รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การใช้มินิไรโซตรอนในการประเมินการเจริญเติบโตของรากยางพารา เพื่อการจัดการสวนอย่างเหมาะสม ภายใต้ภูมิอากาศแปรปรวน

Using a Minirhizotron for the Assessment of Rubber Root Growth to Optimize Cultural Practice under Climate Variability

สายัณห์ สดุดี

ระวี เจียรวิภา

ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

โครงการนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2558 รหัสโครงการ NAT580577S

การใช้มินิไรโซตรอนในการประเมินการเจริญเติบโตของรากยางพาราเพื่อการจัดการสวนอย่างเหมาะสม ภายใต้ภูมิอากาศแปรปรวน

Using a Minirhizotron for the Assessment of Rubber Root Growth to Optimize Cultural Practice under Climate Variability

คณะนักวิจัย	สังกัด
รศ.ดร. สายัณห์ สดุดี	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร. ระวี เจียรวิภา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

โครงการนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ประจำปีงบประมาณ 2558 รหัสโครงการ NAT580577S

1. ชื่อโครงการเดี่ยว หรือโครงการย่อย

   (ภาษาไทย) การใช้มินิไรโซตรอนในการประเมินการเจริญเติบโตของรากยางพาราเพื่อการจัดการสวนอย่างเหมาะสม ภายใต้ภูมิอากาศแปรปรวน

   (ภาษาอังกฤษ) Using a Minirhizotron for the Assessment of Rubber Root Growth to Optimize Cultural Practice under Climate Variability

2. คณะนักวิจัย และคณะ/หน่วยงานต้นสังกัด

   2.1 หัวหน้าโครงการวิจัย

   รศ.ดร. สายัณห์ สดุดี
   ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ
   มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา 90112
   โทรศัพท์: (074) 286244 โทรสาร (074) 558803
   E-mail: sayan.s@psu.ac.th

   2.2 ผู้ร่วมวิจัย

   ผศ.ดร. ระวี เจียรวิภา
   ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ
   มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา 90112
   โทรศัพท์: (074) 286156 โทรสาร (074) 558803
   E-mail: rawee.c@psu.ac.th

กิตติกรรมประกาศ

โครงการการใช้มินิไรโซตรอนในการประเมินการเจริญเติบโตของรากยางพาราเพื่อการจัดการสวนอย่างเหมาะสม ภายใต้ภูมิอากาศแปรปรวน ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2558 ได้รับความร่วมมือในการสนับสนุนสถานที่การทำวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลจากภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และแปลงยางพาราของเกษตรกร อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โครงการดังกล่าวได้สำเร็จลงด้วยดีทุกประการ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งมา ณ โอกาสนี้

รศ.ดร. สายัณห์ สดุดี
หัวหน้าโครงการวิจัย

บทคัดย่อ

การพัฒนาเครื่องมือเพื่อศึกษารากพืชในดินโดยวิธีการบันทึกภาพถ่ายราก PSU-ARDA Minirhizotron เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรากพืช โดยการทดสอบในสภาวะจำลองพืชขาดน้ำและสภาพน้ำท่วมขัง และการศึกษาในสภาพแปลงยางพาราของเกษตรกร พบว่าการศึกษาต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 ภายใต้สภาวะที่ขาดน้ำในระดับที่ต่างกัน ณ เรือนกระจก คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สามารถติดตามการเจริญเติบโตของรากต้นกล้ายางพาราในดินที่ระดับความชื้นแตกต่างกันได้ แสดงให้เห็นถึงการปรับตัวของต้นกล้ายางพาราในการเจริญเติบโตแผ่ขยายในดินชั้นล่าง เพื่อหาน้ำในดินเพื่อใช้ในการรักษาระดับการเจริญเติบโตในสภาวะที่ขาดน้ำ ส่วนการทดลองสภาวะน้ำท่วมขัง ในต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 พบว่ารากยางพาราทั้งสองพันธุ์มีการปรับตัว เมื่อค่าศักย์ของน้ำในใบยางพารา และค่าการชักนำปากใบลดต่ำลง ซึ่งส่งผลให้มีการตายของรากบริเวณผิวดิน และที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร จากผิวดิน เปรียบเทียบกันการเจริญเติบโตของต้นกล้าที่ควบคุม และหลังจากระบายน้ำออก ภายในระยะเวลา 2 สัปดาห์ ต้นกล้ามีการเจริญเติบโตกลับสู่สภาวะปกติ ส่วนยางพาราพันธุ์ RRIM 600 มีการปรับตัวได้ดีกว่าพันธุ์ RRIT 251 การศึกษาการเจริญเติบโตของรากยางพาราในแปลงปลูกช่วงฤดูร้อน และฤดูฝน ทำให้ทราบพลวัตรของรากยางพาราที่เปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับการพัฒนาในรอบปีส่วนของต้นเหนือพื้นดินและผลผลิตยางพารา ผลปรากฏว่าการศึกษารากพืชด้วยเครื่องมือมินิไรโซตรอนมีประโยชน์ในการศึกษาพลวัตรของยางพาราเพื่อการจัดการสวนภายใต้สภาวะภูมิอากาศที่แปรปรวนได้

คำสำคัญ: ต้นกล้ายางพารา รากยางพารา มินิไรตรอน สภาวะเครียดน้ำ

Abstract

According to the development of PSU-ARDA Minirhizotron for the assessment of root growth, it was tested for the measurement of plants growth under water deficit, waterlogging and controlled condition, including under smallholder's rubber plantation for the water deficit experiment, planting material (1 year RRIM 600 clone) were grown in soil containers (30 x 120 x 30 cm.) at with 3 levels of watering, with 3 replications. It was found that plants could adapt root growth by decreasing in top soil layers and increasing in the lower soil layers to uptake water under water stress condition. Under waterlogging experiment, planting materials (RRIM 600 and RRIT 251) were used. Results showed that during the plants adapted with decreasing of leaf water potential and stomatal conductance leading to a decreased of root growth. After drainage, the plants could recover within 2 weeks RRIM 600 trended to show more adaptation to waterlogging than RRIT 251. Besides, the root study by minirhizotron was applied under field condition, it could monitored dynamic root growth under summer and rainy seasons. It showed could be synchronize of root growth, shoot growth and latex yield showing phenological development. This suggests that the minirhizotron is benefit for the investigation of rubber root growth to optimize plantation management under climate change

Keywords: Rubber seedlings, Fine root, Minirhizotron, Water stress

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
รายการตาราง	จ
รายการภาพ	ฉ
บทนำ	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
บทที่ 1 ตรวจเอกสาร	2
1. สภาวะขาดน้ำ	2
2. การตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชต่อสภาวะเครียดน้ำ	3
3. กระบวนการสังเคราะห์แสง	3
4. รากพืช	3
5. ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของรากพืช	4
6. พลวัตของรากพืช	5
7. ปัจจัยทางสภาพแวดล้อมต่อการมีชีวิตของราก	6
8. การศึกษารากพืชโดยวิธีมินิไรโซตรอน	8
9. ระบบรากของยางพารา	9
บทที่ 2 วิธีการวิจัย	11
บทที่ 3 ผลการทดลอง	13
บทที่ 4 วิจารณ์ผล	30
บทที่ 5 สรุปผล	31
เอกสารอ้างอิง	32
ภาคผนวก	37

รายการตาราง

เรื่อง **หน้า**

ตารางที่ 1 ค่าวิเคราะห์คุณสมบัติของดินที่ใช้ปลูกทดลอง 13

รายการภาพ

เรื่อง **หน้า**

ภาพที่ 1 ตัวอย่างการศึกษารากพืชโดยติดตั้งท่อมินิไรโซตรอนที่ทำมุมในแนวนอนแนวตั้งฉากและทำมุม 45 องศากับพื้นดิน.และส่วนประกอบของอุปกรณ์มินิไรโซตรอนที่ใช้บันทึกภาพรากพืช ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและบันทึกข้อมูลภาพ ส่วนของกล้องถ่ายถาพรากในดินและอุปกรณ์ควบคุมไฟส่องสว่าง 9

ภาพที่ 2 กล่องศึกษารากยางพารา (RHIZOBOX) ประกอบจากแผ่นอะคริลิคใสกว้าง 60 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร หนา 20 เซนติเมตร โดยภายในติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน และท่อวัดความชื้นในดิน 12

ภาพที่ 3 อุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ บันทึกตลอดการทดลองการศึกษาการเจริญเติบโตของรากต้นกล้ายางพาราที่งดการให้น้ำ 13

ภาพที่ 4 เปรียบเทียบปริมาณความหนาแน่นของรากยากพาราเฉลี่ยระหว่างรากมีชีวิต (ACTIVE ROOT) และรากตาย (MORTALITY ROOT) ที่ระดับความลึก 0-100 เซนติเมตร ภายหลังสิ้นสุดการทดลอง 14

ภาพที่ 5 การเจริญเติบโตของรากต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 เฉลี่ย แต่ละสัปดาห์ เปรียบเทียบที่ระดับความลึก ทุกๆ 20 เซนติเมตร 16

ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินตลอดการทดลอง ที่ระดับความลึก 0-100 เซนติเมตร ในแต่ละสิ่งทดลอง 17

ภาพที่ 7 ความยาวรากของต้นกล้ายางพาราที่ระดับความลึก 0-100 เซนติเมตร วิเคราะห์หาความยาวรากจากภาพถ่ายรากด้วยกล้องมินิไรโซตรอน 18

ภาพที่ 8 ค่าความเขียวของใบวัดโดยเครื่อง SPAD METER 19

ภาพที่ 9 อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์บันทึกค่าทุกๆ 1 ชั่วโมง 20

ภาพที่ 10 ค่าการชักนำปากใบเปรียบเทียบระหว่างสิ่งทดลอง ของต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600และ RRIT 251 21

ภาพที่ 11 ค่าศักย์ของน้ำในใบยางพาราเปรียบเทียบระหว่างสิ่งทดลองระหว่างพันธุ์ยางพารา RRIM 600 และ RRIT 251 22

ภาพที่ 12 ค่าความเขียวในใบยางพาราวัดด้วย SPAD METER เปรียบเทียบระหว่างสิ่งทดลองระหว่างต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 23

ภาพที่ 13 การเจริญเติบของรากต้นกล้ายางพาราแต่ละช่วงการทดลองในระยะก่อนให้น้ำท่วมขัง (PRE-WL) ระยะให้น้ำท่วมขัง (WL) และระยะฟื้นตัว (RECOVERY) เปรียบเทียบระหว่างสิ่งทดลองของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 24

รายการภาพ

เรื่อง **หน้า**

ภาพที่ 14 ความชื้นในดินที่ระดับความลึก 10 30 และ 70 เซนติเมตร ของสิ่งทดลองที่ 1 2 และ 3 ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 25

ภาพที่ 15 ความชื้นในดินที่ระดับความลึก 10 30 และ 70 เซนติเมตร ของสิ่งทดลองที่ 1 2 และ 3 ของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 26

ภาพที่ 16 การเตริญเติบโตของต้นกล้ายางพาราระหว่างสิ่งทดลอง เปรียบเทียบในระยะก่อนทดลอง ระหว่างทดลอง และภายหลังสิ้นสุดการทดลอง ของต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600 27

ภาพที่ 17 น้ำหนักแห้งของราก และ ลำต้น ของต้นกล้าเปรียบเทียบระหว่างสิ่งทดลองของต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 และRRIM 600 27

ภาพที่ 18 ข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือน ปริมาณผลผลิตน้ำยางสด ค่าดัชนีพื้นที่ใบยางพารา การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน และการเจริญเติบโตของรากในแปลงยางพารา อายุ 14 ปี ของเกษตรกร ต. ฉลุง อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา ปี 2557 28

บทนำ

ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) เป็นพืชอุตสาหกรรมที่สำคัญของภาคใต้ เพราะเกษตรกรส่วนใหญ่ของภูมิภาคเป็นชาวสวนยาง ผลผลิตยางพาราทำรายได้สูงให้แก่ประเทศไทย แต่ปัญหาในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาความแปรปรวนของภูมิอากาศในภาคใต้ ได้ส่งผลให้ผลผลิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เพาะทำให้วันกรีดลดลง มีการระบาดของโรคพืช ดังเช่นในปี 2553 ที่มีพายุดีเปรสชั่นพัดผ่านในภาคใต้ ทำให้ต้นยางล้ม เกิดน้ำท่วมขัง ทำให้สวนยางพาราได้รับความเสียหายถึง 200,000 ไร่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการมีฝนตกในช่วงฤดูร้อน ที่ทำให้เกิดการระบาดของโรคราแป้ง มีการทิ้งใบอ่อนหลายครั้ง ทำให้การพัฒนาใบของต้นยางพาราล่าช้ากว่าปกติ ดังนั้นการพัฒนาชีพลักษณ์ของยางพาราจึงมีแนวโน้มที่เปลี่ยนไปจากเดิม ทำให้ช่วงการเริ่มเปิดกรีดต้องล่าช้าออกไป หรือแม้แต่ในช่วงปลายปีนี้มีฝนตกชุกมากขึ้น และมีน้ำท่วมขัง จนกระทบต่อการเจริญของยางพาราด้วย ส่งผลให้วันกรีดในรอบปีลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ยิ่งไปกว่านั้นในปี 2557 เกิดวิกฤตราคายางตกต่ำมาก นับเป็นปัจจัยซ้ำเติม ทำให้รายได้ของเกษตรกรลดลงต่ำมากจนกระทบต่อการดำรงชีพ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องหาทางบรรเทาผลกระทบที่เกิดขึ้น ในประเด็นแรกคือ ต้องมีการศึกษาถึงแนวโน้มการพัฒนาของต้นตอยางพาราในรอบปีที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ภายใต้สภาพภูมิอากาศที่แปรปรวน จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงพลวัตรการเปลี่ยนแปลงของการเจริญของรากควบคู่ไปกับการพัฒนาของส่วนต้น เพื่อให้ทราบถึงระยะต่างๆ ที่เหมาะสมในการจัดการให้ปุ๋ย สอดคล้องกับการตอบสนองของพืช เพื่อช่วยให้พืชสามารถนำน้ำและธาตุอาหารหรือปุ๋ยไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นการส่งเสริมให้พืชให้ผลผลิตได้สูงขึ้น และยังเป็นการลดการสูญเสียปุ๋ยที่อาจจะถูกชะล้างไปด้วย ถ้าหากมีการให้ในช่วงที่ไม่เหมาะสมต่อการพัฒนาของพืช ดังนั้นการทดลองครั้งนี้จึงนำวิธีการใช้มินิไรโซตรอน เพื่อการประเมินการเจริญของรากพืชภายใต้สภาวะที่พืชเครียด ซึ่งเป็นผลกระทบต่อความแปรปรวนของภูมิอากาศ เพื่อให้ทราบถึงระยะที่พืชมีการฟื้นตัวและมีรากหาอาหารพร้อมที่จะให้ปุ๋ย เพื่อให้ต้นยางพาราสามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ผลผลิตที่เพิ่มขึ้นด้วย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพลวัตการเจริญเติบโตของรากยางพาราภายใต้ความแปรปรวนของภูมิอากาศ
2. ทราบถึงช่วงที่เหมาะสมในการจัดการสวนยางพาราได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 1
ตรวจเอกสาร

สภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาสำคัญที่มีผลกระทบต่อการดำรงชีวิตทั้งสิ่งมีชีวิต และพืชพรรณชนิดต่างๆ (Merry *et al*., 2012) โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งจากปริมาณน้ำที่มากเกินจนเกิดสภาวะน้ำท่วม และสภาวะที่ขาดแคลนน้ำหรือแห้งแล้งเป็นปัจจัยที่ ทำให้วัฏจักรของสิ่งมีชีวิตเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และมีแนวโน้มความรุนแรงมากขึ้น ผลกระทบจากสภาวะแห้งแล้ง ตลอดจนปัจจัยที่มีผลให้ความรุนแรงของความแห้งแล้ง อาจมีพื้นที่เพิ่มมากขึ้นเพิ่มขึ้นคือ การคายระเหยน้ำจากพื้นดินสู่บรรยากาศ มีการคาดการณ์ว่า อัตราการคายระเหยน้ำจาก 1 เปอร์เซ็นต์ในปัจจุบัน อาจเพิ่มขึ้นเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ในปี ค.ศ. 2100 (Xu *et al*., 2010) ซึ่งผลกระทบดังกล่าว ส่งผลให้มีการเจริญเติบโตของพืชลดลงหรือหยุดชะงัก หรืออาจสูญเสียผลผลิต (Blum, 2005; Neumann, 2008) ตลอดจนการปรับตัว และการตอบสนองของพืชโดยการปิดปากใบ และระดับพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงลดลง เอนไซม์ที่สังเคราะห์พลังงาน ATP เสียหาย ตลอดจนปฏิกิริยาของเอนไซม์ Rubisco ถูกยับยั้งไว้ ทั้งนี้ ในการศึกษาการตอบสนองของพืชภายใต้สภาวะเครียดน้ำตัวแปรข้างต้น สามารถใช้เพื่อประเมินศักยภาพหรือความสามารถของพืชในการอยู่รอดภายใต้สภาวะที่ขาดน้ำได้ (Chaves และ Oliveira, 2004; Pinheiro และ Chaves, 2011)

