



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย เรื่อง การพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจสอบปริมาณความชื้น
ของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเทคนิคแบบไม่ทำลาย
(The develop technology of detection moisture content
of Para rubber timber using non-destructive technique)

โดย

ผศ.ดร.สิรินาฏ น้อยพิทักษ์

พฤศจิกายน 2562

สัญญาเลขที่ RDG62T0001

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย เรื่อง การพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจสอบปริมาณความชื้น
ของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเทคนิคแบบไม่ทำลาย

(The develop technology of detection moisture content
of Para rubber timber using non-destructive technique)

คณะผู้วิจัย

ผศ.ดร.สิรินาฏ น้อยพิทักษ์

รศ.ดร.อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล

ผศ.ดร.อมรฤทธิ พุทธิพิพัฒน์ขจร

ผศ.อมรเดช พุทธิพิพัฒน์ขจร

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

ชุดโครงการ ยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive Summary

ในปี 2560 ประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกไม้ยางพาราแปรรูปสูงถึง 50,824.29 ล้านบาท (Rubber Intelligence Unit, 2560) ซึ่งในปัจจุบันไม้ยางพาราแปรรูปเป็นวัตถุดิบเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ไม้แปรรูปเช่น เฟอร์นิเจอร์ ของเล่น ฯลฯ ซึ่งเป็นที่นิยมและมีแนวโน้มการส่งออกเพิ่มมากขึ้น จากลักษณะลวดลายเฉพาะตัว สีขาวนวล และความสวยงามของเนื้อไม้ยางพารา ไม้ยางพาราที่ผ่านการแปรรูปแล้วสามารถจำแนกเพื่อการส่งออกได้เป็น 2 เกรด คือ เกรด A และเกรด B ตามมาตรฐานไม้ยางแปรรูป (มอก. 2423-2552) และแบ่งตามการปฏิบัติงานจริงอีก 2 เกรด คือเกรด C และเกรด P และจำเป็นต้องลดความชื้นเนื้อไม้ให้ต่ำกว่า 12% dry basis (%db) โดยปัจจุบันอุปกรณ์ที่โรงเลื่อยนิยมใช้ในการตรวจสอบความชื้นเพื่อให้ได้คุณภาพตามมาตรฐาน คือ เครื่องวัดความชื้นแบบเข็มตอก และแบบดิจิตอล ซึ่งทั้งสองอุปกรณ์ต่างมีข้อจำกัดในการใช้งาน โดยที่แบบเข็มตอกจะทำลายไม้ยางพารา ส่วนแบบดิจิตอลจำเป็นต้องระบุค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพาราก่อน จากข้อจำกัดของเครื่องมือตรวจสอบความชื้นที่โรงเลื่อยใช้อยู่ในปัจจุบัน งานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy; NIRS) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่างผลิตภัณฑ์ มีความสะดวก รวดเร็วในการวัดตัวอย่างมาทำนายค่าความชื้น ปัจจุบันเทคโนโลยี NIRS ได้มีการพัฒนาเครื่องมือวัดให้มีลักษณะเล็กกะทัดรัด สะดวกกับการวัดแบบพกพาได้ (portable) และมีราคาถูกลงมากเมื่อเทียบกับแบบใช้งานในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นราคาที่ผู้ประกอบการสามารถจัดหาใช้งานได้ อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาต่อยอดให้สามารถเชื่อมต่อแบบไร้สายกับสมาร์ทโฟน (smart phone) ทำให้สะดวกต่อการใช้งาน จึงถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับผู้ประกอบการโรงเลื่อยไม้ยางพาราแปรรูป ทั้งนี้ระบบประมวลผลของเครื่องมือดังกล่าว จำเป็นต้องมีการพัฒนาสมการเพื่อทำนายความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปก่อนโปรแกรมลงเครื่องมือตรวจสอบ

ผลจากงานวิจัยนี้ทำให้ได้สมการสอบเทียบมาตรฐานสำหรับทำนายความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปที่ครอบคลุมการวัดทั้งไม้สดและไม้แห้ง และได้สร้างเครื่องมือตรวจสอบความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปแบบพกพาด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ที่ควบคุมและแสดงผลผ่านสมาร์ทโฟนบนระบบปฏิบัติการ Android โดยให้ชื่ออุปกรณ์ใหม่นี้ว่า “NIR-MC METER” ซึ่งออกแบบให้สามารถเลือกการตรวจสอบได้ 2 รูปแบบ ดังนี้

1. การตรวจสอบไม้ยางพาราอบแห้ง (วัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราในช่วง 0-30%db)
2. การตรวจสอบไม้ยางพาราสด (วัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราในช่วงมากกว่า 30%db)

ในการทดสอบความแม่นยำของสมการสอบเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้น โดยการตรวจสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราที่เป็นสินค้าจริงด้วยเครื่อง NIR-MC METER และทำการเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นตามวิธีมาตรฐาน ASTM D143 ด้วยวิธีอบลมร้อน พบว่าการสร้างสมการสอบเทียบมาตรฐานเพื่อทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยเทคนิค NIRS ที่เหมาะสมที่สุด รูปแบบที่ 1 มีสมรรถนะในการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราในช่วง 0-30%db (ไม้ยางพาราอบแห้ง) ที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient; R_{cv}) เท่ากับ 0.84 ค่าผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายกลุ่มตัวอย่างแบบครอสวาเลชัน (standard error of cross validation; SECV) เท่ากับ 2.05%db และค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิง (อบแห้งไม้ตามมาตรฐาน ASTM S143) กับค่าที่ได้จาก NIRS (Bias) เท่ากับ 0.00%db และรูปแบบที่ 2 ให้สมรรถนะการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราในช่วงมากกว่า 30%db (ไม้ยางพาราสด) ที่ค่า R_{cv} เท่ากับ 0.85 ค่า SECV เท่ากับ 4.56%db และค่า Bias เท่ากับ 0.00%db ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบ ถือว่าอยู่ในระดับสามารถใช้คัดเลือกแบ่งกลุ่มและประมาณค่าได้ เมื่อทำการทดสอบความแม่นยำของสมการสอบเทียบมาตรฐานจากการใช้งานจริงในการวัดตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาใช้พัฒนาสมการทำนาย (unknown sample) พบว่า การทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งมีค่าผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบสมการ (standard error of prediction; SEP) เท่ากับ 1.23%db และค่า Bias เท่ากับ -0.75%db อย่างไรก็ตามหากมีการปรับปรุงรูปแบบการตรวจสอบให้แคบลงเป็นช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-14 %db จะสามารถทำให้ค่า SEP และค่า Bias ลดลงได้ จะช่วยลดความคลาดเคลื่อนลง

เครื่อง NIR-MC METER ควบคุมและแสดงผลผ่านสมาร์ตโฟนบนระบบปฏิบัติการ Android ที่พัฒนาขึ้นเป็นอุปกรณ์ที่มีความสะดวกต่อการปฏิบัติงานจริงในโรงเลื่อย และห้องปฏิบัติการ มีราคาถูกเมื่อเทียบกับแบบตั้งโต๊ะ ทั้งในอนาคตยังสามารถพัฒนาวัดคุณภาพไม้ยางพาราแปรรูปในด้านอื่นๆ เช่น การวัดค่าความแข็งแรง ความถ่วงจำเพาะ ฯลฯ ให้เบ็ดเสร็จได้ในเครื่องเดียวกัน อย่างไรก็ตามต้องมีการสอบเทียบสมการอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้การทำนายมีเสถียรภาพและความแม่นยำมากขึ้น

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและทดสอบสมการสอบเทียบมาตรฐานทำนายความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปที่ครอบคลุมการวัดทั้งไม้สดและไม้แห้งด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้และพัฒนาอุปกรณ์สเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรดย่านใกล้ สร้างแอปพลิเคชันให้ควบคุมการวัดความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป และแสดงผลผ่านหน้าจอสมาาร์ทโฟนบนระบบปฏิบัติการ Android

สมการทำนายปริมาณค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นถูกสร้างขึ้นจากตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูป 3 กลุ่ม คือ ไม้ยางพาราแปรรูปสด ไม้ยางพาราแปรรูปที่อยู่ระหว่างอบลดความชื้นในตู้อบ และไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง ทำการวิเคราะห์สร้างสมการทำนายเชิงปริมาณด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) ในรูปแบบสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราในช่วง 0-30%db และรูปแบบสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราในช่วงมากกว่า 30%db

ผลการวิจัยพบว่าเครื่องสเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรดย่านใกล้แบบพกพา ให้สมรรถนะการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราในช่วง 0-30%db ที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R_{cv}) เท่ากับ 0.84 ค่าผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายกลุ่มตัวอย่างแบบครอสวาไลเดชัน (SECV) เท่ากับ 2.05%db และค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงกับค่าที่ได้จากการทำนาย (Bias) เท่ากับ 0.00%db และให้สมรรถนะการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราในช่วงมากกว่า 30%db ที่ค่า R_{cv} เท่ากับ 0.85 ค่า SECV เท่ากับ 4.56%db และค่า Bias เท่ากับ 0.00%db ซึ่งแสดงว่าอยู่ในระดับที่สามารถคัดเลือกและประมาณค่าได้

ผลการทดสอบวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งซึ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาใช้พัฒนาสมการทำนาย ให้ผลการทำนายโดยมีค่าผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบสมการ (SEP) เท่ากับ 1.23%db และค่า Bias เท่ากับ -0.75%db อย่างไรก็ตามเครื่องสเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรดย่านใกล้แบบพกพาควบคุมผ่านสมาร์ตโฟน เป็นระบบที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงเนื่องจากมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับแบบตั้งโต๊ะ ไม่เพียงแต่สามารถใช้ได้ดีในห้องปฏิบัติการ ยังมีความสะดวกต่อการพกพาสำหรับการตรวจสอบสินค้าในโรงเลื่อย แต่ต้องมีการสอบเทียบสมการอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้การทำนายตัวอย่างที่มีความหลากหลายในด้านฤดูกาล แหล่งผลิต มีความเสถียรและความแม่นยำ

Abstract

This research developed and validated a predictive equation to predict the percentage of moisture of Para rubber timber which covered a range of fresh wood to oven dried wood by using near infrared spectroscopy technique. The NIR spectrometer was developed and the application was created for control of measurements and data display on smartphone based on the Android operating system.

The predictive equation of the percentage of moisture content was generated from 3 groups of fresh wood, intermediate oven dried wood and oven dried wood. The predictive equation was analyzed for the quantitative predictions using Partial least squares regression (PLSR) in the form of an equation to predict the percentage of Para rubber wood moisture in the range 0-30%db and the equation model to predict the percentage of Para rubber wood moisture content in the range more than 30 %db

The results showed that the portable near-infrared spectrometer gave the capability to predict the percentage of moisture content of Para rubber timber in the range 0-30%db with the correlation of coefficient of cross validation (R_{cv}) value of 0.84. Whereas the sum square error of cross validation (SECV) and Bias were 2.05%db and 0.00%db respectively. In addition, the predictive model of Para rubber timber provided the capability to predict the percentage of moisture content in the range of more than 30%db with the R_{cv} value of 0.85, the SECV of 4.56%db and bias of 0.00%db indicating that the equation can be applied for classification and estimation tasks.

The result of validation of predictive equation for the moisture percentage of dried Para rubber timber samples, which were unknown samples, gave the prediction result with the sum square error of prediction (SEP) equal to 1.23%db and bias equal to -0.75%db. However, the portable NIR spectrometer with controlling via smartphone was a suitable system for application in practical sawn timber factories because it was cheap and conveniently portable. Nonetheless, the calibration needed to be carried out regularly so that the prediction of the samples with variation in growing season and growth area is robust and accurate.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาสับสนุนทุนวิจัยงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะท่านผู้ทรงคุณวุฒิ สำนักประสานงานชุดโครงการยางพารา ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา สนับสนุน ตลอดจนการแก้ไขตรวจสอบงานวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบริษัทเขมมหาชัยพาราวัต จำกัด โรงเลื่อย มาบปวา พาราวัต บริษัท ส.กิจชัยกรุป และบริษัท วี กรีน อะกรีคัลเจอร์ จำกัด ที่ให้ข้อมูลกระบวนการแปรรูปไม้ยางพารา และอำนวยความสะดวกในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง จนการทดลองสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากงานวิจัยนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ทางผู้วิจัยขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

คณะผู้วิจัย

พฤศจิกายน 2562

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	15
ผลและวิจารณ์	30
สรุปและข้อเสนอแนะ	47
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	49
ภาคผนวก	53
ภาคผนวก ก ถ่ายทอดเทคโนโลยี และสาธิตการใช้งาน	54
ภาคผนวก ข วิธีการใช้งานอุปกรณ์ NIR-MC METER	57
ความก้าวหน้าของผลงานวิจัย ณ ช่วงรายงานเมื่อเทียบกับแผนงานวิจัยทั้งโครงการ	59
ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและ ผลที่ได้รับตลอดโครงการ	60

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 มาตรฐานไม้ยางพาราแปรรูป	9
2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปด้วยวิธีอบแห้งมาตรฐาน	30
3 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปจากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์แบบดิจิทัล (WAGNER)	31
4 การเปรียบเทียบของเครื่องมือวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง	32
5 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปสำหรับกลุ่มสร้างสมการทำนาย (calibration set)	33
6 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมดด้วยวิธี PLSR จากข้อมูลการดูดกลืนแสง	36
7 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-30%db ด้วยวิธี PLSR จากข้อมูลการดูดกลืนแสง	39
8 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปที่มีช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากกว่า 30%db ด้วยวิธี PLSR จากข้อมูลการดูดกลืนแสง	41
9 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งด้วยวิธี PLSR จากข้อมูลการดูดกลืนแสงของเครื่อง DLP NIRscan Nano	44
10 ผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งของตัวอย่างจริงที่ไม่ได้นำมาใช้พัฒนาสมการทำนาย (Unknow sample) จากเครื่อง WAGNER และเครื่อง NIR-MC Meter	46

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 กระบวนการแปรรูปไม้ยางพารา (วรวรรณ และคณะ, 2561)	8
2 เทคนิคการวัด Near Infrared Spectroscopy	11
3 การเก็บตัวอย่างไม้ยางพาราจาก ก) บริษัท ส.กิจชัย กรุ๊ป ข) โรงเลื่อย มาบพวา พาราวูดส์ ค) บริษัท วี กรีน อะกรีคัลเจอร์ จำกัด และ ง) บริษัท เขามหาชัยพาราวู้ด จำกัด	15
4 ไม้ยางพาราแปรรูป ก) เกรด AB ข) เกรด C ค) เกรด P	17
5 ตำแหน่งการวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้	17
6 การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Near Infrared Spectrometer (DLP NIRscan Nano EVM)	18
7 การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นเชิงพาณิชย์แบบดิจิตอล (WAGNER)	19
8 การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยวิธีตามมาตรฐาน ก) ตัวอย่างไม้ยางพาราที่ถูกตัดแบ่งตาม ขนาดที่กำหนดแล้ว ข) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ ค) ตัวอย่างที่อบในตู้อบลมร้อน ง) ชั่ง น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ	20
9 ขนาดและองค์ประกอบของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (NIR-MC Meter)	24
10 สเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา NIR-MC Meter	25
11 แสดงการทำงานของแอปพลิเคชันสำหรับวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพารา	27
12 การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง NIR-MC Meter	28
13 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของไม้ยางพาราแปรรูปจากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM	34
14 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของไม้ยางพาราแปรรูปจากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Second derivative	35
15 กราฟผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริงที่ได้จากวิธีการหาด้วยตู้อบลมร้อน และค่า เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากการทำนายของไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมดที่ไม่ได้ทำการ ปรับแต่ง spectra	37
16 Regression coefficient การทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมด จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ไม่ได้ทำการปรับแต่ง spectra	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
17 กราฟผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริงของไม้ยางพาราแปรรูปช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-30%db ที่ได้จากวิธีการหาด้วยตู้อบลมร้อน และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากการทำนาย จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Multiplicative Scatter Correction (MSC)	39
18 Regression coefficient การทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-30%db จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Multiplicative Scatter Correction (MSC)	40
19 กราฟผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริงของไม้ยางพาราแปรรูปที่มีช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากกว่า 30%db ที่ได้จากวิธีการหาด้วยตู้อบลมร้อน และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากการทำนาย จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV)	42
20 Regression coefficient การทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปที่มีช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากกว่า 30%db จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV)	42
21 กราฟผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริงของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งที่ได้จากวิธีการหาด้วยตู้อบลมร้อน และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากการทำนาย จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV)	44
22 Regression coefficient การทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งจากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV)	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ถ่ายทอดเทคโนโลยี และสาธิตการใช้งานให้บริษัท ส.กิจชัย กรู๊ป อ.แกลง จ.ระยอง	55
ก2 ถ่ายทอดเทคโนโลยี และสาธิตการใช้งานให้โรงเลื่อย มาบพวา พาราวูดส์ อ.แกลง จ.ระยอง	55
ก3 ถ่ายทอดเทคโนโลยี และสาธิตการใช้งานให้บริษัท เขามหาชัยพาราวู้ด จำกัด อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช	56
ข1 องค์ประกอบของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (NIR-MC METER)	58

การพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจสอบปริมาณความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป ด้วยเทคนิคแบบไม่ทำลาย

The develop technology of detection moisture content of Para rubber timber using non-destructive technique

