



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาต้นแบบเครื่องมือสแกนรากพืชเพื่อประเมินการเจริญเติบโตของรากยางพารา
Development of a Root Scanner Prototype for the Assessment of Rubber
(*Hevea brasiliensis*) Root Growth

คณะนักวิจัย

รศ.ดร. สายัณห์ สดุดี
นายสัตยา บุญรัตน์ชู
ดร. ลดาวัลย์ เลิศเลอวงศ์

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ประจำปีงบประมาณ 2555

ชื่อโครงการ การพัฒนาต้นแบบเครื่องมือสแกนรากพืชเพื่อประเมินการเจริญเติบโตของราก
ยางพารา

Development of a Root Scanner Prototype for the Assessment of
Rubber (*Hevea brasiliensis*) Root Growth

คณะนักวิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ นายสายัณห์ นามสกุล สดุดี สัดส่วนที่ทำการวิจัย 40 %

ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
หาดใหญ่ สงขลา 90112 โทรศัพท์: (074) 286150 โทรสาร: (074) 212823

อิเล็กทรอนิกส์เมลล์ : sayan.s@psu.ac.th

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

1. ชื่อ นายสัตยา บุญรัตน์ชู สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 40%

ฝ่ายซ่อมบำรุงรักษาและพัฒนาเครื่องมือศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ สงขลา 90112

โทรศัพท์ 074-286908

อิเล็กทรอนิกส์เมลล์ : sathaya.b@psu.ac.th
2. ชื่อ นางสาวดาววัลย์ นามสกุล เลิศเลอวงศ์ สัดส่วนที่ทำการวิจัย 20 %

ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
หาดใหญ่ สงขลา 90112 โทรศัพท์: (074) 286145 โทรสาร: (074) 212823

อิเล็กทรอนิกส์เมลล์ : ladawan.l@psu.ac.th

คำนำ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศไทยที่มีศักยภาพในการผลิต และส่งออกเป็นอันดับ 1 ของโลก มีการส่งออกยาง และผลิตภัณฑ์จากยางใน ปี 2555 มีมูลค่าสูงถึง 6.4 แสนล้านบาท ซึ่งพื้นที่ผลิตโดยส่วนใหญ่อยู่ทางภาคใต้ของประเทศไทย มีพื้นที่ปลูกประมาณ 11 ล้านไร่ (สถาบันวิจัยยาง, 2556) แต่ในปัจจุบันพบว่าการปลูกยางพาราในพื้นที่ปลูกยางเดิมนั้น เกษตรกรเลือกใช้พันธุ์ยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในการปลูก แต่ต้นตอ (stock) ที่นำมาใช้เป็นวัสดุปลูกนั้นไม่ได้เพาะเมล็ดจากยางพันธุ์ดีที่มีความต้านทานต่อโรคทางราก ดังนั้นเมื่อเกษตรกรนำต้นกล้ายางเหล่านั้นไปปลูกยังแหล่งปลูกยางเดิมหรือพื้นที่ที่มีการระบาดของโรคทางรากจึงพบการเข้าทำลายของโรค โดยเฉพาะโรครากขาว (white root disease) ซึ่งเกิดจากเชื้อ *Rigidoporus microporus* พบการระบาดในหลายพื้นที่ของภาคใต้ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญต่อการปลูกสร้างสวนยางพาราในภาคใต้ และพบการระบาดมากในช่วงฤดูฝน โรคจะเข้าทำลายตั้งแต่อายุ 1 ปีหลังปลูก และในต้นที่เริ่มถูกทำลายพบว่าเชื้อเข้าทำลายรากก่อนจึงส่งผลให้การเจริญเติบโตของรากลดลงในระยะแรก และเมื่ออาการรุนแรงมากขึ้นพบว่าส่งผลให้การเจริญเติบโตทางลำต้นผิดปกติ ใบยางร่วง จนกระทั่งตายในที่สุด ซึ่งเป็นระยะที่ไม่สามารถควบคุมการระบาดของโรคได้ (สถาบันวิจัยยาง, 2551) แนวทางการศึกษาเกี่ยวกับการเจริญเติบโตของรากจึงมีประโยชน์อย่างมากในการวินิจฉัยระยะแรกเพื่อสามารถหาแนวทางป้องกันการระบาดได้ แต่การศึกษากการเจริญเติบโตของรากจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของรากในดินได้อย่างต่อเนื่อง โดยเทคนิคที่สามารถใช้ศึกษา คือ เทคนิคมินิโรไซตรอนซึ่งมีประสิทธิภาพในการประเมินการเจริญเติบโต และติดตามการเปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่อง และเป็นวิธีที่ไม่ต้องทำลายส่วนของพืชที่ศึกษา (non-destructive method) แต่ข้อจำกัดในการศึกษาโดยเทคนิคมินิโรไซตรอน คือ เครื่องมือที่ใช้มีราคาสูงมาก เพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาต้นแบบเครื่องมือสแกนรากเพื่อประเมินการเจริญเติบโตของรากยางพาราได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัยด้านยางพาราและพืชเศรษฐกิจอื่นๆ ในอนาคต

รศ.ดร. สายัณห์ สดุดี
หัวหน้าโครงการ
สิงหาคม 2556

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	ข
สารบัญ	ค
รายการภาพ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
บทคัดย่อ	ซ
1 บทนำ	1
2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
3. ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
4. ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	2
5. การตรวจเอกสาร	2
5.1 การเปลี่ยนแปลงของรากพืช	2
5.2 ความหมายของ Minirhizotron	3
5.3 การประยุกต์ใช้ Minirhizotron สำหรับการศึกษาพืช	3
5.4 องค์ประกอบของอุปกรณ์ Minirhizotron	4
5.5 ข้อควรปฏิบัติของเทคนิค Minirhizotron	5
5.6 ชนิดของอุปกรณ์ Minirhizotron และอุปกรณ์ทางการค้า	6
6. วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	6
6.1 วิจัยและพัฒนาเครื่องต้นแบบ	6
6.2 การทดสอบเครื่องมือ	7
7. ผลการทดลอง	8
7.1 การพัฒนาเครื่องมือต้นแบบ	8
7.2 ผลการทดสอบเครื่องมือ	13
7.3 การทดสอบภาคสนาม	15
8. วิเคราะห์ผลการทดลอง	19
8.1 การพัฒนาเครื่องมือต้นแบบ	19
8.2 การปรับแก้ไข	20
8.3 แนวทางการประยุกต์ใช้งานเพื่อเพิ่มผลผลิตยางพาราในอนาคต	20
9. สรุปผลการทดลอง	22
10. เอกสารอ้างอิง	23
11. ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป	25

รายการภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ภาพแสดงองค์ประกอบของชุดอุปกรณ์ Minirhizotron	5
ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของต้นแบบเครื่องมือสแกนรากพืช	7
ภาพที่ 3 การติดตั้งท่ออะคริลิกสำหรับ Minirhizotron ในสวนยางพารา	8
ภาพที่ 4 ลักษณะของเครื่องสแกนรากพืชต้นแบบ PSU-Root Scanner 1	9
ภาพที่ 5 ลักษณะมอเตอร์ขับเคลื่อนการทำงานของเครื่องสแกนรากพืชต้นแบบ PSU-Root Scanner 1	9
ภาพที่ 6 ลักษณะเซนเซอร์สแกนเนอร์และลูกกลิ้งของ PSU-Root Scanner 1	10
ภาพที่ 7 ลักษณะของเครื่องสแกนรากพืชต้นแบบ PSU-Root Scanner 1	10
ภาพที่ 8 ส่วนประกอบของชุดล้อระดับความลึกของ PSU-Root Scanner 1	11
ภาพที่ 9 ส่วนประกอบของชุดล้อระดับความลึกของ PSU-Root Scanner 1	11
ภาพที่ 10 ภาพเขียนแบบลายเส้นและรูป 3 มิติของชิ้นส่วนที่เป็นตัวจับหรือบอร์ดของสแกนเนอร์	12
ภาพที่ 11 ภาพเขียนแบบลายเส้นและรูป 3 มิติของชิ้นส่วนที่เป็นตัวประกอบมอเตอร์ขับเคลื่อน	12
ภาพที่ 12 ภาพเขียนแบบลายเส้นและรูป 3 มิติของชิ้นส่วนที่เป็นตัวประกอบล้อขับเคลื่อน	13
ภาพที่ 13 ผลการบันทึกการตรวจสอบความถูกต้องของการบันทึกภาพภายในท่อโปร่งใสด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1 ที่ยังไม่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์	14
ภาพที่ 14 ผลการบันทึกการตรวจสอบความถูกต้องของการบันทึกภาพภายในท่อโปร่งใสด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1 ที่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ด้วยการเน้นสีและความคมชัด	14
ภาพที่ 15 ผลการบันทึกการเจริญเติบโตของรากยางพาราอายุ 15 ปี ด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1 ที่ยังไม่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์	16
ภาพที่ 16 ผลการบันทึกการเจริญเติบโตของรากยางพาราอายุ 15 ปี ด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1 ที่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์แล้วด้วยการเน้นสีและความคมชัด	16
ภาพที่ 17 ผลการบันทึกการเจริญเติบโตของรากยางพาราอายุ 15 ปี ด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1 ที่ยังไม่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์	17
ภาพที่ 18 ผลการบันทึกการเจริญเติบโตของรากยางพาราอายุ 15 ปี ด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1 ที่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์แล้ว	18
ภาพที่ 19 ผลการบันทึกการเจริญเติบโตของรากยางพาราอายุ 15 ปี ด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1 ที่ระดับความลึก 43 - 64 ซม. จากผิวดิน ที่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์แล้ว	19

รายการภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงของดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (%DRC) และ น้ำหนักยางแห้ง ของยางพาราอายุ 15 ในพื้นที่ อ.หาดใหญ่ จ. สงขลา	21
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index: LAI) และน้ำหนักยางแห้ง ของยางพาราอายุ 15 ปี ในพื้นที่ อ.หาดใหญ่ จ. สงขลา	22

กิตติกรรมประกาศ

โครงการ การพัฒนาต้นแบบเครื่องมือสแกนรากพืชเพื่อประเมินการเจริญเติบโตของราก
ยางพารา ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ประเภททั่วไป ประจำปี
งบประมาณ 2555 โดยได้รับความร่วมมือจากภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ และศูนย์
เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ นอกจากนี้ใคร่ขอขอบคุณนายเจษฎา โสภารัตน์
นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ ที่ทุ่มเทในการทดสอบการวัดผลของ
เครื่องมือสแกนรากพืช ในสภาพสวนยางพารา คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

รศ.ดร. สายัณห์ สดุดี
หัวหน้าโครงการ
สิงหาคม 2556

การพัฒนาต้นแบบเครื่องมือสแกนรากพืชเพื่อประเมินการเจริญเติบโตของรากยางพารา

บทคัดย่อ

การศึกษาพัฒนาต้นแบบเครื่องมือสแกนรากพืช หรือ Minirhizotron Scanning System (PSU-Root Scanner 1) พัฒนาด้วยเซนเซอร์สแกนเนอร์แบบพกพาขนาดเล็ก ตัวเครื่องขึ้นรูปด้วยวัสดุพลาสติกวิศวกรรมหรือซูเปอร์ลิ่งขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก สั่งการให้เครื่องบันทึกภาพด้วยการหมุนสแกนภาพภายในท่ออะคริลิกโปร่งใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 103 มม. ผ่านการสั่งการด้วยรีโมทคอนโทรลแบบไร้สาย พบว่า เครื่องมื่อดังกล่าวสามารถบันทึกภาพภายในท่อโปร่งใสได้ภาพสีที่มีความกว้าง 20 ซม. และยาว 31.4 ซม. (2560 x 4019 พิกเซล) และไม่มีคามบิดเบี้ยวเชิงเรขาคณิต การทดสอบเครื่องมือต้นแบบในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม มีข้อบกพร่องที่ต้องปรับแก้ไข คือ ภาพที่บันทึกได้บางภาพยังขาดความคมชัด มีลักษณะฝ้าสีขาวปรากฏในภาพ และเครื่องมือต้นแบบค่อนข้างมีน้ำหนัก ทำให้กลไกการทำงานยังบกพร่อง เครื่องมือรุ่นใหม่ หรือ PSU-Root Scanner 2 จึงได้รับการออกแบบเพื่อปรับแก้ในส่วนดังกล่าว

คำสำคัญ: เครื่องบันทึกภาพรากพืช, สแกนเนอร์, รากพืช

Development of a Root Scanner Prototype for the Assessment of Rubber (*Hevea brasiliensis*) Root Growth

Abstract

Minirhizotron scanning system (PSU-Root Scanner 1) was developed with mini-portable scanner sensor. The cylinder body shape was lathed from Superlene Polyamide. Start to capture the root image by clockwise scanning and stop to work; the order is done by wireless remote control. The real color and non-geometric error of 20 x 31.4 cm² (2560 x 4019 pixels) image is derived from the sensor and recorded in micro-sd card, capacity 2 GB. However, un-clear and dim areas were appeared in the image when the laboratory and field test were done. And this version is still heavy. Thus, PSU-Root Scanner 2 has already designed to improve these defects, particularly make it lighter.