1. สภาวะขาดน้ำ

ความแห้งแล้งหรือสภาวะขาดน้ำคือ ปริมาณน้ำในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืช มีปริมาณน้อยจนถึงจุดที่พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ หรือปริมาณน้ำต่ำกว่าจุดเหี่ยวเฉาถาวร ซึ่งอาจเกิดจากผลกระทบจากฤดูกาล ปริมาณน้ำฝนตามธรรมชาติ และปัจจัยทางกายภาพในดิน ถูกจำกัดในด้านความเครียดน้ำในดินที่มีผลต่อพืช เช่น สภาวะที่มีน้ำในดินน้อย (hypoxia) หรือสภาวะที่ออกซิเจนในดินเหลือเพียงน้อย (anoxia) และความต้านทานเชิงกล (mechanical impedance) ในดิน ซึ่งมีผลต่อการชอนไชของรากในดินที่ระดับลึก การเจริญเติบโต และการพัฒนาระบบรากพืช ซึ่งจากปัจจัยข้างต้นพบว่า มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในดิน ในสภาพที่ดินแห้ง แรงดึงของน้ำในช่องว่างดิน ทำให้ค่าศักย์ของน้ำในดินอยู่ในระดับวิกฤต (ค่าติดลบ) ทำให้ค่าความต้าน ทานน้ำในดินเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (Whitmore และ Whalley, 2009) ซึ่งค่าต้านทานเชิงกลในดินอาจมีค่าถึง -100 kPa ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเครียดบริเวณอนุภาคของดิน มีผลจากแรงตึงผิวของน้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคดิน (Whalley *et al*., 2005) จากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคดินทำให้อนุภาคดิน เกิดการอัดแน่น (soil compaction) ซึ่งมีผลต่อการพัฒนาขนาดของใบพืช ตลอด จนส่งผลต่อการส่งสัญญาณระหว่างยอดกับรากพืชด้วย (Young *et al*., 1997)

นอกจากนี้เนื้อดินที่อัดตัวกันแน่น เมื่อเกิดภาวะน้ำท่วมขังอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดสภาวะดินขาดออกซิเจน ซึ่งอาจมีระดับของออกซิเจนในดินต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ และเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของรากพืชด้วย (daSilva *et al*., 1994) ผลกระทบจากสภาวะขาดน้ำในพืช ได้แก่ ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงของพืชลดลงอย่างรวดเร็ว กระบวนการสังเคราะห์แสงเสียสมดุล การปรับตัวของพืชโดยการปิดปากใบเพื่อลดการสูญเสียน้ำภายในลำต้นและรักษาระดับแรงดันน้ำ

ภายในต้นไว้ รวมถึงกระบวนการเมตาบอลึซึมที่สังเคราะห์พลังงานถูกยับยั้งหรือสูญเสียปฏิกิริยา (Flexas *et al*., 2006)

2. การตอบสนองทางสรีรวิทยาของพืชต่อสภาวะเครียดน้ำ

การเจริญเติบโตและการพัฒนาของพืชโดยทั่วไปได้รับอิทธิผลจากปัจจัยจากสิ่งไม่มีชีวิต เช่น อุณหภูมิอากาศสูง รังสีดวงอาทิตย์ น้ำท่วม และการขาดน้ำ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลกระทบทำให้เกิดการสูญเสียทั้งด้านคุณภาพ และปริมาณของผลผลิตตลอดจน ทำให้พืชเกิดสภาวะเครียดมีผลต่อการเจริญเติบโตผิดปกติ ในการปรับตัวของพืชเมื่อขาดน้ำ โดยการปรับลดรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสงกระบวนการเมทาบอลึซึมที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต แต่ระดับของการตอบสนองของพืชแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะจำเพาะของพืชแต่ละชนิด พันธุกรรม ซึ่งหากพืชขาดน้ำเพียงเล็กน้อยหรือปานกลาง หรือช่วงเวลาสั้นๆ พืชสามารถปรับกระบวนเมทาบอลึซึมกลับเข้าสู่ระดับปกติได้ แต่หากขาดน้ำเป็นระยะเวลายาวนานและเกิดขึ้นบ่อยกระบวนการปรับตัวของพืชไม่อาจเกิดขึ้นได้และพืชตายในที่สุด

3. กระบวนการสังเคราะห์แสง

พืชที่เจริญเติบโตอยู่ภายใต้สภาวะเครียดน้ำ การตอบสนองด้านการสังเคราะห์แสงของพืช มีอัตราลดลง อันเนื่องมาจากการลดอัตราการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในใบ ซึ่งส่งผลให้แหล่งพลังงาน ATP และน้ำตาล (RuBP) ที่ต้องใช้ลดลงเช่นเดียวกัน (Tezara *et al*., 1999) จากนั้นพืชเริ่มปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำ โดยในชั้น Mesophyll ของใบมีปริมาณขอเอนไซม์ Rubisco เพิ่มขึ้น เพื่อช่วยในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับนำไปใช้สร้างพลังงานในสภาวะที่พืชลดอัตราการสังเคราะห์การเคลื่อนย้ายอิเลคตรอนใน Thylakoids และการใช้น้ำตาล Trioses phosphates ลดลง ซึ่งมีผลต่อเนื่องไปยังประสิทธิภาพของปฏิกิริยาทางเคมีของกระบวนการสังเคราะห์แสงในระบบ Photosystem II และการสร้างพลังงาน เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตลดลง (Carmo-Silva *et al*., 2011; Riverco *et al*., 2009) นอกจากนี้การขาดน้ำของพืชมีผลต่อปริมาณของรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง คือคลอโรฟิลล์ เอ และ คลอโรฟิลล์ บี ลดต่ำลง ส่งผลต่อน้ำหนักแห้งของพืชลดลงเช่นเดียวกัน ซึ่งระดับของรงควัตถุจะเป็นตัวควบคุมอัตราการใช้พลังงานและการตรึงคาร์บอน เพื่อใช้การสร้างคลอโรฟิลล์ทั้งระบบ (Chaves *et al*., 2009) พืชลดการทำหน้าที่ของใบจนกระทั่งใบเสื่อมสภาพและทิ้งใบในที่สุดเพื่อเป็นการรักษาน้ำไว้ในลำต้น

4. รากพืช

รากมีบทบาทและหน้าที่สำคัญต่อพืชทุกชนิด การเกิดรากของพืชส่วนใหญ่เกิดจากเมล็ดที่มีการพัฒนายอดและราก ในพืชชั้นสูงจะเป็นรากหลักหรือรากแก้วที่มีขนาดใหญ่ และมีหน้าที่หลักในการยึดพยุงลำต้น จากนั้นมีการพัฒนาส่วนของรากแขนงและรากฝอยขนาดเล็กเพิ่มขึ้น รากที่เจริญเติบโตกระจายตัวอยู่ในดินรวมกันเป็นระบบราก ซึ่งมีการควบคุมโดยกลไกทางพันธุกรรมของพืชแต่ละชนิด และสภาพแวดล้อมที่พืชเจริญเติบโตเป็นตัวบังคับ โดยทั่วไปสามารถแบ่งลักษณะของระบบรากพืชออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ ระบบรากแก้ว และระบบรากแขนง โดยพืชที่มีระบบรากแก้ว

จะมีรากขนาดใหญ่ที่เป็นรากหลักและเกิดขึ้นเป็นลำดับแรก จากนั้นมีการแตกแขนงออกเป็นรากขนาดเล็ก (Dickison, 2000) ส่วนพืชที่มีระบบรากฝอยจะมีรากหาอาหารที่มีขนาดเล็กในปริมาณมาก แต่ปริมาณหรือความหนาแน่นของรากพืชมีปัจจัยที่กำหนดจากลักษณะของสภาพแวดล้อมและระดับความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาหาร ลักษณะทางโครงสร้างในดินที่พืชเจริญเติบโตอยู่มีส่วนสำคัญต่อลักษณะทางโครงสร้างของระบบรากพืช (Turner *et al*.,1985) โดยรากมีหน้าที่ในการยึดพยุงลำต้น ช่วยดูดน้ำและธาตุอาหารจากดิน นอกจากนี้ยังมีบทบาทสำคัญต่อสรีรวิทยาของพืช ซึ่งการเกิดราก การเจริญเติบโต และการตายของราก มีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของส่วนต่างๆ ของพืช ทั้งการเจริญเติบโตทางลำต้นและการให้ผลผลิต อีกทั้งมีความสัมพันธ์กับการเจริญของส่วนยอดโดยตรง Russell (1977) พบว่า การเจริญเติบโตของรากและยอดมีความสัมพันธ์กันในสภาพแวดล้อมคงที่ แต่เมื่อมีความแปรปรวนของสภาพแวดล้อม จะมีผลให้เกิดความแปรปรวนในการกระจายน้ำหนักแห้งในส่วนของรากและลำต้น นอกจากนี้สภาพแวดล้อมที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการเจริญของรากพืช ซึ่งจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการแผ่กระจายของราก คือ อากาศในดิน พันธุกรรมของพืช การลดลงของพื้นที่ใบ ความเป็นกรด - ด่างของดิน อุณหภูมิของดิน ความอุดมสมบูรณ์ของดิน น้ำหรือความชื้นของดิน หน้าที่อีกประการหนึ่งของรากพืช คือ การสร้างสารควบคุมการเจริญเติบโต เช่น ฮอร์โมนโดยเซลล์ภายในรากพืช ทั้งรากที่อยู่ในดิน หรือรากอากาศมีความสามารถในการสังเคราะห์คลอโรพลาสต์ Flores และคณะ (1992) พบการทดลองในต้นกล้วยไม้และต้นโกงกาง สามารถปรับหน้าที่ให้รากสังเคราะห์พลังงาน เมื่ออยู่ในสภาวะที่ได้รับแสงแดดและมีปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียงพอ

5. ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของรากพืช

การเจริญเติบโตของรากและหน้าที่ของรากพืชโดยทั่วไปมักได้รับผลกระทบจากปัจจัยความเครียดภายในและภายนอก และข้อมูลการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของระบบรากพืชยังมีจำกัด และพบว่าการเปลี่ยนแปลงมีกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน และความเครียดที่เกิดจากปัจจัยอื่นๆร่วมกัน เช่น อุณหภูมิ ความร้อน ความแห้งแล้ง ความหนาแน่นในดิน และการขาดออกซิเจนในดิน ทำให้การเจริญเติบโตของรากถูกจำกัด (Whitmore และ Whalley, 2009) นอกจากนี้ลักษณะทางเคมีในดินที่ประกอบด้วยปัจจัยหลายส่วนยังมีผลต่อการเจริญเติบโตของรากเช่นเดียวกัน โดยพบว่าในดินที่มีทองแดง (Cu) ปริมาณมากจะไปจำกัดการเจริญเติบโตของราก (Toselli *et al*., 2009) ในพื้นที่ดินเค็มมีผลต่อการลำเลียงน้ำของพืช หรือแม้แต่ในพื้นที่ดินกรดที่มีผลต่อการดูดซึมธาตุอาหารของพืช ในทางกลับกันหากสภาวะของดินมีปัจจัยเอื้อที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของรากพืช จะมีผลช่วยกระตุ้นให้รากพืชเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งในด้านความยาว ความหนาแน่น รวมถึงการมีอายุที่ยาวนานขึ้น การสร้างรากขึ้นมาใหม่ของพืชในรอบปีอาจมีการเปลี่ยนแปลงจากอิทธิพลของการจัดการทรงพุ่มพืชตามธรรมชาติที่ต้องการแสงแดด เพื่อการเจริญเติบโตตลอดจนได้รับผลจากปริมาณของคาร์โบไฮเดรตที่สะสมในพืช (Eissenstat, 2007) ตลอดจนอัตราการสังเคราะห์แสงลดลง (Wang *et al*., 2001)

6. พลวัตของรากพืช

ระบบรากของพืชที่ประกอบด้วยรากขนาดใหญ่และรากขนาดเล็ก เป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช การเปลี่ยนแปลงของรากพืชขนาดเล็ก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ≤2 มม.) พบว่ามีความสำคัญต่อการทำหน้าที่หาอาหาร การดูดซึมน้ำ โดยอัตราการเกิดรากใหม่หรือการตายไปของรากพืชขนาดเล็กมีการเปลี่ยนแปลงที่เป็น พลวัต กล่าวคือ มีการสร้างรากขึ้นใหม่ทดแทนรากเดิมที่เสื่อมสภาพ หรือถูกทำลายตามธรรมชาติ การเกิดหรือการเสื่อมสภาพของรากนั้นเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนหมุนเวียนธาตุอาหารในดิน (Nadelhoffer และ Reich, 1992) และการตรึงคาร์บอนในดินในรูปของอินทรียวัตถุ (Shibata *et al*., 2005) การแผ่ขยายของระบบรากพืชเป็นกระบวนการที่สำคัญต่อการมีชีวิตของพืชภายใต้สภาวะที่ทรัพยากรที่จำเป็นต่อการใช้เพื่อการเจริญเติบโตของพืชมีอยู่อย่างจำกัดในดิน เช่น ความชื้นในดิน ธาตุอาหารและอินทรียวัตถุในดิน ซึ่งอาจมีการแปรเปลี่ยนอยู่ตลอดเวลา การศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการเกิดและการตายของรากขนาดเล็กก่อนหน้านี้พบว่ามีความแปรปรวนขึ้นกับอิทธิพลจากปัจจัยภายในจากชนิดของพืช พันธุกรรมและปัจจัยภายนอกจากสภาพแวดล้อม การจำแนกลักษณะของพลวัตของรากพืชอาจใช้ช่วงของฤดูกาลในรอบปีเป็นหลักเพื่อให้สามารถเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน หรืออาจใช้ลักษณะจำเพาะของพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำฝน และอุณหภูมิที่แตกต่างกันในการจำแนกพลวัตของราก (Tierney *et al*., 2003) ทั้งนี้ในพื้นที่เขตหนาว ที่มีปริมาณน้ำในดินเพียงพอ การเกิดรากใหม่อาจมีอัตราสูงสุดในช่วงปลายฤดูร้อน หรืออาจมีการสร้างรากเพิ่มขึ้นในฤดูใบไม้ผลิหรือเริ่มเข้าฤดูร้อน หรืออาจมีอัตราลดลงเมื่อเข้าสู่ฤดูร้อน (Ruess *et al*., 1998) ในพืชเขตหนาวที่ขึ้นตามธรรมชาติพบว่า ในช่วงฤดูร้อนค่าศักย์ของน้ำในดินและอุณหภูมิในดินเป็นปัจจัยภายนอกที่มีผลควบคุมพลวัตของรากพืช (Teskey และ Hinckley, 1981) และพบว่าปัจจัยของฤดูกาลมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อพลวัตของรากพืชในรอบปี และโดยเฉพาะในรากพืชขนาดเล็กจะมีการตอบสนองต่อฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลงได้เร็วกว่ารากขนาดใหญ่ ระดับของการตอบสนองมีปัจจัยจากลักษณะทางพันธุกรรมของพืช อุณหภูมิตลอดจนลักษณะความสัมพันธ์ภายในพืช เช่น ลำต้นกับราก (Lyr และ Hoffman, 1967)

นอกจากนี้รูปแบบการเจริญเจริญเติบโตของรากขนาดพืชเล็ก โดยทั่วไปพบว่าการแผ่ขยายของรากจะลดลงในดินที่มีระดับความลึกมากขึ้น (Burke และ Raynal, 1994) ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณของธาตุอาหารในดินมีอยู่น้อยหรือสัดส่วนของดินเหนียวดินร่วน ความหนาแน่นดิน การเคลื่อนที่ของอากาศในดิน ตลอดจนปริมาณของอินทรียวัตถุในดินมีอยู่น้อย นอกจากนี้ปัจจัยของฤดูกาลยังเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ในดินทำให้เกิดความแปรปรวนในดินที่ระดับความลึกต่างกันด้วย (Canadell *et al*., 1996) ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างของระบบรากพืช รวมทั้งการทำหน้าที่ของรากพืชขนาดเล็กเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละฤดูกาล ค่าความหนาแน่นของความยาวราก (Root Length Density; RLD) และค่าความยาวรากจำเพาะ (Specific Root Length: SRL) สามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดระดับความเป็นประโยชน์ในดินซึ่งจะแสดงในลักษณะทางด้านการเจริญเติบโตของรากพืชขนาดเล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละฤดูกาล จากการรายงานของ Schenk และ Jackson (2002) กล่าวว่า มวลชีวภาพของรากขนาดเล็ก จะมีค่าลดลงเมื่อความลึกดินเพิ่มขึ้น และสัมพันธ์กับระดับความเป็นประโยชน์ในดินจะมีค่าลดลงในดินที่ลึกมากขึ้น แต่ในการศึกษากับพืชในเขตร้อนชื้น พบว่าระยะเวลาระหว่างการแตกใบใหม่กับการเกิดรากใหม่พบว่ารากจะเกิดก่อนที่พืชเริ่มแตกใบ (Eissenstat และ

vom Rees, 1994) โดยเป็นกระบวนที่พืชจะต้องเตรียมอาหารสำรองไว้ เพื่อใช้ในการสร้างใบใหม่ ซึ่งพลังงานที่ได้จากการสังเคราะห์แสงก่อนที่พืชจะผลัดใบจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์โบไฮเดรตและเก็บสะสมไว้ที่รากก่อนที่พืชจะทิ้งใบแก่ และภายหลังจากพืชแตกใบใหม่คาร์โบไฮเดรตที่เก็บสะสมในรากก่อนหน้านั้นจึงถูกดึงมาใช้ และใบที่เกิดใหม่จะเริ่มกระบวนการสังเคราะห์แสงอีกครั้ง เพื่อสร้างพลังงานต่อไป แต่เมื่อใบที่เกิดใหม่ส่วนหนึ่งจะใช้คาร์โบไฮเดรตที่เก็บสำรองไว้ในรากมาใช้ในระยะแรกที่ใบยังพัฒนาไม่เต็มที่ ทำให้รากที่เก็บสะสมคาร์โบไฮเดรตเสื่อมสภาพจนกระทั่งตายในที่สุด และการตายของรากจะเกิดอย่างช้าๆ (Aderson *et al*., 2003) จากนั้นเมื่อเข้าสู่ช่วงฤดูใบไม้ร่วง การเจริญเติบโตทางด้านลำต้นของต้น *Larix gmelinii* ลดลงในเดือนสิงหาคม และเริ่มทิ้งใบช่วงเดือนกันยายน ภายหลังจากใบร่วงแล้วนั้น พืชจะเก็บสะสมแป้ง และคาร์โบไฮเดรตไว้ที่ราก เพื่อเป็นแหล่งอาหารเมื่อเข้าสู่ช่วงฤดูใบไม้ผลิต่อไป และในช่วงที่ใบร่วง พบว่าการเจริญเติบโตของรากลดลง และค่อยๆ หมดสภาพ เนื่องจากความต้องการใช้อาหารของพืชลดลง

