

การตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพาราสดโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดชนิด เส้นใยแก้วนำแสง

Measuring Dry Rubber Content in Field Latex using Optical Fiber Sensor

ปิยชาติ มรกตคันโธ¹ และเขมฤทธิ์ ถามะพัฒน์^{2,*}

Piyachat Morakotkhantho and Kheamrutai Thamaphat

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพฯ 10140

Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod,

Bangkok 10140

E-mail¹: piyachat1990@gmail.com; E-mail²: kheamrutai.tha@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

คุณภาพของน้ำยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพาราสามารถบ่งบอกด้วยปริมาณเนื้อยางแห้ง (dry rubber content หรือ DRC) ซึ่งแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักรubberเนื้อยางแห้งต่อน้ำหนักของน้ำยางพารา โดยวิธีการที่นิยมใช้ในการตรวจวัดค่า DRC ณ จุดซื้อ - ขายน้ำยางพารา คือ การวิเคราะห์น้ำหนักเนื้อยางแห้ง โดยใช้วิธีการใช้ไมโครเวฟอบแห้ง ซึ่งทำได้ง่ายและรวดเร็ว อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีความแม่นยำน้อยกว่าวิธีการอบแห้งตามวิธีมาตรฐานมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้คิดค้นวิธีการตรวจวัดวิธีใหม่ที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ซึ่งอาศัยหลักการวัดความขุ่นด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดเส้นใยแก้วนำแสง โดยใช้ไฟโตไดโอด แสงสีแดงความยาวคลื่น 660 nm เป็นแหล่งกำเนิดแสง และนำปลายด้านหนึ่งของเส้นใยแก้วนำแสงชนิดพลาสติกมาเชื่อมต่อกับไฟโตไดโอด ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของเส้นใยแก้วนำแสงจะถูกปกคลุมเคลือบด้วยพลาสติกความยาวประมาณ 1 cm แล้วนำไปจุ่มในตัวอย่งน้ำยางสด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของระดับน้ำยางที่บรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบกับอนุภาคยาง แสงจะกระเจิงเข้าสู่เส้นใยแก้วนำแสงอีกเส้นหนึ่งที่เชื่อมต่อกับตัวรับแสง ความเข้มแสงที่ตรวจวัดได้จะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่า DRC ทั้งนี้เครื่องตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งแบบพกพาที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 3.4% สามารถนำไปใช้ตรวจวัดค่า DRC ของน้ำยางพาราสด ณ จุดซื้อขายจริงได้

คำสำคัญ: ปริมาณเนื้อยางแห้ง; น้ำยางธรรมชาติ; การวิเคราะห์ความขุ่น; เส้นใยแก้วนำแสง

Abstract

Quality of the natural rubber latex collected from a para rubber tree is normally expressed in terms of dry rubber content (DRC), which is defined as the weight percentage of solid rubber content obtained from a weighed quantity of latex. The most commonly used methods for in-field measurement of the DRC are the microwave drying. It is rapid and easy DRC determination technique, although with much less accuracy than the standard drying method. Therefore, a novel, rapid and effective method to measure DRC in latex based on turbidity analysis using optical fiber sensor was created in this work. A red light photodiode with a wavelength of 660 nm used as a light source was connected to one end of plastic-clad-plastic optical fiber. The other end of optical fiber, at which the fiber cladding surface was removed by approximately 1 cm, was immersed into middle-level latex sample volume that was contained in the solution chamber. When a laser beam transmitted through latex solution, the rubber particles scattered light to the another optical fiber connected to light detector. The intensity of detected light was linearly proportional to the DRC. The error percentage of measured DRC was less than 3.4%. This developed portable device can be used to measure the DRC presented in latex for practical field use at latex collection points with high accuracy.

Keywords: Dry Rubber Content; Natural Rubber Latex; Turbidity Analysis; Optical Fiber

บทนำ

ยางพาราเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปอเมริกาใต้ พันธุ์ยางที่มีคุณภาพดีที่สุด คือ ยางพันธุ์ฮีเวีย บราซิลเลียนซีส (*Hevea brasiliensis*) (จิตต์ลัดดา, 2553) โดยมีการนำเข้ามาเพาะปลูกอย่างแพร่หลายในแหลมมลายูตั้งแต่ปี พ.ศ. 2425 เป็นต้นมา สำหรับประเทศไทยได้นำยางพาราเข้ามาปลูกเมื่อพระยารัษฎานุประดิษฐ์มหิศรภักดี (คอซิมบี๊ ณ ระนอง) (จิตต์ลัดดา, 2553) เห็นการทำสวนยางพาราของชาวมลายูได้ผลดี จึงได้มีการแจกจ่ายพันธุ์ยางรวมทั้งมีการถ่ายทอดวิธีการปลูกยางให้แก่ประชาชน ทำให้มีการปลูกยางพาราไปทั่วทั้งภาคใต้และตะวันออกเฉียงใต้ให้กับประเทศเป็นอย่างมากจนยางพาราเป็นสินค้าส่งออกสำคัญของประเทศไทยจนถึงปัจจุบัน จากข้อมูลในปี พ.ศ. 2561 ประเทศไทยมีการส่งออกสินค้ายางพารารวมทุกประเภท 3.57 ล้านตัน (Chaiwat, 2019) สร้างรายได้เป็นมูลค่า 4,828.3 ล้านดอลลาร์สหรัฐ (Sowcharoensuk, 2019)

น้ำยางพาราจากสวนยางพาราของเกษตรกร ถือเป็นต้นน้ำสำคัญในการผลิตสินค้ายางพารา ซึ่งในน้ำยางพาราสดจะมีส่วนประกอบที่เป็นเนื้อยางอยู่ประมาณ 30 – 45% โดยน้ำหนัก น้ำประมาณ 50 – 75% และส่วนประกอบอื่นๆ อีกประมาณ 2.5 – 4% (วรภรณ์, 2549) จากการศึกษาพบว่าเกษตรกรสวน

ยางส่วนใหญ่มากกว่า 92.4% ถีอครองที่ดินขนาดเล็ก (ไชยยะ และคณะ, 2560) ปริมาณน้ำยางพาราที่เก็บได้ในแต่ละวันมีไม่มากนัก จึงจำหน่ายผลผลิตเป็นน้ำยางพาราสดแก่พ่อค้าคนกลาง ซึ่งเป็นกลุ่มทุนค้ากำไรที่พร้อมกดราคาราคาตลอดเวลาที่มีโอกาส (ฐานเศรษฐกิจ, 2563) ซึ่งในการซื้อขายน้ำยางพาราสดจะให้ราคาซื้อขายตามน้ำหนักของเนื้อยางพารา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้ง (dry rubber content หรือ DRC) ในน้ำยางสดทั้งหมดเพื่อคำนวณราคาซื้อขาย โดยปริมาณของเนื้อยางแห้งจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเนื้อยางในน้ำยางพาราสด หรือเรียกว่า %DRC

ปัจจุบันการตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งเพื่อซื้อขายน้ำยางพาราจะทำการวัดโดยพ่อค้าคนกลางโดยวิธีการใช้ไมโครเวฟ คือ ทำการชั่งน้ำหนักน้ำยางพาราสดก่อนอบ 1 กรัม เปรียบเทียบกับน้ำหนักเนื้อยางแห้งหลังจากการอบด้วยไมโครเวฟเพื่อระเหยน้ำออก (การยางแห่งประเทศไทย, 2553) วิธีนี้สามารถทำได้ง่ายและได้ผลรวดเร็ว แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากน้ำอาจระเหยไม่หมด แต่ในความเป็นจริง ณ จุดรับซื้อน้ำยางพารานั้น ผู้รับซื้อน้ำยางจะชั่งมวลน้ำยางพาราสดไม่เต็มจำนวนก่อนนำไปอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพื่อทำการ ซึ่งเกิดความไม่เป็นธรรมกับเกษตรกรสวนยาง เป็นการซ้ำเติมปัญหาราคายางตกต่ำที่เกษตรกรได้รับอยู่แล้วให้รุนแรงยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้นักวิจัยหลายท่านจึงได้พยายามศึกษาและพัฒนาวิธีการตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพารา เพื่อให้ได้มาซึ่งวิธีการที่แม่นยำ ถูกต้องตามความเป็นจริง และยากต่อการทุจริตเอาเปรียบเกษตรกร โดยอาศัยเทคนิคต่างๆ เช่น การตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพาราโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งอาศัยการทำนายปริมาณเนื้อยางแห้งจากการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟจากน้ำยางพาราสด (Julrat *et al.*, 2012) หรือการดูดกลืนรังสีไมโครเวฟโดยโมเลกุลของน้ำในน้ำยางพารา (Aiyarak and Sunheem, 2015) อย่างไรก็ตามคลื่นไมโครเวฟอาจทำให้โมเลกุลของน้ำในน้ำยางพาราเกิดการสั่นพ้องจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลต่อค่าที่ตรวจวัดได้ และหากคลื่นไมโครเวฟรั่วออกมาจากเครื่องมืออาจเป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อของผู้ใช้งานได้ นอกจากการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟแล้วเนื่องจากน้ำยางพาราเป็นลักษณะของสารคอลลอยด์จึงสามารถประยุกต์ใช้หลักการกระเจิงของแสงในการออกแบบวิธีการตรวจวัดได้ โดยใช้แสงเลเซอร์ส่องผ่านเข้าไปในน้ำยางพาราที่บรรจุในภาชนะกระจกใสและใช้กล้องดิจิตอลรับภาพจากแสงที่ผ่านน้ำยางพารามาวิเคราะห์การกระเจิงจากความเข้มของฟลักซ์ภาพ (George *et al.*, 2013 และ Sari *et al.*, 2018) การตรวจวัดด้วยเทคนิคนี้จะสามารถทราบผลได้รวดเร็วภายใน 5 นาที โดยที่ใช้ตัวอย่างน้ำยางพาราเพียงเล็กน้อยประมาณ 0.5 กรัม เท่านั้น อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ต้องใช้กล้องถ่ายภาพดิจิตอลและคอมพิวเตอร์ จึงไม่สะดวกและคล่องตัวในการใช้งาน ณ จุดซื้อขาย นอกจากนั้นชุดอุปกรณ์ทั้งหมดก็ยังมีราคาสูง

ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนของการจัดชุดอุปกรณ์ ลดต้นทุนการสร้างชุดอุปกรณ์ตรวจวัด และเพื่อให้การตรวจวัดทำได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และเกษตรกรสามารถเข้าถึง เรียนรู้ และใช้งานได้ง่าย ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและพัฒนาชุดอุปกรณ์อย่างง่ายและราคาถูกลำดับสำหรับวัดปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพาราโดยอาศัยแนวคิดในการประยุกต์ใช้วิธีการวัดความขุ่นจากการกระเจิงของแสงเมื่อตกกระทบกับอนุภาคในสารคอลลอยด์ (Omar and MatJafri, 2009 และ Inagaki *et al.*, 2016) ซึ่งชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น

ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ ชุดแหล่งกำเนิดและตัวรับแสง ภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง และหน่วยวิเคราะห์และแสดงผล โดยชุดแหล่งกำเนิดและตัวรับแสงจะเชื่อมต่อกับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดพลาสติกที่จุ่มอยู่ในภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง แสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสงจะถูกส่งผ่านไปยังน้ำยางพาราที่บรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุสาร เมื่อแสงตกกระทบกับอนุภาคของยางพาราจะมีแสงบางส่วนเกิดการกระเจิงกลับ (back scattering) ไปยังตัวรับแสง ได้ข้อมูลความเข้มแสงเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้านี้จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณเนื้อยางแห้ง ผู้ตรวจวัดจะสามารถคำนวณปริมาณเนื้อยางแห้งจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเนื้อยางแห้งกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นนี้จะทำให้การวัดปริมาณเนื้อยางแห้งทำได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว สามารถทราบผลได้ทันที ณ จุดซื้อขาย และเนื่องจากต้นทุนชุดอุปกรณ์มีราคาถูก เกษตรกรจึงสามารถจัดหามาทำการตรวจวัดด้วยตนเองได้ ลดการเอารัดเอาเปรียบจากพ่อค้าคนกลางผู้รับซื้อน้ำยาง ก่อให้เกิดความเป็นธรรมกับทุกฝ่าย

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพาราด้วยวิธีการตรวจวัดความชื้นโดยนำเส้นใยแก้วนำแสงมาประยุกต์ใช้
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงการกระเจิงกลับจากอนุภาคของยางพาราที่ส่งผ่านเข้าเส้นใยแก้วนำแสงกับปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพารา
3. เพื่อเปรียบเทียบปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพาราที่วัดได้จากวิธีการที่พัฒนาขึ้นกับวิธีการมาตรฐาน

การทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของน้ำยางพาราธรรมชาติ พบว่าลักษณะของน้ำยางพาราหลังจากการกรีดทันทินั้นจะมีลักษณะสีขาวขุ่น มีค่า pH ประมาณ 6 ค่าแรงตึงผิว (surface tension) 40.5 dyn/cm ที่อุณหภูมิ 30 °C ในน้ำยางธรรมชาติจะประกอบไปด้วยเนื้อยาง น้ำ และองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งส่วนของเนื้อยาง (rubber phase) คิดเป็นประมาณ 30 – 45% (วรารักษ์, 2549) สมบัติของยางธรรมชาติมีอิทธิพลจากลักษณะของโครงสร้างของยางธรรมชาติซึ่งมีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนต่อกันเป็นสายยาวแบบเส้นตรง ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย ส่งผลให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี ยางธรรมชาติมีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20 °C และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำให้ยางเย็นจนแข็งหรือเมื่อยืดยาง ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงโดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้า (specific resistivity) ประมาณ $1 \times 10^{15} - 2 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ อย่างไรก็ตามปัจจัยที่เป็นตัวแปรของสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนที่ละลายน้ำได้ที่อยู่ในน้ำยางพารา ด้วยสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำยางธรรมชาติ จึงได้มีการนำเสนอวิธีการตรวจวัดปริมาณเนื้อยางด้วยเทคนิคการใช้คลื่นไมโครเวฟ โดยประยุกต์หลักการวัดค่า dielectric permittivity ของน้ำยางพาราจากการวัดคลื่นไมโครเวฟที่

สะท้อนกลับจากน้ำยางพารา (Julrat *et al.*, 2012) เนื่องจากค่า dielectric permittivity ของน้ำยางพาราจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพารา จึงนำไปสู่การทำนายค่า DRC ได้ จากการเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งตามมาตรฐานพบว่ามีความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 0.95% นอกจากนี้ยังมีการเสนอวิธีการตรวจสอบปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพาราธรรมชาติโดยใช้หลักการของการดูดกลืนรังสีไมโครเวฟโดยโมเลกุลของน้ำในน้ำยางพารา (Aiyarak and Sunheem, 2015) และจากการวิเคราะห์โดยเครื่องเวกเตอร์เน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์ (8510B vector network analyzer หรือ VNA) จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่าการลดทอนของรังสีไมโครเวฟกับปริมาณเนื้อยางแห้ง จากการทดลองกับน้ำยางพาราสดในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งตามมาตรฐานพบว่ามีความผิดพลาดอยู่ที่ 0.43 วิธีการตรวจวัดข้างต้นให้ผลการตรวจวัดที่รวดเร็ว สามารถนำไปใช้ ณ จุดรับซื้อน้ำยางพาราสดได้ แต่ยังมีข้อจำกัด คือ การประมวลผลที่ต้องใช้เครื่องเวกเตอร์เน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์และคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ซึ่งมีราคาสูง ใช้งานยาก และไม่สะดวกในการพกพาหรือเคลื่อนย้าย และในกระบวนการตรวจวัดนั้นเมื่อคลื่นไมโครเวฟเดินทางผ่านน้ำยางพารา อาจทำให้ส่วนประกอบของน้ำยางพาราที่เป็นโมเลกุลของน้ำเกิดการสั่นพ้องเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟ จนทำให้น้ำยางพารามีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าปริมาณเนื้อยางแห้งที่ตรวจวัดได้ นอกจากนี้การใช้คลื่นไมโครเวฟในการตรวจวัดนั้นอาจทำให้เกิดอันตรายแก่ผู้ใช้งานได้หากคลื่นไมโครเวฟรั่วออกมาจากชุดอุปกรณ์

นอกจากการออกแบบวิธีการตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งโดยอาศัยสมบัติทางไฟฟ้าแล้ว ยังมีการนำเสนอวิธีการตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งโดยอาศัยสมบัติการกระเจิงแสงของน้ำยางพาราด้วย เนื่องจากอนุภาคยางส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทรงกลม มีขนาดประมาณ 0.05 – 3 ไมโครเมตร (วรารักษ์, 2549) และบริเวณผิวของอนุภาคยางจะถูกล้อมรอบด้วยชั้นโปรตีนและไขมัน ทำให้อนุภาคยางสามารถแขวนลอยในน้ำได้อย่างเสถียรโดยมีลักษณะเป็นสารคอลลอยด์ ซึ่งเมื่อแสงเดินทางผ่านสารคอลลอยด์จะทำให้เกิดการกระเจิง ด้วยเหตุนี้จึงมีการเสนอวิธีตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพาราอย่างง่ายโดยให้แสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสง (diode laser) ส่งผ่านเข้าไปในน้ำยางพาราที่บรรจุในภาชนะกระจกใส (glass container) และใช้กล้องดิจิตอล (digital camera) รับภาพจากแสงที่ผ่านน้ำยางพาราเข้ามา ภาพที่บันทึกได้จากกล้องดิจิตอลจะถูกนำมาวิเคราะห์ความเข้มแสงของพิกเซลภาพ (George *et al.*, 2013 และ Sari *et al.*, 2018) พบว่ามีลักษณะการกระจายแบบระฆังคว่ำ (Gaussian) จากนั้นทำการหาค่าความกว้างที่ความเข้มแสงเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุดของกราฟระฆังคว่ำ (full width at half of the maximum หรือ FWHM) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพารา การตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งโดยวิธีนี้ใช้ตัวอย่างน้ำยางพาราเพียงปริมาณน้อย และสามารถทราบผลได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอวิธีการทำนายปริมาณเนื้อยางแห้งโดยใช้ Three-fibre-based diffuse reflectance spectroscopy (TFDRS) ซึ่งมีการประยุกต์ใช้เส้นใยนำแสงมาตรวจวัดความเข้มจากการกระเจิงกลับของแสงที่กระทบกับอนุภาคยางในช่วงความยาวคลื่น 850 – 1060 นาโนเมตร และวิเคราะห์หาค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสง (absorbance ratio) (Inagaki *et al.*, 2016) จากการทดลองพบว่าค่าอัตราส่วนการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ

ปริมาณน้อยอย่างหนึ่งในน้ำยางพาราโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.98 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถนำวิธีการนี้ไปใช้ในการตรวจวัดปริมาณน้อยอย่างหนึ่งในน้ำยางพาราได้ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังอยู่ในระหว่างการพัฒนาต่อไปเพื่อให้สามารถใช้งานได้สะดวกขึ้น เนื่องจากวิธีการนี้จะต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะ ราคาสูง ต้องมีการติดตั้งและวิเคราะห์ผลยุ่งยาก ไม่สะดวกต่อการใช้งาน ณ จุดรับซื้อน้ำยางพารา

จากการศึกษาพบว่าการใช้เส้นใยแก้วนำแสงมีประสิทธิภาพดีในการตรวจวัดความเข้มแสงจากการกระเจิงโดยสารคอลลอยด์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดอื่นๆ ในรูปแบบของการวัดความขุ่นได้ เช่น การวัดคุณภาพน้ำด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดเส้นใยแก้วนำแสง (water quality fiber sensor) การตรวจวัดรูปแบบนี้เป็นการประยุกต์ใช้เส้นใยแก้วนำแสงชนิดพลาสติกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนสัญญาณระหว่างสารตัวอย่างกับระบบทางแสง (Omar and MatJafar, 2009) ดังตัวอย่างการพัฒนาระบบตรวจวัดความขุ่นของน้ำโดยใช้อุปกรณ์เส้นใยแก้วนำแสงที่มีโครงสร้างในการออกแบบการตรวจวัดแตกต่างกัน 3 ระบบ คือ ระบบที่ตรวจวัดความเข้มแสงกระเจิงกลับ ระบบที่ตรวจวัดความเข้มแสงส่องผ่าน (0° scattering) และระบบที่ตรวจวัดความเข้มแสงการกระเจิงที่มุม 90° (90° scattering) นอกจากนี้ แนวคิดการประยุกต์ใช้เส้นใยแก้วนำแสงในการตรวจวัดความขุ่น ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องมืออื่นๆ อีก เช่น การประยุกต์ใช้หลักการของการวัดความขุ่นโดยใช้อุปกรณ์เส้นใยแก้วนำแสงเป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความขุ่นจากการทำปฏิกิริยากันของสาร (A label-free fiber-optic Turbidity Affinity Sensor หรือ TAS) เพื่อวัดระดับน้ำตาลในเลือดสำหรับเครื่องตรวจระดับน้ำตาลในเลือดแบบรายงานผลทันทีตามเวลา (Ballerstadt et al., 2014) ชุดอุปกรณ์ประกอบไปด้วยท่อเส้นใยเซลลูโลสกลวงทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่านที่เจาะจงเฉพาะโมเลกุลของกลูโคส ข้างในบรรจุสารประกอบที่เกิดจากพันธะระหว่างคอนคานาวาลิน เอ (Concanavalin A หรือ ConA) กับเด็คซ์ทราน (dextran) จับตัวกันเป็นโครงร่างตาข่ายที่มีความขุ่นสูงซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับกลูโคสในเลือด เมื่อกลูโคสผ่านเยื่อเลือกผ่านเข้ามาทำพันธะกับ ConA แทนที่เด็คซ์ทราน จะส่งผลให้สารมีความขุ่นลดลงสามารถทำการวัดระดับของกลูโคส โดยการส่งแสงจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านเส้นใยแก้วนำแสงออกสู่สารประกอบภายในท่อเซลลูโลสและสะท้อนกลับสู่เส้นใยแก้วนำแสงที่ต่อกับตัวรับแสง ซึ่งความเข้มของแสงที่สะท้อนกลับมายังตัวรับแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณกลูโคส

จากแนวคิดในการใช้อุปกรณ์เส้นใยแก้วนำแสงในการออกแบบชุดการทดลองเพื่อตรวจวัดความขุ่นในรูปแบบของการวัดความเข้มแสงกระเจิงกลับ พบว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์เพื่อใช้ประโยชน์ในการตรวจวัดปริมาณน้อยอย่างหนึ่งและการตรวจวัดด้านอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากการศึกษาความรู้เกี่ยวกับน้ำยางพารา พบว่าน้ำยางพารามีลักษณะเป็นสารคอลลอยด์ (colloid) ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคยางแขวนลอยอยู่ในน้ำ ทำให้น้ำยางมีความขุ่นในลักษณะเดียวกันกับความขุ่นของน้ำ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเทคนิคการใช้อุปกรณ์เส้นใยแก้วนำแสงวัดความขุ่นจากการกระเจิงกลับของแสงไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาชุดอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณน้อยอย่างหนึ่งในน้ำยางพารา โดยตั้งอยู่บนเงื่อนไขคือมีความแม่นยำ ใช้งานง่าย ตรวจวัดและทราบผลทันที พกพาสะดวก สามารถนำไปทำการวัด ณ จุดซื้อ -

ขาย ได้ ต้นทุนต่ำและราคาถูก เกษตรกรรายย่อยสามารถจัดหามาใช้ในการกิจการครอบครัวได้ เพื่อให้เกษตรกรสามารถพึ่งพาตนเองได้ เกิดความเป็นธรรมและลดการเอาเปรียบจากพ่อค้าคนกลางผู้รับซื้อน้ำยาง