Keywords: Minirhizotron, Scanning system, Fine root

1. บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศไทยที่มีศักยภาพในการผลิต และส่งออกเป็นอันดับ 1 ของโลก มีการส่งออกยาง และผลิตภัณฑ์จากยางใน ปี 2555 มีมูลค่าสูงถึง 6.4 แสนล้านบาท ซึ่งพื้นที่ผลิตโดยส่วนใหญ่อยู่ทางภาคใต้ของประเทศไทย มีพื้นที่ปลูกประมาณ 11 ล้านไร่ (สถาบันวิจัยยาง, 2556) แต่ในปัจจุบันพบว่าการปลูกยางพาราในพื้นที่ปลูกยางเดิมนั้น เกษตรกรเลือกใช้พันธุ์ยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในการปลูก แต่ต้นตอ (stock) ที่นำมาใช้เป็นวัสดุปลูกนั้นไม่ได้เพาะเมล็ดจากยางพันธุ์ดีที่มีความต้านทานต่อโรคทางราก ดังนั้นเมื่อเกษตรกรนำต้นกล้ายางเหล่านั้นไปปลูกยังแหล่งปลูกยางเดิมหรือพื้นที่ที่มีการระบาดของโรคทางรากจึงพบการเข้าทำลายของโรค โดยเฉพาะโรครากขาว (white root disease) ซึ่งเกิดจากเชื้อ *Rigidoporus microporus* พบการระบาดในหลายพื้นที่ของภาคใต้ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญต่อการปลูกสร้างสวนยางพาราในภาคใต้ และพบการระบาดมากในช่วงฤดูฝน โรคจะเข้าทำลายตั้งแต่อายุ 1 ปีหลังปลูก และในต้นที่เริ่มถูกทำลายพบว่าเชื้อเข้าทำลายรากก่อนจึงส่งผลให้การเจริญเติบโตของรากลดลงในระยะแรก และเมื่ออาการรุนแรงมากขึ้นพบว่าส่งผลให้การเจริญเติบโตทางลำต้นผิดปกติ ใบยางร่วง จนกระทั่งตายในที่สุด ซึ่งเป็นระยะที่ไม่สามารถควบคุมการระบาดของโรคได้ (สถาบันวิจัยยาง, 2551) แนวทางการศึกษาเกี่ยวกับการเจริญเติบโตของรากจึงมีประโยชน์อย่างมากในการวินิจฉัยระยะแรกเพื่อสามารถหาแนวทางป้องกันการระบาดได้ แต่การศึกษาการเจริญเติบโตของรากจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของรากในดินได้อย่างต่อเนื่อง โดยเทคนิคที่สามารถใช้ศึกษา คือ เทคนิคมินิไรโซทรอนซึ่งมีประสิทธิภาพในการประเมินการเจริญเติบโต และติดตามการเปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่อง และเป็นวิธีที่ไม่ต้องทำลายส่วนของพืชที่ศึกษา (non-destructive method) แต่ข้อจำกัดในการศึกษาโดยเทคนิคมินิไรโซทรอน คือ เครื่องมือที่ใช้มีราคาสูงมาก เพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาต้นแบบเครื่องมือสแกนรากเพื่อประเมินการเจริญเติบโตของรากยางพาราได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัยด้านยางพาราและพืชเศรษฐกิจอื่นๆ ในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาต้นแบบเครื่องมือ สำหรับสแกนรากพืชเพื่อประเมินการเจริญเติบโตของรากยางพาราได้รวดเร็วอย่างต่อเนื่อง และสามารถใช้งานได้สะดวก เป็นเครื่องมือที่เคลื่อนย้ายได้ในสภาพสวนยางพารา มีต้นทุนการผลิตต่ำ

2. เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีภายในประเทศ เพราะปัจจุบันเครื่องมือดังกล่าวต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงมาก (ข้อมูลจากบริษัทไทยวิศกรจำกัด กรุงเทพฯ ซึ่งเป็นตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทย ได้แจ้งว่าราคาในปี พ.ศ. 2554 ราคาเครื่องละ 892,380 บาท)

3. ขอบเขตของโครงการวิจัย

เป็นการสร้างต้นเครื่องมือดังกล่าวที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- เป็นเครื่องมือที่ใช้งานได้ง่ายไม่ซับซ้อน น้ำหนักเบาสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกในสภาพสวน
- สามารถทำงานได้ต่อเนื่องยาวนาน ต่อการประจุไฟหนึ่งครั้ง
- บันทึกภาพโดยการประเมินความถูกต้อง ด้วยการวัดความยาวรากที่ได้จากวิธีการเจาะดิน
- มีราคาถูก

4. ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

กรอบแนวความคิดของการพัฒนาเครื่องสแกนราก เป็นการนำภาพรากพืช (root image) ที่ได้จากการบันทึกภาพผ่านท่อโพร่งใส (acrylic tube) โดยการใส่เครื่องสแกนเนอร์ภายในท่อโพร่งใสที่ถูกฝังภายในดินบริเวณระบบรากของยางพาราทำมุม 45 องศากับแนวระดับ จากนั้นชุดมอเตอร์ควบคุมจะทำงานบังคับให้เครื่องสแกนเนอร์ที่อยู่ภายในท่อสแกนภาพรากยางพาราที่ความลึกทุกๆ 20 เซนติเมตร จากผิวดินจนกระทั่งถึงความลึก 100 เซนติเมตร จากนั้นนำภาพที่สแกนได้ไปประเมินจำนวนและความยาวรากโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ Rootfly ซึ่งหน่วยความยาวรากที่ได้คือ ซม./ซม.² นอกจากนี้ภาพที่ได้สามารถจำแนกรากที่ตายออกจากรากที่ยังมีชีวิตอยู่ด้วยการสังเกตสีของรากเพื่อประเมินพลวัตของการเจริญเติบโตของราก (dynamics of root growth)

5. การตรวจเอกสาร

5.1 การเปลี่ยนแปลงของรากพืช

กระบวนการเปลี่ยนแปลงของรากพืชเกิดขึ้นใต้ดินนั้นเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญต่อการเกิดขึ้นของวัฏจักรในดินโดยเฉพาะส่วนของรากพืชขนาดเล็ก (<2 มิลลิเมตร) ซึ่งมีผลต่อการหมุนเวียนธาตุอาหาร และอินทรีย์วัตถุในดิน (McClougherty *et al.*, 1982; Fogel, 1991) ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของ

ระบบรากพืชเป็นกลไกที่ค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง จึงทำให้ความเข้าใจในด้านการเปลี่ยนแปลงที่เป็นพลวัตรของระบบรากพืชยังมีข้อมูลเพียงเล็กน้อย (Hendrick and Pregitzer *et al.*, 1996) โดยการตอบสนองของรากพืชอาจเกิดจากปัจจัยภายใน (Joslin *et al.*, 2001) และปัจจัยภายนอกที่ควบคุม เช่น อุณหภูมิ แสง และความเป็นประโยชน์ในดิน (Cote *et al.*, 1998) การเจริญเติบโตของรากพืชโดยทั่วไปพบว่ามีอัตราการกระจายตัวในดินชั้นบนมากกว่าในดินชั้นล่าง และพบว่าการกระจายตัวของรากพืชขนาดเล็กมีปริมาณลดลงในดินที่ระดับความลึกมากขึ้น (Persson, 1983; Joslin and Handerson, 1987; Nabkiar, 1983; Burke and Raynal, 1994) ทั้งนี้อาจมีปัจจัยด้านอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องทำให้พบรากพืชในดินที่ระดับความลึกมากขึ้นพบได้น้อยลง เช่น สัดส่วนของดินร่วน และดินเหนียว ซึ่งมีผลต่อโครงสร้าง ความหนาแน่นดิน ความอุดมสมบูรณ์ของดิน ปริมาณธาตุอาหารในดิน และรวมถึงอากาศที่อยู่ภายในดินที่มีปริมาณน้อยเป็นปัจจัยที่จำกัดการกระจายตัวของรากพืชในดินที่ระดับความลึกมากขึ้น นอกจากนี้ในพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศแห้งแล้งในช่วงฤดูร้อน พบว่าความเป็นประโยชน์ของน้ำในดินชั้นบนมีปริมาณน้อยกว่าในดินชั้นล่าง (Canadell *et al.*, 1999) จากปัจจัยดังกล่าวอาจเป็นข้อจำกัดการเจริญเติบโตของรากพืชในดินชั้นบน ถึงแม้ว่าในดินชั้นบนจะมีปริมาณธาตุอาหารมากกว่าในดินชั้นล่างก็ตาม

5.2 ความหมายของ Minirhizotron

การศึกษารากของพืชที่เป็นวิธีการศึกษาโดยตรง เช่น การเก็บตัวอย่างดินที่มีรากของพืช การขุดรากของพืชทั้งต้น หรือการเปิดหน้าดินบางส่วน มักเป็นวิธีการที่ต้องทำลายรากของพืช ดังนั้นจึงมีการคิดค้นวิธีการศึกษารากของพืชที่ยังคงเป็นวิธีการศึกษาโดยตรง แต่ไม่เป็นการทำลายรากของพืช และสามารถทำซ้ำได้หลายๆ ครั้ง วิธีการหนึ่งที่ได้รับคามนิยม คือ เทคนิค Minirhizotron โดยวิธีการดังกล่าวเป็นการบันทึกภาพของรากพืชผ่านท่อโปร่งใสที่ฝังลงไปใต้ดิน ด้วยกล้องบันทึกภาพขนาดเล็ก ซึ่งสามารถใช้ในการศึกษาได้ทั้งการสร้างรากใหม่และการตายของราก จุดเด่นของเทคนิค Minirhizotron คือสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรากที่สนใจได้จำเพาะมากขึ้น ขึ้นอยู่กับความถี่ของการบันทึกภาพ โดยที่ไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงของรากพืช (Ephrath *et al.*, 1999; Johnson *et al.*, 2001) การศึกษารากพืชด้วยเทคนิค Minirhizotron สามารถศึกษาได้ทั้งจำนวนราก ความยาว พื้นที่ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก นอกจากนี้เทคนิค Minirhizotron สามารถประยุกต์ใช้ศึกษาได้ทั้งการเจริญเติบโต การตายของรากพืช และการเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาของรากพืช (root dynamics) (Hendrick and Pregitzer, 1996; Majdi, 1996) รวมทั้งสามารถศึกษาค่าความหนาแน่นความยาวของราก (root length density; RLD) หรือค่าความยาวของรากต่อปริมาตรของดิน ($m\ m^{-3}$) ซึ่งตัวแปรที่มีความสำคัญในการศึกษาการกระจายและการดูดน้ำของรากของราก (Ephrath *et al.*, 1999)