7. ปัจจัยทางสภาพแวดล้อมต่อการมีชีวิตของราก

7.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของดินเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและสิ่งมีชีวิตในดิน อุณหภูมิในแต่ละชั้นดินที่แตกต่างกันจะไปมีผลต่อการแลกเปลี่ยนอากาศในดินชั้นต่างๆ ที่อยู่ติดกัน ความแน่นของดินปริมาณน้ำและอากาศในดิน เนื้อดิน เป็นต้น ล้วนเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการนำพาความร้อนในดิน เช่นดินที่อัดตัวกันแน่น มีเนื้อดินละเอียด และความชื้นในดินสูงจะมีการนำพาความร้อนได้สูง อุณหภูมิของดินที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชสรุปได้ดังนี้

7.1.1 ช่วยในการงอกของเมล็ด เมล็ดพืชต้องการระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการงอกแตกต่างกัน อุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไปจะกระทบกระเทือนต่อการงอกของเมล็ดได้

7.1.2 การดำเนินกิจกรรมของรากพืช เช่นการหายใจ การดูดอาหาร การแบ่งเซลล์ เป็นต้น ต้องการระดับอุณหภูมิบริเวณรอบ ๆ รากที่เหมาะสม

7.1.3 การเกิดและการระบาดของโรคพืช ระดับอุณหภูมิและปัจจัยอื่นในดินมีผลต่อการเกิดและแพร่ระบาดของเชื้อโรคในดินที่เป็นอันตรายกับพืชได้

Head (1966) ทำการศึกษาความแปรปรวนของการมีชีวิตรากต้นแอปเปิ้ลในแต่ฤดูกาลมีลักษณะที่แตกต่างกัน พบว่า การมีชีวิตของรากต้นแอปเปิลมีอายุยาวนานมากที่สุดในช่วงฤดูหนาว แต่มีอายุลดลงเมื่อเข้าสู่ฤดูฤดูใบไม้ร่วง เช่นเดียวกับการศึกษาของ Forbes และคณะ (1997) ที่ศึกษาการชีวิตของรากต้น *Lolium perene* พบว่าการมีอายุของรากจะสั้นลงเมื่ออุณหภูมิในดินเพิ่มสูงขึ้น สำหรับพืชที่เจริญเติบโตในเขตหนาวและมีความชื้นในอากาศสูง เช่น ต้นสนหอมพบการสร้างรากมีอัตราลดลงในฤดูใบไม้ผลิ เนื่องจากอุณหภูมิอากาศต่ำและอัตราการสังเคราะห์น้อย แต่เมื่อเปลี่ยนไปสู่ฤดูร้อนการสร้างรากมีอัตราเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ในบางพื้นที่ ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้น หากปริมาณน้ำฝนมีน้อยพบอัตราการสร้างรากได้น้อย

7.2 ความชื้นในดิน

ผลของความชื้นในดินที่ประเมินในรูปของค่าศักย์ของน้ำในดินต่อการมีชีวิตของรากพืช พบว่าผลกระทบของค่าศักย์ของน้ำในดินขึ้นอยู่กับปัจจัยจากระยะเวลา และช่วงอายุของราก ซึ่งมีผลต่อการแผ่ขยายของรากพืช โดยเฉพาะในพื้นที่เหนือเส้นศูนย์สูตรการตอบสนองของรากพืชต่อระดับความชื้นในดิน พบว่าในฤดูหนาวการเจริญเติบโตของรากจะหยุดลง เนื่องจากอากาศที่หนาวเย็น (Tierney *et al*., 2003) และระดับน้ำใต้ดินที่เพิ่มขึ้น และพบว่าในฤดูร้อนการยืดยาวของรากจะหยุดชะงัก (Joslin *et al*., 2001) เช่นเดียวกับ Green *et al*. (2005) พบว่าพืชในเขตร้อนชื้น มีอัตราการเกิดรากและความยาวรากสูงสุดในช่วงฤดูฝนมากกว่าในช่วงแล้ง M'Bou และคณะ (2008) ได้ศึกษาการเพิ่มความยาวรากของต้นยูคาลิปตัสกับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในดินในประเทศคองโก พบว่าความยาวรากสัมพันธ์กับฤดูกาลคือ ในช่วงฤดูฝนมีการเพิ่มความยาวรากมากกว่าช่วงฤดูแล้ง และพบในดินที่ระดับความลึก 4 เมตร มากที่สุด จากการศึกษานี้พบว่า ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำในดินและอัตราการเพิ่มความยาวรากมีความสัมพันธ์กัน (r = 0.93) นอกจากนี้ระดับน้ำในดินที่ควบคุมการเพิ่มความยาวรากแล้ว ยังพบว่าระดับของแรงดันน้ำภายในเซลของทั้งในลำต้นยูคาลิปตัสเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ทำหน้าที่ควบคุมการเพิ่มความยาวรากอีกด้วย โดยเฉพาะแรงดันเต่งส่วนปลายของหมวกรากเป็นตัวควบคุมความยาวรากของต้นกล้ายูคาลิปตัส (Halter *et al*., 1996)

ปริมาณของความชื้นดินที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นตัวชักนำให้พืชเพิ่มความยาวรากมากขึ้น (Pregitizer *et al*., 1993) ในการศึกษาของ Imada และคณะ (2008) ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้า *Populus alba* อายุ 1 ปี โดยมีการให้น้ำขังที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตรเป็นระยะเวลา 30 วัน เปรียบเทียบกับทรีตเมนต์ที่มีการให้น้ำคงที่อย่างต่อเนื่อง พบว่าต้น *P. alba* มีการสร้างรากเพิ่มขึ้นใหม่ในบริเวณที่มีอากาศในดินที่จุดความจุความชื้นสนาม Imada และคณะ (2010) พบว่ารากของต้น *P. alba* ใน ทรีตเมนต์ที่มีการควบคุมระดับน้ำในดินมีมวลชีวภาพของรากที่ระดับความลึก 0-10 และ 10-20 เซนติเมตรจากผิวดิน มีค่ามากกว่าทรีตเมนต์ที่มีระดับน้ำในดินคงที่ แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิต

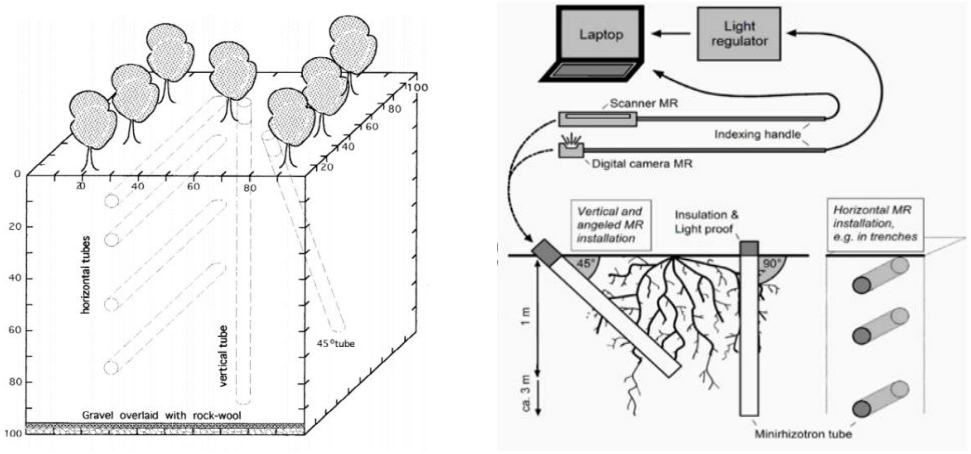
7.3 ธาตุอาหารในดิน

พืชจำเป็นต้องมีการใช้ธาตุอาหาร ซึ่งดูดมาจากดินโดยรากและลำเลียงผ่านไปกับน้ำ เพื่อนำไปสร้างอาหารในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ดังนั้นธาตุอาหารมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของพืช จากการศึกษาถึงผลของปริมาณธาตุอาหารในดินต่อการมีชีวิตของรากพืชโดยการรายงานของ Pregitzer และคณะ (1993) ได้ให้ปุ๋ยไนโตรเจนแก่ต้น *Prunus* มากขึ้น พบว่ามีอัตราการสร้างรากใหม่และการเสื่อมสภาพของรากเก่าอย่างรวดเร็ว การมีชีวิตของรากที่ได้รับปุ๋ยไนโตรเจนพบว่ามีอายุสั้นเมื่อเปรียบกับรากที่เจริญเติบโตในสภาพทั่วไป และการศึกษาของ Serrasolses (1994) ในพื้นที่ป่าเขตเมดิเตอเรเนียนยังพบว่าปริมาณของไนโตรเจนในดินที่ระดับความลึก 5-20 เซนติเมตร จากผิวดินมีปริมาณมากที่สุด ถึง 71% และพบมีปริมาณลดลงในดินที่ระดับความลึกมากขึ้น และยังพบอีกว่ากระบวนการเปลี่ยนรูปของธาตุอาหารในรูปอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ในดินโดยแบคทีเรียมีอัตราเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในดินเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูร้อน กระบวนที่เกิดโดยแบคทีเรียหรือสิ่งมีชีวิตในดินเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้การหมุนเวียนของธาตุอาหารในดินที่ระดับความลึกต่างๆเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

รายงานการศึกษาของ Pregitzer และคณะ (2000) พบการทดลองว่าหากก๊าซคาร์บอนได-ออกไซด์ในอากาศและปริมาณของไนโตรเจนในดินมีปฏิสัมพันธ์โดยตรงต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาการเจริญเติบโต และการหมุนเวียนคาร์บอนในดินของรากขนาดเล็กของต้น *Populus tremuloides* โดยหากระดับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเพิ่มสูงขึ้นและปริมาณของไนโตรเจนในดินมีปริมาณมากเป็นส่วนช่วยให้การเจริญเติบโตของรากและการสร้างรากใหม่มีอัตราเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว พื้นที่รากที่เพิ่มมากขึ้นทำให้การดูดซึมน้ำและธาตุอาหารของต้น *Populus tremuloides* เพิ่มสูงขึ้นด้วยและมีอัตราการเจริญเติบทางด้านลำต้นเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ การศึกษาของ Prasannakumari และคณะ (2010) การให้ธาตุโพแทสเซียมมีส่วนช่วยให้ต้นกล้ายางพารามีความทนทานต่อสภาวะแห้งแล้งได้ และโพแทสเซียมยังช่วยรักษาระดับของค่าศักย์ของน้ำในใบยางและปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ เมื่อเปรียบเทียบกับทรีตเมนต์ควบคุม และธาตุอาหารในดินยังมีผลต่อลักษณะทางสถาปัตยกรรมของรากกล่าวคือ การปลูกทดสอบต้น *Arabidopsis* ในดินที่ขาดธาตุฟอสฟอรัส การเปลี่ยนแปลงของรากพืชที่เห็นได้ชัดเจนคือ พืชมีการสร้างขนรากบริเวณส่วนปลายรากโดยเพิ่มความหนา แน่น และความยาวของขนราก (Ma *et al*., 2001; Bates และ Lynch, 1996) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับต้นที่ปลูกในดินที่มีฟอสฟอรัสในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช

8. การศึกษารากพืชโดยวิธีมินิไรโซตรอน

Brown และ Upchurch (1987) ได้นิยามวิธีการศึกษารากพืชโดยวิธีการมินิไรโซตรอนเอาไว้ว่าเป็นเทคนิคที่ใช้หลักการมองเห็นและติดตามการเปลี่ยนแปลงของรากพืชได้อย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน โดยใช้การบันทึกภาพทั้งภาพเคลื่อนไหวและภาพนิ่งจากกล้องวิดีโอหรือกล้องถ่ายรูป (Richards, 1984) ผ่านท่อที่ทำจากวัสดุโปร่งใสสามารถมองทะลุผ่านได้ เช่น อะคริลิค Plexiglas แก้ว เป็นต้น ซึ่งท่อที่ติดตั้งในดินอาจมีรูปร่างเป็นท่อสี่เหลี่ยม ทรงกลม หรือเป็นลูกบาศก์ (van Nordwijk *et al*., 1985) มีผลต่อการมองเห็นรูปร่างหรือคุณภาพของภาพที่ได้ การติดตั้งท่อมินิไรโซตรอนมีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงนั้นคือ มุมที่ติดตั้งกับพื้นดิน ซึ่งอาจฝังท่อในระนาบเดียวกันกับผิวดิน (Dubach และ Russelle, 1995) แนวตั้งทำมุม 90 องศากับพื้นดิน (Bragg *et al*., 1983) หรือติดตั้งทำมุม 30 (Upchurch และ Ritchie, 1983), 45 องศา (Sanders และ Brown, 1978) หรือ 60 องศา กับพื้นดิน (Johnson *et al*., 1995) และในบางการศึกษาพบว่าการฝังท่อทำมุม 90 องศากับพื้นดินมีความเหมาะสมมากกว่าการฝังท่อในแนวระนาบเมื่อใช้ประเมินการแผ่กระจายของราก ทั้งนี้การศึกษารากพืชในสภาพแปลงทดลอง การฝังท่อแบบทำมุมกับพื้นดินยังนิยมใช้แพร่หลายกว่าการฝังท่อแบบแนวระนาบเนื่องจากมีความสะดวกในการปฏิบัติงาน ซึ่งการฝังท่อทำมุม 35 และ 45 องศา พบว่านักวิจัยเลือกใช้มากที่สุด มีความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ทดลองเกือบทุกสภาพ เช่น ทะเลทราย พื้นที่ลุ่มน้ำท่วมขัง พื้นที่ป่าตามธรรมชาติหรือแม้แต่ในแปลงปลูกพืชทั่วไป (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ตัวอย่างการศึกษารากพืชโดยติดตั้งท่อมินิไรโซตรอนที่ทำมุมในแนวนอนแนวตั้งฉากและทำมุม 45 องศากับพื้นดิน.และส่วนประกอบของอุปกรณ์มินิไรโซตรอนที่ใช้บันทึกภาพรากพืช ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลและบันทึกข้อมูลภาพ ส่วนของกล้องถ่ายถารากในดินและอุปกรณ์ควบคุมไฟส่องสว่าง

ที่มา: Ephrath และคณะ (1999)

นอกจากนี้วิธีการศึกษารากพืชด้วยโดยเทคนิคมินิไรโซตรอนยังสามารถติดตามและคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงของรากพืชได้อย่างต่อเนื่อง ได้ข้อมูลทั้งในด้านเชิงปริมาณ เช่น ความยาวราก ความหนาแน่นราก พลวัตราก การแผ่กระจายและความลึกของราก เป็นต้น และยังสามารถใช้จำแนกลักษณะโครงสร้างระบบรากของพืชชนิดต่างๆได้ (McMichael และ Taylor, 1987)