กรอบแนวคิดการวิจัย

จากการศึกษาองค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติในส่วนของเนื้อยาง อนุภาคส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทรงกลมและบริเวณผิวของอนุภาคยางจะถูกล้อมรอบด้วยชั้นโปรตีนและไขมัน ทำให้อนุภาคยางสามารถแขวนลอยในน้ำได้อย่างเสถียร เมื่อแสงเดินทางผ่านน้ำยางพาราจะมีลักษณะเดียวกันกับลักษณะของแสงเมื่อเดินทางผ่านน้ำ อนุภาคที่แขวนลอยในน้ำจะขัดขวางการเดินทางของแสง ในน้ำบริสุทธิ์แสงจะสามารถส่องผ่านไปได้มากโดยไม่มีการรบกวนโดยเกิดการกระเจิงเพียงเล็กน้อย ซึ่งรูปแบบของปฏิกิริยาระหว่างแสงและสารแขวนลอยที่เป็นของแข็งจะขึ้นกับขนาด รูปร่าง และส่วนประกอบของอนุภาคในสารละลาย นอกจากการกระเจิงของแสงแล้ว แสงที่ส่องผ่านสารละลายจะถูกดูดกลืนและลดทอนความเข้มแสงลงโดยอนุภาคด้วย ซึ่งสามารถอธิบายความเข้มแสงที่ผ่านสารละลายได้โดยสมการกฎของเบียร์ – แลมเบิร์ต (Beer–Lambert law) ดังสมการที่ (1) (Omar and MatJafri, 2009)

$$I = I_0 e^{-(aa+ab)xc} \quad (1)$$

เมื่อ	I	คือ	ความเข้มแสงที่ผ่านสารละลาย
	I_0	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบบ
	x	คือ	ความยาวทางเดินของแสงผ่านตัวกลาง
	c	คือ	ความเข้มข้นของสารละลาย
	aa	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืน
และ	ab	คือ	สัมประสิทธิ์การกระเจิง

ในส่วนของน้ำยางพารามีลักษณะของสารคอลลอยด์ที่มีอนุภาคยางซึ่งมีลักษณะค่อนข้างเป็นทรงกลมแขวนลอยอยู่ในน้ำทำให้แสงที่เดินทางผ่านเกิดการกระเจิง จากทฤษฎีการกระเจิงแสงของเรลลีย์ – แกนส์ (Rayleigh – Gans theory of light scattering) ความเข้มของการกระเจิงต่อหน่วยปริมาตรของสารละลายไอโซโทรปิก (isotropic) ที่มีจำนวนอนุภาค N อนุภาคต่อหน่วยปริมาตรของอนุภาคขนาดเล็กเป็นไปตามสมการที่ (2) (Chong and Colbow, 1976)

$$\frac{I}{I_0} = \frac{N}{2} \left(\frac{3\pi V}{r} \right)^2 \left(\frac{n}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) (1 + \cos^2 \theta) P(\theta) \quad (2)$$

เมื่อ	$m = n_0/n$	คือ	ดรรชนีหักเหสัมพัทธ์
	I_0	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบบ
	V	คือ	ปริมาตรของสารละลาย

r	คือ	ระยะห่างจากจุดสังเกต
λ	คือ	ความยาวคลื่นแสงตกกระทบ
และ θ	คือ	มุมของการสังเกตวัดจากแนวรังสีตกกระทบ

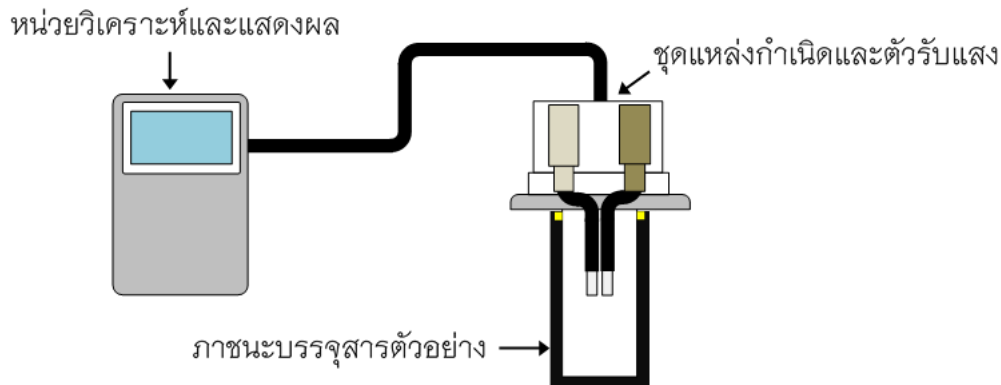
ส่วนแฟคเตอร์ $P(\theta)$ คือ correction factor ของ Rayleigh scattering และผลจากการแทรกสอดของแสงที่กระเจิงจากหลายๆ ส่วนที่แตกต่างกันของอนุภาค

ในการประยุกต์ใช้หลักการกระเจิงของแสงและอุปกรณ์ใยแก้วนำแสงเป็นอุปกรณ์ตรวจวัด เมื่อแสงตกกระทบกับอนุภาคของยางพาราจะมีแสงบางส่วนเกิดการกระเจิงกลับไปยังตัวรับแสง ซึ่งความเข้มแสงที่กระเจิงกลับจะมีความสัมพันธ์กับจำนวนอนุภาคยางในน้ำยางพารา โดยถ้าน้ำยางพารามีอนุภาคยางมาก ความเข้มแสงกระเจิงกลับที่ตรวจวัดได้ก็จะมาก หน่วยแสดงผลจะทำตรวจวัดความเข้มแสงออกมาในรูปแบบของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากตัวรับแสงซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าปริมาณเนื้อยางแห้ง

ระเบียบวิธีวิจัย

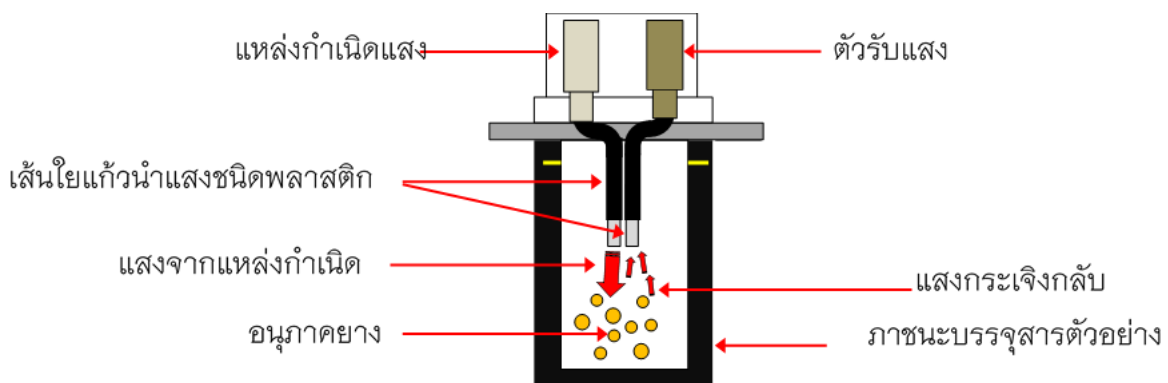
งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงปริมาณ ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งโดยอาศัยแนวคิดจากการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เส้นใยแก้วนำแสงเพื่อวัดความขุ่นจากการกระเจิงของแสงตามแนวคิดการกระเจิงแสงของเรลลีย์ – แกนส์ โดยในการทดลองจะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเนื้อยางแห้งกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากตัวรับแสง ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1) การสร้างชุดตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพาราโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดชนิดเส้นใยแก้วนำแสง ผู้วิจัยได้ออกแบบชุดอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพาราขึ้นภายใต้เงื่อนไขคือ สามารถใช้งานง่าย มีส่วนประกอบน้อย สะดวกในการใช้ตรวจวัด ณ จุดซื้อขาย และเลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่ายและราคาถูก เพื่อให้เกษตรกรรายย่อยสามารถจัดหามาใช้ในกิจการครอบครัวได้ ซึ่งชุดอุปกรณ์ที่ออกแบบขึ้นนี้อาศัยการกระเจิงกลับของแสงที่กระทบกับอนุภาคยาง โดยประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ชุดแหล่งกำเนิดและตัวรับแสง ทำหน้าที่ให้กำเนิดแสงและรับแสงจากการกระเจิงกลับเนื่องจากแสงตกกระทบกับอนุภาคยาง ภาชนะบรรจุตัวอย่างสำหรับใช้บรรจุตัวอย่างตามปริมาตรที่กำหนด และหน่วยวิเคราะห์และแสดงผล ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงกระเจิงกลับออกมาในรูปแบบของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณเนื้อเยื่อในน้ำยางพาราสดโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดชนิดเส้นใยแก้วนำแสง