คำนำ

ยางพารา (*Hevea brasiliensis* Mull. Arg.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางพาราอันดับหนึ่งของโลกในปี 2559 มีพื้นที่ปลูกยางมากกว่า 21 ล้านไร่ ครอบคลุม 60 จังหวัดทั่วประเทศ (สถาบันวิจัยยาง, 2559) นอกจากจะให้ผลผลิตหลักในรูปของน้ำยางแล้ว ปัจจุบันไม้ยางพารากำลังกลายเป็นที่นิยมของตลาดโลก ในปี 2559 มีมูลค่าการส่งออกไม้ยางพาราแปรรูป 50,824.29 ล้านบาท (Rubber Intelligence Unit, 2560) โดยไม้ยางพาราเป็นผลพลอยได้จากการตัดโค่นต้นยางเก่าที่มีอายุ 25 ปีขึ้นไปให้ผลผลิตน้ำยางน้อย (จิรวุฒน์, 2556) แต่ลำต้นยางพารายังคงมีมูลค่าสูง และมีศักยภาพที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์จากการแปรรูปเพื่อส่งออกได้อีกหลายด้าน (สาลีณี, 2557) ซึ่งในปัจจุบันการนำไม้ยางพาราแปรรูปมาเป็นวัตถุดิบเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ไม้แปรรูปเฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากไม้ยางพารามีลักษณะเฉพาะตัว มีลวดลายสีขาวนวลจึงถูกเรียกว่าเป็นไม้สักขาว (White Teak) และความสวยงามของตัวไม้ (ฐิตาภรณ์ และคณะ, 2555; ทรงกลด และคณะ, 2552) ไม้ยางพาราที่ผ่านการแปรรูปแล้วสามารถจำแนกเพื่อการส่งออกได้เป็น 2 เกรด คือ เกรด A และเกรด B (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2552) และจำแนกตามการปฏิบัติงานจริงของโรงเลื่อยได้เพิ่มอีก 2 เกรด คือ เกรด C และ เกรดไม้พาเลท (P) (กรมสรรพากร, 2556) โดยในทางปฏิบัตินั้น การส่งออกไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งนั้นทางโรงเลื่อยมักจำหน่ายเกรด A และ B รวมกันเป็นเกรด AB และจำเป็นต้องลดความชื้นเนื้อไม้ไม่ให้เกินกว่า 12% dry basis (%db) ตามมาตรฐานการส่งออก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม, 2552) โรงเลื่อยนิยมใช้อุปกรณ์ในการตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ความชื้น เช่น เครื่องมือวัดความชื้นแบบเข็มตอก โดยที่ผู้ตรวจต้องทำการตอกเข็มหัวโพรบเข้าไปในเนื้อไม้ ยางพาราเพื่อตรวจสอบความชื้น ดังนั้นทำให้เกิดความเสียหายกับผลิตภัณฑ์ไม้ยางพารา ไม่สามารถนำขึ้น ไม้ที่ถูกตรวจสอบแล้วไปจำหน่ายต่อได้ หรือใช้เครื่องมือวัดความชื้นแบบดิจิตอลซึ่งจำเป็นต้องทราบค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ชนิดนั้นๆก่อนจึงจะสามารถหาค่าความชื้นได้ (วรวรรธน์ และคณะ, 2561) และยังมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นสูงได้ ซึ่งการปฏิบัติงานจริงโรงเลื่อยไม่มีข้อมูลค่าความถ่วงจำเพาะไม้ยางพาราที่ชัดเจน และไม่ค่อยมีการสอบเทียบเครื่องมือ ซึ่งแสดงถึงการขาดความเข้าใจในการใช้เครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ที่มีอยู่ในโรงเลื่อยอย่างถูกต้อง

นอกจากนี้ยังมีอุปสรรคในอุตสาหกรรมไม้ยางพาราอีกหลายประการ ได้แก่ การขาดการวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมไม้ยางในลักษณะการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ขาดความรู้และเทคนิคการตรวจสอบไม้ยางพาราในการผลิตไม้ยางแปรรูปโดยวิธีการไม่ทำลายตัวอย่าง

การพัฒนาอุตสาหกรรมไม้ยางพาราเข้าสู่ยุคไทยแลนด์ 4.0 คือ การนำเทคนิคที่ทันสมัยมาปรับใช้ในการก้าวสู่ยุคดิจิทัลในการตรวจสอบปริมาณความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ซึ่งเป็นเทคนิคแบบไม่ทำลายที่เป็นแนวทางดีแนวทางหนึ่ง เพราะเป็นเทคนิคที่น่าเชื่อถือ รวดเร็ว ราคาถูก สะดวกต่อการพกพา และไม่ทำลายตัวอย่าง

ปัจจุบันมีรายงานงานวิจัยในต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบคุณภาพไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนชนิดต่าง ๆ (Tsuchikawa, 2007) เช่น sweetgum and loblolly pine, Eucalyptus globulus wood, pine wood, bamboo, fresh-sawn red oak lumber ฯลฯ ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared spectroscopy; NIRS) โดย Tsuchikawa (2007) ได้รายงานว่าการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เป็นวิธีหนึ่งในการตรวจสอบคุณภาพไม้ชนิดต่าง ๆ ทั้งในรูปแบบรายงานการวิจัย และทั้งใช้จริงในสายการผลิตภาคอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ ทั้งการวัดในเชิงปริมาณ ได้แก่ การวัดคุณลักษณะทางกายภาพของเนื้อไม้ เช่น ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ความหนาแน่น (Density) ตัวแปรทางโครงสร้าง (Anatomical Parameter) การวัดคุณลักษณะทางเคมีของเนื้อไม้ เช่น ปริมาณลิกนิน (lignin) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เซลลูโลส (cellulose) การวัดคุณลักษณะเชิงกลของเนื้อไม้ เช่น ค่าความแข็งแรง (stiffness) ความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ฯลฯ นอกจากนี้ยังได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดเชิงคุณภาพ ได้แก่ การจำแนกสายพันธุ์ของเศษไม้ (Antti et al., 1996) การจำแนกอายุของเนื้อไม้โบราณคดี (Tsuchikawa et al., 2005) และการจำแนกไม้ยูคาลิปตัสจากพื้นที่ปลูกที่แตกต่างกัน (Schimleck et al., 2000)

เทคนิค NIRS เป็นการตรวจสอบคุณภาพที่แพร่หลายในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร ในปี 2561 วรวรรณ และคณะ (2561) เริ่มมีการรายงานการประยุกต์ใช้ เทคนิค NIRS ในการทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปที่ครอบคลุมทั้งไม้ที่มีความชื้นสูงและไม้ที่มีความชื้นต่ำ (ไม้ยางพาราแปรรูปสดและไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง) โดยที่ไม่ต้องทำลายตัวอย่าง ด้วยเครื่อง NIRS ชนิดตั้งโต๊ะที่มีค่าความละเอียดในการเก็บข้อมูลสูง ให้ค่าสมรรถนะการทำนายสูง แต่เครื่องมือยังไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยี NIRS ได้มีการพัฒนาเครื่องมือวัดให้มีลักษณะเล็กกะทัดรัด สะดวกกับการวัดแบบเคลื่อนที่ได้ (portable) และมีราคาถูกลงมาก ในราคาที่ผู้ประกอบการสามารถซื้อหามาใช้งานได้ อีกทั้งยังมีโอกาสพัฒนาให้ง่ายต่อการใช้งาน ด้วยการเชื่อมต่อเครื่อง NIRS แบบไร้สายกับสมาร์ทโฟน (smart phone)

ฉะนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจสอบปริมาณความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเทคนิค NIRS ซึ่งสามารถใช้งานได้อย่างสะดวก อุปกรณ์มีขนาดเล็กลง ง่ายต่อการใช้งาน สามารถเชื่อมต่อกับสมาร์ทโฟนได้จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจแก่การพัฒนาไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมโรงเลื่อยไม้ยางพาราแปรรูป นำไปสู่แนวทางการพัฒนาสร้างระบบสายพานคัดแยกคุณภาพไม้ยางพาราแปรรูป เพื่อยกระดับมาตรฐานคุณภาพไม้ยางพาราให้เป็นที่น่าเชื่อถือกับประเทศผู้นำเข้า

วัตถุประสงค์

เพื่อตรวจสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปี
อินฟราเรดย่านใกล้แบบพกพาที่ควบคุมผ่านสมาร์ตโฟน

การตรวจเอกสาร

1. ลักษณะไม้ยางพารา (พันธุ์ดีฐ, 2553)

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Hevea brasiliensis* Muell.Arg พันธุ์ยางปัจจุบันให้ขนาดลาต้นค่อนข้างเล็ก ดังนั้นขนาดของเนื้อไม้มีความโตไม่มาก (ประมาณ 20 – 40 ซม. หรือเล็กกว่านี้)

สี : เนื้อไม้มีสีขาวนวล บางทีอาจมีสีชมพูอ่อนแทรกอยู่ส่วนของกระพี้และแก่น มองเห็นไม่เด่นชัด ด้านหน้าตัด เมื่ออบแห้งแล้วเนื้อไม้จะมีสีเข้มขึ้นคล้ายกับสีฟางข้าว

ลักษณะเนื้อไม้ : ค่อนข้างละเอียดถึงหยาบปานกลาง เส้นไม้เป็นเส้นตรง บางส่วนมีลักษณะเส้นสนมากบ้าง น้อยบ้าง ตามลักษณะการเจริญเติบโต เกิดจากส่วนที่เป็นพารงคิมา (wood parenchyma) ปลายไม้เกิดจากความแตกต่างระหว่างด้านสัมผัสความแน่นของไฟเบอร์และปริมาณความหนาแน่นของกลุ่มเซลล์พารงคิมาทางด้านข้างพอร์ (pore) มีลักษณะเดี่ยวและแฝด 2 – 3 พอร์คละกัน มีการกระจายตัวห่าง ๆ อย่างสม่ำเสมอ

1. คุณสมบัติของไม้ยางพารา (พันธุ์ดีฐ, 2553) แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1.1 คุณสมบัติด้านบวก

1.1.1 ลักษณะเนื้อไม้ ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีปริมาณแป้งอยู่ในเนื้อไม้ในเปอร์เซ็นต์ที่สูงมาก พบว่าปริมาณแป้งที่มีในไม้ยางพารานั้น มีอยู่สูงถึง 5.08% ในขณะที่ไม้ชนิดอื่น ๆ จะมีปริมาณแป้ง โดยเฉลี่ยไม่เกิน 1% เท่านั้น การที่ไม้ยางพารามีแป้งอยู่ในเนื้อไม้มากเช่นนี้ จึงทำให้ไม้ยางพารามีสีขาวปนครีมหรืออมเหลืองอ่อนขณะที่ยังสดอยู่ หลังจากแห้งแล้วผิวหน้าไม้เมื่อไสใหม่ ๆ จะเป็นสีขาวแกมน้ำตาลอ่อนหรือแกมชมพู ไม้ยางพาราจะมีเนื้อหยาบ เส้นตรง ลวดลายสวยงามหลังจากขัดและชักเงาแล้ว

1.1.2 น้ำหนักและความแข็งแรง ไม้ยางพารามีความหนาแน่นขณะเมื่อไม้มีความชื้น 12% อยู่ในช่วง 0.62 – 0.70 กรัม/ซม.³ และโดยเฉลี่ยจะมีความหนาแน่นเป็น 0.65 กรัม/ซม.³

1.1.3 คุณสมบัติเกี่ยวกับการแห้ง ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่อบแห้งง่ายและรวดเร็ว การหดตัว หมายถึง การเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการสูญเสียความชื้นของไม้ต่ำกว่าจุดหมาย สำหรับไม้ยางพาราการหดตัวทางด้านรัศมีและด้านสัมผัสน้อยมาก ทำให้ไม่เกิดปัญหาเกี่ยวกับการปริแตกของไม้ยางพาราระหว่างการแห้งหรือการอบไม้ ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้ง่ายเมื่ออากาศเปลี่ยนแปลงไป

1.1.4 ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่แปรรูปได้ง่าย ทั้งการกร่อนของพื้นเลื่อยหรือคมมีดในการเลื่อย – ตกแต่งมีน้อยมากเมื่อเทียบกับไม้สัก

1.2 คุณสมบัติด้านลบ เป็นข้อจำกัดที่ทำให้ไม่สามารถนำเอาไม้ยางพารามาใช้ได้เต็มที่ 100% ซึ่งได้แก่ตำหนิต่าง ๆ ที่มีอยู่ในไม้ยางพารา ได้แก่

1.2.1 ตำหนิที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ได้แก่ ตาไม้และไส้ไม้ ซึ่งเมื่อได้มีการแปรรูปไม้ยางพาราแล้ว ส่วนใดที่มีตาไม้จะต้องทำการตัดออกทิ้งไป ทำให้ไม้ยางพาราแปรรูปท่อนั้นใช้ประโยชน์ได้น้อยลง และธรรมชาติของไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีตาไม้มาก

1.2.2 ตำหนิที่เกิดจากการเจริญเติบโต ไม้ยางพาราจัดเป็นไม้ที่โตเร็วและมีการตัดนำมาใช้ประโยชน์เมื่อยังมีอายุน้อย ในเนื้อไม้จะมีแรงเค้นที่เรียกว่า “growth stress” อยู่มาก เมื่อนำไม้ยางพาราไปทำการแปรรูปไม้บริเวณใกล้ไส้จะมีการขยายตัวทางด้านความยาว ส่วนไม้บริเวณใกล้เปลือกจะมีการหดตัวทางด้านความยาวขึ้น เป็นผลทำให้ไม้ยางพาราแปรรูปเกิดการโก่งงอ การโก่งงอและแตกในสภาพสดเช่นนี้ไม่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นในไม้แต่ประการใด

1.2.3 ตำหนิเกี่ยวกับความผิดปกติของเซลล์เนื้อไม้ ไม้ยางพารามีไส้ไม้ไม่อยู่ตรงกลางลำต้น เนื่องจากการเอียงที่เกิดจากอิทธิพลของกระแสลมและความต้องการแสงของเรือนยอด ไส้ไม้ไม่อยู่ตรงกลางลำต้นเรียกว่า ไม้ปฏิกิริยา (Reaction wood) เมื่อทำการเลื่อยไม้ยางพาราโดยเฉพาะไม้ยางพาราสดผิวหน้าไม้ยางพาราตรงส่วนดังกล่าว เมื่อนำไปไสผิวหน้าจะขรุขระไม่เรียบเช่นกัน ก่อให้เกิดปัญหาทางการใช้ประโยชน์ คือเมื่อทำการไสปรับหน้าไม้ทุกครั้งสุดท้ายให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ แม้ยังไม่เรียบก็ไม่อาจนำมาไสซ้ำได้อีก เพราะจะทำให้ไม่มีขนาดต่ำกว่ากำหนด การขัดช่วยในภายหลังมักทำได้ไม่หมด เพราะเสี้ยนแยกสีกกลงไปในเนื้อไม้ด้วย

1.2.4 ตำหนิเนื่องมาจากการกรีดยาง โดยเฉพาะสวนที่กรีดยางไม่พิถีพิถันหรือไม่ถูกวิธีการ นอกจากนั้นการกรีดยางในสภาวะอากาศขึ้นมากโดยเฉพาะหน้าฝน หน้ายางซึ่งผ่านการกรีดยางไปใหม่ ๆ มักถูกเชื้อราเข้าทำลาย เกิดการเน่าขึ้นและลามลงไปถึงชั้นของเยื่อเจริญ ดังนั้นต้นยางพาราส่วนโคนซึ่งถูกกรีดยางไปแล้วนี้ เมื่อโตต่อไปจะเกิดความผิดปกติขึ้น คือจะมีลักษณะเป็นปุ่มเนื้อไม้ ภายในจะมีเสี้ยนสนมาก และมีรอยแผลซึ่งมีสารสีน้ำตาลเข้มปรากฏอยู่ทั่วไป ลักษณะแผลเป็นแถบยาวหรืออยู่บริเวณกว้างแผ่ขนาดไปกับวงเติบโตและไปตามความสูงของบริเวณที่ถูกกรีด เมื่อทำการแปรรูปไม้ส่วนโคนนี้ รอยแผลดังกล่าวจะปรากฏให้เห็นทั่วไปบนผิวหน้าไม้ ในการนำไม้ยางพาราท่อนโคนซึ่งเป็นส่วนที่มีปริมาตรมากที่สุดมาเลื่อยเป็นไม้แปรรูปสำหรับใช้งาน เมื่อนำไปอบหรือผึ่งแห้ง ส่วนตำหนิที่เป็นรอยแผลขนาดใหญ่มักจะปริหรือแยกออกจากกัน

2. คุณสมบัติเชิงกลของไม้

คุณสมบัติของไม้ที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงเรียกว่า “คุณสมบัติเชิงกล” เป็นสมบัติที่แสดงถึงพฤติกรรมของไม้ต่อแรงที่กระทำ และการทดสอบเชิงกลคือ การทดสอบเพื่อหาคุณค่าสมบัติเชิงกล จะทำการวัดน้ำหนัก และการเสียรูปของไม้ โดยแสดงว่าในรูปของความเค้นและความเครียดซึ่งเป็นดัชนีบอกความแข็งแรง ความแข็งตึง ความยืดหยุ่น และการดูดซับพลังงานของไม้ การทดสอบสมบัติเชิงกลของไม้ในประเทศไทยใช้มาตรฐานจากต่างประเทศ เช่น American Society for Testing and Materials (ASTM), British Standards (BS), German Standards (DIN) และ International Standards (ISO) เป็นต้น

โดยไม้อย่างพารามีความแตกต่างกันของคุณสมบัติเชิงกลทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ ความสูง และอายุที่แตกต่างกัน เช่น พันธุ์ PRIM 600 มีความแข็งแรงจากการดึงในเชิงกลลดลงเมื่ออายุของไม้เพิ่มมากขึ้น และที่ระดับความสูงด้านล่างของลำต้น (1.3 ม.) จะมีแรงจากการดึงสูงกว่าระดับปลายยอดหรือด้านบนสูงของลำต้น (6.0 ม.) (จิรวัดน์, 2556)

3. องค์ประกอบทางเคมีของไม้

องค์ประกอบหลักของไม้ประกอบด้วย คาร์บอนประมาณ 49%, ออกซิเจนประมาณ 44% และไฮโดรเจนประมาณ 6% เป็นต้น และมีพอลิเมอร์ของไม้สามารถจัดกลุ่มได้เป็น 3 ชนิดคือ เซลลูโลส ประมาณ 40-45%, ลิกนินประมาณ 18-35% และเฮมิเซลลูโลสประมาณ 15-25% ส่วนที่เหลือจะประกอบด้วยน้ำตาลอื่นๆ เช่น แป้งและเพคติน เป็นต้น (จิรวัดน์, 2556)

องค์ประกอบทางเคมีของไม้อย่างพาราประกอบด้วย เถ้า 0.82% สารแทรกที่ละลายในเอทานอล-เบนซีน 2.82% สารแทรกที่ละลายในเอทานอล 0.55% สารแทรกที่ละลายในน้ำร้อน 6.35% สารแทรกทั้งหมดในเนื้อไม้ 9.66% ลิกนิน 19.79% โพลีเซลลูโลส 71.13% แอลฟาเซลลูโลส 40.16% เพนโตแซน 11.35% และการละลายในด่าง (1%NaOH) 22.60% (จิรวัดน์, 2556)

4. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของไม้

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของไม้ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ เมื่อความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นคุณสมบัติความแข็งแรงก็เพิ่มขึ้นด้วย ลักษณะการเจริญเติบโต เช่น ความแข็งแรงของไม้ยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในเส้นใยของผนังเซลล์ (USDA, 2010) และอุณหภูมิ ซึ่งมีผลเกี่ยวข้องกับความชื้นทำให้องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติเชิงกลของไม้เปลี่ยน เช่น การหด การพองตัว และการผุพังของไม้ (จิรวัดน์, 2556)