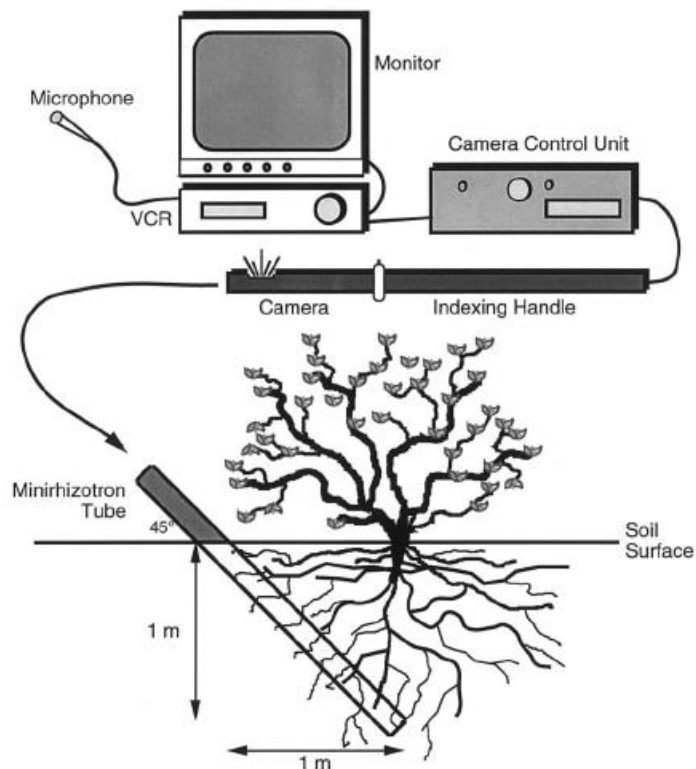
5.3 การประยุกต์ใช้ Minirhizotron สำหรับการศึกษาพืช

การศึกษารากของ *Quercus ilex* L. ด้วยเทคนิค Minirhizotron พบว่า ความหนาแน่นของรากฝอยลดลงตามระดับความลึกของดินที่เพิ่มขึ้น และมีความหนาแน่นสูงสุดบริเวณใกล้ผิวดิน (López *et al.*, 2001) การศึกษาด้วยเทคนิค Minirhizotron ใน *Acer saccharum*, *Liquidambar styraciflua*, *Pinus*

elliottii, *Picea glauca*, *Salix* spp., *Populus tremuloides* พบว่า จำนวนรากที่ได้จากเทคนิค Minirhizotron สามารถใช้ในการประมาณความยาวของรากได้ (Crocker *et al.*, 2003) หลายการศึกษาพยายามศึกษาเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ Minirhizotron และค่า RLD ที่ได้จากภาคสนาม ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องทำลายรากของพืช เช่น ในรายงานของ Parker และคณะ (1991) ได้ศึกษาเปรียบเทียบค่า RLD ที่ได้จากวิธีการเก็บตัวอย่างดิน การใช้วิธีการนับรากจากการเปิดช่องดินในเขตราก และการใช้เทคนิค Minirhizotron ด้วยการใส่แท่งแก้วโปร่งใสที่ฝังเอียง 45 องศา ศึกษาการรากของมันฝรั่ง ค่าจากเทคนิค Minirhizotron ให้ค่าประมาณที่แม่นยำในระดับความลึกที่ต่ำกว่า 30 เซนติเมตรจากผิวดิน ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือขึ้นมา มีค่าความสัมพันธ์ที่ต่ำ คณะที่วิจัยสรุปว่าเทคนิค Minirhizotron มีความสามารถในการประมาณอัตราการเจริญเติบโตของรากได้ แต่อาจมีความแม่นยำต่ำหากใช้ประมาณค่า RLD บริเวณใกล้ผิวดิน ซึ่งในการศึกษาของ Samson และ Sinclair (1994) ในศึกษากับข้าวโพดก็ให้ผลที่สอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามในการสรุปของ Ephrath และคณะ (1999) รายงานว่าการใช้เทคนิค Minirhizotron ศึกษาการรากของพืชตระกูลกระถิน (*Acacia saligna*) และข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) สามารถใช้ประมาณค่า RLD ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงที่ได้จากวิธีการเก็บตัวอย่างดิน และไม่มี ความแตกต่างระหว่างการฝังท่อเอียง 45 องศา และการฝังในแนวตั้ง

5.4 องค์ประกอบของอุปกรณ์ Minirhizotron

องค์ประกอบของอุปกรณ์ Minirhizotron ในระบบดั้งเดิมประกอบด้วย กล้องขนาดเล็กที่ใช้บันทึก ภาพ ท่อโปร่งใสที่ฝังอยู่ในดิน ชุดอุปกรณ์ควบคุม ได้แก่ หน้าจอมอนิเตอร์ อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของกล้อง และไมโครโฟนที่ใช้บอกตำแหน่งของการบันทึกภาพ (ภาพที่ 1) ท่อโปร่งใสสำหรับใช้ฝังในดินจำเป็นต้องปิดปลายด้านล่าง ป้องกันไม่ให้น้ำหรือความชื้นซึมเข้ามาภายในท่อ และส่วนปลายเปิดที่อยู่เหนือผิวดินต้องป้องกันแสงไม่ให้เข้าไปในท่อ ซึ่งอาจมีผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของราก ในขั้นตอนการติดตั้งต้องระมัดระวังไม่ให้มีผลกระทบกระเทือนรากให้มากที่สุด การอัดแน่นของดินบริเวณท่ออาจส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของราก



ภาพที่ 1 ภาพแสดงองค์ประกอบของชุดอุปกรณ์ Minirhizotron ที่ประกอบด้วย กล้องขนาดเล็กที่ใช้บันทึกภาพ ท่อโพร่งที่ฝังอยู่ในดิน ชุดอุปกรณ์ควบคุม ได้แก่ หน้าจอมอนิเตอร์ อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของกล้อง และไมโครโฟนที่ใช้บอกตำแหน่งของการบันทึกภาพ (ที่มา: Johnson และ คณะ, 2001)

5.5 ข้อควรปฏิบัติของเทคนิค Minirhizotron

เทคนิค Minirhizotron เป็นวิธีการศึกษาติดตามรากขนาดเล็กของพืช ที่ไม่ทำลายรากของพืชและสามารถศึกษาซ้ำได้ในจุดเดิม แต่ก็มีความเสี่ยงในการใช้งาน ซึ่งอาจเกิดได้จากขั้นตอนการฝังท่อลงในดิน การฝังท่อจึงควรมีความมั่นใจว่าท่อกับดินสัมผัสกันดี และไม่ทำให้ดินบริเวณรอบท่ออัดตัวกันแน่น การติดตั้งท่อโพร่งใส่ด้วยการขาดความระมัดระวัง อาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ Johnson และ คณะ (2001) แนะนำว่าหลังจากการฝังท่อลงในดินควรรอเป็นระยะเวลาประมาณ 6-12 เดือน ก่อนการเก็บข้อมูล เพื่อให้รากของพืชฟื้นคืนกลับมา และให้ธาตุอาหารกลับสู่สภาพใกล้เคียงก่อนหน้าการติดตั้ง การติดตามการเปลี่ยนแปลงของรากพืช เช่น การเจริญเติบโต การตายและเกิดใหม่ ของราก ก็ต้องมีความมั่นใจว่าท่อที่ฝังจะไม่มีเคลื่อนที่ ส่วนความถี่ของการบันทึกภาพขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ศึกษาและอุปกรณ์ที่ใช้ อย่างไรก็ตามระยะเวลาที่ยาวนานตั้งแต่ 8 สัปดาห์หรือมากกว่านั้น อาจทำให้ค่าประมาณการเปลี่ยนแปลงของรากที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง เนื่องจากในช่วงระยะเวลาที่ยาวนานมีความเป็นไปได้ที่รากของพืชจะงอกใหม่และตายไป ทำให้มีภาพบางส่วนที่ไม่ได้รับการบันทึกในช่วงระยะเวลาดังกล่าว โดยที่ระยะเวลาประมาณ 2 สัปดาห์หรือน้อยกว่านั้น เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการศึกษา

รากของพืช และทำให้การประมาณแม่นยำขึ้น นอกจากนี้การเลือกวิเคราะห์ภาพเฉพาะบางเฟรมในหนึ่งท่อ ก็เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการลดปัญหาจำนวนท่อที่ใช้ในการทดลอง และจำนวนภาพที่ต้องวิเคราะห์ ดังนั้นการวิเคราะห์ภาพเพียงบางภาพในหนึ่งท่อ จึงช่วยลดความแปรปรวนอันเนื่องมาจากการบันทึกภาพ และพึงทราบว่าความยาวของรากมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าจำนวนของราก

5.6 ชนิดของอุปกรณ์ Minirhizotron และอุปกรณ์ทางการค้า

นอกจากอุปกรณ์ Minirhizotron ที่เป็นกล่องบันทึกภาพขนาดเล็กแล้ว ยังมีเครื่องมือชนิดใหม่ที่เพิ่งได้รับการพัฒนาโดยบริษัท CID Bio-Science ของสหรัฐอเมริกา เรียกว่าเครื่อง CI-600 Digital Root Imager (CID Inc., USA) สามารถบันทึกภาพของรากพืชภายในท่อโปร่งใสได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภาพที่ได้มีความคมชัดสูง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานสะดวกพกพาง่าย ไม่ต้องการขั้นตอนยุ่งยากในการบันทึกภาพ โดยหลักการทำงานจะแตกต่างจากอุปกรณ์ Minirhizotron รุ่นเก่า เนื่องจากอุปกรณ์รุ่นใหม่จะเป็นการกวาดสแกนภาพภายในท่อโปร่งใส ด้วยเซนเซอร์ของเครื่องสแกนเนอร์ แตกต่างจากอุปกรณ์รุ่นเก่าที่ใช้การถ่ายภาพนิ่งหรือภาพวิดีโอด้วยกล้องบันทึกภาพขนาดเล็ก ทำให้ภาพที่ได้จากอุปกรณ์ CI-600 Digital Root Imager มีขนาดที่ใหญ่กว่าครอบคลุมพื้นที่ต่อครั้งการจับภาพได้มากกว่า และมีความบิดเบี้ยวของภาพเชิงเรขาคณิตน้อยกว่าหรือแทบไม่มี

อย่างไรก็ตามทั้งอุปกรณ์ Minirhizotron แบบกล่อง และ CI-600 Digital Root Imager ของบริษัทเอกชนเป็นเครื่องมือที่มีราคาค่อนข้างสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่อง CI-600 Digital Root Imager ซึ่งอาจมีราคาสูงถึง 6 แสนบาทต่อเครื่อง และเป็นราคาที่ยังไม่รวมโปรแกรมสำหรับการประมวลผลภาพ ซึ่งถูกจำหน่ายแยกลิขสิทธิ์เป็นอีกหนึ่งผลิตภัณฑ์

6. วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

วิธีการวิจัย

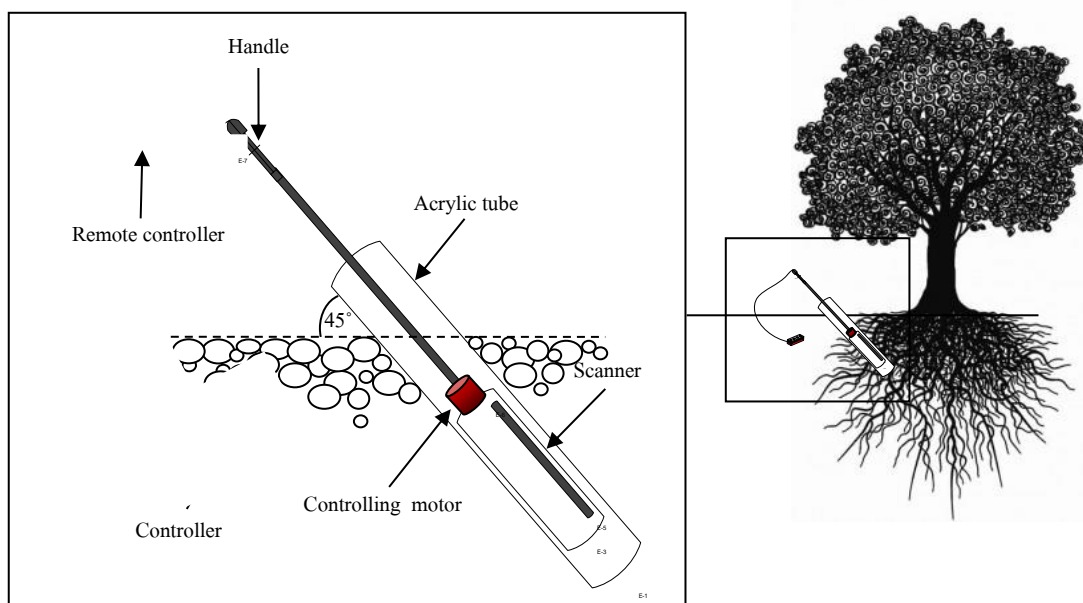
แบ่งออกเป็น 2 การทดลอง ดังนี้

6.1 วิจัยและพัฒนาเครื่องต้นแบบ

หลักการทำงานของเครื่องสแกนรากพืช

ต้นแบบเครื่องมือสแกนรากพืชจะถูกพัฒนาให้เป็นเครื่องมือแบบพกพา ที่สามารถหมุนรอบตัวเองได้ด้วยมอเตอร์ซึ่งต่อกับชุดควบคุม (controller) ภายนอก ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยเครื่องมือดังกล่าวจะทำการบันทึกภาพในช่วงเวลาเดียวกันกับตัวยัดสแกนเนอร์ (controlling-motor) หมุนรอบตัวเอง ดังนั้นเมื่อสอดอุปกรณ์บันทึกภาพหรือสแกนเนอร์ลงในท่ออะคริลิก ซึ่งฝังอยู่ในดินบริเวณเขตรากของต้นยางพาราโดยทำมุมเอียง 45 องศากับผิวดิน ภาพรากที่ติดกับท่อโปร่งใสจะถูกสแกนและบันทึกใน