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นโฟโตไดโอด (photodiode) ทำหน้าที่กำเนิดแสงเลเซอร์ และเลือกใช้ตัวรับแสงเป็นโฟโตทรานซิสเตอร์ (phototransistor) ที่ตอบสนองต่อแสงช่วงที่ตามองเห็นถึงช่วงอินฟราเรด ทั้งโฟโตไดโอดและโฟโตทรานซิสเตอร์จะเชื่อมต่อกับเส้นใยแก้วนำแสงชนิดพลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ดังแสดงในภาพที่ 2 ตรงส่วนปลายของเส้นใยแก้วนำแสงทั้ง 2 เส้น แจ็กเก็ตจะถูกปอกออกเป็นความยาว 1 cm และถูกปรับระยะให้อยู่ตำแหน่งตรงกลางของปริมาตรของสารที่บรรจุในภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง ซึ่งภาชนะบรรจุสารตัวอย่างจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกสีดำทึบแสง เพื่อป้องกันไม่ให้แสงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้ามาในภาชนะและรบกวนการทำงานของตัวรับแสง โดยชุดแหล่งกำเนิดแสงและตัวรับแสงนี้จะถูกติดตั้งไว้ในวัสดุขึ้นรูปพลาสติกสีดำทึบแสงที่สามารถปิดลงไปในปากของภาชนะบรรจุสารตัวอย่างได้พอดี เปิด - ปิดได้ง่าย มีดัดแปลงในการใช้งาน และป้องกันแสงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าไปในภาชนะบรรจุสารตัวอย่างได้



ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงชุดแหล่งกำเนิดและตัวรับแสงพร้อมหลักการทำงาน

จากภาพที่ 2 แสงจากไฟโตไดโอดจะเดินทางผ่านเส้นใยแก้วนำแสงสู่น้ำยางพาราที่บรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง เมื่อแสงที่ส่งผ่านเข้าไปในน้ำยางพาราดกกระทบกับอนุภาคยาง จะเกิดการกระเจิงกลับเข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงที่เชื่อมต่อกับตัวรับแสง และสามารถตรวจวัดความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไปได้จากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในวงจรไฟฟ้าของตัวรับแสงซึ่งติดตั้งอยู่ในหน่วยวิเคราะห์และแสดงผล

2) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพารา เพื่อให้ชุดอุปกรณ์สามารถทำนายปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพาราได้ จึงจำเป็นต้องต้องทราบสมการเปรียบเทียบที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกกับปริมาณเนื้อยางแห้งก่อน ดังนั้นหลังจากสร้างชุดอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วต้องทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพารา โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

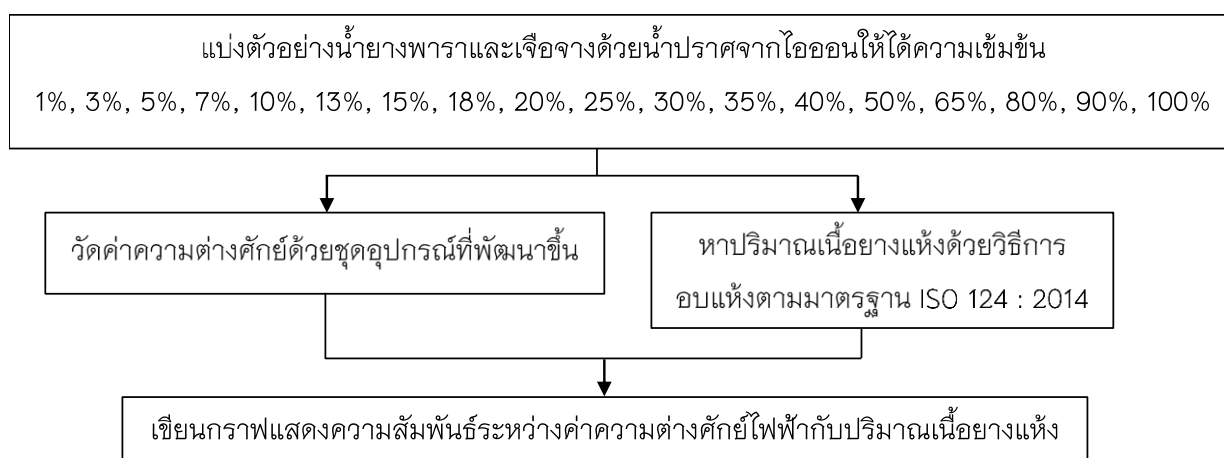
(1) การเตรียมตัวอย่างน้ำยางพารา น้ำยางพาราสดที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำยางพาราสดจากสวนยางพาราใน จังหวัดพัทลุง พันธุ์ยาง RRIM3001 อายุต้นยางพาราประมาณ 7 ปี เมื่อเก็บน้ำยางพาราแล้วทำการรักษาสภาพน้ำยางพาราสดโดยการเติมแอมโมเนียผสมลงในน้ำยางพาราในอัตราส่วน 1 : 400 โดยปริมาตร และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อรักษาสภาพน้ำยางพาราไม่ให้เกิดการบูดเน่าและจับตัวเป็นก้อน

(2) การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณเนื้อยางแห้งในน้ำยางพารา ทำโดยนำน้ำยางพารามาเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) ให้ได้ความเข้มข้นคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรน้ำยางพาราสดต่อปริมาตรของเหลวทั้งหมดแตกต่างกัน 18 ความเข้มข้นดังแสดงในภาพที่ 3 แล้วจึงนำน้ำยางพาราที่มีความเข้มข้นต่างๆ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งนำไปใช้ในการตรวจวัดด้วยชุดอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้น โดยบรรจุน้ำยางตัวอย่างปริมาตร 80 ml ในภาชนะบรรจุสารตัวอย่างและบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า สำหรับส่วนที่สองนำไปหาปริมาณเนื้อยางแห้งด้วยวิธีการอบแห้งตามมาตรฐาน ISO 124 : 2014 [10] โดยนำน้ำยาง 3 – 5 mg ใส่ในจานเพาะเชื้อ นำไปอบในตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง แล้วจึงนำออกมาชั่งและบันทึกมวล จากนั้นนำเข้าตู้อบซ้ำที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 30 นาที ชั่งบันทึกมวลอีกครั้ง และทำซ้ำจนกว่ามวลที่ชั่งได้จะมีความแตกต่างจากการชั่งครั้งก่อนหน้าไม่เกิน 0.5 mg แล้วจึงนำมวลของเนื้อยางแห้งที่ได้ไปคำนวณหา DRC ตามสมการที่ (3)

$$\text{ปริมาณเนื้อยางแห้ง} = \frac{\text{มวลของยางแห้ง}}{\text{มวลของน้ำยางสด}} \times 100 \quad (3)$$

นำค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากชุดอุปกรณ์และค่าปริมาณเนื้อยางแห้งที่หาด้วยวิธีการอบแห้งมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณเนื้อยางแห้ง หลังจากนั้นจึงทำการหา

สมการคณิตศาสตร์ที่เป็นตัวแทนของกราฟ (curve fitting) จะได้สมการเปรียบเทียบเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าปริมาณเนื้อยางแห้งได้เมื่อทราบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการตรวจวัด



ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงวิธีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณเนื้อยางแห้ง

3) การตรวจสอบความถูกต้องของค่าปริมาณเนื้อยางแห้งที่ได้จากการตรวจวัดด้วยชุดอุปกรณ์ ในขั้นตอนนี้จะทำการทดลองเพื่อหาความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณเนื้อยางแห้งที่ได้จากการวัดโดยใช้ชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น โดยทำการเติมน้ำเปล่าเจือจางแบบสุ่มลงไปในตัวอย่งน้ำยางพาราสด ทำให้เป็นตัวอย่งน้ำยางพาราสดที่ไม่ทราบค่าปริมาณเนื้อยางแห้ง หลังจากนั้นทำการแบ่งน้ำยางแต่ละตัวอย่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งทำการตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้งด้วยชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น อีกส่วนหนึ่งทำการตรวจวัดด้วยวิธีการอบแห้งมาตรฐานตาม ISO 124 : 2014 จากนั้นจึงหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (relative error) ของค่าปริมาณเนื้อยางแห้งที่ได้จากการตรวจวัดด้วยชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดด้วยวิธีอบแห้งตามมาตรฐานโดยอาศัยสมการที่ (4)

$$\text{relative error (\%)} = \frac{|\text{DRC}_{\text{result}} - \text{DRC}_{\text{standard}}|}{\text{DRC}_{\text{standard}}} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ $\text{DRC}_{\text{result}}$ คือ ค่าปริมาณเนื้อยางแห้งที่วัดได้จากวิธีการต่างๆ
 $\text{DRC}_{\text{standard}}$ คือ ค่าปริมาณเนื้อยางแห้งที่วัดได้จากวิธีการอบแห้งตามมาตรฐาน