5. กระบวนการแปรรูปไม้ยางพารา

กระบวนการแปรรูปไม้ยางพารา เริ่มจากเกษตรกรตัดต้นยางพารามาเข้าส่งให้แก่โรงเลื่อย ท่อนซุงถูกคัดเลือกเกรด ตาหนิต่าง ๆ เบื้องต้น จากนั้นเข้าสู่การเลื่อยไม้ยางโดยให้เป็นแผ่นมีขนาดตามความต้องการ แล้วทำการคัดแยกเกรดไม้สด จากนั้นนำเข้าสู่การอัดน้ำยา เพื่อรักษาเนื้อไม้ ป้องกันแมลงมอดต่าง ๆ แล้วนำเข้าสู่ห้องอบ ทำการอบแห้งให้มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นน้อยกว่า 12%db ก่อนส่งขาย เมื่อไม้ยางแปรรูปอบแห้งออกจากตู้อบแล้วจึงนำไปคัดแยกตำหนิ รอยแตก สีที่เปลี่ยนแปลง และเกรดอีกครั้ง ก่อนเตรียมจำหน่ายดังภาพที่ 1 (วรวรรณ และคณะ, 2561)



ภาพที่ 1 กระบวนการแปรรูปไม้ยางพารา (วรวรรณ และคณะ, 2561)

6. การวัดปริมาณความชื้นไม้ยางพาราแปรรูป

การวัดค่าปริมาณความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปทำได้โดยวิธีอบแห้ง โดยเตรียมชิ้นไม้ทดสอบ ให้ตัดไม้ห่างจากปลายด้านใดด้านหนึ่งไม่น้อยกว่า 30 มิลลิเมตร ให้มีความยาว 20-25 มิลลิเมตร ตลอดความกว้างของแผ่นไม้ตัวอย่าง ซึ่งน้ำหนักตัวอย่างชิ้นไม้ที่ต้องการทดสอบ แล้วนำตัวอย่างชิ้นไม้นั้นอบในตู้อบอุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส จนได้มวลคงที่ แล้วนำมาใส่ในเดซิเดเตอร์ปล่อยไว้ให้เย็น ชั่งชิ้นไม้ทดสอบ เป็นน้ำหนักของชิ้นไม้ทดสอบหลังอบแห้ง แล้วคำนวณหาปริมาณความชื้นจาก ผลต่างของมวลชิ้นไม้ทดสอบก่อนอบและหลังอบส่วนด้วยมวลของชิ้นไม้ทดสอบหลังอบแห้งคูณ 100 หรือวิธีใช้มาตรความชื้น โดยมาตรความชื้นผ่านการสอบเทียบหรือผ่าน

การตรวจสอบให้ถูกต้องตรงกับเครื่องที่ได้สอบเทียบกับการหาปริมาณความชื้นด้วยวิธีการอบแห้งแล้ว (มอก.2423-2552)

7. มาตรฐานไม้ยางพาราแปรรูป

สมาคมธุรกิจไม้ยางพาราไทย (2556) ได้เสนอมาตรฐานไม้ยางพาราแปรรูป ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ไม้ยางพาราแปรรูป (มอก.2423-2552) ดังตารางที่ 1 ตารางที่ 1 มาตรฐานไม้ยางพาราแปรรูป

รายการคุณลักษณะของไม้		ชั้นคุณภาพ	
		A	B
ขนาดหน้าไม้แปรรูป	ความหนา	12, 16, 19, 22, 25, 32, 38, 50, 63, 75, 88, 100 มิลลิเมตร	
	ความกว้าง	22, 25, 38, 50, 63, 75, 88, 100, 125 มิลลิเมตร	
	ความยาว	1.00, 1.10, 1.20, 1.25, 1.30, 1.50, 2.00 เมตร	
	ขนาดพิเศษ	ไม้แปรรูปที่มีขนาดความหนา ความกว้าง ความยาวนอกเหนือจากที่กำหนดไว้	
	ขนาดความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ	ความหนาและความกว้าง	0-5 มิลลิเมตร
ชั้นคุณภาพ		ความยาว	
		0-50 มิลลิเมตร	
ชั้นคุณภาพ		A	ไม้แปรรูปที่ตัดตำหนิออกแล้ว ได้ไม้เกลี้ยงท่อนยาวที่สุด ยาวไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของความยาวที่กำหนด
		B	ไม้แปรรูปที่ตัดตำหนิออกแล้วได้ไม้เกลี้ยงท่อนยาวไม่น้อยกว่า 30 เซนติเมตร และไม่ใช้งานได้รวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ของความยาวที่กำหนด หรือ ไม้แปรรูปที่ได้ไม้เกลี้ยงหนึ่งท่อนยาวไม่น้อยกว่าร้อยละ 60 ของความยาวที่กำหนด
ความชื้น		ไม่เกิน 12%	

นิยาม

- 1) ไม้แปรรูป หมายถึง ไม้ยางพาราแปรรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ผ่านการเลื่อย อัดน้ำยาและอบแห้งเรียบร้อยแล้ว
 - 2) ไม้เกลี้ยง หมายถึง ไม้ที่ปราศจากตำหนิใดๆ ทั้ง 4 ด้าน ยกเว้นตำหนิขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร
 - 3) ตำหนิ หมายถึง ตาตำ รอยแตก เส้นตำ ราตำ ไม้ซ้ำน้ํา เปลือก ไม้สีก
- หมายเหตุ ไม้ที่มีรูมอดให้ถือเป็นไม้เสีย

สเปกโทรสโกปีของอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy: NIRS)

สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy: NIRS) เป็นคลื่นแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 700 - 2500 nm โดยมีหลักการ คือ เมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปยังสารหรือวัตถุ แล้วสารเกิดการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง near infrared ทำให้โมเลกุลของสารเกิดการสั่นที่ความถี่เฉพาะค่าหนึ่ง ในการสั่นของพันธะต่าง ๆ จะเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละพันธะ รวมทั้งตำแหน่งของโมเลกุลและช่วงการดูดกลืนแสงเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชันด้วย ดังนั้นเมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตรงกับพันธะในโมเลกุลก็จะเกิดการสั่นและดูดกลืนรังสีไว้ ทำให้มีพลังงานมากกว่าปกติ จากเดิมที่โมเลกุลอยู่ในสภาวะพื้น (ground vibration level) เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited vibration level) อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลกลับสู่สภาวะพื้นก็จะปล่อยพลังงานที่รับเพิ่มเข้าไปออกมาในรูปพลังงานความร้อน ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสง (Absorbance, A) เป็นไปตามกฎของเบียร์ - แลมเบิร์ต (Beer-Lambert) พลังงานของคลื่นแสงเมื่อผ่านเข้าไปในตัวอย่าง พลังงานจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง ความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีนั้น ความยาวคลื่นอินฟราเรดย่านใกล้สามารถแบ่ง ออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงความยาวคลื่นสั้นตั้งแต่ 700-1000 nm และช่วงความยาวคลื่นยาวตั้งแต่ 1000-2500 nm (Osborne et al.,1993)

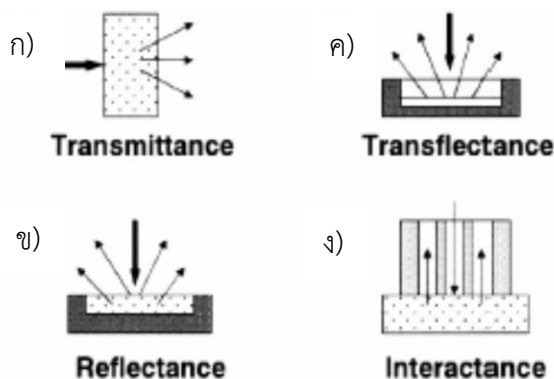
การเลือกเทคนิคการวัดการดูดกลืนแสงของตัวอย่างนั้นมีความสำคัญอย่างมาก จำเป็นต้องเลือกเทคนิคให้เหมาะสมกับตัวอย่างที่ต้องการ เนื่องจากมีผลต่อค่าการดูดกลืนแสง โดยมีเทคนิคการวัดตัวอย่าง 4 แบบคือ (Siesler et al., 2002)

1) Transmission เป็นการวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมาในด้านตรงกันข้ามกับด้านที่แสงตกกระทบตัวอย่าง (sample: s) ไปยังเครื่องตรวจจับ (detector: d) ดังภาพที่ 2ก)

2) Reflection แสงตกกระทบที่พื้นผิวของตัวอย่าง แล้วจึงวัดปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาโดยรวมถึงแสงที่สะท้อนจากเนื้อตัวอย่างส่วนที่ใกล้ผิวตัวอย่างได้อีกด้วย ดังภาพที่ 2ข)

3) Transflection แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบตัวอย่าง ผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบแผ่นเซรามิก ทอง หรืออะลูมิเนียมในชั้นใต้สุด แล้วสะท้อนกลับมายัง detector ดังภาพที่ 2ค)

4) Interaction ใช้ในกรณี fiber optics probe แสงจากแหล่งกำเนิดแสงย่าน NIR ส่องผ่านลงมายังตัวอย่างในวงแหวนด้านนอกมาตกกระทบตัวอย่าง แล้วแสงที่สะท้อนออกมาจาก เนื้อตัวอย่างถูกส่งไปยัง detector บริเวณส่วนกลาง fiber optics probe ดังภาพที่ 2ง)



ภาพที่ 2 เทคนิคการวัด Near Infrared Spectroscopy

ที่มา: Siesler et al. (2002)

การตรวจวัดตัวอย่างด้วยเครื่อง NIR Spectroscopy ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของสเปกตรัม ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance : A) และความยาวคลื่น (Wavelength; nm) หรือเลขคลื่น (Wavenumber; cm^{-1}) โดยเครื่อง NIRS นั้นจะมีการต่อเชื่อมกับโปรแกรมสำเร็จรูปทางคอมพิวเตอร์ เพื่อรวบรวมและประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากเครื่อง NIRS

การวิเคราะห์ข้อมูลที่อยู่ในสเปกตรัมต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์สถิติแบบตัวแปรพหุ (multivariate statistical technique) หรืออาจเรียกว่า เคมีเมตริกส์ (chemometrics) เป็นหลักการที่อาศัยหลักเคมีร่วมกับหลักการทางสถิติในการวิเคราะห์ เทคนิคนี้เป็นการวิเคราะห์การถดถอยร่วมกับการปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์ข้อมูล (อนุพันธ์, 2555) เนื่องจากปัจจัยของขนาดอนุภาค อุณหภูมิ ความชื้นของตัวอย่างอาจเป็นปัญหาในการวิเคราะห์สเปกตรัมของตัวอย่าง ซึ่งเกิดจากการกระเจิงของแสง ทั้งความแตกต่างในผลเชิงบวก (additive scattering) ทำให้สเปกตรัมเพิ่มขึ้นตามช่วงความยาวคลื่น หรือผลเชิงคูณ (multiplicative scattering) สเปกตรัมจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสูงขึ้น นอกจากนี้สเปกตรัมที่ได้จากการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้จะเป็นสเปกตรัมที่มีการเหลื่อมซ้อนทับกันอยู่

(overlapping band) เกิดจากการดูตกเส้นขององค์ประกอบย่อยในตัวอย่างดังนั้นในการวิเคราะห์สเปกตรัมจึงต้องนำไปปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ก่อน เพื่อลดความผิดพลาดให้น้อยลง การปรับแต่งสเปกตรัมนี้มีด้วยกันหลายแบบ เช่น Smoothing, การทำอนุพันธ์ (first derivative and second derivative), Multiplicative scatter correction (MSC), Standard Normal Variate (SNV), Normalization (สิรินาฏ, 2557)

เมื่อทำการปรับแต่งสเปกตรัมแล้วสามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมกับค่าทางเคมี โดยการใช้โปรแกรมทางสถิติเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ การวิเคราะห์มีด้วยกัน 2 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนการวิเคราะห์หาสมการสอบเทียบมาตรฐาน (calibration) เพื่อเป็น model ในการวัดค่าคุณภาพตามที่ต้องการตรวจสอบ ขั้นตอนที่สองนั้นเป็นการทดสอบความแม่นยำของสมการสอบเทียบมาตรฐานที่สร้างขึ้น ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นการทำ validation เพื่อตรวจสอบสมการที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ ขั้นตอนที่กล่าวมานั้นสามารถใช้การวิเคราะห์แบบ Partial Least Square Regression (PLSR) ในการสร้างสมการสอบเทียบมาตรฐาน เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมซึ่งเป็นการลดจำนวนตัวแปรลง โดยมีการสร้างตัวแปรใหม่จากตัวแปรเดิม และมีการนำข้อมูลตัวแปรตามเข้ามาร่วมในการสร้างตัวแปรใหม่ สามารถทำได้ 2 วิธี คือ การสร้างสมการถดถอยแบบ PLS1 เป็นการสร้างสมการสำหรับทำนายค่าตัวแปรตามเพียง 1 ตัว โดยใช้สมการ 1 สมการ และ PLS2 เป็นการสร้างสมการสำหรับทำนายค่าตัวแปรตามหลายตัวโดยใช้สมการเดียวกันโดยทั่วไปสมการที่สร้างด้วยวิธีถดถอยแบบ PLS1 ให้ค่าความถูกต้องการทำนายมากกว่าการสร้างสมการถดถอยแบบ PLS2 (สิรินาฏ, 2557)

ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสมการแสดงด้วย ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient; R) คือค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) หากค่าที่คำนวณได้มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง +1 ถ้าหากมีค่าเข้าใกล้ -1 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันในทิศทางตรงข้าม ถ้าหากเข้าใกล้ +1 ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันทางบวกอย่างมาก แต่ถ้าหากมีค่าเป็น 0 ตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน (Meier et al., 2014) ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination; R^2) เป็นค่าที่พิสูจน์ว่าโมเดลที่ได้นั้นเหมาะสมหรือไม่ มีค่าตั้งแต่ 0-1 ถ้าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าโมเดลนั้นยังดี การแปลความหมายของค่า R และ R^2 โดย Williams (2007) ได้มีการเปรียบเทียบไว้ ดังนี้

ค่า $R=0.2$ หรือ $R^2=0.2$

คือ ไม่สามารถใช้ในงาน NIR calibration ได้

ค่า $R=0.51-0.70$ หรือ $R^2=0.26-0.49$

คือ มีความสัมพันธ์ที่ไม่ดี ควรหาเหตุผล

ค่า $R=0.71-0.80$ หรือ $R^2=0.50-0.64$	คือ สามารถคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) อย่างหายา
ค่า $R=0.81-0.90$ หรือ $R^2=0.66-0.81$	คือ สามารถคัดเลือก(แบ่งกลุ่ม)และประมาณค่าอย่างหายาได้
ค่า $R=0.91-0.95$ หรือ $R^2=0.83-0.90$	คือ ควรใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ หรือการวิจัย
ค่า $R=0.96-0.98$ หรือ $R^2=0.92-0.96$	คือ ใช้ในการประยุกต์ได้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
ค่า $R \geq 0.99$ หรือ $R^2 \geq 0.98$	คือ ดีเยี่ยม สามารถใช้ประยุกต์ได้ทุกงาน

ค่าผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (standard error of calibration; SEC) คือ ค่าที่บอกถึงสมการที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการทำนายต่อไปได้ดีหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย

ค่าผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบสมการ (standard error of prediction; SEP) คือ ค่าที่บอกถึงการนำสมการที่สร้างขึ้นมาทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากเครื่อง NIRS มีความแม่นยำสูงหรือต่ำ ซึ่งถ้าค่าที่คำนวณได้มีค่าน้อย หมายความว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำสูง

ค่า bias หรือค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงกับค่าที่ได้จาก NIRS คือค่าเฉลี่ยของการทำนายข้อมูลของตัวแปรตาม (Y) และค่าเฉลี่ยข้อมูลของตัวแปรอิสระ (X) มีความแตกต่างกันหรือไม่ ค่าที่คำนวณได้ควรมีค่าน้อย

ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายตัวเอง (root mean square error of calibration; RMSEC) คือ เป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการประเมินโดยใช้สมการเทียบมาตรฐานกับค่าที่วิเคราะห์ได้

ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (root mean square error of prediction; RMSEP) เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพของโมเดล การคำนวณค่า RMSEP เกิดจากการถอดรากที่สองของการรวมค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนาย (standard error of prediction, SEP) ยกกำลังสอง และค่าความผิดพลาด (bias) ยกกำลังสอง โมเดลที่ดีต้องมีค่า RMSEP ที่ต่ำ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Defo et al. (2007) ได้มีการศึกษาการหาความชื้น และความหนาแน่นของไม้โอ๊คสีแดงสด โดยใช้เทคนิค NIR spectroscopy ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงแบบพื้นผิวแบบ transverse และแบบ radial ให้ค่าการทำนายที่ดีกว่าการวัดพื้นผิวแบบ tangential

Kobori et al. (2008) ได้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ visible–near-infrared (Vis-NIR) imaging ร่วมกับเทคนิคเคมีเมตริก (chemometrics) ในการจำแนกประเภทไม้ทั้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ 3 ชนิด ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ SIMCA ในการสร้างโมเดลจำแนกกลุ่มพบว่า มีความถูกต้องในจำแนก 89%

Watanabe et al. (2011) ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค NIR ในการจัดเรียงปริมาณความชื้นของไม้สนสีเขียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า NIR spectroscopy มีความสามารถในการประมาณค่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยของไม้สนสีเขียว ถึงแม้ว่าสามารถวัดค่าได้เพียงแค่ผิวหน้า เนื่องจากขีดจำกัดของความลึกที่สามารถวัดได้

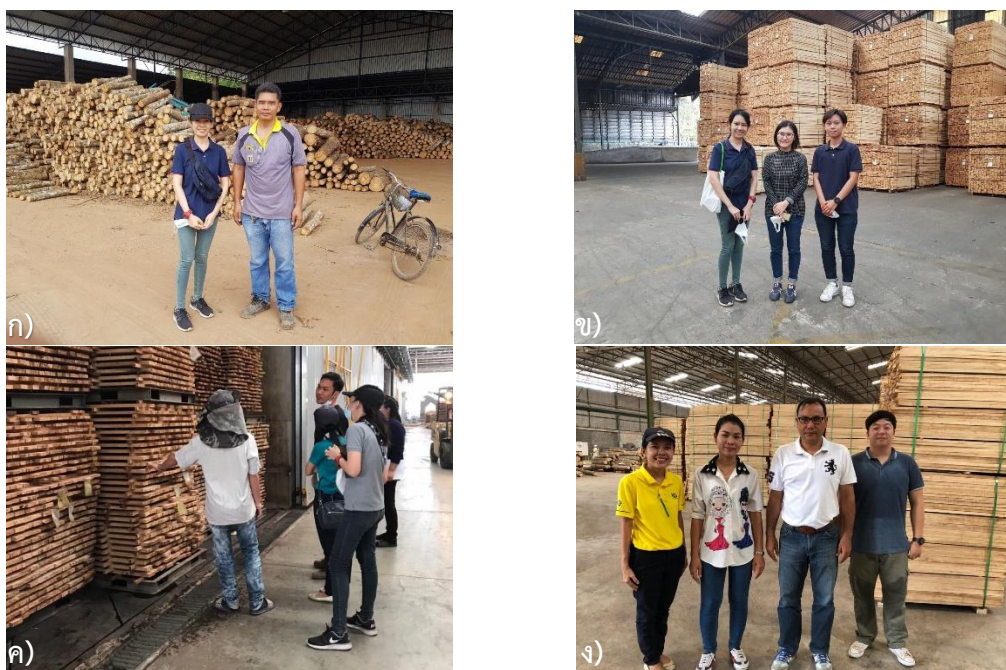
Haddadi et al. (2014) ได้ทำการศึกษาการทำนายความชื้นของกระดานไม้สนด้วยการใช้เทคนิค Hyperspectral images ที่ความยาวคลื่น 947-1637 nm กับตัวอย่างจำนวน กระดานไม้สน 100 ตัวอย่างและ ตัวอย่างแบบจัดสุ่ม ขนาด 4 cm จำนวน 7 ตัวอย่าง ตัวอย่างถูกวัดด้วย Hyperspectral images และการหาความชื้นแบบชั่งน้ำหนัก คือ นำไปอบแห้งจนน้ำหนักคงที่ สำหรับตัวอย่างมีความชื้น 1%-137% (มาตรฐานแห้ง) แล้วจึงวิเคราะห์ด้วย PLS เพื่อสร้างภาพ 2 มิติของค่าความชื้น $R^2 = 0.85$, RMSEP = 0.1085