นามสกุล .JPEG โดยภาพที่ได้สามารถวิเคราะห์และประเมินความยาวของรากได้ด้วยโปรแกรม Rootfly (Version 2.0.2, Clemson University, SC, USA.) โดยในขั้นตอนของการพัฒนาและปรับแก้ไขเครื่องต้นแบบได้ดำเนินการที่ฝ่ายซ่อมบำรุงรักษาและพัฒนาเครื่องมือศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของต้นแบบเครื่องมือสแกนรากพืช

6.2 การทดสอบเครื่องมือ

ดำเนินการวิจัยเพื่อการทดสอบที่ ต.ฉลุง อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ใช้ต้นยางอายุ 14 ปี และ ต.ทุ่งขม้น อ.นาหม่อม จ.สงขลา ใช้ต้นยางอายุ 7 ปี โดยติดตั้งท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ทน 3 มิลลิเมตร ยาว 100 เซนติเมตร ซึ่งท่ออะคริลิกแต่ละอันจะถูกสวมด้านปากท่อด้วยปลอกพีวีซีทึบแสงที่มีความยาว 25 เซนติเมตร (ภาพที่ 3) เพื่อป้องกันแสงเข้าไปรบกวนการเจริญเติบโตของราก ในแต่ละพื้นที่จะติดตั้งท่ออะคริลิกพื้นที่ละ 3 จุด ติดตั้งโดยใช้เครื่องเจาะดิน (soil auger) เจาะทำมุม 45 องศา กับแนวระดับบริเวณระบบรากของต้นยางพารา หลังจากติดตั้งท่อลงในดินแล้วปิดฝาท่อด้วยฝาปิดพีวีซีเพื่อป้องกันแสงแดดและน้ำฝน เก็บข้อมูลโดยสอดเครื่องสแกนรากลงในท่ออะคริลิกใส จากนั้นสแกนภาพรากของยางพาราทุกระดับความลึก 20 เซนติเมตร จนกระทั่งถึงระดับ 100 เซนติเมตร ขณะเดียวกันทำการเจาะดินห่างจากจุดฝังท่ออะคริลิกใสประมาณ 60 เซนติเมตร และนำคอลัมน์ (column) แต่ละชั้นดินทุกๆ 20 เซนติเมตร จากผิวดินจนถึง 100 เซนติเมตร ไปล้างรากเพื่อวัดความยาวราก จากนั้นหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรากที่วัดได้จากเครื่องต้นแบบ และความยาวรากที่ได้จากการเจาะดินเพื่อประเมินความแม่นยำของการวัด และบันทึกข้อมูลทุกเดือนเป็นระยะเวลา 6 เดือน



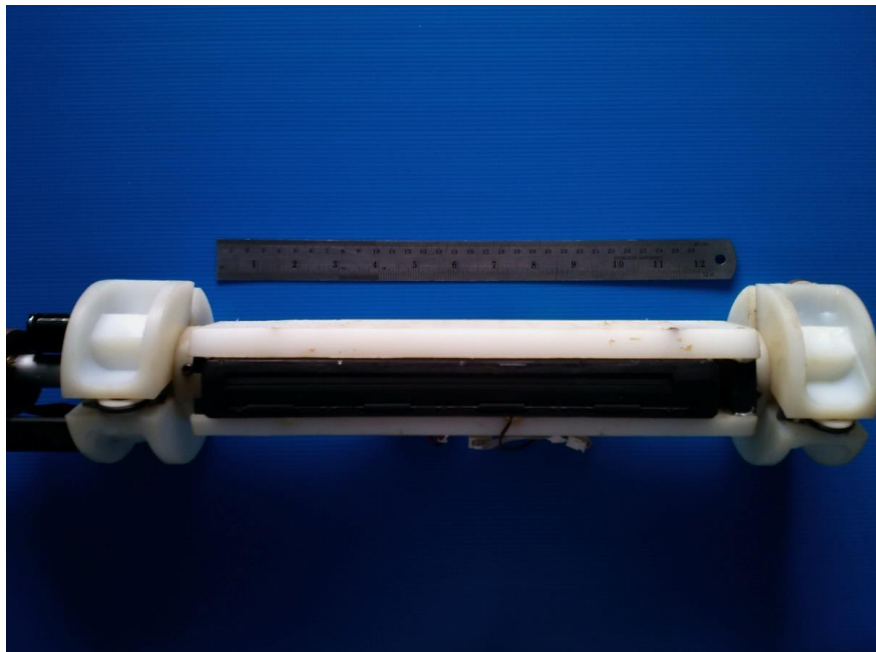
ภาพที่ 3 การติดตั้งท่ออะคริลิกสำหรับ Minirhizotron ในสวนยางพารา

7. ผลการทดลอง

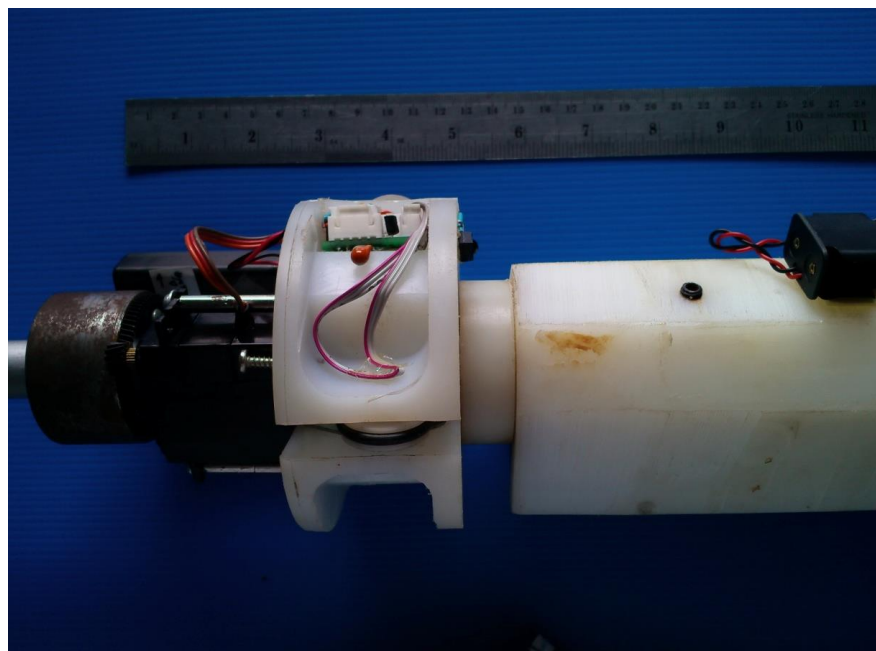
7.1 การพัฒนาเครื่องมือต้นแบบ

การศึกษการพัฒนาต้นแบบเครื่องมือสแกนรากพืชเพื่อประเมินการเจริญเติบโตของรากยางพาราในครั้งนี้ คณะวิจัยได้พัฒนาเครื่องต้นแบบขึ้นมา 2 รุ่น ได้แก่ PSU-Root Scanner 1 และ PSU-Root Scanner 2 โดยที่เครื่องมือรุ่น PSU-Root Scanner 1 เป็นเครื่องมือรุ่นแรกที่ได้ทำการออกแบบและประกอบสำเร็จ (ภาพที่ 4 และ 5) เครื่องมือรุ่นแรกที่ประดิษฐ์ขึ้นมาประกอบด้วยเซนเซอร์สแกนเนอร์แบบพกพาขนาดเล็ก ซึ่งประกอบอยู่ในบอร์ดที่กลึงขึ้นรูปจากพลาสติกซูเปอร์สทิน มีมอเตอร์ขับเคลื่อนการหมุนรอบตัวเองของเครื่องสแกน เพื่อบันทึกภาพรอบๆ ท่ออะคริลิก อยู่ที่ด้านบนของตัวเครื่อง ทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวเครื่องเป็นส่วนของตัวประกอบและล้อประกอบที่เคลื่อนที่ขึ้นลงภายในท่อ ขณะที่เครื่องสแกนเนอร์กำลังหมุนรอบตัวเองเพื่อบันทึกภาพ ส่วนประกอบทั้งสองจะหยุดนิ่งเป็นอิสระจากการเคลื่อนที่ของบอร์ดและเครื่องสแกน ระดับความลึกของการบันทึกภาพจะถูกกำหนดโดยการเลื่อนมือจับ (Handle) ของตัวเครื่องด้วยการใช้ชุดล้อระดับ ซึ่งประกอบด้วย นี้อตลือระดับ ชุดลูกปืนสนับสนุนการหมุน และฝาครอบ (ภาพที่ 6 8 และ 9) การควบคุมการหมุนและการบันทึกภาพจะทำงานผ่านการสั่งการด้วยรีโมทคอนโทรลแบบไร้สาย หลักการบันทึกภาพของเครื่องสแกนเนอร์ จำเป็นต้องให้ผิวด้านในของท่ออะคริลิกสัมผัสกับลูกกลิ้งของตัวเครื่องสแกนเนอร์ (ภาพที่ 6) เนื่องจากการหมุนของลูกกลิ้ง จะส่งสัญญาณให้เครื่องสแกนเนอร์เริ่มบันทึกภาพด้วยการสแกน การบันทึกภาพจึงดำเนินพร้อมการหมุนของตัวเครื่องสแกนเนอร์ หากลูกกลิ้งไม่สามารถสัมผัสกับผิวท่ออะคริลิกจะทำให้ไม่สามารถสั่งให้เครื่องบันทึกภาพได้ ดังนั้นส่วนประกอบที่สำคัญในการสั่ง

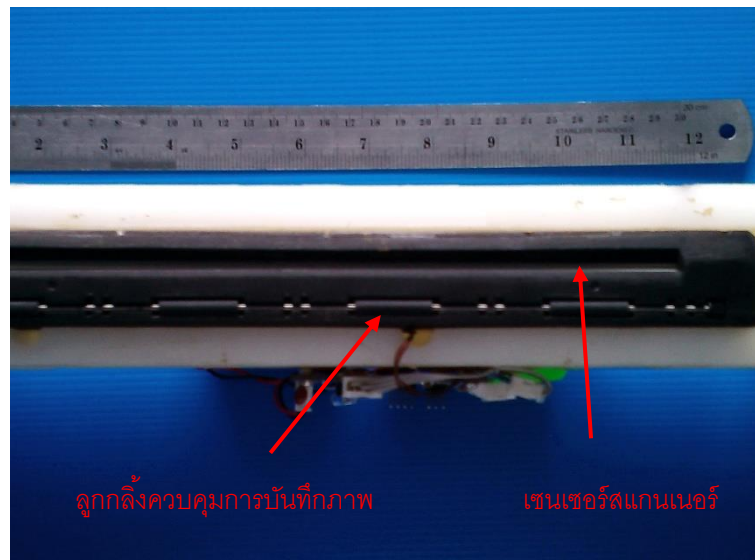
การให้เครื่องมือต้นแบบสามารถบันทึกภาพได้ คือ จังหวะความเร็วของการหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อน เครื่อง น้ำหนักของตัวเครื่องที่จะเป็นตัวหน่วงการทำงานของมอเตอร์ และการสัมผัสของลูกกลิ้งของเครื่องสแกน การหมุนครบหนึ่งรอบจะทำให้ได้ภาพที่มีขนาดความกว้าง 20 ซม. และยาว 31.4 ซม. (2560 x 4019 พิกเซล)