ผลการวิจัย

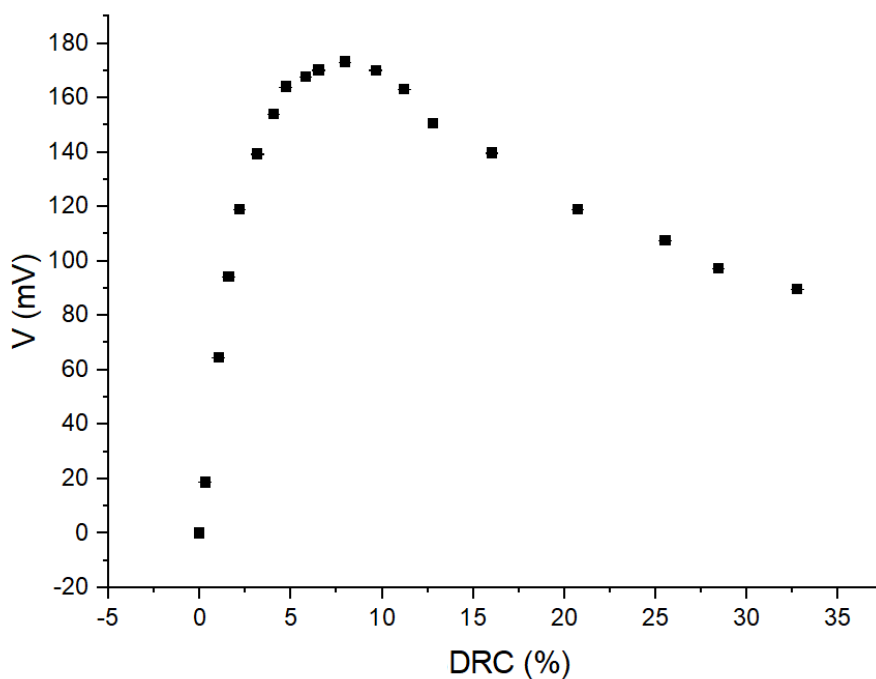
1) การสร้างชุดอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณเนือย่างแห้งในน้ำยางพาราโดยใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดเส้นใยแก้วนำแสง เมื่อทำการออกแบบและประดิษฐ์เสร็จสมบูรณ์แล้ว จะได้ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณเนือย่างแห้งในน้ำยางพาราที่ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ชุดแหล่งกำเนิดและตัวรับแสง ภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง และหน่วยวิเคราะห์และแสดงผล ชุดแหล่งกำเนิดและตัวรับแสงจะเชื่อมต่อไปยังหน่วยวิเคราะห์และแสดงผล ภายในกล่องประกอบด้วยวงจรเรกกูเลเตอร์ของแหล่งกำเนิดและตัวรับแสง ซึ่งทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าแกไฟโตไดโอดและไฟโตทรานซิสเตอร์ โดยศักย์ไฟฟ้าขาออกจากวงจรตัวรับแสงจะต่อเข้ากับโวลต์มิเตอร์ เพื่อตรวจวัดและแสดงผลค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และแหล่งพลังงานของชุดอุปกรณ์ได้จากแบตเตอรี่ที่ติดตั้งอยู่ร่วมกับหน่วยวิเคราะห์และแสดงผล อย่างไรก็ตามชุดอุปกรณ์จะสามารถใช้ทำนายค่าปริมาณเนือย่างแห้งได้ก็ต่อเมื่อรู้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณเนือย่างแห้ง ซึ่งผู้วิจัยจะกล่าวถึงผลของการศึกษาความสัมพันธ์นี้ในลำดับถัดไป

2) ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณเนือย่างแห้งในน้ำยางพารา ชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นจะสามารถทำนายค่าปริมาณเนือย่างแห้งได้ก็ต่อเมื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณเนือย่างแห้งในน้ำยางพาราโดยผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเนือย่างแห้ง (DRC) กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ที่ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง

ความเข้มข้นของน้ำยางพารา (%V/V)	DRC (%)	V(mV)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00 ± 0.00
1	0.314	18.62	18.62	18.65	18.63 ± 0.01
3	1.054	64.45	64.31	64.44	64.40 ± 0.05
5	1.603	94.10	93.98	94.15	94.08 ± 0.05
7	2.209	119.02	118.94	118.91	118.96 ± 0.03
10	3.179	139.37	139.27	139.33	139.32 ± 0.03
13	4.071	153.98	154.03	154.01	154.01 ± 0.01
15	4.735	164.01	164.02	164.00	164.01 ± 0.01
18	5.825	167.73	167.87	167.62	167.74 ± 0.07
20	6.546	169.99	170.23	169.94	170.05 ± 0.09

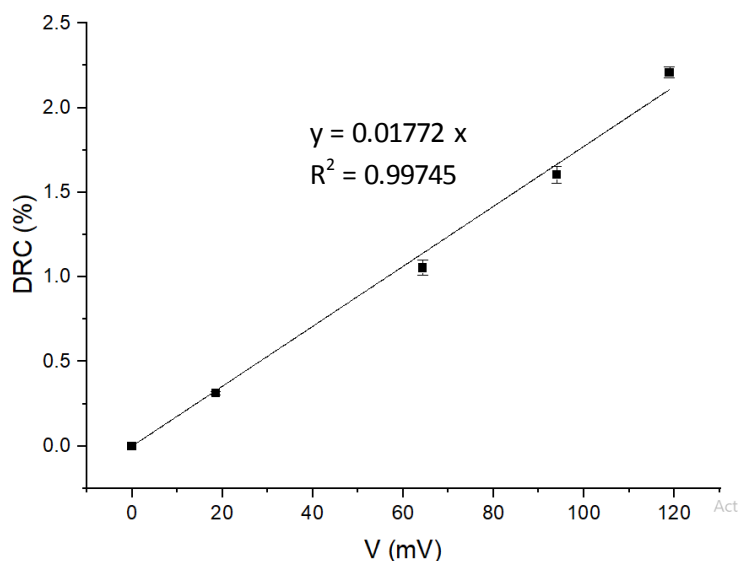
ความเข้มข้นของ น้ำยางพารา (%V/V)	DRC (%)	V(mV)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
25	7.971	173.08	173.10	173.13	173.10 ± 0.01
30	9.670	169.53	170.31	170.27	170.04 ± 0.25
35	11.235	163.02	163.09	163.00	163.04 ± 0.03
40	12.796	150.39	150.39	150.39	150.39 ± 0.00
50	16.042	139.68	139.69	139.65	139.67 ± 0.01
65	20.740	119.08	118.92	118.94	118.98 ± 0.05
80	25.526	107.50	107.43	107.37	107.43 ± 0.04
90	28.445	97.15	97.23	97.13	97.17 ± 0.03
100	32.774	89.52	89.50	89.48	89.50 ± 0.01



ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเนื้อยางแห้ง (DRC) กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

จากตารางที่ 1 เมื่อนำค่าปริมาณเนื้อยางแห้งและความต่างศักย์มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเนื้อยางแห้งกับความต่างศักย์ไฟฟ้า จะได้กราฟดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรตัวรับแสงในช่วง DRC เท่ากับ 0 – 8% จะมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อค่า DRC มากกว่า 8% ค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าลดลง โดยในการหาสมการเปรียบเทียบ ผู้วิจัยเลือกใช้ข้อมูล

ในช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0 – 120 mV ที่ค่าปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้งกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะเป็นเชิงเส้นดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) กับปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้งในน้ำยางพาราสด (DRC)