สังเกตได้ว่าปัจจุบันการใช้เทคนิค NIR spectroscopy ในการตรวจสอบคุณภาพและทำนายข้อมูลคุณสมบัติของไม้ชนิดต่างๆ มากมายในต่างประเทศ แต่เพิ่งเริ่มมีรายงานวิจัยถึงการประยุกต์ใช้เทคนิค NIR spectroscopy ในอุตสาหกรรมไม้ยางพาราแปรรูปของไทย ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS ด้วยอุปกรณ์แบบพกพา ในการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปเพื่อเป็นแนวทางในการทำไปพัฒนาอุปกรณ์ตรวจสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแบบพกพาเชื่อมต่อสมาร์ตโฟน

อุปกรณ์และวิธีการ

1 การเก็บตัวอย่างและเตรียมตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูป

เก็บตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปจาก บริษัท ส.กิจชัย กรุ๊ป และ โรงเลื่อย มาบพวา พาราวูดส์ อ. แกลง จ.ระยองซึ่งเป็นตัวแทนไม้จากภาคตะวันออก, บริษัท วี กรีน อะกริคัลเจอร์ จำกัด อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี ซึ่งเป็นตัวแทนจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และ บริษัท เขมมหาชัยพาราวู้ด จำกัด อ. เมือง จ.นครศรีธรรมราช เป็นตัวแทนไม้จากภาคใต้ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การเก็บตัวอย่างไม้ยางพาราจาก ก) บริษัท ส.กิจชัย กรุ๊ป ข) โรงเลื่อย มาบพวา พาราวูดส์ ค) บริษัท วี กรีน อะกริคัลเจอร์ จำกัด และ ง) บริษัท เขมมหาชัยพาราวู้ด จำกัด

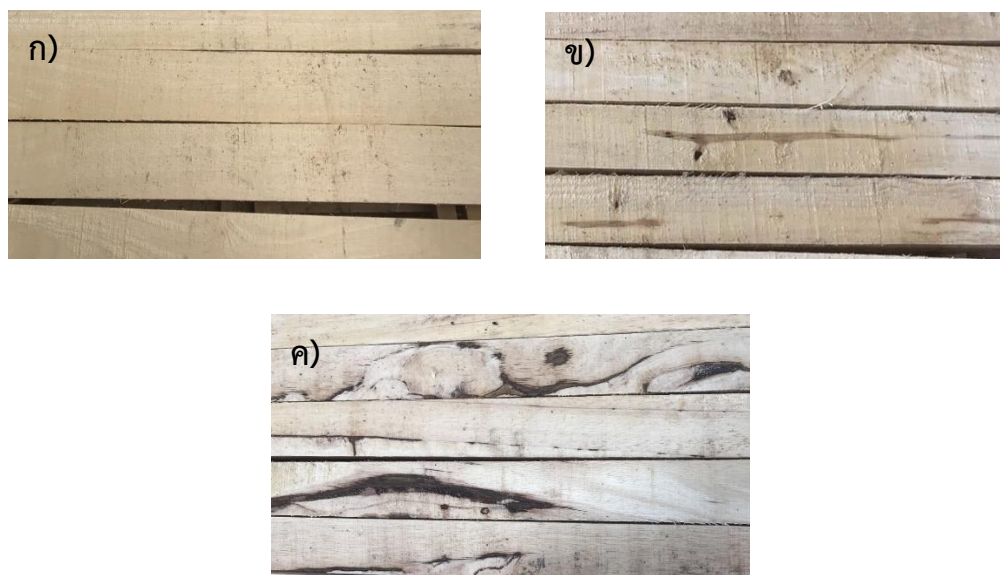
เตรียมตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปสด ไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง และไม้ยางพาราแปรรูปที่กำลังอบลดความชื้นในตู้อบของโรงเลื่อย เกรด A, B, AB, C และ พาเลท (Pallet; P) ดังภาพที่ 4 โดยมีการห่อตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมดด้วยพลาสติก (plastic wrap) เพื่อให้ความชื้นของตัวอย่างทั้งหมดเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ซึ่งลักษณะของไม้ยางพาราแปรรูปเกรด A นั้นมีเนื้อสวย เมื่อตัดตำหนิออกแล้วต้องได้ไม้เกลี้ยงท่อนยาวที่สุดยาวไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของความยาวที่กำหนดซึ่งนิยมใช้ส่งออกต่างประเทศ เกรด B ไม้แปรรูปที่ตัดตำหนิออกแล้วได้ไม้เกลี้ยงท่อนยาวไม่น้อยกว่า 30 เซนติเมตร และไม่ใช้งานได้

รวมกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ของความยาวที่กำหนด เกรด AB เป็นการขายร่วมกันระหว่างเกรด A เกรด B ตามคำสั่งซื้อของลูกค้าต่างประเทศ ไม้ยางพาราแปรรูปเกรด C นั้นอาจมีตำหนิหรือไม้มอดได้ แต่เมื่อตัดตำหนิออกแล้วได้ไม้เกลี้ยงยาวไม่น้อยกว่าร้อยละ 60 ของความยาวที่กำหนด นิยมส่งขายต่างประเทศในเกรดรอง หรือขายในประเทศ และไม้ยางพาราแปรรูปเกรด P มีลักษณะตำหนิ ไม้ลายตลอดแนว นิยมนำไปใช้ทำชิ้นงานพาเลท ดังภาพที่ 4 จำนวน 600 ตัวอย่าง เพื่อให้มีความแปรปรวนของข้อมูลตัวอย่างในการสร้างสมการทำนายที่ครอบคลุมเกรดไม้ พื้นที่การปลูก และระดับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในไม้ยางพาราแปรรูปสดถึงไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง จึงได้สุ่มเลือกตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูป 3 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 ไม้ยางพาราแปรรูปสด (fresh wood) จำนวน 145 ตัวอย่าง (เกรด A จำนวน 6 ตัวอย่าง เกรด B จำนวน 6 ตัวอย่าง เกรด AB จำนวน 61 ตัวอย่าง เกรด C จำนวน 51 ตัวอย่าง และเกรด P จำนวน 21 ตัวอย่าง)

กลุ่มที่ 2 ไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง (oven dried wood) จำนวน 400 ตัวอย่าง (เกรด A จำนวน 27 ตัวอย่าง เกรด B จำนวน 26 ตัวอย่าง เกรด AB จำนวน 167 ตัวอย่าง เกรด C จำนวน 107 ตัวอย่าง และเกรด P จำนวน 73 ตัวอย่าง) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งที่โรงเลื่อยได้ลดความชื้นให้มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่ำกว่า 12% ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ไม้ยางพาราแปรรูป (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2552) แล้วเก็บรักษาไว้ในโกดังเพื่อเตรียมส่งออกต่างประเทศ

กลุ่มที่ 3 ไม้ยางพาราแปรรูปที่อยู่ระหว่างอบลดความชื้นในตู้อบ (intermediate oven dried wood) จำนวน 55 ตัวอย่าง (เกรด AB จำนวน 35 ตัวอย่าง และเกรด C จำนวน 20 ตัวอย่าง) เพื่อให้ได้ช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ครอบคลุมในช่วงที่ขาดหายไประหว่างไม้ยางพาราสดและไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง สำหรับใช้สร้างสมการทำนายที่มีค่าการกระจายตัวของตัวอย่างที่ครอบคลุมตลอดช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราสดไปถึงช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง ซึ่งเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นมีด้วยกัน 3 ช่วงเวลา ได้แก่ 7, 48 และ 96 ชั่วโมง ตามลำดับ

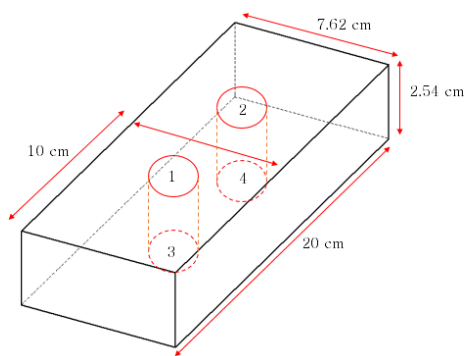


ภาพที่ 4 ไม้ยางพาราแปรรูป ก) เกรด AB ข) เกรด C ค) เกรด P

ตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปทั้ง 3 กลุ่ม นั้นถูกตัดแต่งให้มีขนาด $2.54 \times 7.62 \times 20$ cm ดังภาพที่ 5 จากนั้นเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง 25°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบหาค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ และหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น

2.การวัดค่าการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูป

ตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปที่ตัดแต่งตามขนาดที่กำหนดแล้ว มากำหนดตำแหน่งการวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ 4 ตำแหน่ง เพื่อให้ได้ค่าสเปกตรัมเฉลี่ยทั่วทั้งชิ้น ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ตำแหน่งการวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้

2.1 การวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเครื่อง NIR Spectrometer แบบพกพา

นำตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Near Infrared Spectrometer (DLP NIRscan Nano EVM, Texas Inc, Texas, USA) ดังภาพที่ 6 ซึ่งเป็นเครื่องมือขนาดเล็ก สามารถเคลื่อนย้ายได้ มีราคาถูก มีช่วงความยาวคลื่น 900-1700 nm รูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (reflectance mode) ที่ resolution เท่ากับ 3.51 nm และ scan average เท่ากับ 10 ครั้ง วัดค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมด ชั้นละ 4 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 2 ซ้ำ ตามตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ในภาพที่ 5



ภาพที่ 6 การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Near Infrared Spectrometer (DLP NIRscan Nano EVM)

3.การทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป

3.1 การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์แบบดิจิทัล

นำตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปมาวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นแบบดิจิทัล (MMC220, Wagner Electronic Products Inc, Oregon, USA) ดังภาพที่ 7 เป็นอุปกรณ์ในเชิงพาณิชย์ที่โรงงานนิยมเนื่องจากสามารถใช้ได้อย่างสะดวก โดยคู่มือของเครื่องมือกล่าวถึงข้อจำกัดในการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นอยู่ในช่วง 4-32%db โดยเครื่องมือมีขนาดพื้นที่ในการวัด กว้าง 3.81 cm x ยาว 6.35 cm และสามารถวัดได้ลึก 1.91 cm ซึ่งการทำงานของเครื่องวัดความชื้นเป็นการใช้สนามแม่เหล็ก (electromagnetic field) ในการวัดค่าและต้องทราบความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ

ก่อน โดยค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพาราที่เครื่องวัดความชื้นแบบดิจิตอลเท่ากับ 0.61 ตามคำแนะนำของผู้จำหน่ายเครื่องมือ

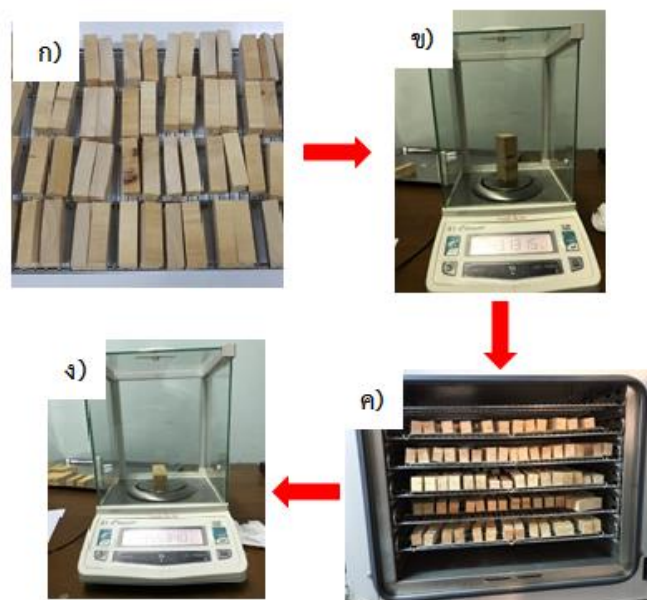


ภาพที่ 7 การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นเชิงพาณิชย์แบบดิจิตอล (WAGNER)

4.การทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป

4.1 การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยวิธีการอบด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D143

นำตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปมาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยการอบด้วยตู้อบลมร้อนตามมาตรฐาน (ASTM, 2000) ซึ่งตำแหน่งที่นำมาวิเคราะห์เป็นบริเวณตำแหน่งที่ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยตัวอย่างถูกตัดแบ่งให้มีขนาด $2.54 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm} \times 7.62 \text{ cm}$ จำนวน 2 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง ดังภาพที่ 8ก แล้วนำตัวอย่างไม้ยางพาราที่ตัดแบ่งแล้วชั่งน้ำหนักก่อนอบทันที (W_f) ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (CY 204, Citizen Scale India Pvt. Ltd, Maharashtra, India) ดังภาพที่ 8ข แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อน (FD240, BINDER, Tuttlingen, Germany) ที่อุณหภูมิ $103 \pm 2^\circ\text{C}$ จนกว่าน้ำหนักคงที่ ดังภาพที่ 8ค จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการอบด้วยตู้อบลมร้อนแล้วใส่โถดูดความชื้น (desiccator) เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำหนักหลังอบเปลี่ยนแปลงแล้วจึงนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักหลังอบ (W_d) ด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิตอล 4 ตำแหน่ง ดังภาพที่ 8ง นำค่าที่ได้มาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห่งดังสมการที่ 1



ภาพที่ 8 การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยวิธีตามมาตรฐาน ก) ตัวอย่างไม้ยางพาราที่ถูกตัดแบ่งตามขนาดที่กำหนดแล้ว ข) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ ค) ตัวอย่างที่อบในตู้อบลมร้อน ง) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ

คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น โดยใช้สูตร

$$\% \text{moisture content} = \frac{W_f - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ W_f = น้ำหนักตัวอย่างไม้ก่อนอบ (g)
 W_d = น้ำหนักตัวอย่างไม้หลังอบ (g)

5.การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

นำข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรวจสอบข้อมูลที่ผิดปกติ (outlier) ของค่าอ้างอิงโดยพิจารณาค่ามาตรฐาน (standard score ; Z) ของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม่ยางพารา ถ้าหากค่า Z มากกว่า 3 หรือน้อยกว่า -3 ถือว่าเป็น outlier (Meier, 2014)

นำค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละเกรดไม้ของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปทั้ง 3 กลุ่ม ด้วยวิธี One way ANOVA และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม่ยางพาราแปรรูประหว่างการวัดด้วยวิธีการลมนร้อนตามมาตรฐาน ด้วยโปรแกรม SPSS version 11.5

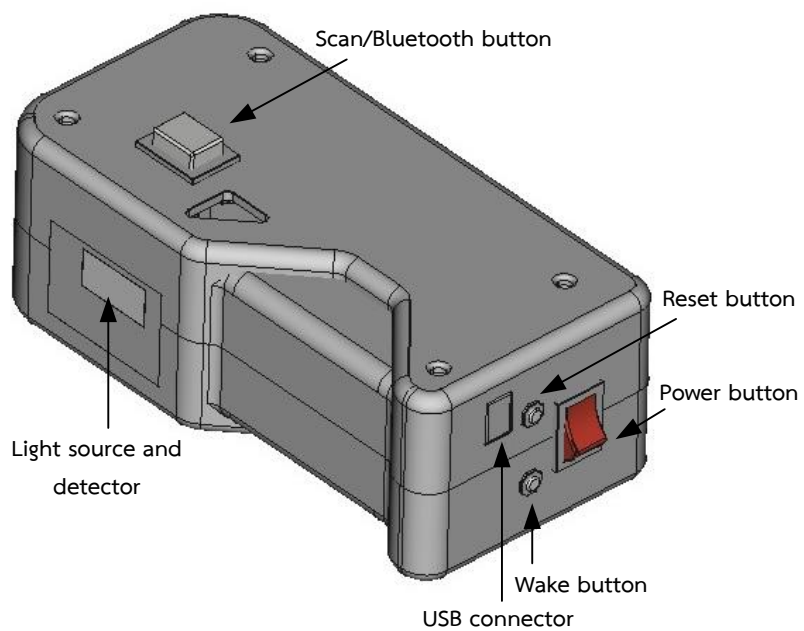
ทำการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นใน 4 รูปแบบ คือ สมการทำนายความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมด (ไม้ยางพาราแปรรูปสด ไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง และไม้ยางพาราแปรรูปที่อยู่ระหว่างอบลดความชื้นในตู้อบ; ค่าความชื้น 0-90%db) สมการทำนายความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปสด (ค่าความชื้น 30-90%db) สมการทำนายความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งและไม้ยางพาราแปรรูปที่อยู่ระหว่างอบลดความชื้น (ค่าความชื้น 0-30%db) และสมการทำนายความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง (ค่าความชื้น 0-14%db)

โดยนำข้อมูลสเปกตรามาตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูลโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Principal Component Analysis (PCA) แล้วนำข้อมูลสเปกตรากการดูดกลืนของแสงเริ่มต้นและ สเปกตราที่นำมาทำการปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธี Smoothing, First derivative แบบ Savitzky Golay 15 points, Second derivative แบบ Savitzky Golay 15 points, Multiplicative scatter correction (MSC), Standard normal variate (SNV) ทั้งนี้เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมการทำนายที่วิเคราะห์สร้างจากสเปกตราเริ่มต้นและสเปกตราที่มีการลดอิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัม และลดการกระเจิงของแสง จากนั้นแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้สร้างสมการทำนาย (calibration set) จำนวน 600 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ใช้ในการทดสอบสมการทำนาย (external prediction set) จำนวน 335 ตัวอย่าง ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่เกี่ยวข้องที่นำมาสร้างสมการทำนายโดยมีความแตกต่างด้านแหล่งปลูก ฤดูกาล พันธุ์ จากนั้นใช้โปรแกรม The Unscrambler 9.8 (CAMO, USA) สร้างสมการทำนาย ทำนายประกอบด้วยสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) แบบ Full cross validation ด้วยข้อมูลในกลุ่มที่สร้างสมการทำนายโดยมีการกำหนดให้ค่าการดูดกลืนแสงเป็นตัวแปรอิสระ และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากวิธีทางมาตรฐาน เป็นตัวแปรตามในแต่ละสมการทำนาย