9. ระบบรากของยางพารา

ยางพาราเป็นพืชยืนต้นที่มีระบบรากแก้ว รากแขนง รากฝอยประกอบรวมกัน ลักษณะหรือรูปแบบการเจริญเติบโตของระบบต้นยางพารา พบว่ามีความแตกต่างกันขึ้นกับภูมิประเทศที่ปลูก ลักษณะของดิน การเลือกใช้วัสดุปลูกในการขยายพันธุ์ แต่ข้อมูลการศึกษาเกี่ยวกับระบบรากยางพาราทั้งรูปแบบการการเจริญเติบโตของราก หรือเปลี่ยนแปลงในรอบปี ในพื้นที่ปลูกแตกต่างกันมีการศึกษาเพียงเล็กน้อย และข้อมูลพลวัตของรากพาราในรอบปียังไม่ชัดเจน ในการศึกษาของ Pathiratna (2006) เกี่ยวกับการเจริญเติบโตของรากยางพาราในประเทศศรีลังกา รายงานไว้ว่า การเพิ่มจำนวนของรากยางพารามีความสัมพันธ์กับอายุของต้นยาง คือ เมื่อต้นยางมีอายุ 2-3 ปี การแผ่ขยายของรากหาอาหารขนาดเล็กพบมากระยะห่างจากโค่นต้นประมาณ 2 เมตร และในดินที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร ในช่วงอายุ 3-4 ปี จะพบว่าเป็นช่วงที่มีความหนาแน่นของรากมากที่สุดโดยพบในระยะปลูกระหว่างต้น (207.8-312.3 เซนติเมตร/ตารางเซนติเมตร) แต่เมื่อต้นยางมีอายุเพิ่มขึ้นในปีที่ 7 กลับพบว่าความหนาแน่นของรากลดลง และในปีที่ 18 พบความหนาแน่นของรากมีปริมาณค่อนข้างคงที่ (217.5 เซนติเมตร/ตารางเซนติเมตร) และภายหลังจากที่ยางผลิใบใหม่พบว่าความหนาแน่นของรากยางพารามีจำนวนมากในชั้นผิวดินที่ระดับความลึก 20 เซนติเมตร โดยมีปัจจัยที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของรากพาราคือ ปริมาณความชื้นในแปลงปลูกยางพาราที่ค่อนข้างสูง การย่อย

สลายผุผังของใบยางและอินทรียวัตถุ ทำให้มีปริมาณของธาตุอาหารสะสมในดินเพิ่มขึ้นเป็นตัวกระตุ้นให้รากยางพาราเพิ่มปริมาณและความยาวมากขึ้น ความหนาแน่นของทรงพุ่มใบยางที่แตกใหม่ช่วยชะลอการคายระเหยน้ำจากดินไปสู่บรรยากาศ และช่วยให้เกิดสภาวะอากาศเฉพาะในพื้นที่บริเวณโค่นต้นยาง (Micro climate) ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมที่เหมาะแก่การเจริญเติบโตของรากและต้นยางพารา นอกจากนี้การปลูกพืชคลุมยาง และพืชร่วมยาง เช่น เพอราเรีย หรือ Cinnamon มีส่วนช่วยทำให้ระดับของธาตุอาหารและอินทรียวัตถุที่ได้จากใบและลำต้นที่ย่อยสลายเพิ่มขึ้น จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของรากยางพาราบริเวณชั้นผิวดิน อีกทั้งการใส่ปุ๋ยคอกยังช่วยกระตุ้นการสร้างรากของต้นยางพาราเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย จากรายงานการศึกษาของ Gonkhamdee และคณะ (2009) ใช้เทคนิค root window ติดตั้งในท่อซีเมนต์ลึก 4.5 เมตร จากพื้นดินศึกษาพลวัตรของระบบรากยางพาราในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยระยะเวลา 17 เดือน ที่ระดับความลึก 0-4.5 เมตรจากพื้นดิน พบว่าการเจริญเติบโตของรากยางพาราที่ระดับความลึก 0-150 เซนติเมตร มีความสัมพันธ์ทางบวกกับปริมาณน้ำฝนมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการเจริญเติบโตของรากที่ระดับความลึก 150-450 เซนติเมตร ค่าความหนาแน่นของความยาวราก (RLD) พบบริเวณผิวดินที่ระดับ 0-50 เซนติเมตร และมีค่าลดลงที่ระดับความลึกเพิ่มขึ้น การเจริญเติบโตของรากยางพาราที่ระดับความลึกมากกว่า 150 เซนติเมตรพบว่ารากที่ปรากฏใช้ระยะเวลานานกว่ารากที่ระดับความลึก 0-50 เซนติเมตร ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากปริมาณของน้ำฝนมีผลต่อการเจริญเติบโตของรากยางพาราบริเวณผิวดินมากที่สุด ซึ่งเป็นรูปแบบการเจริญเติบของพืชในพื้นที่เขตร้อนชื้นทั่วไป (Green *et al*., 2005)

บทที่ 2
วิธีการวิจัย

1. วิธีการทดลอง

กิจกรรมที่ 1 ศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาและพลวัตของรากของต้นกล้ายางพารา ภายใต้สภาวะขาดน้ำและการตอบสนองภายหลังการให้น้ำกลับคืน

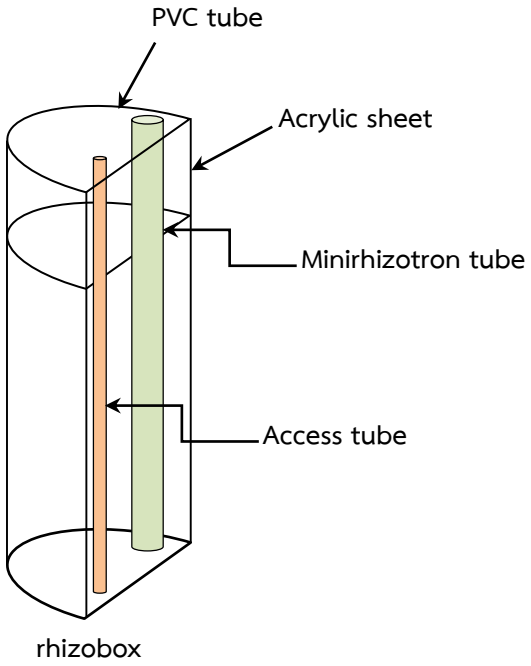
วางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely randomized design) โดยใช้สิ่งทดลองคือ ต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 อายุ 1 ปี จำนวน 9 ต้น ปลูกในกล่องศึกษาราก (Rhizobox) ขนาด กว้าง 60 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร หนา 20 เซนติเมตร ที่ประกอบจากท่อพีวีซีและแผ่น อะคริลิคใส โดยแบ่งออกเป็น 3 สิ่งทดลองๆละ 3 ซ้ำ

สิ่งทดลองที่ 1 ต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ให้น้ำทุกวัน (ควบคุม)
สิ่งทดลองที่ 2 ต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่งดให้น้ำเป็นเวลา 4 วัน
สิ่งทดลองที่ 3 ต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่งดให้น้ำเป็นเวลา 8 วัน

การให้น้ำในสิ่งทดลองที่ 1 ให้จนถึงระดับความจุความชื้นสนาม และการให้น้ำกลับคืน (re-watering) แก่ต้นกล้ายางพาราในสิ่งทดลองที่ 2 และ 3 เมื่อค่าศักย์ของน้ำในใบลดลงจนค่าอยู่ที่ -2.20 MPa (Sangsing *et al*., 2004) โดยให้น้ำจนกระทั่งความชื้นในดินอยู่ที่จุดความจุความชื้นสนาม

บันทึกข้อมูลการตอบสนองของต้นกล้ายางพาราทุกวันตลอดการทดลองจนกระทั่งหลังจากให้น้ำกลับคืน 5 วัน และระดับความชื้นในดินโดยติดตั้งท่อมินิไรโซตรอนและท่อ soil profile probe สำหรับวัดความชื้นในดิน ขนานกับต้นยางที่ปลูกในกล่องทดลอง (ภาพที่ 2) การเปลี่ยนแปลงของราก ต้นกล้ายางพาราแต่ละสิ่งทดลองบันทึกข้อมูลทุกๆ 2 วัน จนสิ้นสุดการทดลอง

ปริมาณน้ำที่ให้แก่ต้นยางพารา คำนวณจากปริมาณความชื้นในดินที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ที่ระดับความจุความชื้นสนาม (Field capacity: FC) และระดับความชื้นต่ำสุดในดินที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ หรือจุดเหี่ยวเฉาถาวร (Permanent wilting point: PWP)



ภาพที่ 2 กล่องศึกษารากยางพารา (Rhizobox) ประกอบจากแผ่นอะคริลิคใสกว้าง 60 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร หนา 20 เซนติเมตร โดยภายในติดตั้งท่อมินิไรโซตรอน และท่อวัดความชื้นในดิน

กิจกรรมที่ 2. ศึกษาการตอบสนองทางสรีรวิทยาและพลวัตของรากของต้นกล้ายางพาราภายใต้สภาวะน้ำขังและการตอบสนองภายหลังการงดน้ำขัง

วางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely randomized design) โดยใช้สิ่งทดลอง คือ ต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 และพันธุ์ RRIT 251 อายุ 5-8 เดือน หรือมีจำนวนใบเรียงกัน 3 ฉัตร จำนวนสิ่งทดลองละ 9 ต้น รวมทั้งหมด 18 ต้น โดยปลูกอนุบาลต้นกล้ายางพาราในถุงพลาสติกเป็นระยะเวลา 1 เดือน จากนั้นจึงย้ายปลูกในถังพลาสติกปริมาตร 200 ลิตร ที่ติดตั้งวาล์วควบคุมน้ำเพื่อขังน้ำขณะทำการทดลอง โดย แบ่งออกเป็น 3 สิ่งทดลองๆละ 3 ซ้ำ (ต้น)

สิ่งทดลองที่ 1 ต้นกล้ายางพาราปลูกในสภาวะปกติมีการให้น้ำทุกวัน (ควบคุม)
สิ่งทดลองที่ 2 ต้นกล้ายางพาราที่ปลูกโดยให้น้ำท่วมขังระดับผิวดิน
สิ่งทดลองที่ 3 ต้นกล้ายางพาราที่ปลูกโดยให้น้ำท่วมขังเหนือผิวดินสูง 10 เซนติเมตร

การให้น้ำในสิ่งทดลองที่ 1 จนกระทั่งถึงจุดความจุความชื้นสนาม (Field capacity) ระยะเวลาให้น้ำท่วมขังในสิ่งทดลองที่ 2 และ 3 ใช้ระยะเวลา 7 สัปดาห์ จากนั้น ศึกษาการตอบ สนองทางสรีรวิทยาและการเปลี่ยนแปลงของระบบรากต้นกล้ายางพาราภายหลังการ ปล่อยน้ำขังออก (เจริญเติบโตในสภาวะปกติ) ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

บทที่ 3
ผลการทดลอง

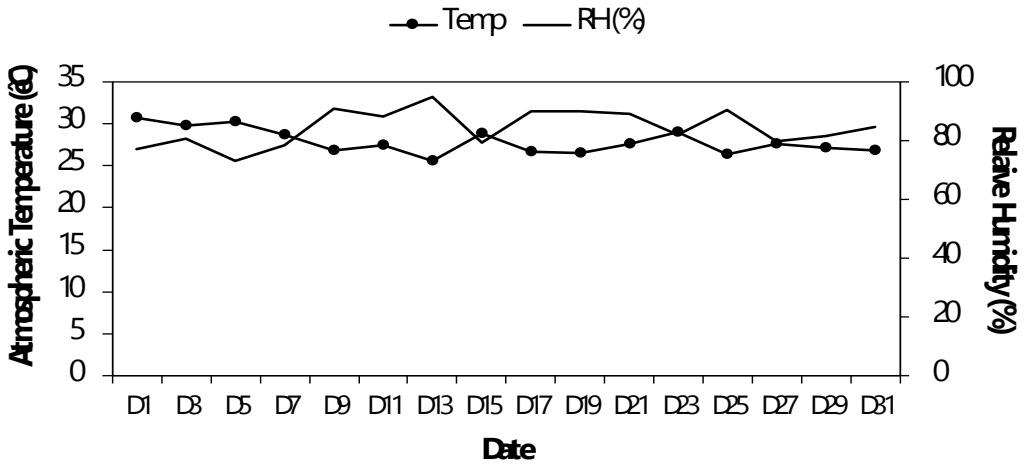
1. ข้อมูลวิเคราะห์คุณสมบัติของดินที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 1 ค่าวิเคราะห์คุณสมบัติของดินที่ใช้ปลูกทดลอง

พารามิเตอร์	กิจกรรมที่ 1	กิจกรรมที่ 2
Total N	0.07	0.04
Total P	236.02	187.13
Available P	2.68	15.85
K	20.88	51.08
Ca	10.49	278.62
Mg	7.03	51.38
pH	5.12	6.02
Sand	44.47	64.17
Silt	13.66	15.44
Clay	41.87	20.39

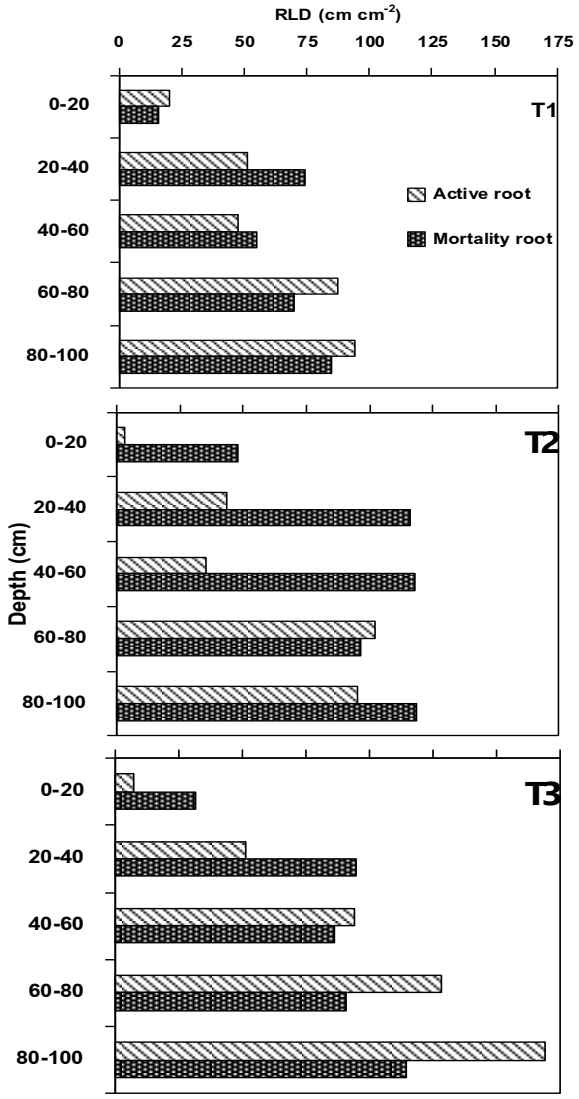
2. ข้อมูลอากาศและความชื้นสัมพัทธ์

การเปลี่ยนแปลงข้อมูลอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ที่บันทึกทุกๆ 1 ชั่วโมงตลอดการทดลอง พบว่า อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ตลอดการทดลอง เท่ากับ 25-36 องศาเซลเซียส ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงสุด-ต่ำสุด มีค่าระหว่าง 73-94 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 3)



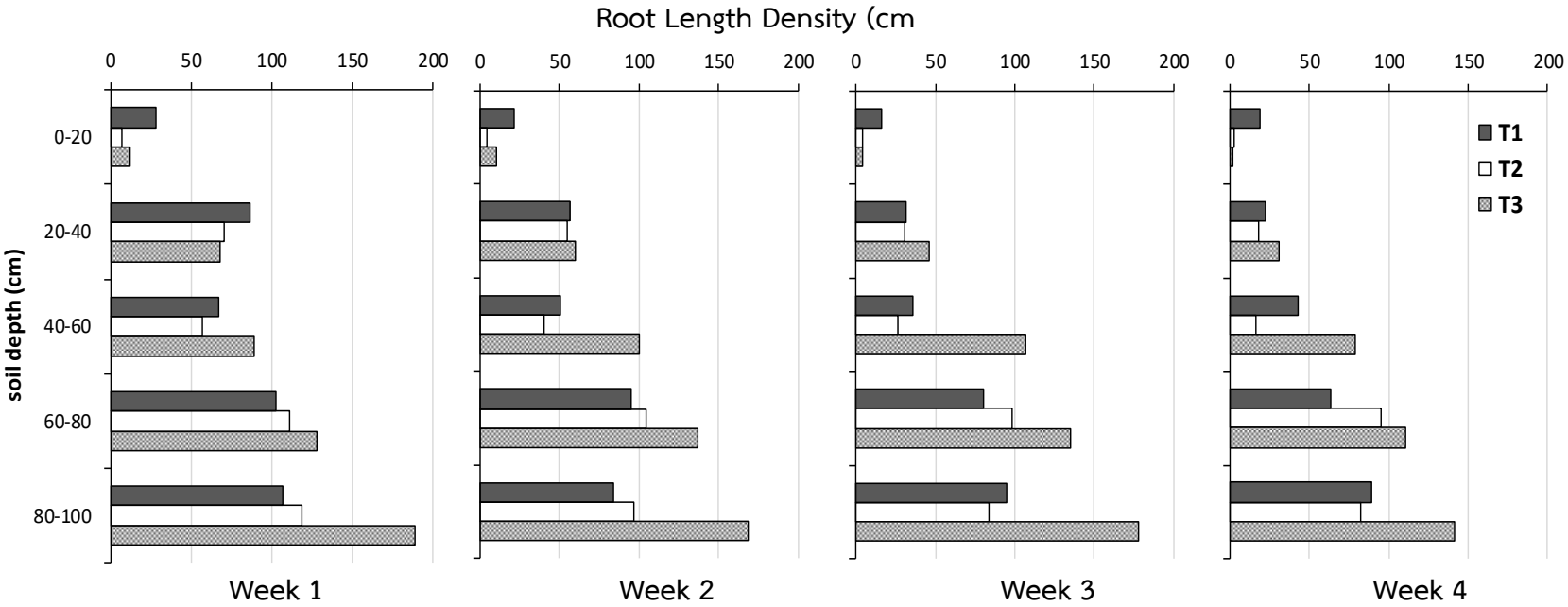
ภาพที่ 3 อุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ บันทึกตลอดการทดลองการศึกษาการเจริญเติบโตของรากต้นกล้ายางพาราที่งดการให้น้ำ