จากภาพที่ 5 สมการคณิตศาสตร์ที่เป็นตัวแทนของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) กับปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้ง (DRC) ในน้ำยางพารามีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ (5)

$$DRC = 0.01772 V \quad (5)$$

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.99745 และสมการคณิตศาสตร์ที่เป็นตัวแทนของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้งที่ได้ตามสมการที่ (5) จะเป็นสมการเปรียบเทียบของชุดอุปกรณ์ ใช้สำหรับคำนวณค่าปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้งเมื่อตรวจวัดได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแล้ว

3) ผลการตรวจสอบความถูกต้องของค่าปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้งที่ได้จากการตรวจวัดด้วยชุดอุปกรณ์ ในขั้นตอนนี้ได้นำชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นทำการตรวจวัดปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้งในน้ำยางพาราและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยวิธีการอบแห้งตามมาตรฐาน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้ง (DRC) ของตัวอย่างน้ำยางพาราสดที่วัดได้โดยใช้ชุดอุปกรณ์เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดโดยวิธีอบแห้งตามมาตรฐาน

ตัวอย่างที่	ค่า DRC (%) ที่วัดได้		
	การอบแห้งมาตรฐาน	ชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	33.3	33.43	0.39
2	33.6	32.97	1.88
3	31.2	32.25	3.37

ตัวอย่างที่	ค่า DRC (%) ที่วัดได้		
	การอบแห้งมาตรฐาน	ชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น	ความคลาดเคลื่อน (%)
4	32.5	32.57	0.22
5	32.9	32.12	2.37

อภิปรายผลการวิจัย

จากการออกแบบและประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้งในน้ำยางพารา พบว่าชุดอุปกรณ์ที่ได้สามารถใช้งานง่าย มีส่วนประกอบน้อย สะดวกในการใช้ตรวจวัด และเลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่ายและราคาถูก และเมื่อประกอบชุดแหล่งกำเนิดและตัวรับแสง ภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง และหน่วยวิเคราะห์และแสดงผลเข้าด้วยกัน ก็จะได้ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดที่เสร็จสมบูรณ์พร้อมใช้งาน ซึ่งในการตรวจวัดปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้งต้องบรรจุสารตัวอย่างปริมาตร 80 ml ลงในภาชนะบรรจุ จะทำให้ปลายของเส้นใยแก้วนำแสงอยู่ตรงกลางของสารตัวอย่างพอดี แล้วจึงครอบปิดชุดแหล่งกำเนิดและตัวรับแสงบนภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง เมื่อกดสวิตช์เปิดการทำงาน ชุดอุปกรณ์จะทำงานโดยอัตโนมัติและแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จอแสดงผล และจะสามารถใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าทำนายค่าปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้งได้เมื่อทราบสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้ง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้ง (DRC) กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ในภาพที่ 4 พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากวงจรตัวรับแสงในช่วง DRC เท่ากับ 0 – 2.5% จะมีค่าสูงขึ้นในลักษณะเป็นเชิงเส้น ต่อจากนั้นจะสูงขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นจนมีค่าสูงสุดที่ DRC ประมาณ 8% อันเนื่องมาจากเมื่อค่า DRC สูง จำนวนอนุภาคยางก็ย่อมมากขึ้น จึงทำให้เกิดการกระเจิงกลับของแสงเข้าสู่ตัวรับแสงมากตามไปด้วยตามทฤษฎีการกระเจิงแสงของเรลลีย์ – แจนส์ แต่เมื่อค่า DRC มากกว่า 8% ค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น อันเนื่องมาจากมีความขุ่นของสารตัวอย่างสูง นั่นคือมีจำนวนอนุภาคยางเป็นจำนวนมาก จึงทำให้เกิดการลดทอนของแสงที่กระเจิงกลับและเดินทางเข้าสู่ตัวรับแสงตามกฎของเบียร์ – แลมเบิร์ต ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Inagaki และคณะ ในส่วนการสร้างสมการเปรียบเทียบสำหรับใช้คำนวณค่าปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้งจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้นั้น ผู้วิจัยจะเลือกข้อมูลในช่วงที่ค่าปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้งกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะเป็นเชิงเส้น ซึ่งอยู่ในช่วงค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ประมาณ 0 – 120 mV และได้สมการคณิตศาสตร์ที่เป็นสมการเปรียบเทียบสำหรับชุดอุปกรณ์นี้ คือ $DRC = 0.01772 V$ เมื่อ DRC คือ ปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้งในน้ำยางพารา (%DRC) และ V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวรับแสงในหน่วย mV

ในการตรวจสอบความถูกต้องของค่าปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้งที่ได้จากการตรวจวัดด้วยชุดอุปกรณ์ จะต้องทำการเจือจางน้ำยางพาราสดด้วยน้ำปราศจากไอออน โดยมีอัตราส่วนน้ำยางพาราสด 1 ส่วน ต่อ น้ำปราศจากไอออน 19 ส่วน คนให้เข้ากันแล้วบรรจุลงในภาชนะบรรจุของชุดอุปกรณ์ปริมาตร 80 ml จากนั้นจึงอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า นำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ไปคำนวณหาปริมาณเนื้อเยื่ออย่างแห้ง

จากตามสมการที่ (5) จะได้ค่าปริมาณเนื้อเยื่อของตัวอย่างที่ถูกเจาะในอัตราส่วน $1/20$ จากนั้นนำค่าปริมาณเนื้อเยื่อของตัวอย่างคำนวณได้จากสมการที่ (5) คูณ 20 จะเป็นค่าปริมาณเนื้อเยื่อของตัวอย่างพาราตัวอย่าง ลำดับต่อไปจึงนำค่าที่ตรวจวัดได้จากชุดอุปกรณ์มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีอบแห้งตามมาตรฐานเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อน พบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3.4% ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจมีผลมาจากหลายปัจจัย เช่น เกิดจากความไม่แน่นอนของการตรวจวัดในขั้นตอนการเจาะตัวอย่างพาราก่อนตรวจวัด หรือจากผลของอุณหภูมิของน้ำยาพาราที่มีต่อค่าที่ได้จากการตรวจวัดด้วยชุดอุปกรณ์

องค์ความรู้ใหม่จากการวิจัย

จากการวิจัยนี้ทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในการตรวจวัดปริมาณเนื้อเยื่อในน้ำยาพารา โดยอาศัยหลักการวัดความชื้นและการประยุกต์ใช้เส้นใยแก้วนำแสงส่องผ่านแสงเลเซอร์ลงไปในน้ำยาพาราให้เกิดการกระเจิงของแสงเมื่อตกกระทบกับอนุภาคยา ทำการตรวจวัดความเข้มของแสงที่กระเจิงกลับมาสู่ตัวรับแสง ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าปริมาณเนื้อเยื่อในน้ำยาพารา จากการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ นำไปสู่การได้สมการเปรียบเทียบสำหรับคำนวณปริมาณเนื้อเยื่อของตัวอย่างเมื่อทราบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากการตรวจวัด จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชุดตรวจวัดปริมาณเนื้อเยื่อในน้ำยาพาราที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ตรวจวัดปริมาณเนื้อเยื่อของตัวอย่างได้จริง ใช้งานง่าย สามารถพกพาหรือเคลื่อนย้ายได้สะดวก เนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดเล็กและจำนวนน้อยชิ้น เหมาะสำหรับการนำไปใช้วัดในพื้นที่ซื้อ-ขายน้ำยาพารา หรือสามารถใช้ในโรงงานและห้องปฏิบัติการได้ เป็นการเพิ่มทางเลือกใหม่แก่เกษตรกร และสามารถต่อยอดสู่การพัฒนาให้มีคุณสมบัติที่ดียิ่งขึ้นในอนาคต