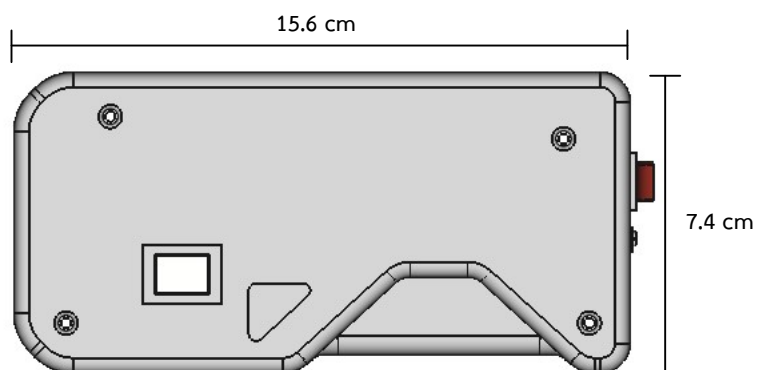
โดยพิจารณาค่าสมรรถนะของสมการทำนายที่ดีที่สุดจากค่าทางสถิติ คือ ค่า Correlation coefficient of calibration (R_c) ที่มีค่าสูง ค่า standard error of calibration (SEC) ที่มีค่าต่ำ ค่า bias ที่มีค่าต่ำ และ ค่า Root mean square error of calibration (RMSEC) ที่มีค่าต่ำ จากนั้นเมื่อได้สมการทำนายแล้วทำการทดสอบสมการทำนายด้วยข้อมูลในกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการ แล้วพิจารณาค่าสมรรถนะการทำนายจากค่าทางสถิติ คือ ค่า Correlation coefficient of prediction (R_p) ที่มีค่าสูง ค่า Root mean square error of prediction (RMSEP) ที่มีค่าต่ำ ค่า standard error of prediction (SEP) ที่มีค่าต่ำ ค่า bias ที่มีค่าต่ำ

6. การออกแบบและสร้างสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา

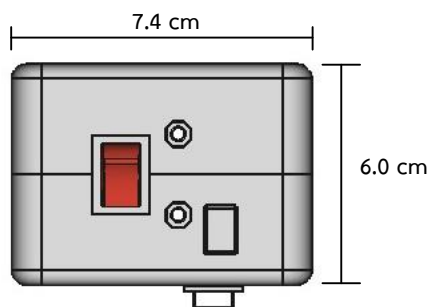
6.1 สเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา (ภาพที่ 9) ถูกออกแบบให้มีรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (Reflectance mode) มีช่วงความยาวคลื่น 900-1700 nm ความละเอียด 5 nm มีขนาดกว้าง 6.0 cm ยาว 15.6 cm และสูง 7.4 cm ตามลำดับ ภายในบรรจุ DLP NIRscan Nano ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญคือ เกรตติงเลี้ยวเบน (Diffraction Grating) ทำหน้าที่แยกแสงที่ผ่านเข้ามาออกเป็นหลาย ๆ ความยาวคลื่นในทิศทางต่าง ๆ กันและเดินทางไปตกกระทบกับกระจกอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก (Digital Micro mirror Device, DMD) ซึ่งทำหน้าที่สะท้อนความยาวคลื่นที่ละความยาวคลื่นจากน้อยไปมากเพื่อตกกระทบบน เซ็นเซอร์รับแสงชนิด Indium Gallium Arsenide (In GaAs) ทำให้ได้เส้นสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 nm มีหลอดเปล่งแสง (Light emitting diode, LED) กำเนิดแสงในช่วงคลื่นอินฟราเรดย่านใกล้ มีปุ่มกดสำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ดังนี้คือ ปุ่มรีเซ็ตการทำงานของอุปกรณ์ (Reset button) ปุ่มกดเพื่อออกจากสภาวะหลับใหล (Wake button) และปุ่มกดเพื่อสั่งให้อุปกรณ์อ่านสเปกตรัมจากตัวอย่างหรือใช้เพื่อเชื่อมต่อกับ Smart phone ด้วยสัญญาณ Bluetooth อุปกรณ์ถูกออกแบบให้ทำงานโดยใช้แหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขนาด 3.7V 4000 mAh ซึ่งทำการประกอบเป็น สเปกโตรมิเตอร์แบบพกพาสำหรับวัดความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป ให้ชื่อว่า NIR-MC Meter (ภาพที่ 10) เครื่องสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพานี้ถูกออกแบบให้ทำงานร่วมกับแอปพลิเคชันที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Android เพื่อแสดงผลและควบคุมการใช้งานบนอุปกรณ์ Smart phone โดยเชื่อมต่อผ่าน Bluetooth Low Energy (BLE) เวอร์ชัน 4.0



ก). ภาพ isometric



ข). ภาพด้านหน้า (front view)



ค). ภาพด้านข้าง (side view)

ภาพที่ 9 ขนาดและองค์ประกอบของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (NIR-MC Meter)



ภาพที่ 10 สเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา NIR-MC Meter

6.2 แอปพลิเคชันสำหรับการวัดค่าความชื้นของไม้ยางพาราถูกพัฒนาบนระบบปฏิบัติการ Android studio 2.3.3 โดยอาศัย KST SDK ทำงานร่วมกับ DLP Spectrum Library ซึ่งเป็นที่รวบรวมคำสั่งภาษาซี สำหรับการสั่งงานอุปกรณ์ผ่านแอปพลิเคชันเช่น การคำนวณความเข้มแสงสะท้อนกลับ (Reflectance intensities) หรือความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืน (Absorbance intensities) จากการสแกนแต่ละครั้ง และการคำนวณความเข้มแสงอ้างอิง (Reference intensities) ของแต่ละความยาวคลื่นเป็นต้น โดยความเข้มแสงอ้างอิงคำนวณได้จากข้อมูลที่ใช้สอบเทียบอ้างอิง (Reference calibration data) ซึ่งเก็บอยู่ภายใน DLP NIRscan Nano สำหรับการคำนวณความเข้มแสงสะท้อนกลับจะต้องนำความเข้มแสงอ้างอิง (Intensity of Reference) มาคำนวณร่วมกับความเข้มแสงที่ได้จากตัวอย่าง (Intensity of Sample) (ดังสมการที่ 1) ส่วนการคำนวณความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืนคำนวณได้จากค่าลบของลอการิทึม

ฐานสิบของความเข้มแสงสะท้อนกลับ (ดังสมการที่ 2) และนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปแสดงผลในแอปพลิเคชันต่อไป

$$\text{Reflectance} = \text{Intensity of Sample} / \text{Intensity of Reference} \quad (1)$$

$$\text{Absorbance} = -\log_{10} (\text{Reflectance}) \quad (2)$$

เมื่อได้ความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืนแล้วจะนำมาคูณกับ ค่า Regression coefficient ของสมการการทำนายที่สร้างขึ้น เพื่อคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพารา และแสดงผลผ่านหน้าจอ smart phone

แอปพลิเคชันถูกออกแบบให้มีความทำงาน 2 ส่วนคือ ส่วนแรกของแอปพลิเคชัน (ภาพที่ 11 ก)) จะปรากฏเมื่อเปิดแอปพลิเคชัน และจะทำหน้าที่เชื่อมต่อ Smart phone กับ Bluetooth โดยกดที่ปุ่ม CONNECT เมื่อเชื่อมต่อสำเร็จจะนำไปสู่ส่วนที่สองคือส่วนประมวลผลและแสดงผลการทำนายความชื้นของไม้ยางพารา (ภาพที่ 11 ข)) สำหรับการวัดค่าความชื้นไม้ยางพาราจะมีให้เลือก 2 แบบคือ แบบแรกวัดค่าความชื้นของไม้ยางพาราอบแห้งที่มีค่าความชื้นในช่วง 0-30% และแบบที่สองวัดค่าความชื้นของไม้ยางพาราสดที่มีค่าความชื้นมากกว่า 30% เมื่อเลือกแบบการวัดเสร็จ เลือกปุ่ม SCAN เพื่อสั่งงานให้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์อ่านข้อมูลสเปกตรัมจากตัวอย่างและส่งข้อมูลที่ได้กลับมาที่แอปพลิเคชันเพื่อคำนวณค่าความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืนและทำนายปริมาณความชื้นของไม้ยางพารา พร้อมแสดงผลลัพธ์ที่หน้าจอของ Smart phone ดังภาพที่ 11 ค) และ ง)



ก) หน้าหลัก



ข) เลือกประเภทการวัด



ค) แสดงผลการวัดไม้แห้ง



ง) แสดงผลการวัดไม้สด

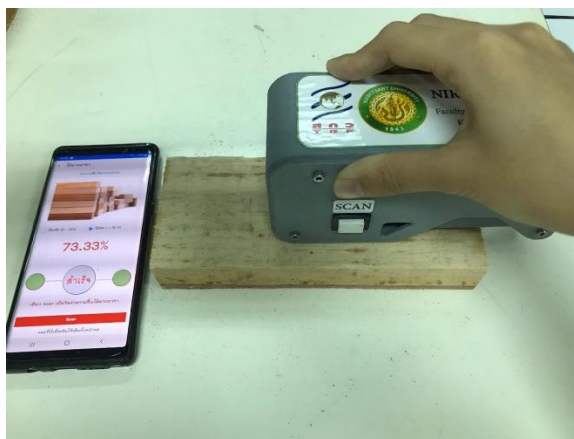
ภาพที่ 11 แสดงการทำงานของแอปพลิเคชันสำหรับวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพารา

7. ทำการทดสอบการทำนาย

โดยนำตัวอย่างไม้ยางพาราซึ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาใช้พัฒนาสมการทำนาย (Unknown sample) ไม้ยางพาราแปรรูปสด (fresh wood) จำนวน 90 ตัวอย่าง และไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง (oven dried wood) จำนวน 245 ตัวอย่าง ซึ่งเป็นกลุ่มที่ใช้ในการทดสอบสมการทำนาย (external prediction set) มาวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Near Infrared Spectroscopy (DLP Nirnano EVM, Texas Inc, Texas, USA) โดยเชื่อมต่อสัญญาณกับ Smart phone ในระบบปฏิบัติการ Android แล้วบันทึกค่าการทำนายที่แสดงผลจากหน้าจอ Smart phone (รายละเอียดวิธีการใช้งานอุปกรณ์ NIR-MC Meter แสดงไว้ในภาคผนวก ก) ดังนี้

7.1 การวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเครื่อง NIR-MC Meter

นำตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง NIR-MC Meter ดังภาพที่ 12 วัดค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมด ชั้นละ 4 ตำแหน่ง ตามตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ในภาพที่ 5



ภาพที่ 12 การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง NIR-MC Meter

7.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบการทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราที่แสดงผลจากหน้าจอ Smart phone กับค่าอ้างอิงที่ได้จากการนำตัวอย่างไปอบด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D143 ดังขั้นตอนที่ 4 และเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์แบบดิจิตอล (WAGNER) (วัดได้เฉพาะไม้แห้ง) แล้วพิจารณาค่า SEP, bias และ RMSEP

8. ถ่ายทอดเทคโนโลยี และสาธิตการใช้งาน

ถ่ายทอดเทคโนโลยี และสาธิตการใช้งานให้บริษัท ส.กิจชัย กรุ๊ป และ โรงเลื่อย มาบพวา พารา
วูดส์ อ.แกลง จ.ระยอง ซึ่งเป็นตัวแทนไม้จากภาคตะวันออก และ บริษัท เขมมหาชัยพาราวู้ด จำกัด อ.
เมือง จ.นครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นตัวแทนไม้จากภาคใต้

ผลและวิจารณ์

จากการตรวจสอบความผิดปกติ (outliers) ของค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM จากการวัดไม้ยางพาราแปรรูปจำนวน 600 ตัวอย่าง ด้วยวิธี PCA พบว่ามีความผิดปกติของเส้นสเปกตรัม 1 เส้น จึงเหลือตัวอย่าง 599 ตัวอย่าง

เมื่อตรวจสอบค่าความผิดปกติของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น พบว่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ผิดปกติจำนวน 2 ตัวอย่าง ดังนั้นจึงเหลือตัวอย่างทั้งหมดที่นำไปวิเคราะห์จำนวน 597 ตัวอย่าง

1 ผลการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูป

1.1 การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยวิธีตามมาตรฐาน

ผลของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูป จากวิธีการหาความชื้นด้วยวิธีอบตามมาตรฐาน (ASTM, 2000) พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปสดนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 50.75-88.59%db ไม้ยางพาราแปรรูปที่อยู่ระหว่างอบลดความชื้นถูกสุ่มตัวอย่างจากตู้อบของโรงเลื่อยอยู่ในช่วง 2.59-54.81%db และไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งพร้อมส่งออกต่างประเทศอยู่ในช่วง 0.51-13.22%db ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปด้วยวิธีอบแห้งมาตรฐาน

ชนิด	ระยะเวลา ในการอบแห้ง (ชั่วโมง)	จำนวน ตัวอย่าง	ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%db)			
			ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	Mean	SD
ไม้ยางพาราแปรรูปสด	-	143	50.75	88.59	64.30	6.75
ไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง	120	399	0.51	13.22	6.25	1.97
ไม้ยางพาราแปรรูปที่อยู่ระหว่าง อบลดความชื้นในตู้อบ	7	10	34.64	54.81	47.43	5.89
	48	30	8.14	41.66	21.26	9.12
	96	15	2.59	16.62	8.23	5.62

1.2 การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเครื่องวัดความชื้นแบบดิจิตอล (WAGNER)

ผลของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูป จากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์แบบดิจิตอล (WAGNER) พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งอยู่ในช่วง 2.39-18.43%db ดังตารางที่ 3 และ ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปที่อยู่ระหว่างอบลดความชื้นถูกสุ่มตัวอย่างจากตู้อบของโรงเลื่อยอยู่ในช่วง 4.79-31.25%db ซึ่งค่าความชื้นจะถูกจำกัดเมื่อวัดความชื้นสูงตั้งแต่ 32% ขึ้นไป ส่วนไม้ยางพาราแปรรูปสดไม่สามารถวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องวัดความชื้นแบบดิจิตอล (WAGNER) ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดไม้แห้งเท่านั้น โดยต้องมีค่าไม่มากกว่า 32%db

ตารางที่ 3 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปจากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์แบบดิจิตอล (WAGNER)

ชนิด	ระยะเวลา ในการอบแห้ง (ชั่วโมง)	จำนวน ตัวอย่าง	ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%db)			
			ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	Mean	SD
ไม้ยางพาราแปรรูปสด	-	143	N/A	N/A	N/A	N/A
ไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง	120	399	2.39	18.43	7.17	1.88
ไม้ยางพาราแปรรูปที่อยู่ระหว่าง อบลดความชื้นในตู้อบ	7	10	N/A	N/A	N/A	N/A
	48	30	N/A	N/A	N/A	N/A
	96	15	4.79	23.91	11.03	7.22

หมายเหตุ N/A หมายถึง ไม่สามารถวัดได้

1.3 การเปรียบเทียบของเครื่องมือวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง

ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง จำนวน 399 ตัวอย่าง ด้วยวิธี One - Way ANOVA และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากการทำนายของเครื่อง DLP NIRscan Nano ที่ได้จากสมการทำนาย (calibration model) นั้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับค่าอ้างอิงที่ได้จาก

แบบตู้อบลมร้อนด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM (2000) คือ 6.26%db และ 6.22%db ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นแบบดิจิตอล (WAGNER) นั้นมีค่าความชื้นสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้จากแบบตู้อบลมร้อนด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM (2000) โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยที่ได้จากเครื่องมือวัดความชื้นแบบดิจิตอล (WAGNER) มีค่า 7.17%db และวิธีการอ้างอิงมีค่าเฉลี่ย 6.22%db ดังตารางที่ 4

ส่วนในตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปสดมีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อไม้สูงเกินกว่า 32%db ดังแสดงในตารางที่ 2 เครื่องมือวัดความชื้นแบบดิจิตอลจึงไม่สามารถวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปสดได้ดังตารางที่ 3 จึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างวิธีการหาความชื้นทั้ง 2 แบบได้

เมื่อพิจารณาแบบละเอียดขึ้นพบว่าการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากเครื่อง DLP NIRscan Nano แสดงค่าผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายกลุ่มตัวอย่างสำหรับสร้างสมการทำนาย (standard error of calibration; SEC) เท่ากับ 2.05%db และค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิงจากการอบแห้งไม้ตามมาตรฐานกับค่าที่ได้จาก NIRS (Bias) มีค่า 0.01% ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดความชื้นดิจิตอล (WAGNER) แสดงให้เห็นถึงสมณะการทำนายของเครื่อง DLP NIRscan Nano ที่มีมากกว่า เนื่องจากมีคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเครื่องมือวัดความชื้นดิจิตอล (WAGNER) ในการทำนายความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง จึงมีความเหมาะสมในการสร้างสมการทำนายไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเครื่อง DLP NIRscan Nano ต่อไป

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบของเครื่องมือวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง

วิธีวัดความชื้น	จำนวน ตัวอย่าง	Mean±SD (%db)	SEC (%db)	Bias (%db)
การอบ (Oven dryer)	399	6.22±1.96 ^b		
เครื่อง DLP NIRscan Nano	399	6.26±1.60 ^b	1.23	0.01
เครื่องมือวัดความชื้นดิจิตอล	399	7.17±2.19 ^a	1.76	0.93

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงค่าซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยวิธี Duncan's multiple range test.