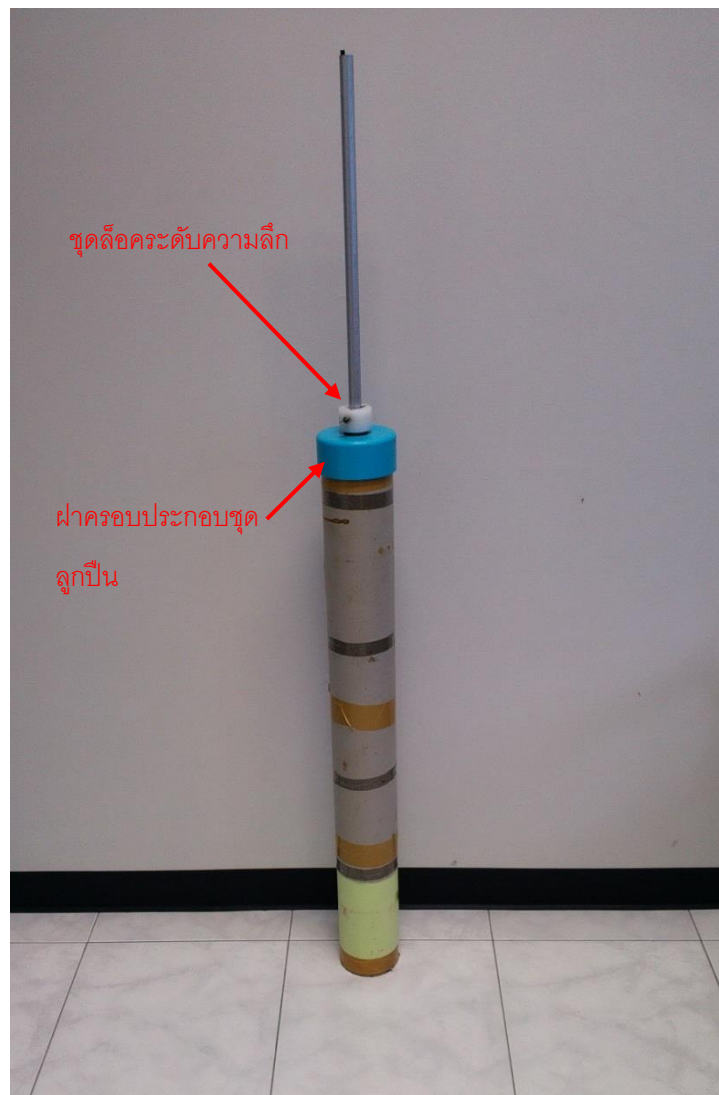
ภาพที่ 4 ลักษณะของเครื่องสแกนรากพืชต้นแบบ PSU-Root Scanner 1



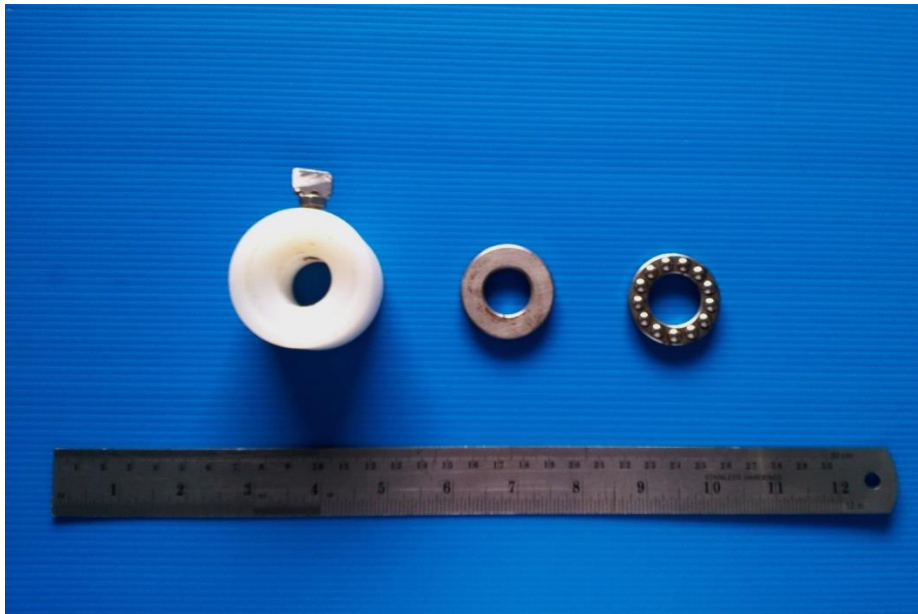
ภาพที่ 5 ลักษณะมอเตอร์ขับเคลื่อนการทำงานของเครื่องสแกนรากพืชต้นแบบ PSU-Root Scanner 1



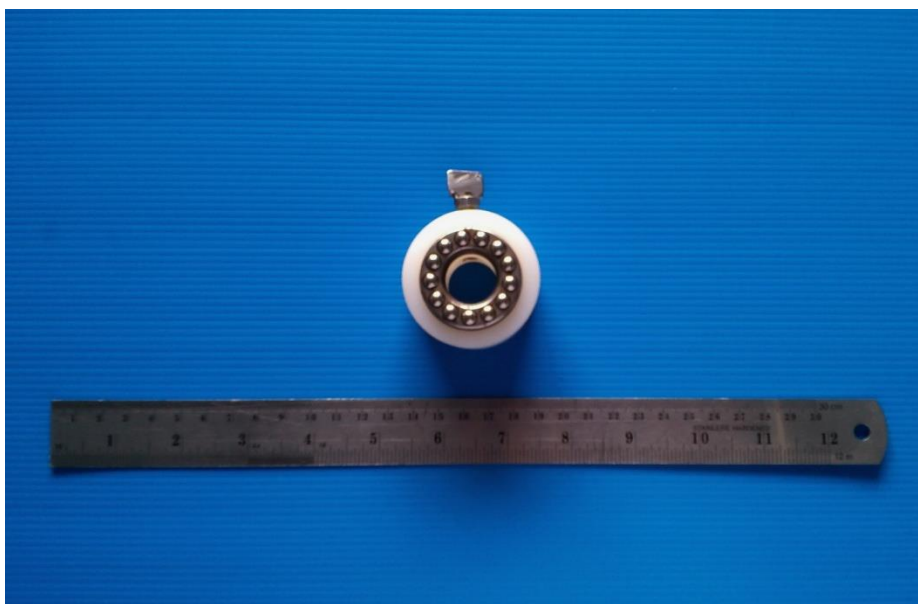
ภาพที่ 6 ลักษณะเซนเซอร์สแกนเนอร์และลูกกลิ้งของ PSU-Root Scanner 1



ภาพที่ 7 ลักษณะของเครื่องสแกนรากพืชต้นแบบ PSU-Root Scanner 1



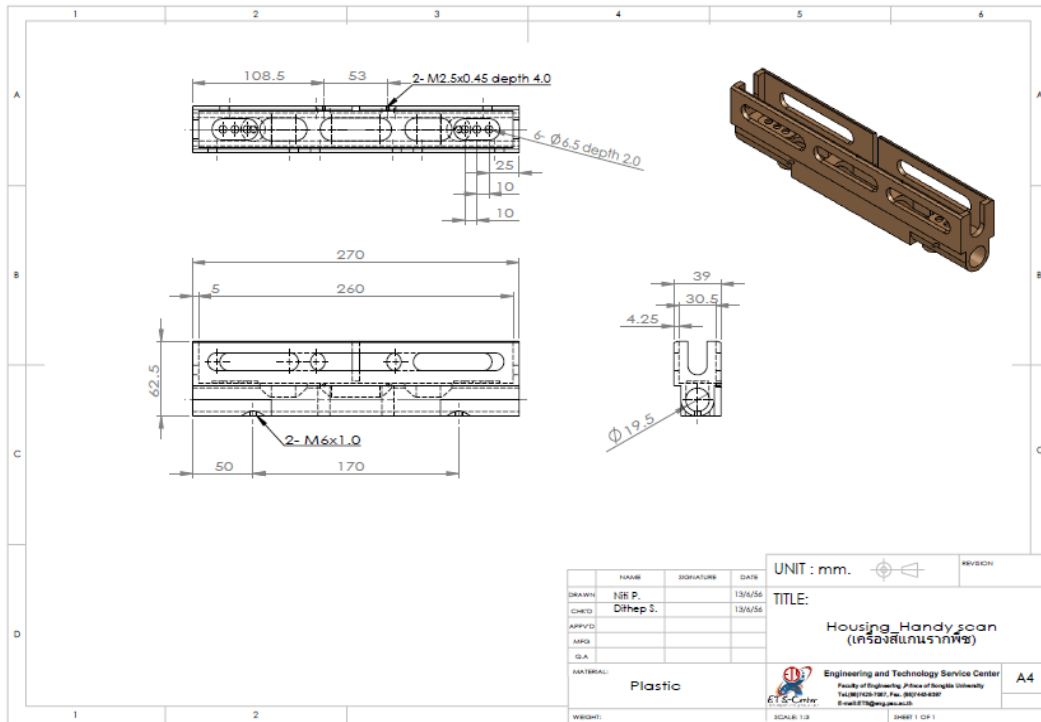
ภาพที่ 8 ส่วนประกอบของชุดล้อระดับความลึกของ PSU-Root Scanner 1



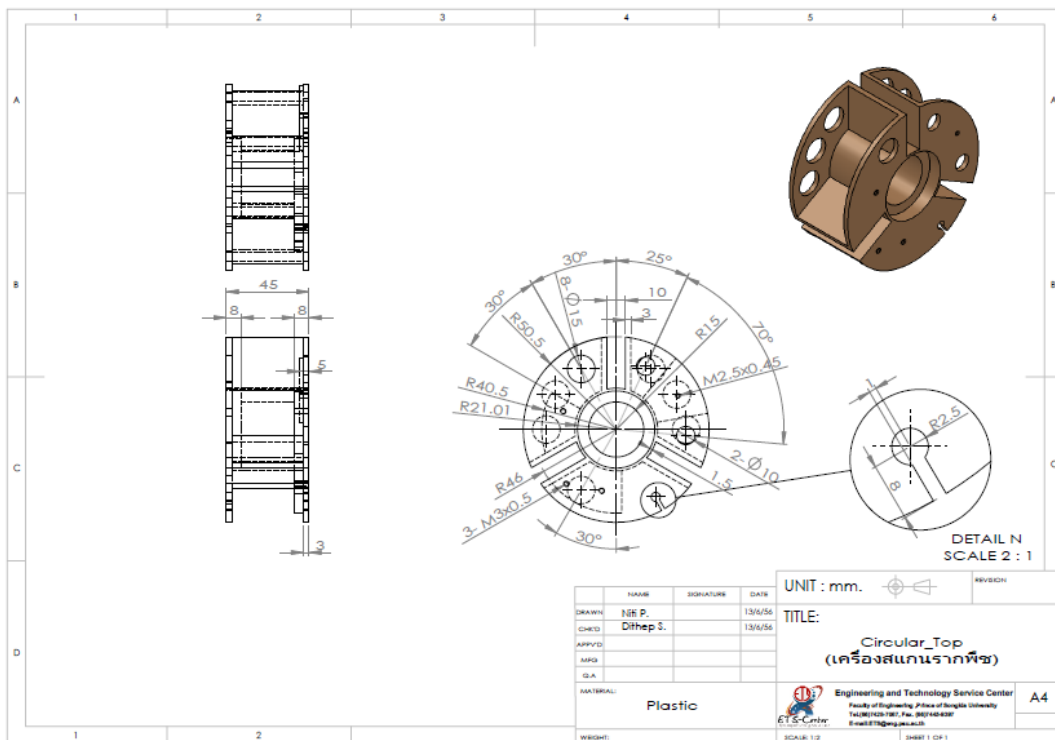
ภาพที่ 9 ส่วนประกอบของชุดล้อระดับความลึกของ PSU-Root Scanner 1