การเจริญเติบโตระหว่างต้นยางที่ควบคุม (ให้น้ำทุกวัน) ให้น้ำทุก 4 วัน และ 8 วันพบว่าสัดส่วนระหว่างรากมีชีวิตที่ค่าแตกต่างกัน โดยผลการศึกษาโดยวิธีการนับจุดตัดรากด้วยวิธีการของ Tennant (1975) พบว่าในสิ่งทดลองควบคุมที่มีการให้น้ำทุกวันมีปริมาณของรากมีชีวิตและรากตายในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกันตั้งแต่ระดับความลึก 0-100 เซนติเมตร ในขณะที่สิ่งทดลองที่สองทิ้งดการให้น้ำ 4 วัน และให้น้ำอีกครั้ง 4 วันต่อเนื่องพบว่า สัดส่วนระหว่างรากมีชีวิต และรากตายมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยที่ระดับความลึก 20-100 เซนติเมตร ในสิ่งทดลองที่ 2 และ 3 และสิ่งทดลองที่ 2 ที่ระดับความลึก 20-60 เซนติเมตร มีจำนวนรากตายสูงกว่ารากมีชีวิต ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 3 ปริมาณรากตายที่ระดับความลึก 60-100 เซนติเมตร มีปริมาณรากมีชีวิตสูงกว่ารากตายเล็กน้อย (ภาพที่ 4)

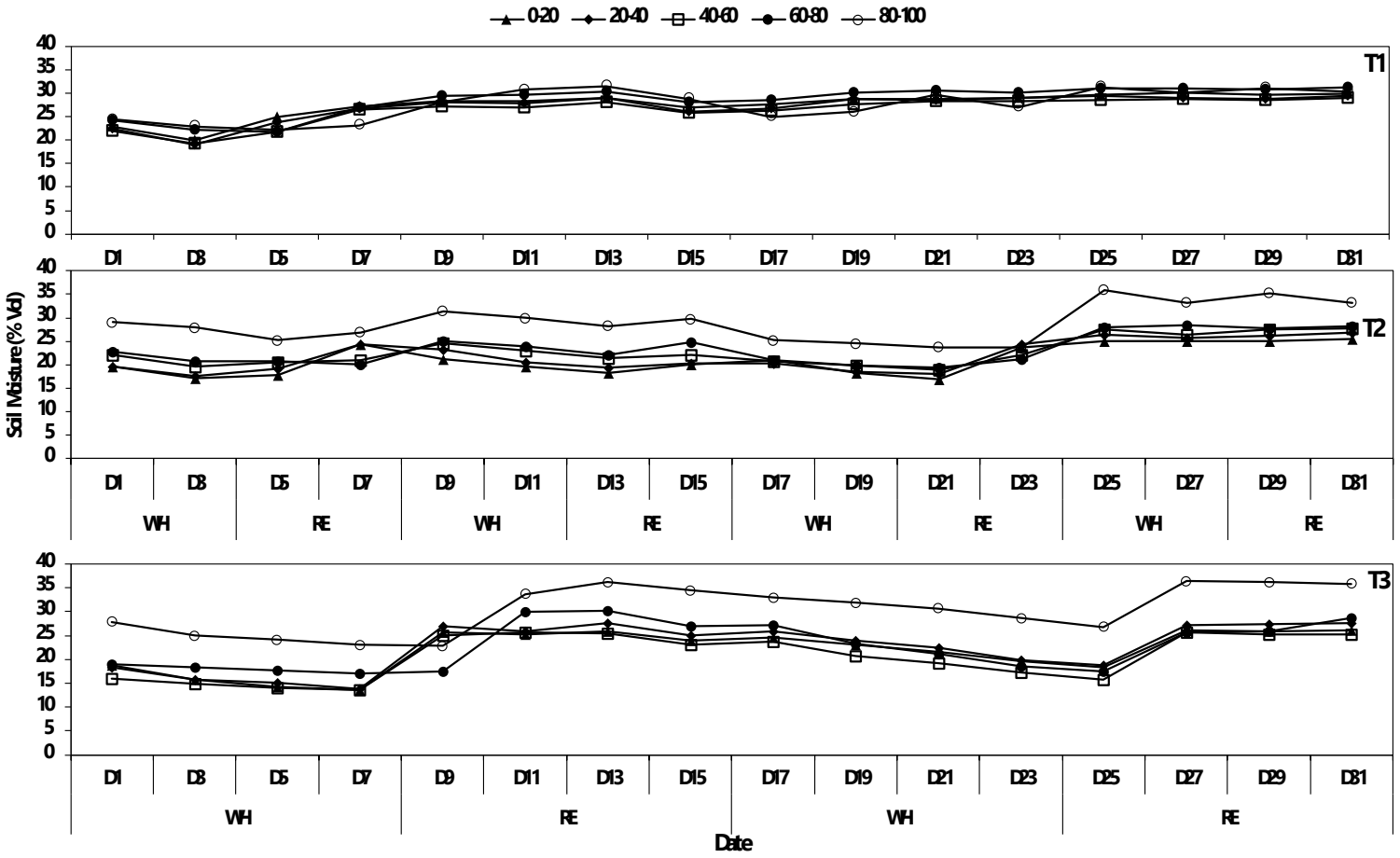


ภาพที่ 4 เปรียบเทียบปริมาณความหนาแน่นของรากยากพาราเฉลี่ยระหว่างรากมีชีวิต (Active root) และรากตาย (Mortality root) ที่ระดับความลึก 0-100 เซนติเมตร ภายหลังสิ้นสุดการทดลอง

จากภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณรากที่ระดับความลึก 0-100 เซนติเมตร พบว่า ปริมาณรากของสิ่งทดลองควบคุมในดินที่ระดับความลึก (0-40 เซนติเมตร) มีปริมาณสูงสุดในช่วงสัปดาห์แรกของการทดลอง และมีปริมาณลดลงเล็กน้อยภายหลังสิ้นสุดการทดลองในสัปดาห์ที่ 4 สิ่งทดลองที่ 2 และ 3 มีปริมาณรากที่เจริญเติบโตหนาแน่นที่ระดับความลึก 40-100 เซนติเมตร สูงกว่าสิ่งทดลองควบคุม ในสัปดาห์ที่ 2 และจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองในสัปดาห์ที่ 7

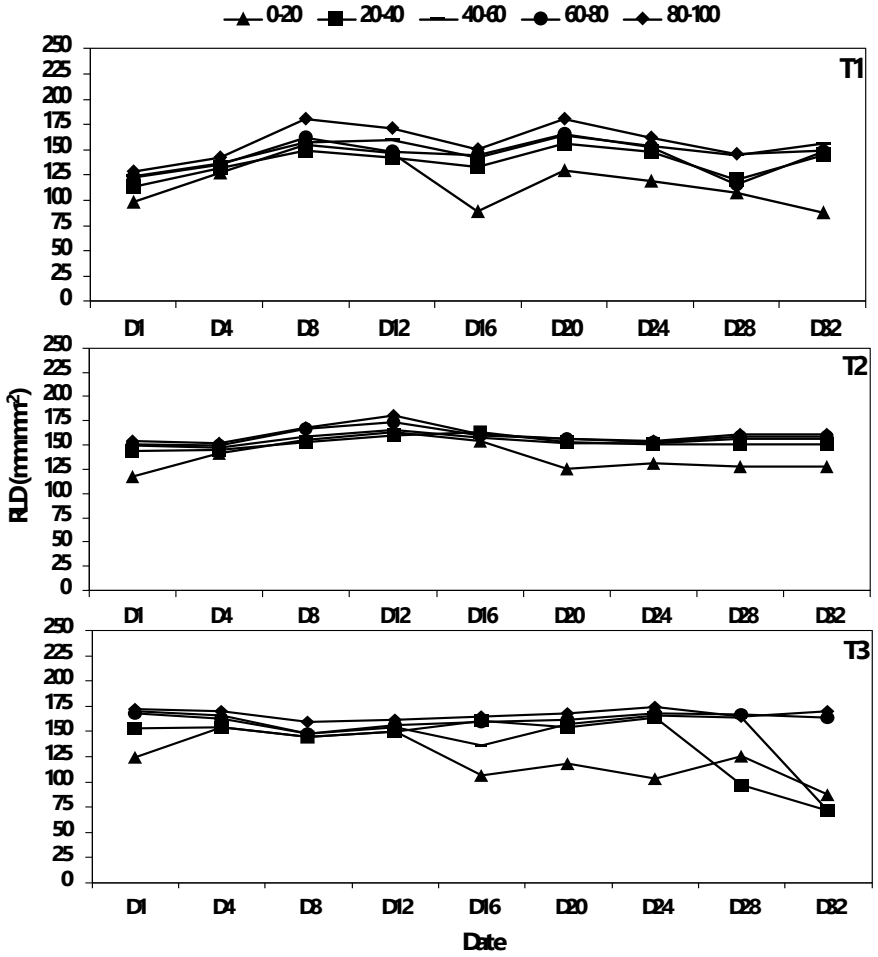


ภาพที่ 5 การเจริญเติบโตของรากต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 เฉลี่ย แต่ละสัปดาห์ เปรียบเทียบที่ระดับความลึก ทุกๆ 20 เซนติเมตร



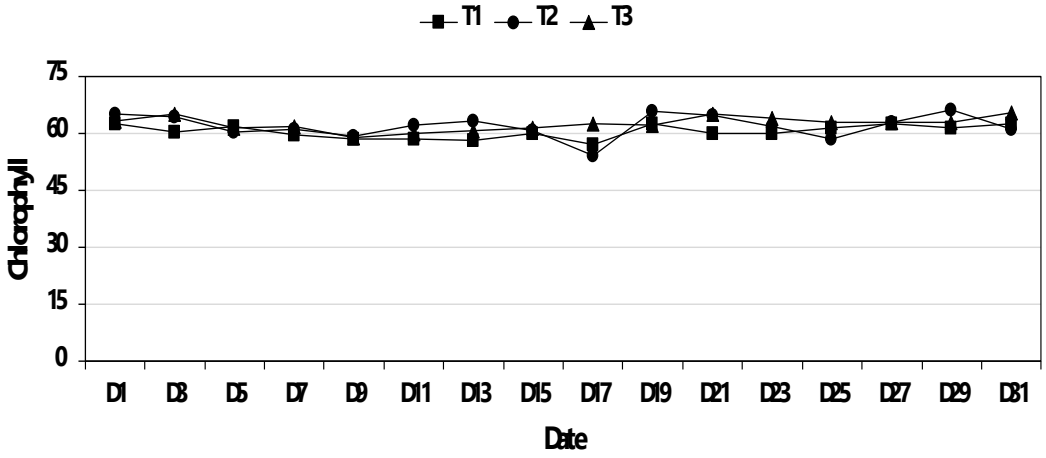
ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินตลอดการทดลอง ที่ระดับความลึก 0-100 เซนติเมตร ในแต่ละสิ่งทดลอง

ความชื้นในดินตลอดการทดลองในสิ่งทดลองควบคุมแสดงให้เห็นถึงระดับความชื้นในดินที่คงที่อยู่ในช่วง 18-31 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความชื้นดินในสิ่งทดลองที่ 2 และ 3 ปริมาณความชื้นในดิน มีค่าสูงสุดในดินที่ระดับ 80-100 ซม. (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 7 ความยาวรากของต้นกล้ายางพาราที่ระดับความลึก 0-100 เซนติเมตร วิเคราะห์หาความยาวรากจากภาพถ่ายรากด้วยกล้องมินิไรโซตรอน

การวิเคราะห์หาความยาวรากของต้นกล้ายางพาราที่ศึกษาโดยเทคนิคมินิไรโซตรอน พบว่าในสิ่งทดลองควบคุมที่ให้น้ำทุกวัน การเจริญเติบโตของรากในดินทุกระดับความลึกมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน ยกเว้นการเจริญเติบโตของรากที่ผิวดิน (0-20 เซนติเมตร) ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป 12 วันหลังการทดลอง ในขณะที่สิ่งทดลองที่สอง พบว่าการเจริญเติบของรากในดินทุกระดับความลึกอยู่ช่วงการเจริญเติบโตที่เปลี่ยนแปลงต่างกันเล็กน้อย แต่การเจริญเติบโตของรากที่ระดับความลึก 0-20 เซนติเมตร มีค่าลดลงเมื่อผ่านการทดลองไปประมาณ 16 วัน ส่วนสิ่งทดลองที่สามที่งดการให้น้ำ 8 วัน และให้น้ำกลับอีกครั้งเป็นระยะเวลา 8 วัน พบว่าการเจริญเติบโตของรากลดลงเมื่อทดลองเป็นเวลา 12 และ 24 วัน โดยรากที่ระดับความลึก 0-20, 20-40 และ 40-60 เซนติเมตร มีค่าลดลงตามลำดับ (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 8 ค่าความเขียวของใบวัดโดยเครื่อง SPAD meter

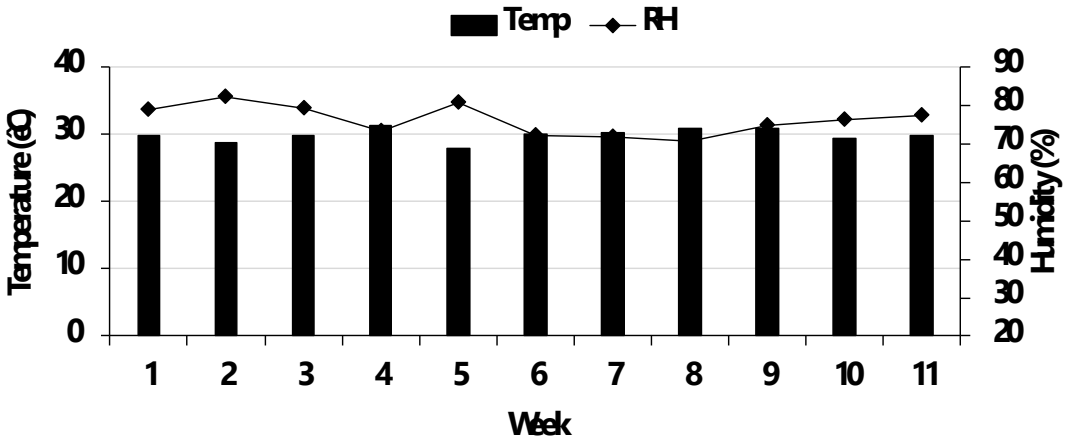
การเปลี่ยนแปลงของค่าความเขียวของใบต้นกล้ายางพาราตลอดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสามสิ่งทดลอง โดยมีค่าสูงสุด-ต่ำสุด เท่ากับ 56-62 ในสิ่งทดลองที่ 1 54-66 ในสิ่งทดลองที่ 2 และ 58-65 ในสิ่งทดลองที่ 3 (ภาพที่ 8)

กิจกรรมที่ 2 ศึกษาการตอบสนองของต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 ภายใต้สภาวะน้ำท่วมขัง

1. การตอบสนองทางสรีรวิทยา

1.1 ข้อมูลอากาศระหว่างทดลอง

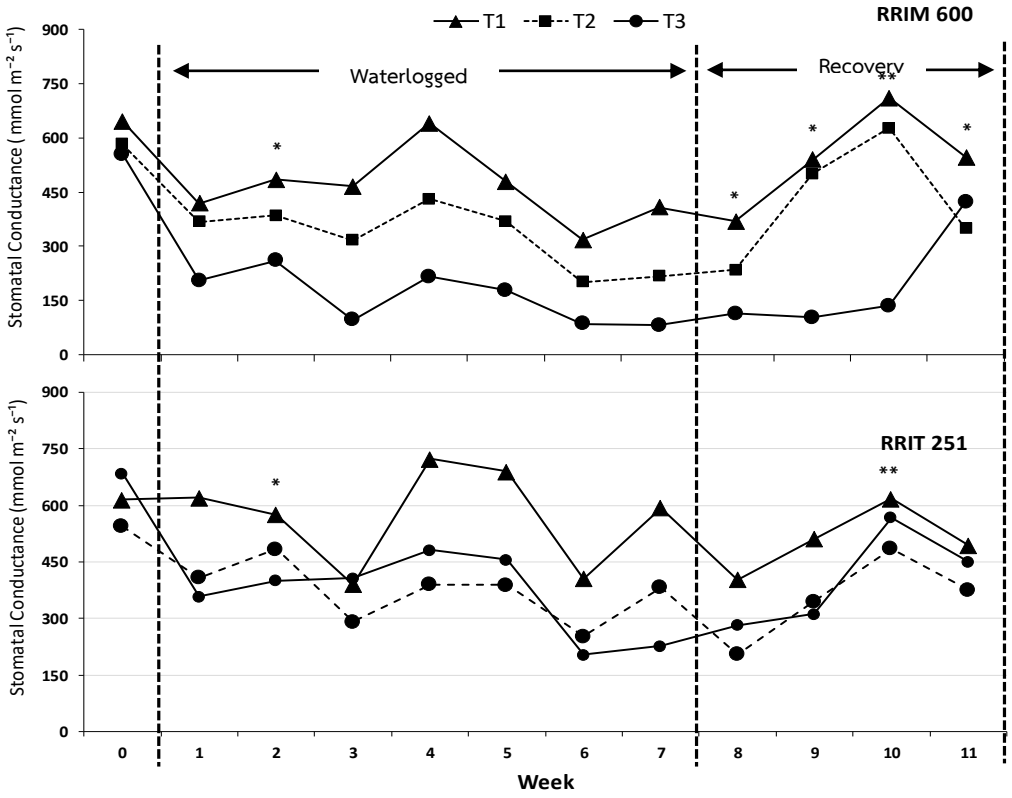
การเปลี่ยนของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตลอดการทดลอง พบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 31.3 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิต่ำสุด 28.8 องศาสเซลเซียส ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ยสูงสุด-ต่ำสุด เท่ากับ 82 และ 70.6 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 9)