1.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป

ข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปสำหรับใช้เป็นค่าอ้างอิงถูกแบ่ง 4 กลุ่ม กลุ่มในการสร้างสมการทำนาย (calibration set) คือ กลุ่มไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมด (ไม้ยางพาราแปรรูปสด ไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง และไม้ยางพาราแปรรูปที่อยู่ระหว่างอบลดความชื้นในตู้อบ) ที่มีเปอร์เซ็นต์ค่าความชื้น 0-90%db กลุ่มไม้ยางพาราแปรรูปสดที่มีเปอร์เซ็นต์ค่าความชื้น 30-90%db กลุ่มไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งและไม้ยางพาราแปรรูปที่อยู่ระหว่างอบลดความชื้นที่มีเปอร์เซ็นต์ค่าความชื้น 0-30%db และกลุ่มไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งที่มีเปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-14%db สำหรับสร้างสมการทำนาย 4 โมเดล โดยได้แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่ำสุด สูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังตารางที่ 5

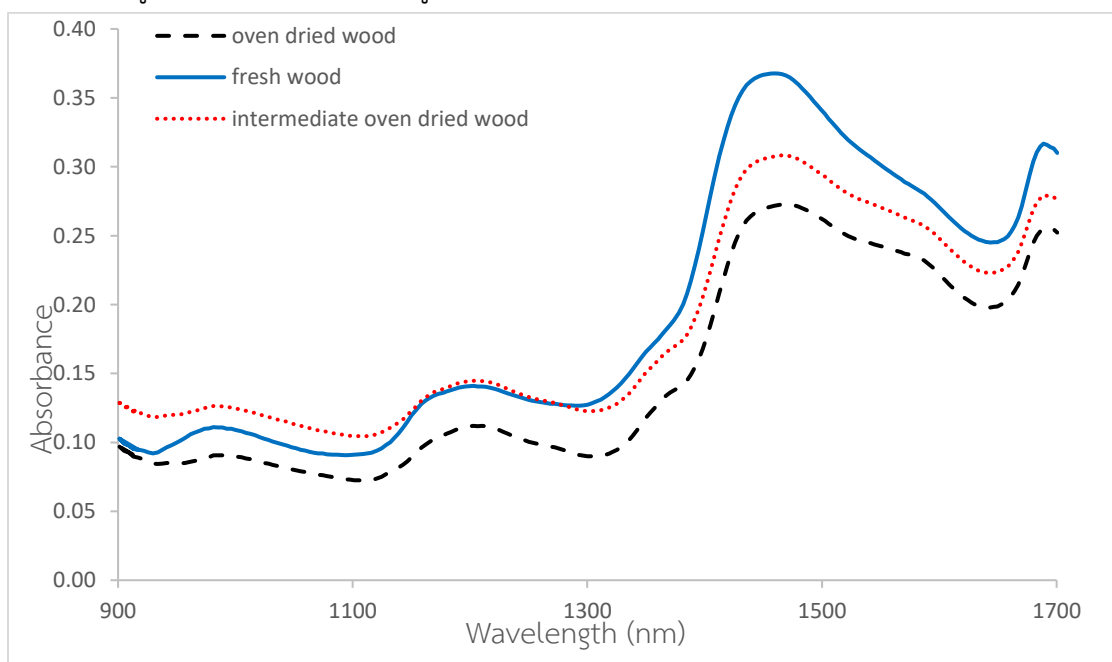
ตารางที่ 5 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปสำหรับกลุ่มสร้างสมการทำนาย (calibration set)

โมเดล	จำนวน ตัวอย่าง	ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%db)			
		ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	Mean	SD
กลุ่มไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมด (ความชื้น 0-90%db)	597	0.51	88.59	20.78	25.74
กลุ่มไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง (ความชื้น 0-14%db)	399	0.51	13.22	6.25	1.97
กลุ่มไม้ยางพาราแปรรูปที่มี เปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-30%db	440	0.51	29.51	7.03	3.79
กลุ่มแปรรูปที่มีเปอร์เซ็นต์ ความชื้นมากกว่า 30%db	157	34.64	88.59	62.61	8.59

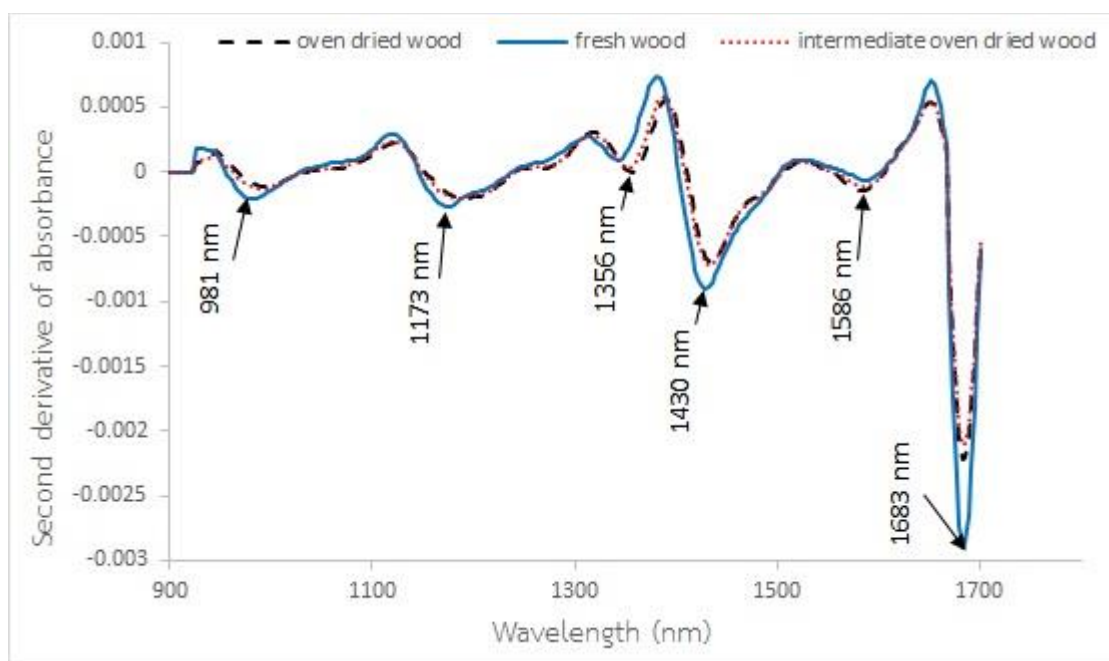
2.สเปกตรากการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูป

2.1 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของเครื่อง Near Infrared Spectrometer (DLP NIRscan Nano EVM)

ผลจากการวัดสเปกตรากการดูดกลืนแสงผลจากการวัดค่าสเปกตรากการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูป ดังภาพที่ 13 แสดงว่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของไม้ยางพาราแปรรูปสด ไม้ยางพาราแปรรูปสดที่นำมาลดความชื้น และไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง ก่อนการปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เมื่อทำการปรับแต่งสเปกตรากด้วยวิธี Second derivative แบบ Savitzky Golay ดังภาพที่ 14 พบว่าสามารถเห็นพีคที่เด่นชัดที่ตำแหน่งของพันธะ OH ของน้ำที่ความยาวคลื่น 981 nm และ 1430 nm และมีการเรียงตัวของการดูดกลืนแสงในไม้ยางพาราแปรรูปสดที่สูงกว่าไม้ยางพาราแปรรูปที่อยู่ระหว่างอบลดความชื้นในตู้อบ และไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง ตามลำดับ



ภาพที่ 13 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของไม้ยางพาราแปรรูปจากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM



ภาพที่ 14 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของไม้ยางพาราแปรรูปจากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Second derivative

3.ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป

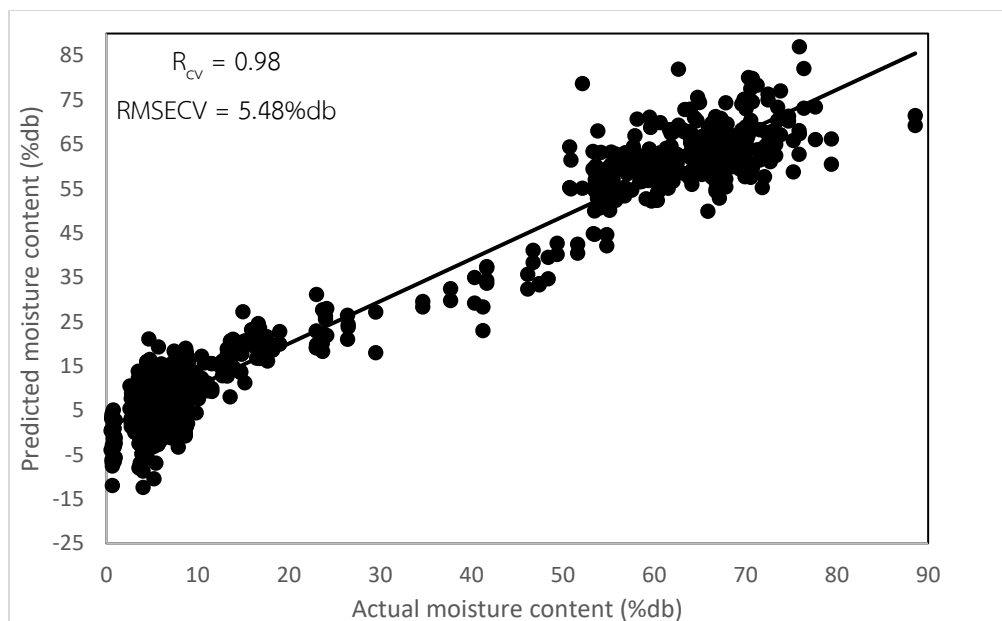
3.1 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมดจากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM

การสร้างสมการทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราทั้งหมด (ไม้ยางพาราแปรรูปสด, ไม้ยางพาราแปรรูปที่อยู่ระหว่างอบลดความชื้นในตู้อบ และไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง) ดังตารางที่ 6 ซึ่งนำข้อมูลสเปกตราช่วงความยาวคลื่น 900-1700 nm พบว่า สเปกตรากการดูดกลืนแสง (original spectra) ให้ผลการสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสมการทำนายมีค่า R_c เท่ากับ 0.98 เท่ากับ 5.37%db bias เท่ากับ 0.00%db และค่า RMSEC เท่ากับ 5.37%db และมีค่าผลการทำนายที่ดีที่สุดมีค่า R_{cv} เท่ากับ 0.98 ซึ่งแสดงว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ และประกันคุณภาพได้ มีค่า SECV เท่ากับ 5.49%db bias เท่ากับ 0.01%db และ RMSECV เท่ากับ 5.48%db ดังภาพที่ 15 แต่เนื่องจากการวัดช่วงการความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปในโรงเลื่อยในนิคมใช้งานวัดไม้อบแห้งในช่วงความชื้น 0-12%db จึงได้มีการพิจารณาสร้างสมการทำนายในช่วงความชื้นที่มีความละเอียดในช่วงความชื้นต่ำต่อไป

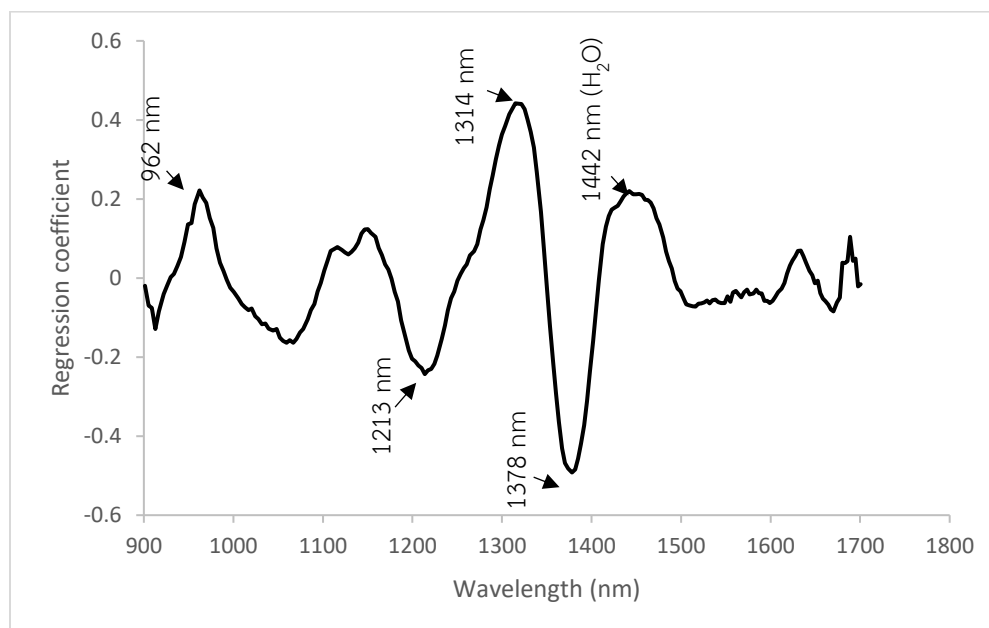
เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ในภาพที่ 16 ที่ไม่ได้ทำการปรับแต่ง spectra พบว่า ความยาวคลื่นที่ 962 nm เป็นการสั่นของ O-H second overtone ของน้ำ (Osborne et al., 1993) ความยาวคลื่นที่ 1213 nm เป็นการสั่นของ C-H second overtone ของ CH_2 (Osborne et al., 1993) ความยาวคลื่นที่ 1442 nm เป็นการสั่นของ O-H first overtone ของ H_2O (Osborne et al., 1993) ในส่วนของพีคที่มีสัมประสิทธิ์การถดถอยที่สูงถึงความยาวคลื่นที่ 1314 nm และ 1378 nm อาจเกิดจากองค์ประกอบอื่นที่อยู่ภายในเนื้อไม้ยางพาราแปรรูป

ตารางที่ 6 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมดด้วยวิธี PLSR จากข้อมูลการดูดกลืนแสง

Pretreatment	PC	R_c	SEC (%db)	Bias (%db)	RMSEC (%db)	R_{cv}	SECV (%db)	Bias (%db)	RMSECV (%db)
Absorbance	8	0.98	5.37	0.00	5.37	0.98	5.49	0.01	5.48
1 st derivative	3	0.97	6.48	0.00	6.47	0.97	6.56	0.01	6.56
2 nd derivative	3	0.97	6.00	0.00	6.00	0.97	6.10	0.01	6.09
MSC	5	0.97	5.77	0.00	5.77	0.97	5.83	0.00	5.82
SNV	5	0.97	5.68	0.00	5.68	0.97	5.74	0.00	5.73



ภาพที่ 15 กราฟผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริงที่ได้จากวิธีการหาด้วยตู้อบลมร้อน และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากการทำนายของไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมดจากค่าการดูดกลืนแสง



ภาพที่ 16 Regression coefficient การทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมดจากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ไม่ได้ทำการปรับแต่ง spectra

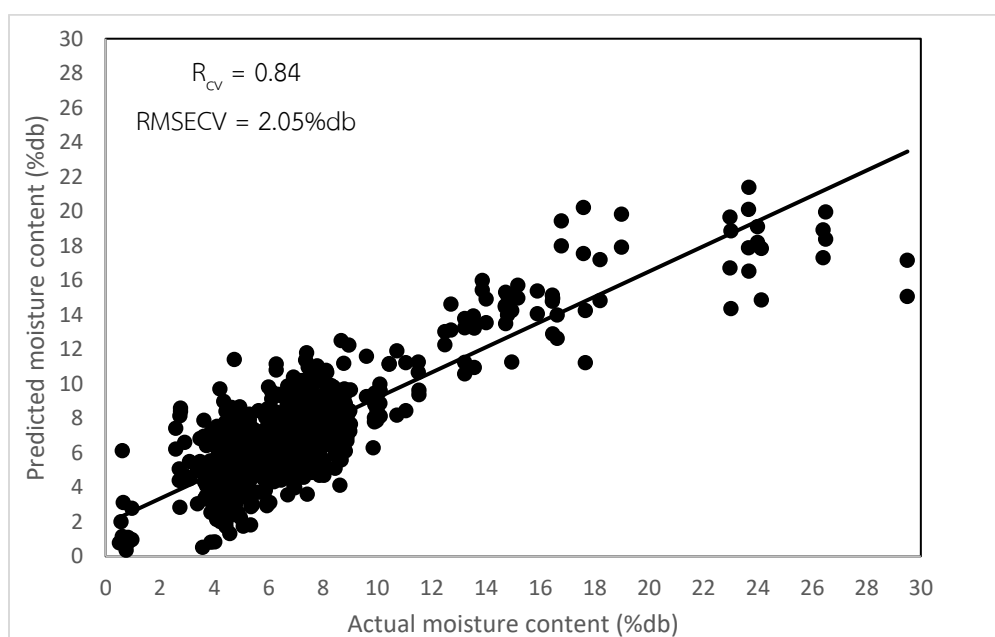
3.2 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปที่มีช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-30%db จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM

การสร้างสมการทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปที่มีช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-30%db ซึ่งนำข้อมูลสเปกตรัมช่วงความยาวคลื่น 900-1700 nm ไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งมาปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์พบว่า การปรับแต่งด้วยวิธี Multiplicative Scatter Correction (MSC) ดังตารางที่ 7 ให้ผลการสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสมการทำนายมีค่า R_c เท่ากับ 0.87 SEC เท่ากับ 1.84%db bias เท่ากับ 0.00%db และค่า RMSEC เท่ากับ 1.84%db และมีค่าผลการทำนายที่ดีที่สุดมีค่า R_{cv} เท่ากับ 0.84 ซึ่งแสดงว่าสามารถคัดเลือกและประมาณค่าได้ มีค่า SECV เท่ากับ 2.05%db bias เท่ากับ 0.00%db และค่า RMSECV เท่ากับ 2.05%db ดังภาพที่ 17 ซึ่งมีช่วงเหมาะกับการทำนายวัดไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งมากขึ้น

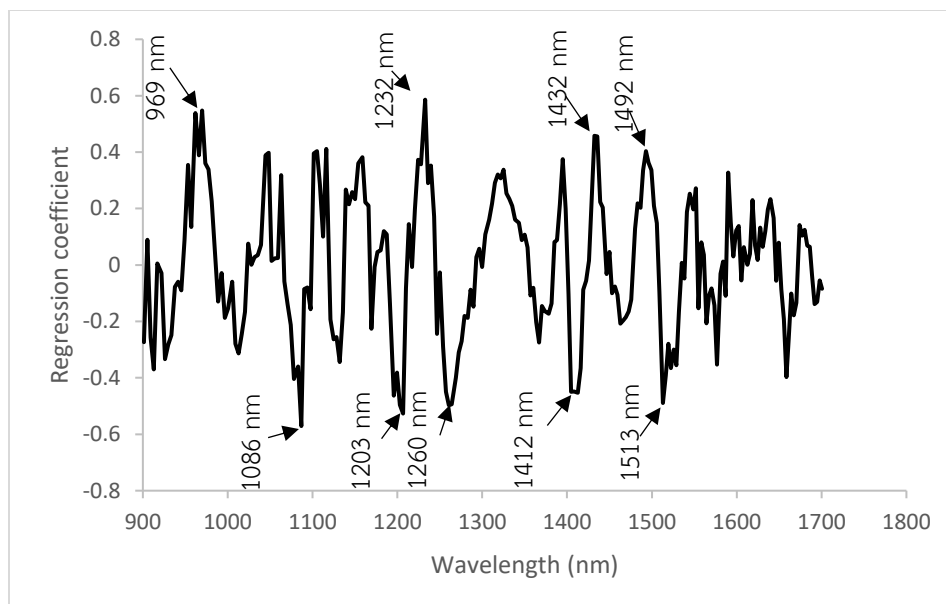
เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ในภาพที่ 18 ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี Multiplicative Scatter Correction (MSC) พบว่า 969 nm เป็นการสั่นของ O-H second overtone ของน้ำ (Osborne et al., 1993) ความยาวคลื่นที่ 1412 nm และ 1492 nm เป็นการสั่นของ O-H first overtone (Osborne et al., 1993) ความยาวคลื่นที่ 1432 nm เป็นการสั่นของ O-H ของน้ำ (Fujimoto et al., 2010) ความยาวคลื่นที่ 1513 nm เป็นการสั่นของ O-H first overtone ของเซลลูโลส (Schwanninger et al., 2011) ในส่วนของพีคที่มีสัมประสิทธิ์การถดถอยที่สูงดังความยาวคลื่นที่ 1086 nm 1203 nm 1232 nm และ 1260 nm อาจเกิดจากองค์ประกอบอื่นที่อยู่ภายในเนื้อไม้ยางพาราแปรรูป