สรุป

จากการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากับปริมาณเนื้อเยื่อในน้ำยาพารา และการทดสอบความถูกต้องของค่าปริมาณเนื้อเยื่อของตัวอย่างที่ได้จากการตรวจวัดด้วยชุดอุปกรณ์ พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ที่อ่านได้จากชุดอุปกรณ์ตรวจวัดในช่วง 0 – 120 mV มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณเนื้อเยื่อ (DRC) โดยมีสมการคณิตศาสตร์ที่เป็นตัวแทนของกราฟซึ่งใช้เป็นสมการเปรียบเทียบคือ $DRC = 0.01772 V$ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการ $R^2 = 0.99745$ ซึ่งถือว่ามีค่าเป็นเชิงเส้นในการวัดสูง สามารถนำไปใช้ในการคำนวณค่าปริมาณเนื้อเยื่อของตัวอย่างเมื่อทราบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ โดยผลจากการทดสอบความถูกต้องของค่าปริมาณเนื้อเยื่อของตัวอย่างที่ได้จากการตรวจวัดด้วยชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับค่าปริมาณเนื้อเยื่อของตัวอย่างที่ตรวจวัดด้วยวิธีการอบแห้งตามมาตรฐาน พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.65% ดังนั้นชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ตรวจวัดปริมาณเนื้อเยื่อในน้ำยาพาราสดได้จริง และด้วยลักษณะของชุดอุปกรณ์ซึ่งมี

ส่วนประกอบน้อยชิ้น ขนาดเล็กสามารถพกพาได้สะดวก ใช้งานง่ายไม่ซับซ้อน และได้ผลการตรวจวัดที่ ดังนั้นชุดอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นนี้จึงสามารถไปใช้ได้ทั้งการวัด ณ จุดซื้อขาย ในโรงงานแปรรูปน้ำยาง รวมทั้งในห้องปฏิบัติการ

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัย ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะ ดังนี้

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1) ในการตรวจวัดปริมาณเนื้อยางแห้ง ผู้ตรวจวัดจะต้องเจาะจางน้ำยางพาราสดโดยผสมน้ำยางพารา 1 ส่วนกับน้ำสะอาดในอัตรา 19 ส่วน และเทน้ำยางที่เจาะจางแล้วลงในภาชนะบรรจุสารตัวอย่างปริมาตร 80 ml เมื่อได้ค่าจากการตรวจวัดให้คูณด้วย 20 จะเป็นค่าปริมาณเนื้อยางแห้งจริงของน้ำยางพาราตัวอย่าง และควรตรวจสอบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แสดงผลได้ขณะตรวจวัดจะต้องไม่เกิน 120 mV ถ้าหากค่าความต่างศักย์จะต้องทำการเจาะจางน้ำยางพาราตัวอย่างลงไปอีกจึงค่อยทำการตรวจวัด

2) เนื่องจากชุดการทดลองนี้อาศัยแนวคิดของการวัดความชื้น จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายอื่นๆ ที่มีลักษณะเป็นสารคอลลอยด์เช่นเดียวกับน้ำยางพาราได้

2. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1) ในการทดลองนี้ยังไม่ได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิของน้ำยางพาราที่มีต่อค่าที่ได้จากการตรวจวัดด้วยชุดอุปกรณ์ ดังนั้นในการพัฒนาต่อไปควรจะต้องมีการศึกษาผลของอุณหภูมิของน้ำยางพาราด้วย

2) เมื่อใช้ชุดอุปกรณ์นี้ทำการตรวจวัดโดยไม่เติมสารตัวอย่างลงไปในภาชนะ และตรวจวัดโดยการเติมน้ำเปล่าลงไปในภาชนะ พบว่าค่าที่ตรวจวัดได้จะเป็นศูนย์เสมอทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าชุดอุปกรณ์ยังทำงานปกติหรืออ่านค่าได้เที่ยงตรงเช่นเดิมหรือไม่ จึงควรมีสารตัวอย่างที่เป็นมาตรฐานเตรียมไว้สำหรับตรวจสอบความเที่ยงตรง โดยก่อนใช้งานแต่ละครั้งจะต้องตรวจวัดด้วยสารตัวอย่างมาตรฐานก่อน และในการตรวจวัดสารตัวอย่างมาตรฐานแต่ละครั้งควรจะต้องได้ค่าเท่ากันเสมอ ซึ่งสารตัวอย่างมาตรฐานนี้ควรมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่มีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอและความเข้มข้นที่เป็นมาตรฐาน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณสวนนายประจักษ์ มรกตคันโธ จ.พัทลุง ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์น้ำยางพาราสด สำหรับใช้ในการทดลองทดลองงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กองการยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2563). *สถิติยางประเทศไทย Thailand Rubber Statistics*. สืบค้นเมื่อ 12 พฤศจิกายน 2563, จาก <https://www.doa.go.th/rc/suratthani/wp-content/uploads/2019/05/STATISTICS-2563-1.pdf>.
- การยางแห่งประเทศไทย. (2553). *การหาปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC)*. สืบค้นเมื่อ 5 มกราคม 2561, จาก http://www.raot.co.th/ewt_dl_link.php?nid=5754.
- การยางแห่งประเทศไทย. (2562). *ความเคลื่อนไหวราคายางชนิดต่างๆ*. สืบค้นเมื่อ 25 พฤศจิกายน 2563, จาก http://www.raot.co.th/rubber2012/rubberprice_yr.php.
- จิตต์ลัดดา คักดาภิพาณิชย์. (2553). *เทคโนโลยียางธรรมชาติ*. กรุงเทพฯ: บริษัท เทคโนโลยีปิซ คอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด.
- ไชยยะ คงมณี และคณะ. (2560). *โครงการรับรู้ความเสี่ยงและกลยุทธ์จัดการความเสี่ยงของเกษตรกรสวนยางในภาคใต้ ประเทศไทย (รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์)*. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
- ฐานเศรษฐกิจ. (7 กรกฎาคม 2563). *ชาวสวนยางเคือง รัฐบาลแก้ปัญหาหลงทาง*. สืบค้นเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2563, จาก https://www.thansettakij.com/content/Macro_econ/441127.
- วรารณ ขจรไชยกูล. (2549). *ยางธรรมชาติ การผลิตและการใช้งาน*. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัด ซีโนดิไซน์.
- Aiyarak, P. and Sunheem, P. (2015). Design and Implementation of Microwave Attenuation Measurements to Estimate the Dry Rubber Content of Natural Rubber Latex. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 37(6), 713–718.
- Ballerstadt, R.D., Evans, C., Pillai, A.P. and Gowda, A. (2014). A Label-Free Fiber-Optic Turbidity Affinity Sensor (TAS) for Continuous Glucose Monitoring. *Biosensors and Bioelectronics*, 61(C), 280–284.
- Chong, C.S. and Colbow, K. (1976). Light Scattering and Turbidity Measurement on Lipid Vesicles. *Biochimica et Biophysica Acta*, 436(2), 286–282.
- George, N.A., Akhila, P. and Vijayan, M. (2013). A Simple Optical Sensor for the Measurement of Dry Rubber Content in Natural Rubber Latex. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 28(4), 313–320.
- Inagaki, T., Nozawa, D., Shimomura, Y. and Tsuchikawa, S. (2016). Three-Fibre-Based Diffuse reflectance Spectroscopy for Estimation of Total Solid Content in Natural Rubber Latex. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 24, 327–335.
- International Standard. (2014). *Latex, Rubber – Determination of Total Solids Content*. (7th ed.). Geneva: ISO Copyright Office.

- Julrat, S., Chongcheawchamnan, M., Khaorapapong, T., Patarapiboolchai, O., Kririksh, M. and Robertson, D. (2012). Single-Frequency-Based Dry Rubber Content Determination Technique for In-Field Measurement Application. *IEEE Sensor Journal*. 12(10), 3019–3030.
- Omar, A.B.F. and MatJafri, M.Z.B. (2009). Turbidimeter Design and Analysis: A Review on Optical Fiber Sensors for the Measurement of Water Turbidity. *Sensors*, 37(10), 8311–8335.
- Sari, I. R. J., Fathurrahman, J. A., Crisnaningtyas, F. and Romadhon, S. (2018). FWHM Dimensional Analysis from Scattered Light Intensity Profile for Dry Rubber Content Determination in Natural Rubber. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*. 9(1), 9–14.
- Sowcharoensuk, C. (2019). *Thailand Industry Outlook 2019–21: Natural Rubber Processing*. Retrieved September 10, 2020, ๙๙๓ https://www.krungsri.com/bank/getmedia/2f5ad30c-1aee-439d-a443-0065b8d98a9a/IO_Rubber_190617_EN_EX.aspx.