ภาพที่ 9 อุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์บันทึกค่าทุกๆ 1 ชั่วโมง

1.2 ค่าการชักนำปากใบ

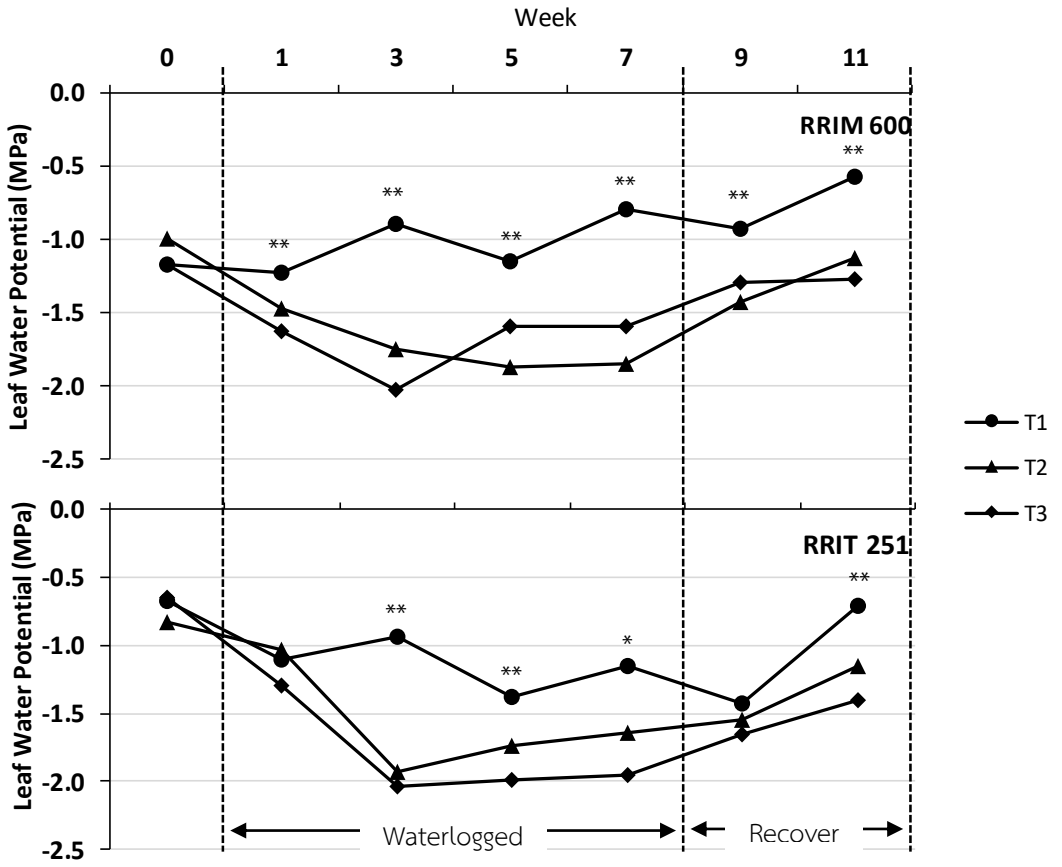
ผลจากการวัดค่าชักนำปากใบของสิ่งทดลองที่ 2 และสิ่งทดลองที่ 3 มีค่าลดต่ำลง โดยค่าการชักนำปากใบในสิ่งทดลองที่ 3 มีค่าลดลงต่ำสุด สำหรับยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในสิ่งทดลองที่ 3 มีค่าลดต่ำลงอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการชักนำปากใบในสิ่งทดลองที่ 2 ที่มีค่าสูงกว่า ซึ่งพบว่ามีการพยายามปรับภายใต้สภาวะที่น้ำท่วมขัง เพื่อลดการสูญเสียน้ำจากต้น และภายหลังจากการระบายน้ำออก ผ่านไป 2 สัปดาห์ ค่าการชักนำปากใบของยางพาราทั้งสองพันธุ์มีค่ากลับสูงขึ้นสอดคล้องกันทั้งสามสิ่งทดลองผลจากการวัดค่าชักนำปากใบของสิ่งทดลองที่ 2 และสิ่งทดลองที่ 3 มีค่าลดต่ำลง โดยค่าการชักนำปากใบในสิ่งทดลองที่ 3 มีค่าลดลงต่ำสุด สำหรับยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในสิ่งทดลองที่ 3 มีค่าลดต่ำลงอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการชักนำปากใบในสิ่งทดลองที่ 2 ที่มีค่าสูงกว่า ซึ่งพบว่ามีการพยายามปรับภายใต้สภาวะที่น้ำท่วมขัง เพื่อลดการสูญเสียน้ำจากต้น และภายหลังจากการระบายน้ำออก ผ่านไป 2 สัปดาห์ ค่าการชักนำปากใบของยางพาราทั้งสองพันธุ์มีค่ากลับสูงขึ้นสอดคล้องกันทั้งสามสิ่งทดลอง (ภาพที่ 10)



ภาพที่ 10 ค่าการซักนำปากใบเปรียบเทียบระหว่างสิ่งทดลอง ของต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251

1.3 ค่าศักย์ของน้ำในใบ

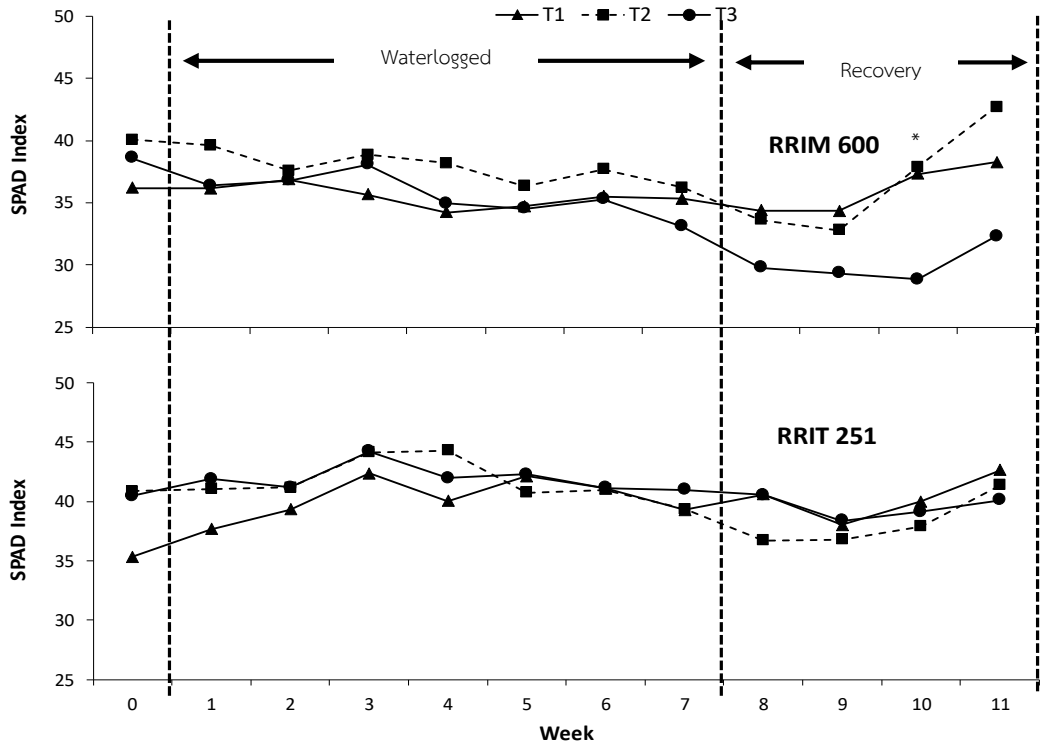
จากการวัดค่าศักย์ของน้ำในใบยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ พบว่าความแตกต่างของค่าศักย์ของน้ำในใบในสิ่งทดลองที่ 2 และ สิ่งทดลองที่ 3 ลดลงมากกว่าในสิ่งทดลองที่ 1 อย่างชัดเจน และมีรูปแบบการตอบสนองใกล้เคียงกันตลอดการทดลองจนกระทั่งเข้าสู่สัปดาห์ที่ 9 ที่ค่าศักย์ของน้ำในใบของสิ่งทดลองที่ 1 มีค่าลดลงใกล้เคียงกับสิ่งทดลองที่ 2 และ 3 ซึ่งน่าเป็นผลจากขนาดของต้นกล้าที่ควบคุมทั้งสอง 2 พันธุ์ ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น และจำนวนใบที่มากกว่าสิ่งทดลองที่ 2 และ 3 ที่ได้รับน้ำท่วมขัง และเมื่อระบายน้ำออก พบว่าค่าศักย์ของน้ำในใบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนในสัปดาห์ที่ 11 แสดงถึงการฟื้นตัวของต้นยางพาราอย่างรวดเร็ว และเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าศักย์ของน้ำใน5ใบของสิ่งทดลองที่ 2 และ 3 มีค่าใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่า การให้น้ำท่วมขังที่ระดับผิวดิน และที่ระดับ 10 เซนติเมตรเหนือผิวดิน ส่งผลกระทบแตกต่างกัน (ภาพที่ 11)



ภาพที่ 11 ค่าศักย์ของน้ำในใบยางพาราเปรียบเทียบระหว่างสิ่งทดลองระหว่างพันธุ์ยางพารา RRIM 600 และ RRIT 251

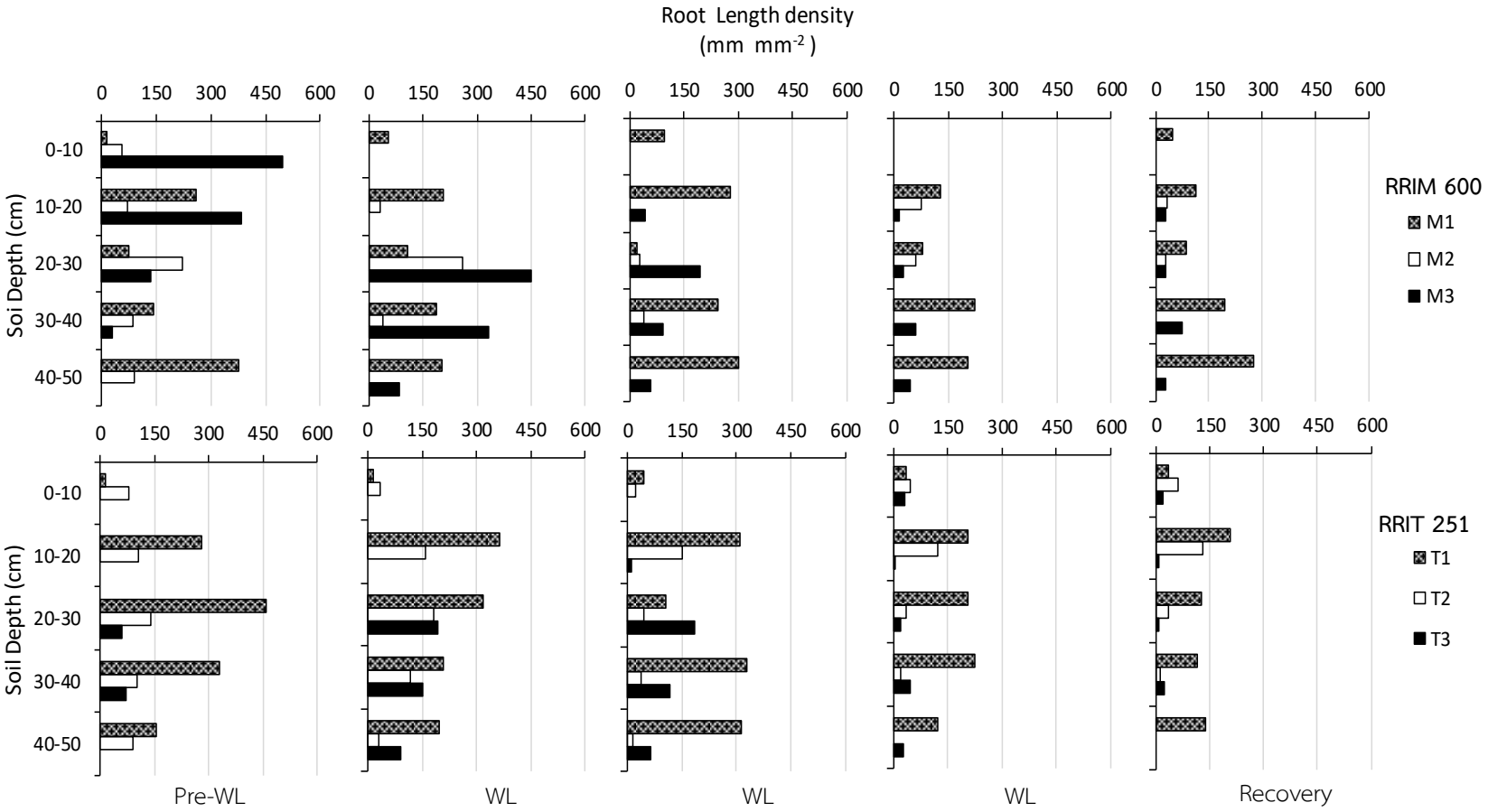
1.4 การเปลี่ยนแปลงค่าความเขียวของใบ

จากภาพที่ 12 แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าความเขียวของใบทั้ง 3 สิ่งทดลอง เป็นที่น่าสังเกตว่าในสิ่งทดลองที่ 3 ที่น้ำท่วมขัง 10 เซนติเมตร เหนือผิวดินมีปริมาณความเขียวของใบลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งทดลองที่ 1 และ 2 ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 2 ที่น้ำท่วมขังระดับผิวดินมีปริมาณความเขียวของใบลดลงต่ำกว่าสิ่งทดลองควบคุมเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าสภาวะน้ำท่วมขังมีผลกระทบต่อปริมาณของรงควัตถุ และคลอโรฟิลล์ในใบต้นกล้ายางพารา และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนก๊าซเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชลดลง อย่างไรก็ตาม ภายหลังการปล่อยน้ำออก พบว่าการปรับตัวของต้นกล้าทั้งสองพันธุ์มีปริมาณความเขียวของใบเพิ่มขึ้นในสัปดาห์ที่ 11 หรือ 3 สัดาห์ภายหลังการปล่อยน้ำ



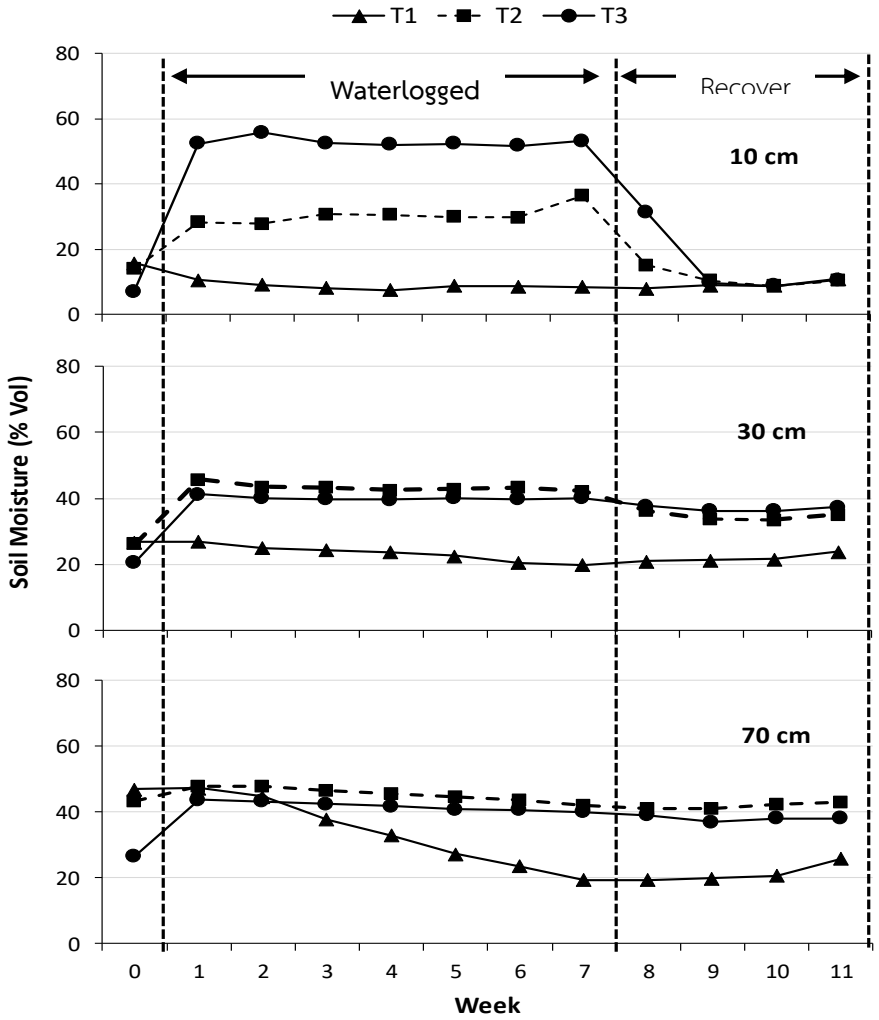
ภาพที่ 12 ค่าความเขียวในใบยางพาราวัดด้วย SPAD meter เปรียบเทียบระหว่างสิ่งทดลองระหว่างต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251