ตารางที่ 7 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-30%db ด้วยวิธี PLSR จากข้อมูลการดูดกลืนแสง

Pretreatment	PC	R_c	SEC (%db)	Bias (%db)	RMSEC (%db)	R_{cv}	SECV (%db)	Bias (%db)	RMSECV (%db)
Absorbance	15	0.86	1.94	0.00	1.94	0.83	2.14	0.00	2.14
1 st derivative	12	0.84	2.04	0.00	2.04	0.83	2.12	0.00	2.11
2 nd derivative	6	0.84	2.08	0.00	2.08	0.82	2.15	0.00	2.15
MSC	14	0.87	1.84	0.00	1.84	0.84	2.05	0.00	2.05
SNV	14	0.87	1.87	0.00	1.87	0.84	2.06	0.00	2.06



ภาพที่ 17 กราฟผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริงของไม้ยางพาราแปรรูปช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-30%db ที่ได้จากวิธีการหาด้วยตู้อบลมร้อน และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากการทำนายจากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Multiplicative Scatter Correction (MSC)



ภาพที่ 18 Regression coefficient การทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง ช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-30%db จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Multiplicative Scatter Correction (MSC)

3.3 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปที่มีช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากกว่า 30%db จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM

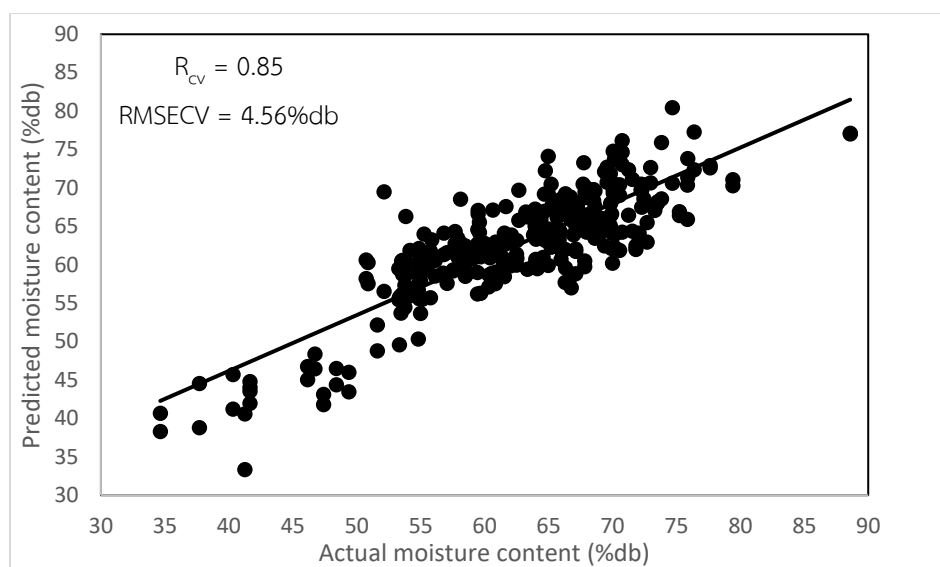
การสร้างสมการทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งที่มีช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากกว่า 30%db ซึ่งนำข้อมูลสเปกตรာช่วงความยาวคลื่น 900-1700 nm ไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งมาปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์พบว่า การปรับแต่งด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV) ดังตารางที่ 8 ให้ผลการสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสมการทำนายมีค่า R_c เท่ากับ 0.86 ค่า SEC เท่ากับ 4.36%db ค่า bias เท่ากับ 0.00%db และค่า RMSEC เท่ากับ 4.36%db และมีค่าผลการทำนายที่ดีที่สุดมีค่า R_{cv} เท่ากับ 0.85 ซึ่งแสดงว่าสามารถคัดเลือกและประมาณค่าได้มีค่า SECV เท่ากับ 4.57%db ค่า bias เท่ากับ 0.00%db และมีค่า RMSECV เท่ากับ 4.56%db ดังภาพที่ 19 ซึ่งมีช่วงเหมาะกับการทำนายวัดไม้ยางพาราแปรรูปสด

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ในภาพที่ 20 ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV) พบว่าความยาวคลื่นที่ 1055 nm เป็นการสั้นของ

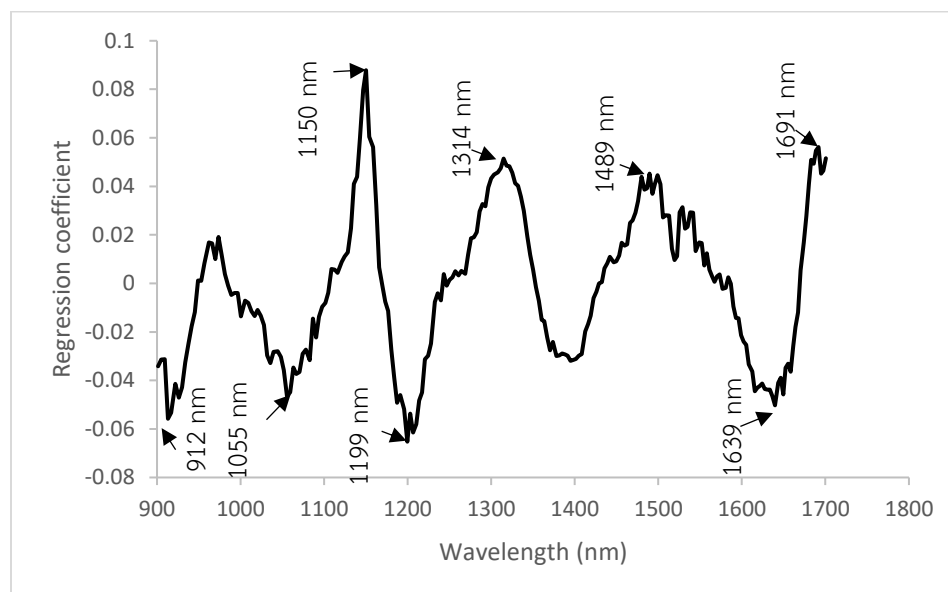
C-H second overtone ของ CH_2 (Osborne et al., 1993) ความยาวคลื่นที่ 1150 nm และความยาวคลื่นที่ 1199 nm เป็นการสั่นของพันธะ C-H second overtone ของลิกลิน (Schwanninger et al., 2011) ความยาวคลื่นที่ 1489 nm เป็นการสั่นของ O-H first overtone ของเซลลูโลส (Osborne et al., 1993) ความยาวคลื่นที่ 1639 nm เป็นการสั่นของ C-H ที่เกี่ยวข้องกับเซลลูโลส (Fujimoto et al., 2010) ในส่วนของพีคที่มีสัมประสิทธิ์การถดถอยที่สูงถึงความยาวคลื่นที่ 912 nm, 1314 nm และ 1691 nm อาจเกิดจากองค์ประกอบอื่นที่อยู่ภายในเนื้อไม้ยางพาราแปรรูป

ตารางที่ 8 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปที่มีช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากกว่า 30%db ด้วยวิธี PLSR จากข้อมูลการดูดกลืนแสง

Pretreatment	PC	R_c	SEC (%db)	Bias (%db)	RMSEC (%db)	R_{cv}	SECV (%db)	Bias (%db)	RMSECV (%db)
Absorbance	7	0.85	4.51	0.00	4.50	0.83	4.79	0.02	4.78
1 st derivative	6	0.86	4.40	0.00	4.40	0.84	4.63	0.02	4.62
2 nd derivative	4	0.86	4.42	0.00	4.41	0.84	4.66	0.01	4.65
MSC	7	0.86	4.38	0.00	4.37	0.84	4.60	0.01	4.59
SNV	7	0.86	4.36	0.00	4.36	0.85	4.57	0.00	4.56



ภาพที่ 19 กราฟผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริงของไม้ยางพาราแปรรูปที่มีช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากกว่า 30%db ที่ได้จากวิธีการหาด้วยตู้อบลมร้อน และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากการทำนาย จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV)



ภาพที่ 20 Regression coefficient การทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปที่มีช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากกว่า 30%db จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV)

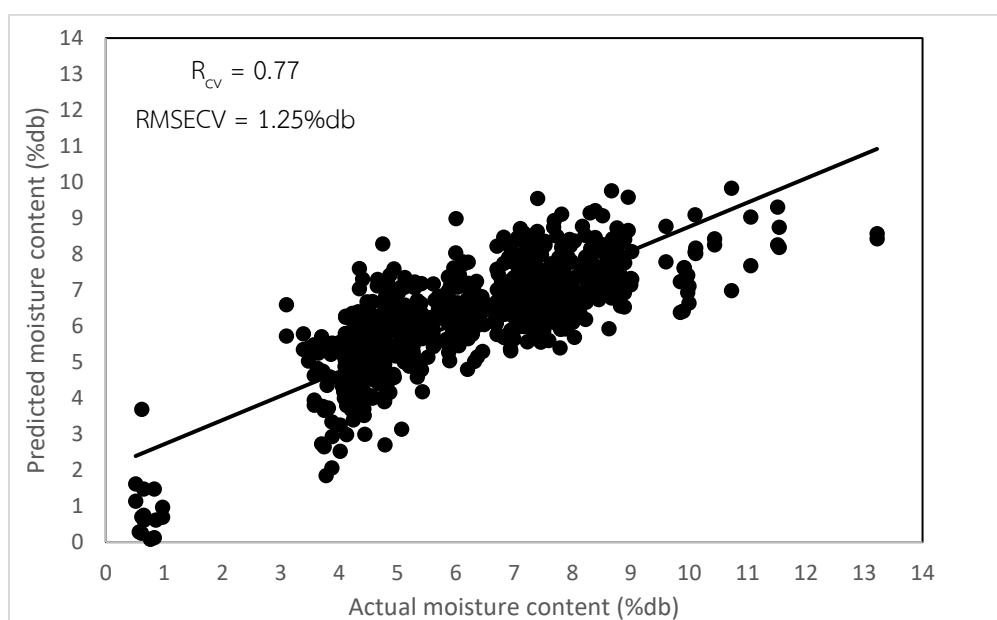
3.4 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง ช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นมากกว่า 0-14%db จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM

การสร้างสมการทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นเบื้องต้นซึ่งนำข้อมูลสเปกตราช่วงความยาวคลื่น 900-1700 nm ไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-14%db มาปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์พบว่า การปรับแต่งด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV) ดังตารางที่ 9 ให้ผลการสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสมการทำนายมีค่า R_c เท่ากับ 0.82 ค่า SEC เท่ากับ 1.14%db ค่า bias เท่ากับ 0.00%db และค่า RMSEC เท่ากับ 1.13%db และมีค่าผลการทำนายที่ดีที่สุดมีค่า R_{cv} เท่ากับ 0.77 ซึ่งแสดงว่าสามารถคัดเลือกอย่างหายาได้ ค่า SECV เท่ากับ 1.13%db ค่า bias เท่ากับ 0.00%db และมีค่า RMSECV เท่ากับ 1.25%db ดังภาพที่ 21 อย่างไรก็ตามถึงแม้ค่า R_{cv} ไม่สูงมากนัก แต่เมื่อพิจารณาค่า RMSECV เห็นได้ว่าสมการทำนายมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเหมาะกับการใช้งานทำนายไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งซึ่งโรงเลื่อยมักใช้ในการปฏิบัติงานจริงในช่วงช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-12%db

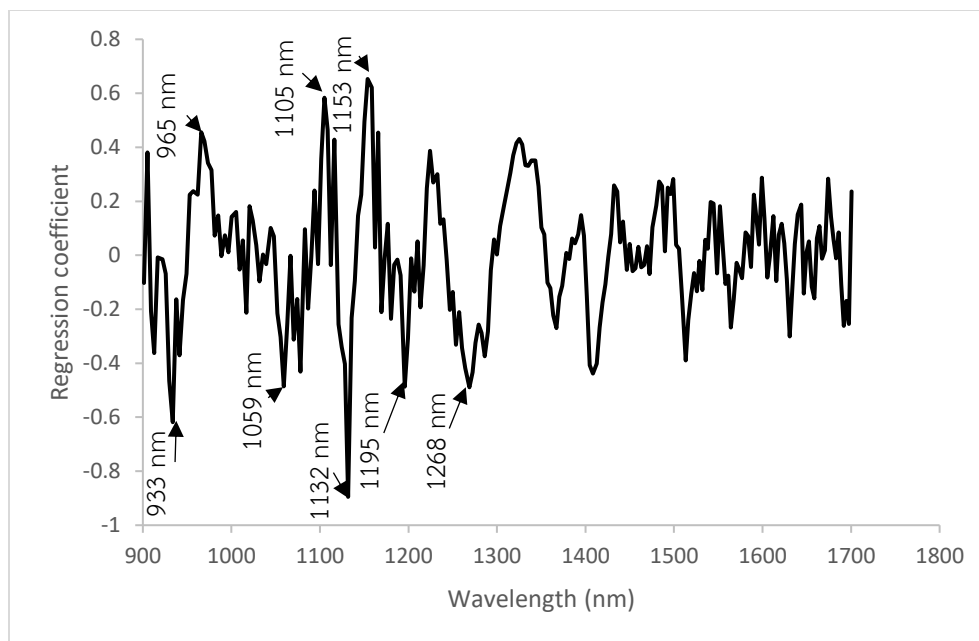
เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ในภาพที่ 22 ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV) พบว่าความยาวคลื่นที่ 965 nm เป็นการสั่นของ O-H second overtone ของน้ำ (Osborne et al., 1993) ความยาวคลื่นที่ 1059 nm เป็นการสั่นของ N-H second overtone (Osborne et al., 1993) ความยาวคลื่นที่ 1153 nm และความยาวคลื่นที่ 1195 nm เป็นการสั่นของพันธะ C-H second overtone ของลิกนิน (Schwanninger et al., 2011) ในส่วนของพิกที่มีสัมประสิทธิ์การถดถอยที่สูงถึงความยาวคลื่นที่ 933 nm, 1105 nm 1132 nm และ 1268 nm อาจเกิดจากองค์ประกอบอื่นที่อยู่ภายในเนื้อไม้ยางพาราแปรรูป

ตารางที่ 9 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งด้วยวิธี PLSR จากข้อมูลการดูดกลืนแสงของเครื่อง DLP NIRscan Nano

Pretreatment	PC	R_c	SEC (%db)	Bias (%db)	RMSEC (%db)	R_{cv}	SECV (%db)	Bias (%db)	RMSECV (%db)
Absorbance	12	0.78	1.23	0.00	1.23	0.76	1.29	0.00	1.29
1 st derivative	6	0.74	1.32	0.00	1.31	0.73	1.34	0.00	1.34
2 nd derivative	8	0.78	1.24	0.00	1.24	0.76	1.29	0.00	1.28
MSC	11	0.79	1.21	0.00	1.21	0.77	1.26	0.00	1.26
SNV	14	0.82	1.14	0.00	1.13	0.77	1.25	0.00	1.25



ภาพที่ 21 กราฟผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจริงของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งที่ได้จากวิธีการหาด้วยตู้อบลมร้อน และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากการทำนาย จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV)



ภาพที่ 22 Regression coefficient การทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง จากเครื่อง DLP NIRscan Nano EVM ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV)

4. ผลการทดสอบการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างไม้ยางพาราที่ไม่ได้นำมาใช้พัฒนาสมการทำนาย (Unknow sample) เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงด้วยวิธีการอบด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D143

ผลการทดสอบการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการทำนาย (external prediction set) ซึ่งเป็นตัวอย่างไม้ยางพาราที่ไม่ได้นำมาใช้พัฒนาสมการทำนาย (Unknow sample) ด้วยเครื่อง NIR-MC Meter แสดงค่าการทำนายผ่านหน้าจอ Smart phone โดยนำตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปจำนวน 335 ตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยไม้ยางพาราแปรรูปสดจำนวน 90 ตัวอย่าง ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในช่วง 53.59 – 85.49%db และไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งจำนวน 245 ตัวอย่าง ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในช่วง 3.89 – 9.09%db มาวัดการดูดกลืนแสงเพื่อทดสอบการทำงานจริงของเครื่องมือวัดและแอปพลิเคชันที่ออกแบบ

4.1 ผลทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปสดของตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาใช้พัฒนาสมการทำนาย (Unknow sample) จากเครื่อง NIR-MC Meter

ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปสดของกลุ่มตัวอย่างสินค้าจริงซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาใช้พัฒนาสมการทำนาย (Unknow sample) มาทดสอบพบว่า เครื่อง NIR-MC Meter ให้ผลการทำนายมีค่า SEP เท่ากับ 4.18%db ค่า RMSEP เท่ากับ 4.18%db และค่า Bias เท่ากับ -0.09%db

4.2 ผลทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งของตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาใช้พัฒนาสมการทำนาย (Unknow sample) จากเครื่อง NIR-MC Meter เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดความชื้นเชิงพาณิชย์ (WAGNER)

ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งของกลุ่มตัวอย่างสินค้าจริงซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาใช้พัฒนาสมการทำนาย (Unknow sample) ที่นำมาทดสอบโดยใช้สมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป พบว่า เครื่อง WAGNER ให้ผลการทำนายมีค่า RMSEP เท่ากับ 1.03%db SEP เท่ากับ 0.63%db และ Bias เท่ากับ 0.81%db ดังภาพที่ 19 และเครื่อง NIR-MC Meter ให้ผลการทำนายมีค่า RMSEP เท่ากับ 1.44%db ค่า SEP เท่ากับ 1.23%db และค่า Bias เท่ากับ -0.75%db ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งของตัวอย่างจริงที่ไม่ได้นำมาใช้พัฒนาสมการทำนาย (Unknow sample) จากเครื่อง WAGNER และเครื่อง NIR-MC Meter

อุปกรณ์	RMSEP (%db)	SEP (%db)	Bias (%db)
WAGNER	1.03	0.63	0.81
NIR-MC Meter	1.44	1.23	-0.75

สรุปและข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องมือตรวจสอบความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปแบบพกพาด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ที่ควบคุมและแสดงผลผ่านสมาร์ตโฟนบนระบบปฏิบัติการ Android ที่สามารถใช้งานได้จริงโดยให้ชื่ออุปกรณ์ใหม่ว่า “NIR-MC METER” ซึ่งออกแบบให้สามารถเลือกการตรวจสอบได้ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 สำหรับการตรวจสอบความชื้นไม้ยางพาราอบแห้ง (วัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในช่วง 0-30%db) และรูปแบบที่ 2 สำหรับตรวจสอบความชื้นไม้ยางพาราสด (วัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในช่วงมากกว่า 30%db)