ทั้งนี้เครื่องมือต้นแบบ PSU-Root Scanner 2 เป็นการศึกษาที่อยู่ในขั้นตอนของการออกแบบ 3 มิติ เพื่อให้เครื่องมือมีลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานได้มากขึ้น และทำให้มีน้ำหนักลดลงจากเครื่องมือต้นแบบ PSU-Root Scanner 1 โดยเป็นการเขียนแบบ 3 มิติ (ภาพที่ 10 11 และ 12) เพื่อการขึ้นรูปด้วยวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ลดทอนส่วนที่ไม่จำเป็นออก และทำให้อุปกรณ์มีความทันสมัยกับการใช้งาน องค์ประกอบหลักของเครื่อง PSU-Root Scanner 2 ยังคงเหมือนกับเครื่อง PSU-Root Scanner 1 ในการดำเนินการหลังจากนี้จะเป็นการขึ้นรูปด้วยการฉีดพลาสติกด้วยเครื่องปริ้นเตอร์ 3 มิติ เพื่อทำเป็นวัสดุต้นแบบ ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ของมหาวิทยาลัยสงขลา-

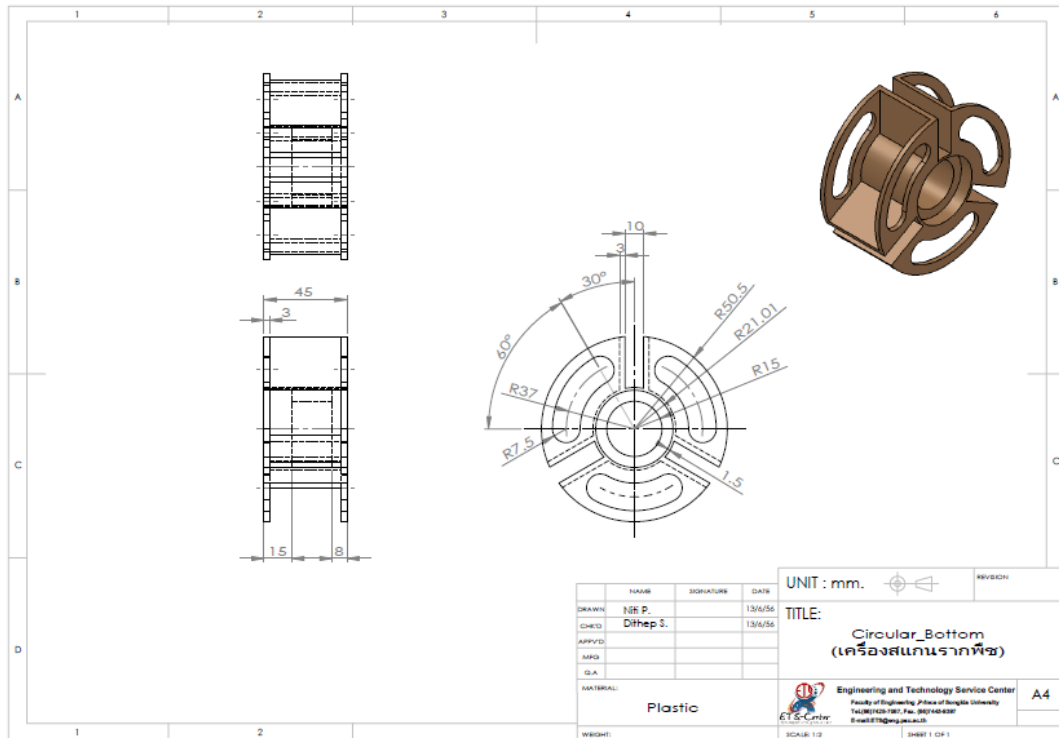
นครินทร์ และจะประกอบเป็นเครื่องต้นแบบ PSU-Root Scanner 2 เพื่อดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการและภาคสนามต่อไป



ภาพที่ 10 ภาพเขียนแบบลายเส้นและรูป 3 มิติของชิ้นส่วนที่เป็นตัวจับหรือบอร์ดี้ของสแกนเนอร์



ภาพที่ 11 ภาพเขียนแบบลายเส้นและรูป 3 มิติของชิ้นส่วนที่เป็นตัวประกอบมอเตอร์การขับเคลื่อน

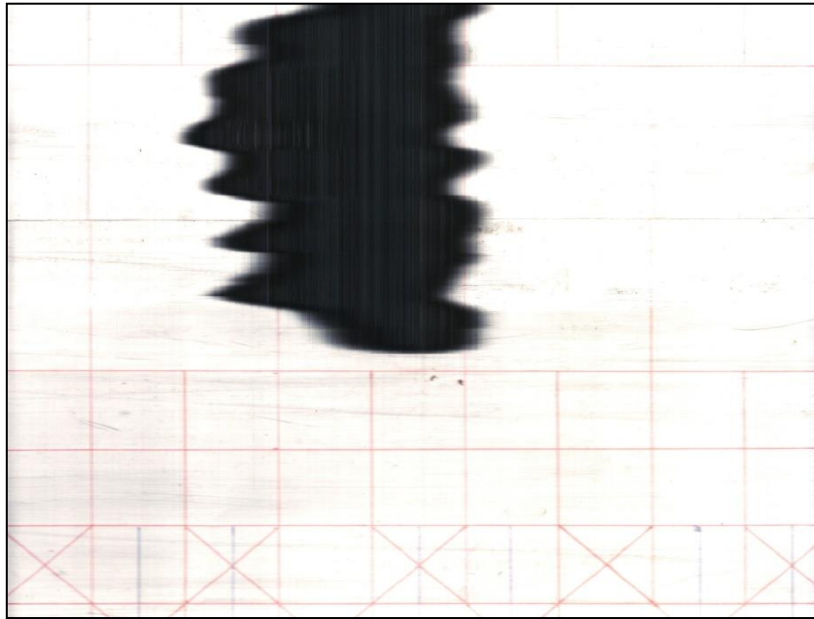


ภาพที่ 12 ภาพเขียนแบบลายเส้นและรูป 3 มิติของชิ้นส่วนที่เป็นตัวประกอบล้อขับเคลื่อน

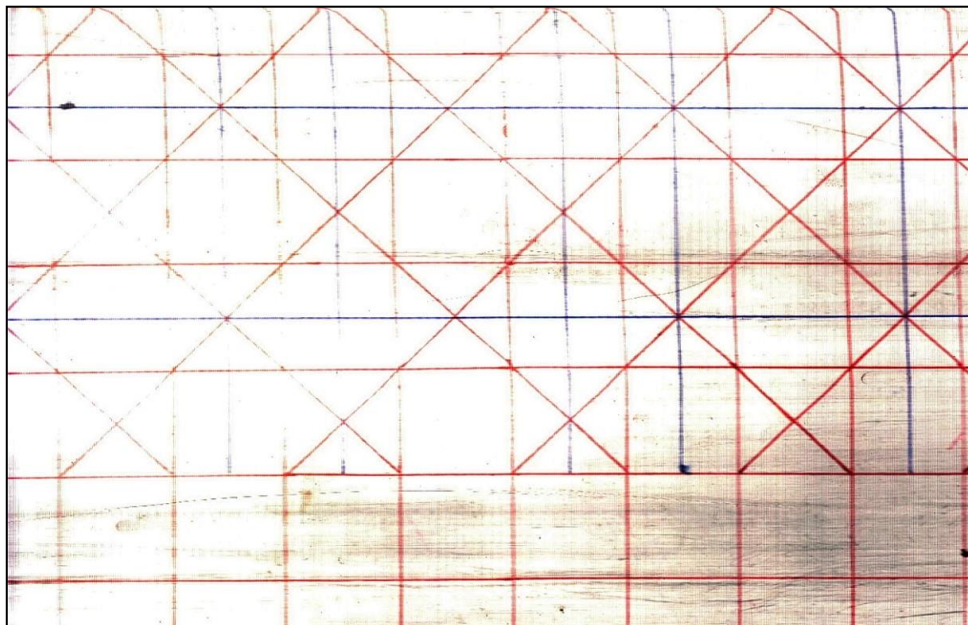
7.2 ผลการทดสอบเครื่องมือ

จากการนำเครื่องมือบันทึกภาพรากของพืชระบบสแกน PSU-Root Scanner 1 ไปทดสอบความถูกต้องของการบันทึกภาพภายในท่ออะคริลิก โดยการทดลองบันทึกภาพเส้นกริด (ภาพที่ 13 และ 14 ขนาดกริดเส้นสีแดงเท่ากับ 2.5 ซม x 2.5 ซม.) ที่ติดบริเวณผิวนอกของท่ออะคริลิก จำลองการบันทึกภาพรากของพืช พบว่า เครื่องมือต้นแบบสามารถบันทึกภาพได้ค่อนข้างชัดเจน และมีความแม่นยำไม่มีการบิดเบี้ยวเชิงเรขาคณิตของภาพ มีเฉพาะบริเวณขอบของภาพเพียงเล็กน้อยที่มีการบิดเบี้ยว ทั้งนี้ไม่มีผลกระทบต่อผลการแปลผลและวิเคราะห์ข้อมูล แต่อย่างไรก็ตามในการบันทึกภาพในบางครั้ง เครื่องสแกนเนอร์ไม่สามารถหมุนเพื่อบันทึกภาพภายในท่ออะคริลิกได้ครบรอบ เนื่องจากยังมีปัญหาที่กลไกขับเคลื่อนของเครื่องที่เกิดจากปัญหาเชิงเทคนิคของตัวเครื่อง เพราะเครื่องมือต้นแบบ PSU-Root Scanner 1 ประกอบจากวัสดุพลาสติกซูเปอร์ลีนกลิ้งขึ้นรูปซึ่งมีน้ำหนักค่อนข้างมาก ทำให้มอเตอร์ที่ขับเคลื่อนไม่สามารถขับให้เครื่องสแกนเนอร์หมุนได้ครบรอบ โดยเฉพาะจังหวะที่เครื่องหมุนไปถึงด้านท้องของท่อและกำลังจะหมุนกับสู่ด้านบนของท่อ ตัวเครื่องสแกนจะติดกับผิวของท่อไม่สามารถหมุนต่อได้ครบรอบ ประกอบกับท่ออะคริลิกที่ใช้ในการทดลองไม่ได้มีลักษณะกลมตลอดทั้งแนวท่อตามที่มองเห็นด้วยตาเปล่า เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปท่ออะคริลิกของโรงงานผู้ผลิต ไม่สามารถควบคุมท่อดังกล่าวให้มีลักษณะเท่ากันตลอดทั้งท่อได้ ดังนั้นในบางช่วงของความยาวท่อจะมีลักษณะบิดเบี้ยวเล็กน้อย ซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าต้องวัดด้วยคาลิเปอร์ (calipers) ทำให้เป็นอุปสรรคต่อกลไกการหมุนรอบตัวเองของ

เครื่องสแกนภายในท่ออะคริลิก นอกจากนี้ภาพที่ได้จากการบันทึกบางภาพยังมีการปรากฏลักษณะแถบสีดำบนภาพ



ภาพที่ 13 ผลการบันทึกการตรวจสอบความถูกต้องของการบันทึกภาพภายในท่อโปร่งใสด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1 ที่ยังไม่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ (ขนาดกริดเส้นสีแดงเท่ากับ 2.5 ซม. x 2.5 ซม.)



ภาพที่ 14 ผลการบันทึกการตรวจสอบความถูกต้องของการบันทึกภาพภายในท่อโปร่งใสด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1 ที่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ด้วยการเน้นสีและความคมชัด (ขนาดกริดสี่เหลี่ยมจัตุรัสเส้นสีแดงเท่ากับ 2.5 ซม. x 2.5 ซม.)