การเจริญเติบโตของรากยางพาราที่ศึกษาด้วยเทคนิคมินิไรโซตรอนในระยะก่อนให้น้ำท่วมขัง (Pre-WL) ระยะให้น้ำท่วมขัง (WL) และระยะฟื้นตัว (recovery) ภายหลังการปล่อยน้ำ พบว่าสิ่งทดลองควบคุมที่มีการให้น้ำปกติ พบการเจริญเติบโตของรากกระจายตลอดความลึกในดิน แต่สิ่งทดลองที่ 2 ที่ให้น้ำขังระดับผิวดิน และสิ่งทดลองที่ 3 ที่ให้น้ำท่วมขังเหนือพื้นดิน 10 เซนติเมตร การเจริญเติบโตของรากลดลงในดินทุกระดับความลึกโดยเฉพาะในดินที่ระดับลึก 0-20 เซนติเมตร ทั้งนี้ภายหลังการปล่อยน้ำออก การฟื้นตัวของรากในสิ่งทดลองที่ 2 มีการเจริญเติบสูงกว่าสิ่งทดลองที่ 3 และพบในดินที่ระดับ 0-30 เซนติเมตร (ภาพที่ 13)

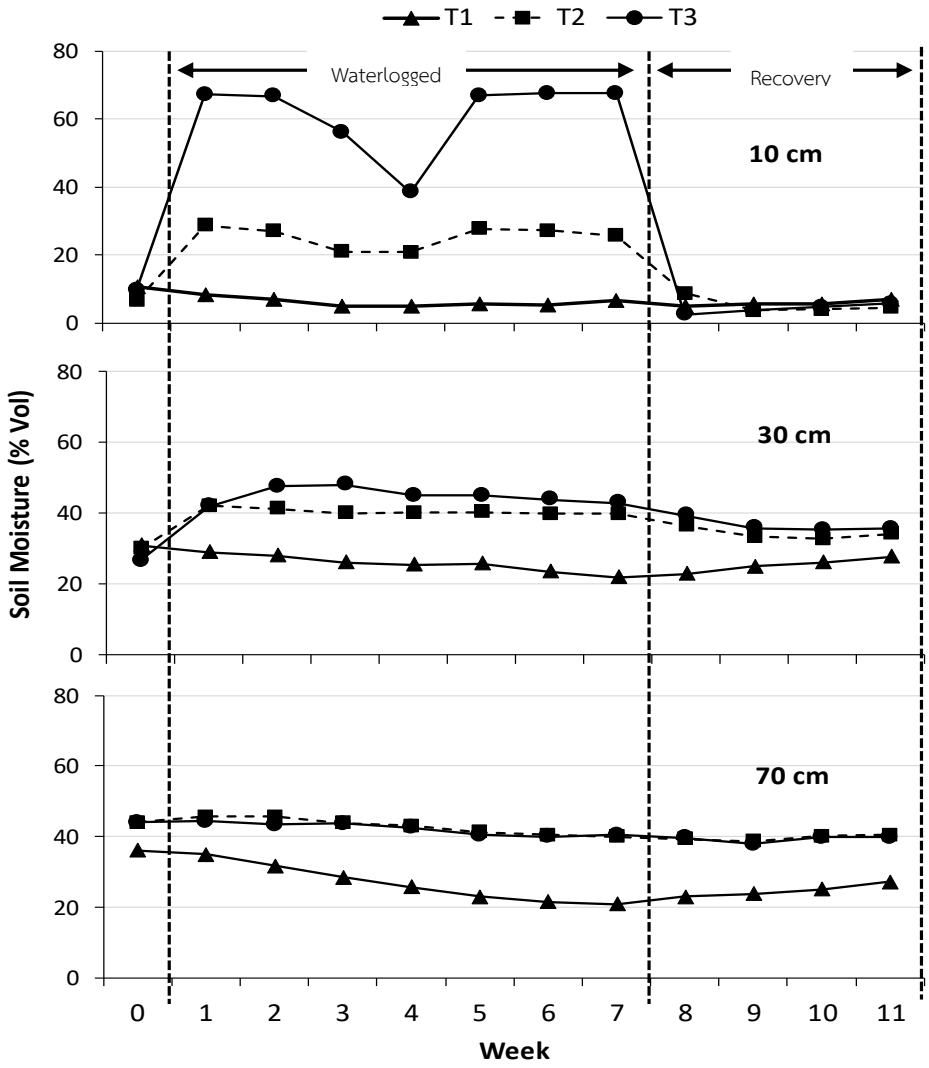


ภาพที่ 13 การเจริญเติบของรากต้นกล้ายางพาราแต่ละช่วงการทดลองในระยะก่อนให้น้ำท่วมขัง (Pre-WL) ระยะให้น้ำท่วมขัง (WL) และระยะฟื้นตัว (Recovery) เปรียบเทียบระหว่างสิ่งทดลองของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251

การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดินที่ระดับความลึก 10 30 และ 70 เซนติเมตร ตลอดการทดลองพบว่าความชื้นในดินระหว่างน้ำท่วมขังของสิ่งทดลองที่ 2 และ 3 ที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตรจากผิวดิน มีค่าสูงสุดในขณะที่ระดับความลึก 30 และ 70 เซนติเมตร มีปริมาณความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตลอดการทดลองทั้งยางพาราพันธุ์ RRIM 600 และ RRIT 251 (ภาพที่ 14 และ 15)



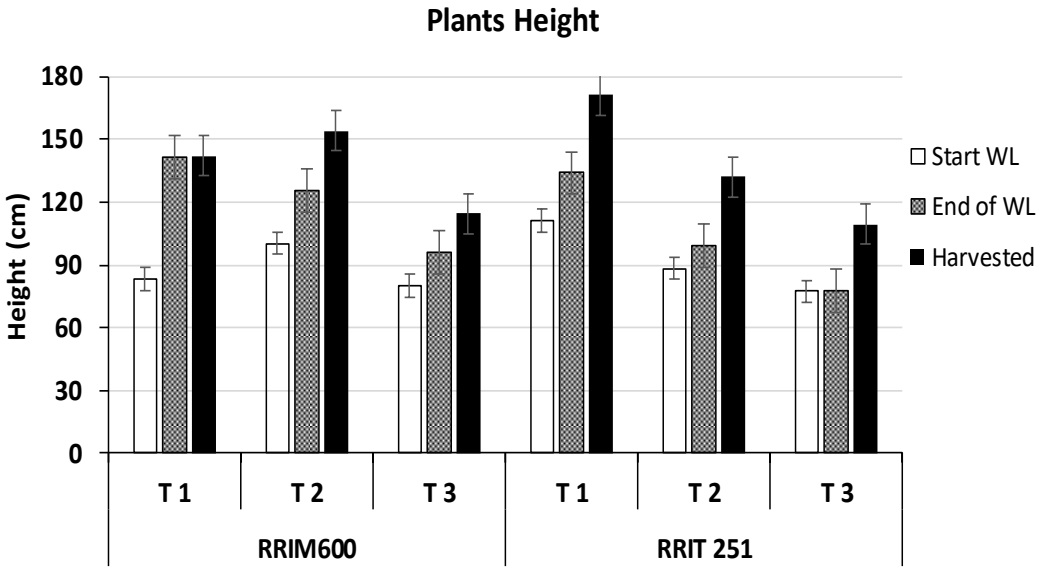
ภาพที่ 14 ความชื้นในดินที่ระดับความลึก 10 30 และ 70 เซนติเมตร ของสิ่งทดลองที่ 1 2 และ 3 ของยางพาราพันธุ์ RRIM 600



ภาพที่ 15 ความชื้นในดินที่ระดับความลึก 10 30 และ 70 เซนติเมตร ของสิ่งทดลองที่ 1 2 และ 3 ของยางพาราพันธุ์ RRIT 251

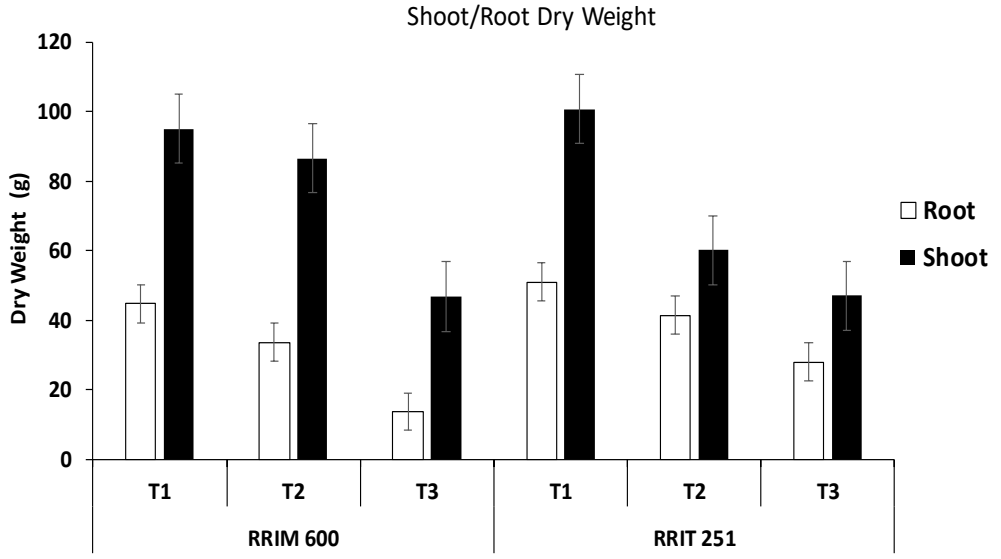
1.5 ผลกระทบต่อการเจริญเติบโตด้านลำต้น

จากภาพที่ 16 แสดงให้เห็นว่ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 มีการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นน้อยกว่าพันธุ์ RRIT 251 ในระยะแรกก่อนการให้น้ำขัง แต่การเปลี่ยนแปลงความสูงของต้นกล้ายางพาราในระยะที่มีการให้น้ำท่วมขัง ของสิ่งทดลองที่ 2 และ ในยางพาราพันธุ์ RRIM 600 มีความสูงมากกว่าสิ่งทดลองในยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ในสิ่งทดลองที่ 2 และ 3 หลังการปล่อยน้ำ พบว่าความสูงของต้นกล้าของทั้ง 3 สิ่งทดลอง มีความสูงเพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นในสิ่งทดลองควบคุมของต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 แตกต่างกับต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่มีการเจริญเติบโตของลำต้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

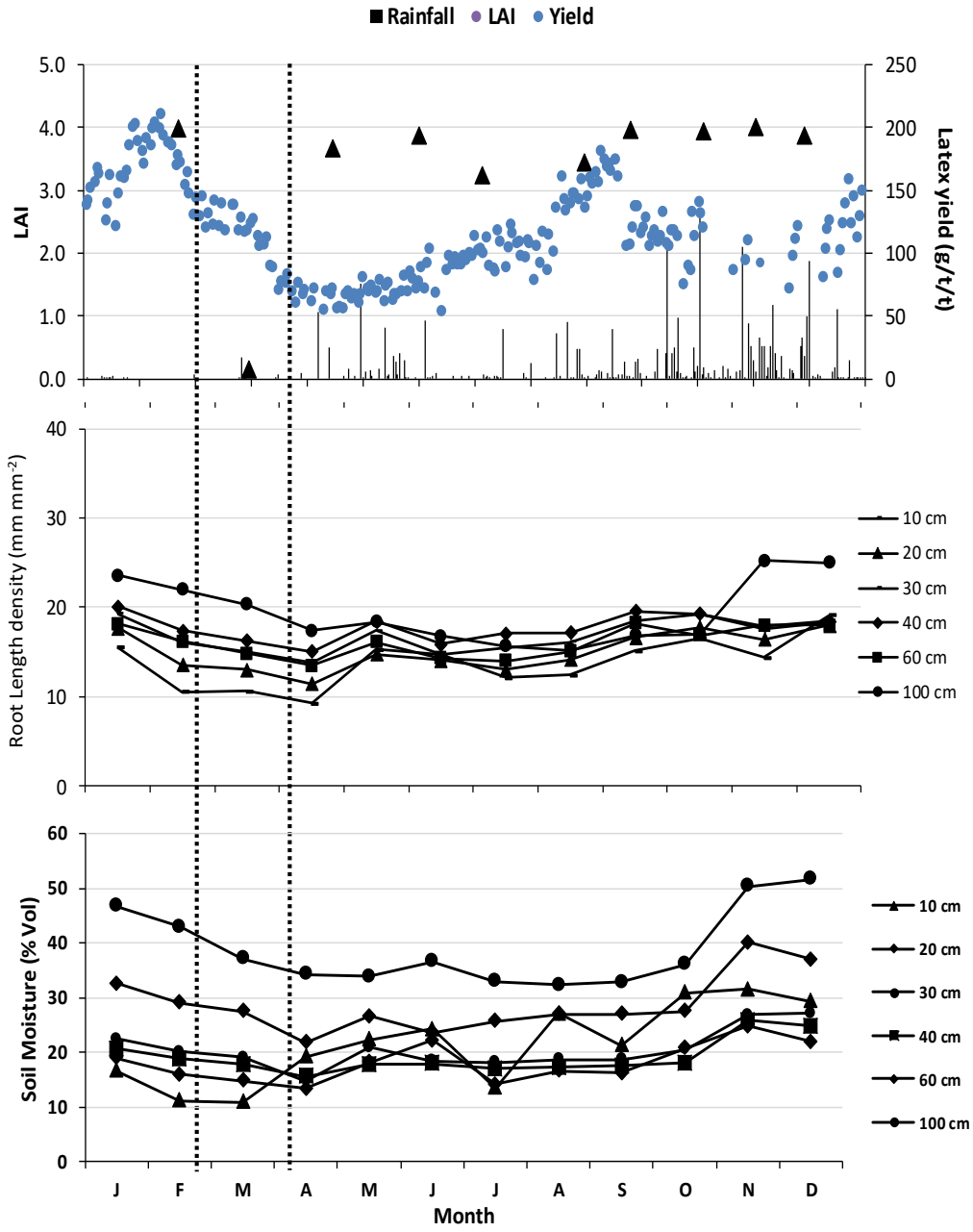


ภาพที่ 16 การเตริญเติบโตของต้นกล้ายางพาราระหว่างสิ่งทดลอง เปรียบเทียบในระยะก่อนทดลอง ระหว่างทดลอง และภายหลังสิ้นสุดการทดลอง ของต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600

จากภาพที่ 17 แสดงให้เห็นว่ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่อายุเท่ากับพันธุ์ RRIM 600 มีความยาวรากและขนาดลำต้นมากกว่า เมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตทางลำต้นจะเห็นว่ายางพันธุ์ RRIM 600 พยายามรักษาการเจริญเติบโตทางลำต้น แม้มีปริมาณใบลดลง แสดงถึงการปรับตัวที่ต่างกัน ขณะที่การเจริญเติบโตส่วนยอดของ ยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ลดลงชัดเจน ตามระดับความรุนแรงของปริมาณน้ำที่ท่วมขัง



ภาพที่ 17 น้ำหนักแห้งของราก และ ลำต้น ของต้นกล้าเปรียบเทียบระหว่างสิ่งทดลอง ของต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 และRRIM 600



ภาพที่ 18 ข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือน ปริมาณผลผลิตน้ำยางสด ค่าดัชนีพื้นที่ใบยางพารา การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน และการเจริญเติบโตของรากในแปลงยางพารา อายุ 14 ปี ของเกษตรกร ต. ฉลุง อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา ปี 2557

จากภาพที่ 18 ศึกษาพัฒนาการในรอบปี (Phenological development) ของยางพารา พันธุ์ RRIM 600 ที่เปิดกรีด อายุ 14 ปี ของเกษตรกรในพื้นที่ต. ฉลุง อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา ข้อมูลดัชนีพื้นที่ใบแสดงให้เห็นถึงช่วงการผลัดใบระหว่างเดือนกุมภาพันธ์-เดือนมีนาคม และมีการแตกใบใหม่ช่วงเดือนเมษายน และจากข้อมูลปริมาณน้ำฝน พบว่ามีการกระจายตัวของฝนที่ตกกระจายตั้งแต่

