Universities) ประจำปี 2554
- ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Saelim, S., Sdoodee, S. and Chiarawipa. R. 2017. Monitoring seasonal fine root dynamics of *Hevea brasiliensis* clone RRIM 600 in Southern Thailand using minirhizotron technique. Songklanakar Journal of Science and Technology. (In press).

สายันท์ สุดดี และ ศักดิ์อนันต์ แซ่ลิ่ม. 2560. อุปกรณ์ถ่ายภาพรากพืชสุดยอดนวัตกรรมฝีมือนักวิจัยไทย. วารสารเคหเกษตร 139.

อนุสิทธิบัตร

สายันท์ สุดดี, สัตยา บุญรัตน์ชู, ระวี เจียรวิภา, เจษฎา โสภารัตน์ และ ศักดิ์อนันต์ แซ่ลิ่ม. เครื่องบันทึกภาพรากของพืชระบบอิเล็กทรอนิกส์. เลขอนุสิทธิบัตรที่ 12535. เลขที่คำขอ 1503001218. วันที่รับอนุสิทธิบัตร 29 กรกฎาคม 2558.

รางวัลรางวัล Gold medal, Leading Innovation Award และ Diploma ผลงาน “PSU-ARDA Minirhizotron®” งานประกวดนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ระดับนานาชาติ Kaohsiung International Invention and Design EXPO 2015 ประเทศไต้หวัน.