7.3 การทดสอบภาคสนาม

เมื่อนำเครื่องมือต้นแบบไปทดสอบบันทึกภาพในภาคสนาม ภายในสภาพสวนยางพาราอายุ 15 ปี พบว่า แม็กโครซ์การหมุนของเครื่องสแกนจะทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ แต่ก็สามารถบันทึกภาพของรากยางพาราได้บางส่วน ซึ่งภาพที่ได้ค่อนข้างมีความชัดเจน ปัญหาที่พบในการทดสอบภาคสนามคือ แม้ภาพที่บันทึกได้มีความชัดเจนค่อนข้างสูง แต่มีบางส่วนของภาพที่มีลักษณะเป็นฝ้าสีขาวทำให้มองเห็นภาพรากในบริเวณดังกล่าวได้ไม่ชัดเจน (ภาพที่ 15 และ 17) สาเหตุที่คาดว่าทำให้ภาพบริเวณดังกล่าวมีลักษณะเป็นฝ้า อาจเนื่องมาจากท่ออะคริลิกที่ใช้ทดสอบมีรอยขีดข่วนบริเวณผิวด้านใน และอาจมีสาเหตุจากกระบวนการฝังท่อ ที่เกิดช่องว่างระหว่างผิวท่อด้านนอกกับดินรอบๆ ท่อ ทำให้เกิดไอน้ำจับบริเวณรอบๆ ผิวด้านนอกของท่อ ทั้งนี้ฝ้าดังกล่าวสามารถทำให้ลดน้อยลงได้ ด้วยการปรับแก้คุณภาพของภาพที่บันทึกได้ด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ พบว่าหลังจากการปรับแก้ภาพด้วยซอฟต์แวร์ ทำให้คุณภาพของภาพดังกล่าวมีความคมชัดมากขึ้น และช่วยปรับการมองเห็นรากของยางพาราบริเวณที่เป็นฝ้าได้ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามแม้ว่าการปรับแต่งภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ จะทำให้ภาพมีความคมชัดมากขึ้น แต่ก็ทำให้สีของรากมีความคลาดเคลื่อนไปจากสีธรรมชาติที่บันทึกได้ และบางครั้งกลับทำให้แถบฝ้าสีขาวถูกเพิ่มความเข้มมากขึ้น (ภาพที่ 16 และ 19)



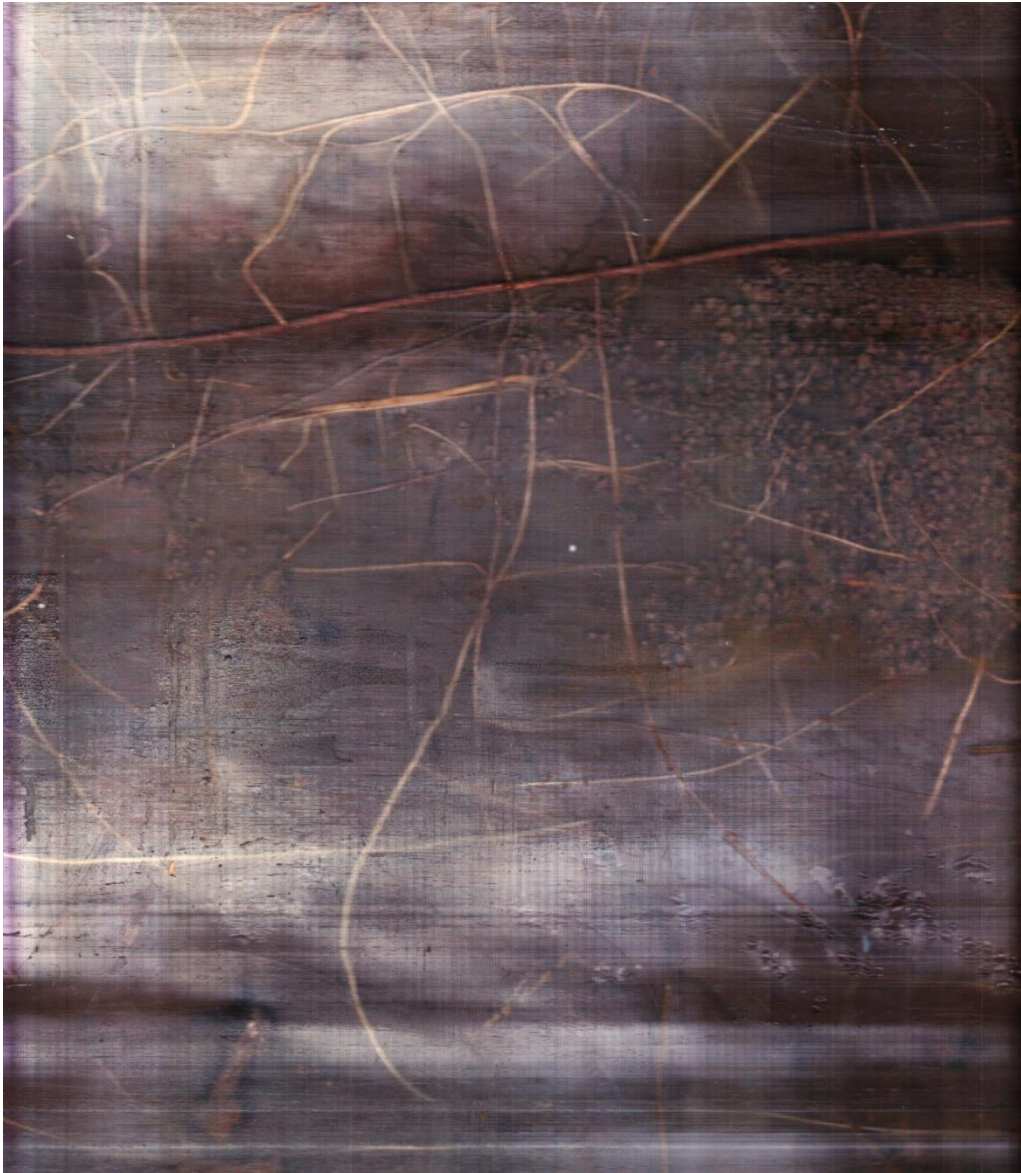
ภาพที่ 15 ผลการบันทึกการเจริญเติบโตของรากยางพาราอายุ 15 ปี ด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1 ที่ยังไม่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์



ภาพที่ 16 ผลการบันทึกการเจริญเติบโตของรากยางพาราอายุ 15 ปี ด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1 ที่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์แล้วด้วยการเน้นสีและความคมชัด



ภาพที่ 17 ผลการบันทึกการเจริญเติบโตของรากยางพาราอายุ 15 ปี ด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1
ที่ยังไม่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์



ภาพที่ 18 ผลการบันทึกการเจริญเติบโตของรากยางพาราอายุ 15 ปี ด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1
ที่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์แล้ว



ภาพที่ 19 ผลการบันทึกการเจริญเติบโตของรากยางพาราอายุ 15 ปี ด้วยเครื่อง PSU-Root Scanner 1 ที่ระดับความลึก 43 - 64 ซม. จากผิวดิน ที่ปรับคุณภาพของภาพด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์แล้ว

8. วิจัยผลการทดลอง

8.1 การพัฒนาเครื่องมือต้นแบบ

การศึกษาพัฒนาเครื่องมือต้นแบบสำหรับการสแกนรากพืช เพื่อประเมินการเจริญเติบโตของรากยางพารา ในครั้งนี้ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ คณะวิจัยได้พัฒนาเครื่องมือต้นแบบให้มีความสามารถใช้งานในภาคสนาม แต่อย่างไรก็ตามคุณภาพของภาพที่บันทึกได้ค่อนข้างต่ำ ภาพที่ได้ยังมีลักษณะเป็นแถบสีขาวปรากฏอยู่ในภาพ ซึ่งคาดว่าเกิดจากกระบวนการฝังท่อโปร่งใสในดิน ทำให้ดินไม่แนบสนิทกับผนังด้านนอกของท่อ และอาจเกิดจากกลไกการขับเคลื่อนของตัวสแกนเนอร์ยังมีการติดขัด ทำให้ความราบรื่นของการ

บันทึกภาพมีปัญหา ทำให้ความสามารถประเมินลักษณะของรากยังได้ไม่เต็มประสิทธิภาพเท่าที่ควร ขณะนี้คณะวิจัยได้ทำการเขียนแบบเพื่อปรับแก้ส่วนที่ยังบกพร่อง ด้วยการร่างแบบ 3 มิติ เพื่อการขึ้นรูปด้วยวัสดุที่มีน้ำหนักเบา และพยายามพัฒนากลไกการควบคุมการบันทึกภาพให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเครื่องมือต้นแบบที่ถูกพัฒนาขึ้น เป็นการประยุกต์ใช้เซนเซอร์เครื่องสแกนเนอร์แบบพกพาทางการค้า ซึ่งอาศัยการหมุนของลูกกลิ้งควบคุมการฉายแสงไปยังวัตถุเป้าหมายแล้วสะท้อนกลับมายังเซนเซอร์ ทั้งนี้เซนเซอร์ดังกล่าวมีข้อจำกัดของระยะการทำงาน โดยจะต้องแนบกับวัตถุเป้าหมายให้ใกล้ที่สุด ภาพที่ได้จึงจะมีความคมชัด แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดของการออกแบบกลไกควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวอุปกรณ์ต้องเคลื่อนที่กวาดภาพรอบๆ ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว และมีลักษณะผิวโค้ง ทำให้ระยะระหว่างเซนเซอร์และรากที่ประกอบอยู่ที่ผิวด้านนอกของท่อโปร่งใสยังมีระยะห่างค่อนข้างมาก ภาพที่ได้จึงยังมีความคมชัดน้อย อีกทั้งตัวประกอบหรือบอร์ดที่ประกอบเซนเซอร์ยังมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักค่อนข้างมาก ความสั่นไหวของการหมุนและการบันทึกภาพจึงยังคงมีปัญหา

นอกจากนี้ทุกครั้งที่นำเครื่องมือต้นแบบไปทดสอบเก็บข้อมูลภาคสนาม พบปัญหาและอุปสรรค คือ เมื่อทดสอบเครื่องมือไปได้ประมาณ 3 - 4 ภาพ มักจะประสบปัญหาการกลไกขับเคลื่อนของเครื่องสแกนเนอร์เกิดการติดขัด ทำให้ต้องนำกลับมาปรับแก้ในห้องปฏิบัติการ

8.2 การปรับแก้ไข

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ขณะนี้คณะวิจัยได้ทำการออกแบบเครื่องต้นแบบ PSU-Root Scanner 2 ซึ่งคาดว่าจะสามารถดำเนินการขึ้นรูปด้วยการฉีดพลาสติกที่มีน้ำหนักเบาด้วยเครื่องปริ้นเตอร์ 3 มิติ และจะได้ประกอบเป็นเครื่องมือต้นแบบ เพื่อการทดสอบในห้องปฏิบัติการและในภาคสนาม ต่อไปในอนาคต

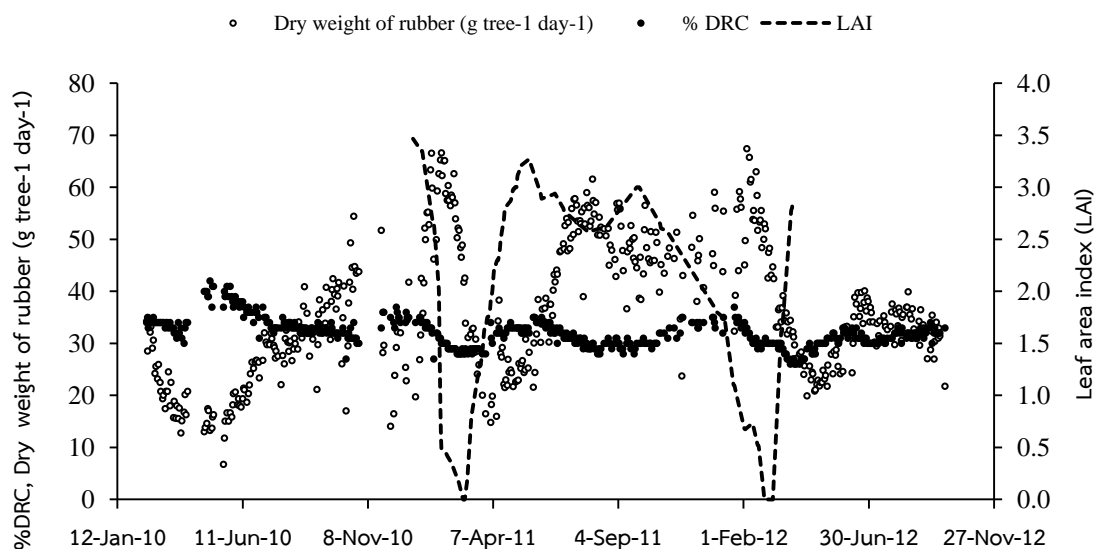
8.3 แนวทางการประยุกต์ใช้งานเพื่อเพิ่มผลผลิตยางพาราในอนาคต