เดือนพฤษภาคม และมีฝนตกชุกเดือนกันยายนจนถึงปลายเดือนธันวาคม ซึ่งปริมาณน้ำฝนที่ตกกระจายสะสม พบว่าความชื้นในดินที่ระดับความลึก 100 เซนติเมตร มีปริมาณความชื้นในดินสูงสุดตลอดทั้งปี ซึ่งจากปัจจัยความชื้นที่สะสมในดินเป็นผลให้กระเจริญเติบโตของรากยางพารา พบว่ามีการเจริญเติบโตสอดคล้องกับปริมาณความชื้นในดินเช่นเดียวกัน

บทที่ 4
วิจารณ์ผล

ต้นกล้ายางพาราที่ได้รับน้ำอย่างสม่ำเสมอสามารถการเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วแม้อยู่ในสภาวะอากาศแห้งแล้ง (สุภัทร และคณะ, 2550) ดังนั้นสภาวะแล้งหรือมีฝนทิ้งช่วงติดต่อกัน ในช่วงที่ปลูกยางในระยะต้นกล้า จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและความมีชีวิตรอดของต้นยางพารา ซึ่งอาจทำให้เกิดอาการยอดแห้งตาย หรือลำต้นเล็ก ต้นแคระเกร็น และยังส่งผลให้มีระยะการเปิดกรีดช้ากว่าปกติถึง 1-2 ปี อีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากในสภาพที่ต้นกล้ายางพาราขาดน้ำติดต่อกัน จะมีค่าศักย์ของน้ำในใบและการเปิดปากใบลดลงเพื่อลดการคายน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงลดลง (Sangsing *et al*., 2004) และทำให้ต้นยางพาราเกิดอาการใบร่วง ชะงักการเจริญเติบโตและตายในระยะต่อมา (Chandrasekhar *et al*., 1998) ดังนั้นจึงควรมีการจัดการน้ำให้แก่ต้นยางพาราในระยะยางอ่อน ซึ่งจะเป็นการช่วยให้ต้นกล้ายางพาราสามารถกระตุ้นเจริญเติบโตได้ดีขึ้นและมีโอกาสเปิดกรีดได้ก่อนกำหนด 1-2 ปีได้แม้อยู่ในสภาพแห้งแล้งหรือสภาพที่ได้รับน้ำฝนตามธรรมชาติก็ตาม (Devakumar *et al*., 1998) ด้วยสาเหตุนี้ปริมาณน้ำที่เพียงพอจึงมีบทบาทสำคัญในการเจริญเติบโตของต้นกล้ายางพาราและส่งผลต่อการสร้างมวลของใบ ก้านใบ ลำต้น และรากได้แตกต่างกันในระยะต่อมา

บทที่ 5
สรุปผล

สภาวะเครียดน้ำส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้ายางพาราที่ระดับแตกต่างกันขึ้นกับระดับความรุนแรงของสภาวะเครียดน้ำที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าสภาวะที่ต้นกล้ายางพาราขาดน้ำมีผลกระทบทำให้มีการปรับตัวโดยการลดกระบวนการทางสีรรวิทยาลง ได้แก่ การแลกเปลี่ยนก๊าซ และการใช้น้ำภายในลำต้น อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อการลำเลียงน้ำในต้นอีกส่วนหนึ่ง การปรับตัวของต้นกล้าทางด้านกายภาพที่พบชัดเจนคือ อัตราการเจริญเติบโตของรากขนาดเล็กมีปริมาณลดลงในดินชั้นบนที่ระดับ 0-40 เซนติเมตร และมีการเจริญเติบโตเพิ่มสูงขึ้นในดินระดับลึก (60-100 เซนติเมตร) เพื่อการหาน้ำให้เพียงพอต่อการรักษาระดับการเจริญเติบโต ในขณะที่ผลกระทบของสภาวะน้ำท่วมขังต่อการปรับตัวของต้นกล้ายางพาราภายหลังจากการปล่อยน้ำออก มีการฟื้นตัวโดยการสร้างรากใหม่ทดแทนที่ระดับผิวดิน 0-20 เซนติเมตร สูงกว่าในดินชั้นล่าง และเพิ่มอัตราเมตบอลึซึมภายในเพื่อฟื้นตัวให้กลับสู่การเจริญเติบโตในสภาวะปกติโดยเร็ว ดังนั้นจากผลการศึกษาที่ได้นี้สามารถนำไปปรับใช้ในการปลูกสร้างส่วนยางระยะแรกเพื่อเพิ่มอัตราการมีชีวิตรอดของต้นกล้ายางพาราที่ย้ายปลูก ซึ่งควรมีการให้น้ำในช่วงแล้งแก่ต้นกล้ายางพาราอย่างเพียงพอ หรือการปรับพื้นที่ปลูกในที่ราบลุ่มให้มีการระบายน้ำที่ดีในช่วงฤดูผล เพื่อให้อัตราการเจริญเติบโตของต้นกล้าอยู่ในระดับคงที่ ซึ่งมีผลต่อการให้น้ำยางในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

สุภัทร์ อิศรางกูร ณ อยุธยา, อโนมา ดงแสนสุข, รวมชาติ แต่พงษ์โสรัถ และธีระยุทธ นาคแดง. 2550. ความสัมพันธ์ของสภาพภูมิอากาศกับการเจริญเติบโตของยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ปลูกภายใต้ระบบการให้น้ำ. แก่นเกษตร 35 (พิเศษ): 118-125.

Anderson, L. J., L. H. Comas, A. N. Lakso and D. M. Eissenstat. 2003. Multiple risk factors in root survivorship: A 4-year study in Concord grape. New Phytologist 158: 489-501

Blum, A. 2005. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential are they compatible, dissonant, or mutually exclusive. Australian Journal of Agricultural Research 56: 1159-1168.

Bragg, P. L., G. Govi and R. Q. Cannell. 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.

Brown, D. A. and D. R. Upchurch. 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) pp. 15-30. Madison : American Society of Agronomy.

Burke, M. K. and D. J. Raynal. 1994. Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. Plant and Soil 162: 135–146.

Canadell, J., A. Djema, B. López, F. Lloret, S. Sabaté, D. Siscart and C. A. Gracia. 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 : Springer-Verlag.

Carmo-Silva, A. E., M. A. Gore, P. Andrade-Sanchez, A. N. French, D. J. Hunsaker and M. E. Salvucci. 2012. Decreased CO_2 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.

Chandrasekhar, T. R., M. A. Nazeer, J. G. Marattukalam, G. P. Prakash, K. Annamalainathan and J. Tomas. 1998. An analysis of growth and drought tolerance in rubber during the immature phase in a dry subhumid Climatic, Experimental Agriculture 34: 287-300.

Chaves, M. M. and M. M. Oliveira. 2004. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. Journal of Experimental Botany 55: 2365-2384.

Chaves, M. M., J. Flexas and C. Pinheiro. 2009. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. Annals of Botany 103: 551-560.

daSilva, A. P., B. D. Kay and E. Perfect. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. Soil Science Society of American Journal 58: 1775-1781.

Devakumar, A. S., S. M. Sathik, M. B. J. Jacob, K. Annamalainathan, P. Gawaiprakash and K. R. Vijayakumar. 1998. Effects of atmospheric and soil drought on growth and development of *Hevea brasiliensis*. Journal of Rubber Research 1: 190-198.

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 K. C. J. Van Rees. 1994. The growth and function of fine roots. Ecological bulletin 43: 76-91.

Ephrath, J. E., M. Silberbush and P. R. Berliner. 1999. Calibration of minirhizotron readings against root length density data obtained from soil cores. Plant and Soil 209: 201-208.

Flexas, J., J. Bota, J. Galmes, H. Medrano and M. Ribas-Carbo. 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., K. E. Black and J. E. Hooker. 1997. Temperature induced alteration to root longevity in *Lolium perenne*. Plant and Soil 190: 87-90.

Gonkhamdee, S., J. L. Maeght, F. F. Do and A. Pierret. 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., L. A. Dawson, J. Proctor, E. I. Duff and D. A. Elston. 2005. Fine root dynamics in a tropical rain forest is influenced by rainfall. Plant and Soil 276: 23-32.

Halter, R., R. Sands, E. K. S. Nambiar and D. H. Ashton. 1996. Elongation of *Eucalyptus* roots during day and night. Tree Physiology 16: 877-881.

Imada, S., N. Yamanaka and S. Tamai. 2008. Water table depth affects *Populus alba* fine root growth and whole plant biomass. Functional Ecology 22: 1018-1026.

Imada, S., N. Yamanaka and S. Tamai. 2010. Fine-root growth, fine root mortality, and leaf morphological change of *Populus albain* response to fluctuating water tables. Trees 24: 499-506.

Johnson, M. G., D. T. Tingey, M. J. Storm and D. L Phillips. 1995. Patterns of ponderosa pine fine root growth as affected by elevated CO_2 : initial results. Plant Physiology 14: 81–88.

Lyr, H. and G. Hoffman. 1967. Growth rates and growth periodicity of tree roots. International Review of Forestry Research 2: 181-236.

M'Bou, A. T., C. Jourdan, P. Deleporte, Y. Nouvellon, L. Saint-André, J. P. Bouillet, F. Mialoundama, A. Mabiala and D. Epron. 2008. Root elongation in tropical Eucalyptus plantations: effect of soil water content. Annuals of Forest Science 65: 609.

Ma, Z., D. G. Bielenberg, K. M. Brown and J. P. Lynch. 2001. Regulation of root hair density by phosphorus availability in *Arabidopsis thaliana*. Plant Cell and Environment 24: 459-467.

McMichael, B. L. and H. M. Taylor. 1987. Applications and limitations of rhizontrons and minirhizotrons to quantify root development of field-grown potatoes. Plant and Soil 182: 301-312.

Merry, S. J., P. N. Foster and I. C. Prentice. 2012. Future global water resources with respect to climate change and water withdrawals as estimated by a dynamic global vegetation model. Journal of Hydrology 448-449: 14-29.

Nadelhoffer, K. J. and J. W. Reich. 1992. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. Ecology 73: 1139-1147.

Neumann, P. M. 2008. Coping mechanisms for crop plants in drought prone environments. Annals of Botany 101: 901-907.

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: 59-64.

Pinheiro, C. and M. M. Chaves. 2011. Photosynthesis and drought: Can we make metabolic connections from available data? Journal of Experimental Botany 62: 869-882.

Prasannakumari, P., M. D. Jessy and K. Annamalainathan. 2010. Potassium and silicon help young rubber plants to tide over transient drought. Workshop on Climate Change and NR-2010, IRRDB, 28th - 30th July 2010.

Pregitzer, K. S., R. L. Hendrick and R. Fogel. 1993. The demography of fine roots in response to patches of water and nitrogen. New Phytologist 125: 575-580.

Pregitzer, K. S., J. S. King and A. J. Burton. 2000. Response of tree fine roots to temperature. New Phytologist 147: 105-115.

Richards, J. H. 1984. Root growth response to defoliation in two *Agropyron* bunchgrasses: field observations with an improved root periscope. Oecologia 64: 21–25.

Ruess, R. W., R. L. Hendrick and J. P. Bryant. 1998. Regulation of fine root dynamics by mammalian browsers in early successional Alaskan taiga forests. Ecology 79: 2706-2720.

Russell, R. S. 1977. Plant Root Systems: Their Function and Interaction with the soil. London: McGraw-Hill book company. pp.290.

Sanders, J. L. and D. A. Brown. 1978. A new fiber optic technique for measuring root growth of soybeans under field conditions. Agron Journal 70: 1073–1076.

Sangsing, K., X. L. Roux, P. Kasemsap, S. Thanisawanyangkura, K. Sangkhasila, E. Gohet and P. Thaler. 2004. Photosynthetic capacity and effect of drought on leaf gas exchange in two rubber (*Hevea brasiliensis*) clones. Kasetsart Journal (Natural Science) 38: 111-122.

Serrasolses, I. 1994. Fertilitat dels sòls afectats pel foc. Dinàmica del nitrogen i del fósfor. Ph.D. Dissertation. University of Barcelona.

Shibata, H., T. Hiura, Y. Tanaka, K. Takagi and T. Koike. 2005. Carbon cycling and budget in a forested basin of southwestern Hokkaido northern Japan. Ecological Research 20: 325-331.

Teskey, R. O. and T. M. Hinckley. 1981. Influence of temperature and water potential on root growth of white oak. Physiologia Plantarum 52: 363-369.

Tezara, W., V. J. Mitchell, S. D. Driscoll and D. W Lawlor. 1999. Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. Nature 401: 914-917.

Tierney, G. L., T. J. Fahey, P. M. Groffman, J. P. Hardy, R. D. Fitzhugh and C. T. Driscoll. 2003. Environmental control of fine root dynamics in a northern hardwood forest. Global Change Biology 9: 670-679.

Upchurch, D. R. and J. R. Ritchie. 1983. Root observations using a video recording system in minirhizotrons. Agronomy Journal 75: 1009-1015.

Van Noordwijk, M., A. de Jager and J. Floris. 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.

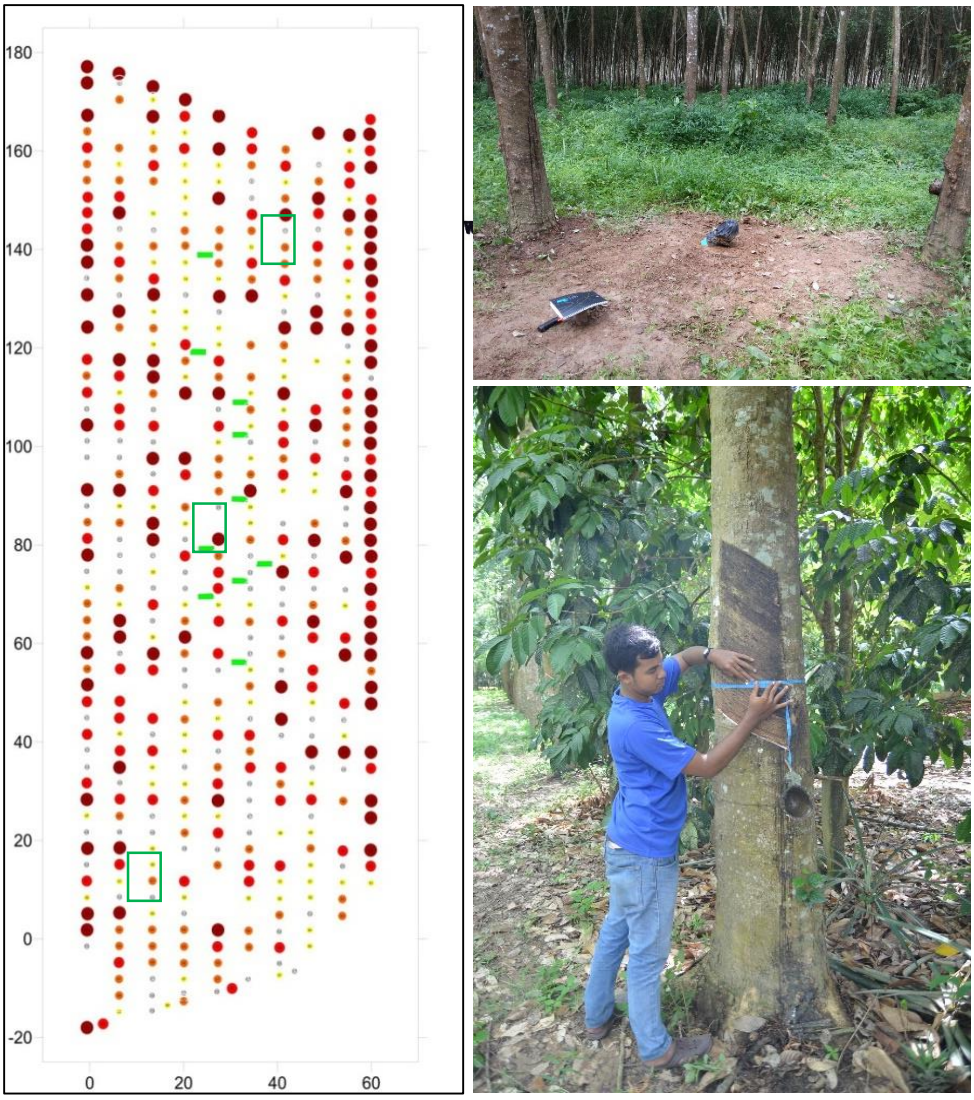
Whalley, W. R., P. B. Leeds-Harrison, L. J. Clark and D. J. G. Gowing. 2005. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. Soil and Tillage Research 84: 18-27.

Whitmore, A. P. and W. R. Whalley. 2009. Physical effects of soil drying on roots and crop growth. Journal of Experimental Botany 60: 2845-2857.

Xu, Z., Zhou, G. and H. Shimuzu. 2010. Plant responses to drought and rewatering. Plant Signal and Behavior 5: 649-654.

Young, I. M., K. Montagu, J. Conroy and A. G. Bengough. 1997. Mechanical impedance of root growth directly reduces leaf elongation rates of cereals. New Phytologist 135: 613-619.

ภาคผนวก



ภาพประกอบภาคผนวกที่ 1 แผนผังการเก็บข้อมูลในแปลงทดลองของเกษตรกร อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา

ภาพประกอบภาคผนวกที่ 2 การทดลองสภาวะขาดน้ำในต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600

ภาพประกอบภาคผนวกที่ 3 การทดลองศึกษาสภาวะน้ำท่วมขังในต้นกล้ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600