2. การสร้างสมการสอบเทียบมาตรฐานเพื่อทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปแบบจากการดูดกลืนแสงของเครื่องสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบพกพาที่เหมาะสมที่สุด รูปแบบที่ 1 มีสมรรถนะในการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราในช่วง 0-30%db (ไม้ยางพาราอบแห้ง) ที่ค่า R_{cv} เท่ากับ 0.84 ค่า SECV เท่ากับ 2.05%db และค่า Bias เท่ากับ 0.00%db และรูปแบบที่ 2 ให้สมรรถนะการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราในช่วงมากกว่า 30%db (ไม้ยางพาราสด) ที่ค่า R_{cv} เท่ากับ 0.85 ค่า SECV เท่ากับ 4.56%db และค่า Bias เท่ากับ 0.00%db ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบ ถือว่าอยู่ในระดับสามารถใช้คัดเลือกแบ่งกลุ่มและประมาณค่าได้

3. ผลการทดสอบความแม่นยำของสมการสอบเทียบมาตรฐานจากการใช้งานจริงในการวัดตัวอย่างที่ไม่ได้นำมาใช้พัฒนาสมการทำนาย (unknown sample) ให้สมรรถนะการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปสดมีค่า SEP เท่ากับ 4.18%db และค่า Bias เท่ากับ -0.09%db และให้สมรรถนะการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งมีค่า SEP เท่ากับ 1.23%db ค่า Bias เท่ากับ -0.75%db อย่างไรก็ตามหากมีการปรับปรุงรูปแบบการตรวจสอบให้แคบลงเป็นช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้น 0-14 %db จะสามารถทำให้ค่า SEP และค่า Bias ลดลงได้ ทำให้ความคลาดเคลื่อนในการทำนายลงได้ โดยควรมีการสอบเทียบสมการทำนายอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้การทำนายตัวอย่างที่มีความหลากหลายในด้านฤดูกาล แหล่งผลิต มีความเสถียรและความแม่นยำมากขึ้นต่อไป

4. เครื่อง NIR-MC METER ควบคุมและแสดงผลผ่านสมาร์ตโฟนบนระบบปฏิบัติการ Android ที่พัฒนาขึ้นเป็นอุปกรณ์ที่มีความสะดวกทั้งต่อการปฏิบัติงานจริงในโรงเลื่อย และห้องปฏิบัติการ มีราคาถูกเมื่อเทียบกับแบบตั้งโต๊ะ ในอนาคตยังสามารถพัฒนาวัดคุณภาพไม้ยางพาราแปรรูปแบบในด้านอื่นๆ เช่น

การวัดค่าความแข็งแรง ความถ่วงจำเพาะ ฯลฯ ให้เบ็ดเสร็จได้ในเครื่องเดียวกัน อย่างไรก็ตามควรมีการพัฒนาเพิ่มเติมให้แสดงผลเบ็ดเสร็จผ่านตัวเครื่องต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมสรรพากร. 2556. **คู่มือแนะนำการชำระภาษีอากรกิจการโรงเลื่อยไม้ยางพารา**. แหล่งที่มา: <http://www.rd.go.th/publish/47243.0.html>, 27 เมษายน 2561.
- จิรวัดน์ รียาพันธ์. 2556. **คุณสมบัติทางเคมีและเชิงกลของไม้ยางพารา 7 โคลนพันธุ์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ฐิตาภรณ์ ภูมิไชย์, กฤษดา สังข์สิงห์, จินวัฒน์ รียาพันธ์ และเฉลิมพล ภูมิไชย์. 2558. คุณสมบัติทางเคมีและเชิงกลของไม้ยางพารา. *วารสารวิชาการเกษตร* 32(2): 144-158.
- พันธุ์ดิฐ เทียนทอง. 2553. **ปัจจัยการผลิตที่มีอิทธิพลต่อผลผลิตของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราในจังหวัดสุราษฎร์ธานี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- วรวรรณ นกน้อย. 2561. **การทำนายปริมาณความชื้น ความถ่วงจำเพาะ และความแข็งแรงไม้ยางพาราด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย. 2559. **อนาคตยางพาราไทย**. แหล่งที่มา: <http://www.rubberthai.com/index.php/newsyang/academic-info-on-rubber4/item/2420-22-06-2559>, 10 พฤศจิกายน 2560.
- สมาคมธุรกิจไม้ยางพาราไทย. 2556. **มาตรฐานไม้ยางพาราแปรรูป**. แหล่งที่มา: <http://www.tpa-rubberwood.org/articles.php>, 12 พฤษภาคม 2560.
- สาลินี ช่วยยก. 2557. **ผลผลิตภาพและค่าใช้จ่ายในการทำไม้ยางพาราในจังหวัดสุราษฎร์ธานี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2552. **ไม้ยางแปรรูป**. มอก. 2423-2552.

สิรินาฏ น้อยพิทักษ์. 2557. การประเมินและจำแนกความฝืดของผลพลับพลาพันธุ์พืชและความแก่ของ
 ชิงด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ตัวแปรพหุคูณ. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก,
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. 2555. การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์. น. 5-2-5-23. เทคโนโลยี
 อินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทาง
 การเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

American Society for Testing and Materials. 2000. **Standard Test Methods for Small
 Clear Specimens of Timber.** D 143-94.

Antti, H., M., Sjostrom and L., Wallbacks. 1996. Multivariate calibration models using NIR
 spectroscopy on pulp and paper industrial applications. **Journal of
 Chemometrics** 10: 591–603.

Defo, M., A.M., Taylor and B., Bond. 2007. Determination of moisture content and
 density of fresh-sawn red oak lumber by near infrared spectroscopy. **Forest
 Prod Journal** 57(5): 68-72.

Haddadi, A., B., Leblon, J., Burger, Z., Porouz, K., Groves and J., Nader. 2015. Using near-
 infrared hyperspectral images on subalpine fir board. Part 2: Density and basic
 specific gravity estimation. **Wood material science and engineering** 10 (1): 41-
 56.

Kobori, H., Yonenobu, H., Noma, J., and Tsuchikawa, S. 2008. Discriminant analyzing
 system for wood wastes using a visible-near-infrared chemometric imaging
 technique. **Appl. Spectrosc.** 62 (8): 854–859.

Meier, K.J., J.L., Brudney and J., Bohte. 2014. **Applied Statistics for Public and
 Nonprofit Administration.** 8th ed. Boston, USA: Wadsworth.

- Osborne, B.G., T., Fearn and P.H., Hindle. 1993. **Practical NIR spectroscopy with application in food and beverage analysis**. Longman Scientific and Technical, Harlow.
- Rubber Intelligence Unit. 2560. สถิติการส่งออกผลิตภัณฑ์ไม้ยางพารา. แหล่งที่มา: [http://rubber.oie.go.th/ImEx ThaiByProduct.aspx?pt=ex&hgid=4](http://rubber.oie.go.th/ImEx%20ThaiByProduct.aspx?pt=ex&hgid=4), 1 กุมภาพันธ์ 2561.
- Schimleck, L.R., C.A., Raymond, C.L., Beadle, G.M., Downes, P.D., Kube and J., French. 2000. Applications of NIR spectroscopy to forest research. **Appita Journal** 53: 458–464.
- Siesler, H.W., Y. Ozaki , S. Kawata. and H.M. Heise. 2002. **Near-Infrared Spectroscopy. Principles, Instruments, Applications**. WILEY-VCH, Germany.
- Tsuchikawa, S. 2007. A Review of Recent Near Infrared Research for Wood and Paper. **Applied Spectroscopy Reviews** 42: 43–71.
- _____, H., Yonenobu and H.W., Siesler. 2005. Near-infrared spectroscopic observation of the ageing process in archaeological wood using a deuterium exchange method. **Analyst** 130: 379–384.
- United States Department of Agriculture Forest Service. 2010. **Wood Handbook**. General Technical Report FPL-GTR-190, Madison, Wisconsin.
- Watanabe, K., S.D., Mansfield and S., Avramidis. 2011. Application of near-infrared spectroscopy for moisture-based sorting of green hem-fir timber. **Journal Wood Sci** 57(4): 288-294.
- Schwanninger, M., J.C., Rodrigues and K., Facker. 2011. A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. American. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 19: 287-308.

Fujimoto, T., Y., Kurata, K., Matsumoto and S., Tsuchikawa. 2008. Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full length lumber specimens. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 16: 529-537.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ถ่ายทอดเทคโนโลยี และสาธิตการใช้งาน

ถ่ายทอดเทคโนโลยี และสาธิตการใช้งานเครื่องตรวจสอบความชื้นไม้ยางพาราแปรรูป NIR-MC METER ที่จัดสร้างขึ้นจากงานวิจัยนี้ ให้บริษัท ส.กิจชัย กรุป และ โรงเลื่อย มาบพวา พาราเวสต์ อ.แกลง จ.ระยอง ซึ่งเป็นโรงเลื่อยไม้ยางพาราแปรรูปส่งออกในภาคตะวันออก เมื่อวันที่ 10 ตุลาคม 2562 และ บริษัท เขามหาชัยพาราเวสต์ จำกัด อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นโรงเลื่อยไม้ยางพาราแปรรูปส่งออกในภาคใต้ เมื่อวันที่ 19 ตุลาคม 2562



ภาพผนวกที่ ก1 ถ่ายทอดเทคโนโลยี และสาธิตการใช้งานให้บริษัท ส.กิจชัย กรุป อ.แกลง จ.ระยอง



ภาพผนวกที่ ก2 ถ่ายทอดเทคโนโลยี และสาธิตการใช้งานให้โรงเลื่อย มาบพวา พาราเวสต์ อ.แกลง จ.ระยอง



ภาพผนวกที่ ก3 ถ่ายทอดเทคโนโลยี และสาธิตการใช้งานให้บริษัท เขามหาชัยพาราวู้ด จำกัด
อ.เมือง จ.นครศรีธรรมราช

จากการถ่ายทอดเทคโนโลยีและสาธิตการใช้งานให้โรงเลื่อยไม้ยางพาราแปรรูปได้มีข้อคิดเห็น
และข้อเสนอแนะดังนี้

ข้อดี

- เครื่อง NIR-MC METER สามารถวัดไม้ยางพาราแปรรูปได้ทั้งไม้ยางพาราแปรรูปสดและไม้
ยางพาราแปรรูปอบแห้ง
- เครื่อง NIR-MC METER ที่พัฒนาขึ้นมีการใช้งานที่สะดวก โดยไม่ต้องทราบค่าความถ่วงจำเพาะ
ของไม้ยางพาราแปรรูป

ข้อเสนอแนะ

- ควรพัฒนาให้อ่านค่าความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปได้ที่ตัวเครื่อง และสามารถบันทึกค่าได้ เพื่อ
ความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น
- ควรพัฒนาให้มีจอแสดงผลแบบเตอร์ของการใช้งาน

ภาคผนวก ข

วิธีการใช้งานอุปกรณ์ NIR-MC METER

การใช้งานระบบและอุปกรณ์ NIR – MC METER

ขั้นตอนการใช้งาน ดังต่อไปนี้

1. เปิดเครื่อง NIR-MC METER (สภาวะ ON) ไฟสีเขียวจะขึ้นที่อุปกรณ์
2. กดปุ่ม SCAN ค้างไว้ประมาณ 5 วินาที ไฟฟ้าจะขึ้นที่อุปกรณ์ควบคู่กับไฟสีเขียว (พร้อมเชื่อมต่อ Bluetooth กับ Smart phone)
3. เปิดแอปพลิเคชัน โปรแกรมตรวจสอบคุณภาพไม้ยางพารา บน Smart phone
4. เลือก Connect เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ NIR-MC METER (มีไฟสีเขียวขึ้นที่อุปกรณ์ แสดงว่ามีการเชื่อมต่อกับ Smart phone แล้ว)
5. เริ่มต้นการใช้งานอุปกรณ์ NIR-MC METER โดยกด Scan บนหน้าจอ Smart phone หรือ กดปุ่ม Scan ที่ตัวอุปกรณ์ NIR-MC METER



ภาพผนวกที่ ข1 องค์ประกอบของเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (NIR-MC METER)

ขั้นตอนการปิดระบบ

1. เลือก ออกจากโปรแกรม (ด้านขวาบนของหน้าจอ Smart phone) เพื่อออกจากแอปพลิเคชัน
 2. ปิดเครื่อง NIR – MC METER (สภาวะ OFF)
- *ปุ่ม Reset เพื่อ Reset การทำงานของอุปกรณ์
- ปุ่ม Wake Up เพื่อออกจากสภาวะหลับใหล (Wake button) ของอุปกรณ์
- **การชาร์ตแบตเตอรี่ต้องเปิดเครื่อง NIR – MC METER (สภาวะ ON) จะมีแสงไฟสีแดงที่อุปกรณ์ เมื่อแบตเตอรี่เต็ม ไฟสีแดงก็จะดับลง

ความก้าวหน้าของผลงานวิจัย ณ ช่วงรายงานเมื่อเทียบกับแผนงานวิจัยทั้งโครงการ

แผนการดำเนินงานวิจัย	เดือน											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ติดต่อโรงเลื่อย เตรียมเครื่องมือวัดเพื่อศึกษากำหนดการวัดที่เหมาะสม และเตรียมตัวอย่างไม้ยางพารา												
วัดข้อมูลการดูดกลืนแสง NIRS ของตัวอย่างเนื้อไม้เกรด AB, B, C และ P จากภาคใต้ ภาคตะวันออก และภาคอีสาน												
หาเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางด้วยวิธีการอบตามมาตรฐานเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการสร้างสมการทำนาย												
วิเคราะห์ข้อมูล NIRS เพื่อสร้างโมเดลทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในตัวอย่างเนื้อไม้												
ทำการออกแบบ และพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับคำนวณค่าความชื้นของไม้ยาง												
ทำการวัดตัวอย่างไม้ยาง เพื่อทดสอบสมการทำนาย												
หาเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางด้วยวิธีการอบตามมาตรฐานในการทดสอบสมการทำนาย และเปรียบเทียบผลการทำนายด้วยเครื่อง NIRS												
สรุปผล เขียนรายงาน ถ่ายทอดเทคโนโลยี สาธิตการใช้งานให้กับโรงเลื่อย												

หมายเหตุ

ลูกศรสีดำ (↔) แสดงแผนการดำเนินงานวิจัยตามที่เสนอแผนไว้ในข้อเสนอโครงการ

ลูกศรสีแดง (↔) แสดงความก้าวหน้าการดำเนินงานวิจัยจริงที่ได้ดำเนินการไปแล้ว

**ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผล
ที่ได้รับตลอดโครงการ**

ระยะเวลา	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
6 เดือนที่ 1	1. เก็บตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปที่ได้มาตรฐานตามสมาคมธุรกิจไม้ยางพาราไทยจากโรงเลื่อยในภาคใต้ 1 แห่ง ภาคตะวันออก 1 แห่ง และภาคอีสาน 1 แห่ง 2. กำหนดตำแหน่งการวางตัวอย่างวัด NIR ตัดแต่งตัวอย่างทำการวัดตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปจากโรงเลื่อยภาคใต้ ด้วยเครื่อง NIRS และหาค่าความชื้นด้วยวิธีอบตามมาตรฐาน	1. ได้เก็บตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งที่ได้มาตรฐานจาก โรงเลื่อย 4 แห่ง ได้แก่ โรงเลื่อยในภาคใต้ 1 แห่ง ภาคตะวันออก 1 แห่ง และภาคอีสาน 1 แห่ง 2. สามารถกำหนดตำแหน่งการวางตัวอย่างวัด NIR ได้ค่าข้อมูลการดูดกลืนแสง NIRS และค่าความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยวิธีอบตามมาตรฐาน สำหรับสร้างสมการทำนาย (calibration model)	1. ได้ตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งที่ได้มาตรฐานจาก โรงเลื่อย 4 แห่ง ได้แก่ โรงเลื่อยในภาคใต้ 1 แห่ง ภาคตะวันออก 2 แห่ง และภาคอีสาน 1 แห่ง 2. ได้ตำแหน่งการวางตัวอย่างวัด NIR ได้ค่าข้อมูลการดูดกลืนแสง NIRS และค่าความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยวิธีอบตามมาตรฐาน สำหรับสร้างสมการทำนาย (calibration model) 3. ได้รายงานความก้าวหน้ารอบ 6 เดือน
6 เดือนที่ 2	1. วิเคราะห์ข้อมูล NIRS เพื่อสร้างโมเดลทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ในตัวอย่างเนื้อไม้ 2. ออกแบบอุปกรณ์ NIRS แบบพกพา เชื่อมต่ออุปกรณ์กับ Smart phone และพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับคำนวณค่าความชื้นของไม้ยาง บนระบบปฏิบัติการ Android 3. วัดตัวอย่างไม้ยางพาราด้วยอุปกรณ์ NIRS แบบพกพา เชื่อมต่ออุปกรณ์กับ Smart phone และเปรียบเทียบผลการ	1. วิเคราะห์ข้อมูล NIRS เพื่อสร้างโมเดลทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในตัวอย่างเนื้อไม้ 2. ออกแบบอุปกรณ์ NIRS แบบพกพา เชื่อมต่ออุปกรณ์กับ Smart phone และพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับคำนวณค่าความชื้นของไม้ยางบนระบบปฏิบัติการ Android 3. วัดตัวอย่างไม้ยางพาราด้วยอุปกรณ์ NIRS แบบพกพา เชื่อมต่ออุปกรณ์กับ Smart phone และเปรียบเทียบผลการทำนายด้วย	1. ได้โมเดลทำนายค่าความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปจาก ข้อมูล NIRS 2. ได้อุปกรณ์ NIRS แบบพกพา เชื่อมต่ออุปกรณ์กับ Smart phone และแอปพลิเคชันสำหรับคำนวณค่าความชื้นของไม้ยางพารา บนระบบปฏิบัติการ Android สำหรับทำนายค่าความชื้นของไม้ยาง 3. ได้ผลการทดสอบเปรียบเทียบค่าการทำนายจาก NIRS แบบพกพา กับค่าจากวิธีอบตามมาตรฐาน

ระยะเวลา	กิจกรรมที่วางแผนไว้	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
	ทำนายด้วยเครื่อง NIRS กับค่าจากวิธีอบตามมาตรฐาน 4. เผยแพร่การใช้งานอุปกรณ์ให้กับโรงเลื่อย	เครื่อง NIRS กับค่าจากวิธีอบตามมาตรฐาน 4. ได้เผยแพร่การใช้งานให้กับโรงเลื่อย 1 แห่ง	4. ได้เผยแพร่การใช้งานให้กับโรงเลื่อย 3 แห่ง (ภาคตะวันออก 2 แห่ง และภาคใต้ 1 แห่ง) 5. รูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์