อย่างไรก็ตาม แม้การศึกษาในครั้งนี้ จะดำเนินการได้เพียงการทดสอบและปรับแก้ไขเครื่องมือต้นแบบ แต่คณะวิจัยได้ทำการพัฒนาเครื่องมือต้นแบบได้ถึง 2 รุ่น นั่นคือ PSU-Root Scanner 1 และ PSU-Root Scanner 2 ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษาพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางพาราและปาล์มน้ำมัน รวมทั้งสามารถต่อยอดไปสู่การพัฒนาเป็นเครื่องมือทางการค้าได้ในอนาคต

จากการศึกษาโดยนักศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิตของภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ ทำการศึกษาติดตามการเปลี่ยนแปลงดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) และผลผลิตของยางพารา ได้แก่ ปริมาณน้ำยางสด เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (%DRC) และน้ำหนักเนื้อยางแห้ง ในระหว่างปี พ.ศ. 2553 ถึง 2555 (ภาพที่ 20) พบว่า ปริมาณน้ำยางสด และน้ำหนักเนื้อยางแห้ง มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของ LAI อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำยางสด และน้ำหนักเนื้อยางแห้ง จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของ LAI หลัง LAI เปลี่ยนแปลงไปแล้วประมาณ 42 วัน (ภาพที่ 21) นั่นหมายความว่า

ว่า LAI เป็นตัวแปรที่บ่งบอบสำคัญในการกำหนดปริมาณผลผลิตของยางล่องหน้า นอกจากนี้ พบว่า ยางพาราในพื้นที่ภาคใต้ตอนล่าง เช่น ในจังหวัดสงขลา จะมีการผลัดใบตั้งแต่ปลายเดือนมกราคม ถึงปลายเดือนกุมภาพันธ์ และจะแตกใบใหม่ที่ภายในต้นเดือนมีนาคม และจะมีอัตราการแตกใบใหม่สูงสุดในกลาง เดือนเมษายน ทั้งนี้ตั้งแต่ช่วงปลายเดือนมกราคมถึงเมษายนของทุกปี ในพื้นที่ภาคใต้ตอนล่าง เช่น สงขลา เป็นช่วงระยะเวลาของฤดูแล้ง ดังนั้นการแตกใบใหม่ของยางพาราหลังการผลัดใบ จึงเกิดขึ้นในขณะที่ยังเป็นฤดูแล้ง นั่นเท่ากับว่ารากของยางพารามีบทบาทสำคัญในการดูดน้ำมาเพื่อหล่อเลี้ยงใบซึ่งกำลังแตกใหม่และกำลังเจริญเติบโต และมีบทบาทโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงผลผลิตของยางพารา

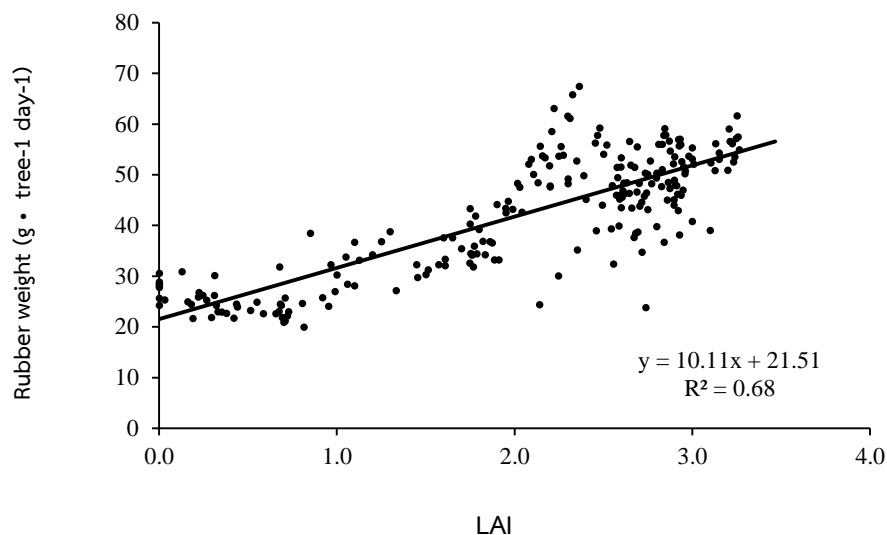
ดังนั้นการศึกษาพลวัต หรือ phenology ของรากยางพาราในแต่ละฤดู จะช่วยทำให้เรามีความเข้าใจเกี่ยวกับการตอบสนองทางสรีรวิทยาของยางพาราต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตอบสนองต่อระดับความชื้นในดินที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละฤดู ความรู้ดังกล่าวจะเป็นกุญแจสำคัญทำให้เราสามารถจัดการสวนยางพาราได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการเพิ่มผลผลิต และรักษาความยั่งยืนในการผลิตยางพาราในระยะยาว อย่างไรก็ตามในการศึกษาในครั้งนี้ เป็นเพียงแค่จุดเริ่มต้นของการการศึกษาเพื่อพัฒนาเครื่องมือต้นแบบ ให้มีความสามารถในการบันทึกภาพรากฝอยของยางพาราให้ภาพมีความคมชัด และได้เครื่องมือที่มีความสะดวกในการใช้งานและมีน้ำหนักเบา และเป็นการปรับแก้ไขส่วนที่ยังบกพร่องเพื่อให้เครื่องมือต้นแบบ PSU-Root Scanner 2 มีความสมบูรณ์มากกว่าเครื่องมือต้นแบบ PSU-Root Scanner 1



ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงของดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) เปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้ง (%DRC) และน้ำหนักยางแห้ง (dry weight of rubber; $\text{g tree}^{-1} \text{day}^{-1}$) ของยางพาราอายุ 15 ในพื้นที่ อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา

ในอนาคตหากมีการปรับของตัวเครื่องมือตามแบบ 3 มิติ ที่ได้ทำการปรับและออกแบบไว้แล้วด้วยการขึ้นรูปกับวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและทนทาน คาดว่าจะทำให้กลไกที่ขับเคลื่อนการหมุนของตัวสแกนเนอร์

ทำงานได้ดีขึ้นมีความสั่นไหวในการทำงานได้มากขึ้น อาจมีส่วนช่วยให้เพิ่มความคมชัดของภาพ และลดปริมาณแถบสีขาวที่ปรากฏในภาพที่บันทึกได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับการศึกษารากของยางพาราได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ รวมทั้งพืชเศรษฐกิจอื่นที่สำคัญของประเทศ และจากความสำเร็จในประเด็นนี้ ทางสำนักพัฒนาสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ได้ให้ความสนใจที่จะให้ทุนสนับสนุนการวิจัย เพื่อการต่อยอดไปสู่การพัฒนาเป็นเครื่องมือเชิงพาณิชย์ ซึ่งทีมนักวิจัยกำลังพัฒนาข้อเสนอโครงการเพื่อรับทุนดังกล่าว



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index: LAI) และน้ำหนักยางแห้ง (dry weight of rubber; $\text{g tree}^{-1} \text{ day}^{-1}$) ของยางพาราอายุ 15 ปี ในพื้นที่ อ.หาดใหญ่ จ. สงขลา น้ำหนักยางแห้งจะมีความสัมพันธ์สูงสุดกับ LAI หลัง LAI เปลี่ยนแปลงไปแล้ว 42 วัน

9. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาพัฒนาต้นแบบเครื่องมือสแกนรากพืช เพื่อประเมินการเจริญเติบโตของรากยางพาราในครั้งนี้ เป็นการพัฒนาต้นแบบเครื่องมือสแกนรากพืช PSU-Root Scanner 1 ที่พัฒนาด้วยเซนเซอร์สแกนเนอร์แบบพกพาขนาดเล็ก เครื่องมือดังกล่าวสามารถบันทึกภาพภายในท่อโปร่งใสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 103 มม. ได้ภาพที่มีความกว้าง 20 ซม. และยาว 31.4 ซม. (2560 x 4019 พิกเซล) การประเมินความแม่นยำเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการได้ภาพที่ไม่มีความบิดเบี้ยวเชิงเรขาคณิต แต่ทั้งนี้ การทดสอบเครื่องมือต้นแบบในภาคสนามยังมีข้อบกพร่องที่ต้องปรับแก้ไข คือ ภาพที่บันทึกได้บางภาพยังขาดความคมชัด เครื่องมือต้นแบบค่อนข้างมีน้ำหนักมาก ทำให้กลไกการทำงานยังบกพร่อง คณะวิจัยได้ต่อยอดออกแบบปรับแก้ไขเครื่องมือดังกล่าวไว้แล้วในรุ่น PSU-Root Scanner 2 ด้วยการออกแบบ 3 มิติ เพื่อการขึ้นรูปด้วยวัสดุที่มีน้ำหนักเบากว่า PSU-Root Scanner 1

10. เอกสารอ้างอิง

- สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2556. บทบรรณาธิการ การเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจยางต้องเน้นการตลาด. วารสารยางพารา. ปีที่ 34 ฉบับที่ 1 มกราคม – มีนาคม 2556. หน้า 1.
- Burke, M. K. and Raynal, D. J. 1994. Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant Soil* 162: 135–146.
- 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. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp 48–59.
- Côté, B., Hendershot, W. H., Fyles J. W., Roy, A. G., Bradley, R., Biron, P. M., and Courchesne, F. 1998. The phenology of fine root growth in a maple dominated ecosystem: relationships with some soil properties. *Plant Soil* 201: 59–69.
- Crocker, T. L., R. L. Hendrick, R. W. Ruess, K. S. Pregitzer, A. J. Burton, M. F. Allen, J. Shan and L. A. Morris. 2003. Substituting root numbers for length: improving the use of minirhizotrons to study fine root dynamics. *Applied Soil Ecology* 23: 127-135.
- 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.
- Fogel, R. 1991. Root system demography and production in forest ecosystems. *In Plant Root Growth: An Ecological Perspective*. (Ed. D Atkinson) Special Publication No 10 of the British Ecological Society.
- Hendrick, R. L. and Pregitzer, K. S. 1993. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forests. *Nature* 361:59–61.
- Hendrick, R. L. and Pregitzer, K. S. 1996. Applications of minirhizotrons to understand root function in forests and other natural ecosystems. *Plant Soil* 185: 293–304.
- Johnson, M. G., Tingey, D. T., Storm, M. J., Phillips, D. L. 1995. Patterns of ponderosa pine fine root growth as affected by elevated CO₂: initial results. *Plant Physiol. (Life Sci. Adv.)* 14, 81–88.

- Joslin, J. D. and Henderson, G. S. 1987. Organic matter and nutrients associated with fine root turnover in a white oak stand. *For. Sci.* 33: 330–346.
- 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 Soil* 228: 201–212.
- López, B., S. Sabaté and C. A. Gracia. 2001. Vertical distribution of fine root density, length density, area index and mean diameter in a *Quercus ilex* forest. *Tree Physiology* 21: 555-560.
- Majdi, H. and Kangas, P. 1997. Demography of fine roots in response to nutrient applications in a Norway spruce stand in southwestern Sweden. *Ecoscience* 4: 199–205.
- McClagherty, C. A., Aber, J. D. and Melillo, J. M. 1982. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology* 63: 1481–1490.
- Parker, C. J., M. K. V. Carr, N. J. Jarvis, B. Pupilampu and V. H. Lee. 1991. An evaluation of the minirhizotron technique for estimating root distribution in potatoes. *The Journal of Agricultural* 116: 341-350.
- Persson, H. A., 1983. The distribution and productivity of fine root in boreal forests. *Plant Soil* 71: 87-101.
- Samson, B. K. and Sinclair, T. R. 1994. Soil core and minirhizotron comparison for the determination of root length density. *Plant Soil* 161: 225-232.

11. ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ว่าการศึกษาครั้งนี้มีข้อจำกัดในขั้นตอนการพัฒนาเครื่องมือต้นแบบให้ มีความสามารถในการทำงานให้ได้ภาพที่มีความคมชัด แต่ประสบปัญหาที่ไม่สามารถทำให้