



การตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ Verification of Sawn Timber Hevea Wood Moisture Content Using Near Infrared Spectroscopy

วรวรรณ นกน้อย¹, สิริณาด น้อยพิทักษ์^{1*} และอนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล¹
Worawat Noknoi¹, Sirinad Noypitak^{1*}, Anupun Terdwongworakul¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University, Nakhon Pathom, Thailand 73140

*Corresponding author: Tel: +66-851755727, Fax: +66-0-3435-1896, E-mail: fengsnn@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%db) ของไม้ยางพาราแปรรูป ด้วยการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ด้วยเครื่อง Fourier transform near infrared spectrophotometer ช่วงเลขคลื่น 12489–3594 cm^{-1} (800–2700 nm) รูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (diffuse reflectance mode) สร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) ผลการวิจัยพบว่า การนำค่าสเปกตรากการดูดกลืนแสงมาทำการปรับแต่งทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Second derivative ให้ผลของการทดสอบสมการทำนายสูงที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของกลุ่มทำนาย (R_p^2) เท่ากับ 0.95 ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (RMSEP) เท่ากับ 4.13%db และค่า Residual prediction deviation (RPD) เท่ากับ 4.55 การใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้มาช่วยในการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปที่ครอบคลุมไม้ยางพาราแปรรูปสด ไม้ยางพาราแปรรูปสดที่ถูกลดความชื้น และไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งนั้นสามารถตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้อย่างรวดเร็ว และที่สำคัญไม่ต้องทำลายตัวอย่างเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

คำสำคัญ: ความชื้น, ไม้ยางพาราแปรรูป, สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

Abstract

This research studied prediction of moisture content of sawn timber Hevea wood by near infrared spectroscopy using Fourier transform near infrared spectrophotometer in a range of 12489–3594 cm^{-1} (800–2700 nm) in diffuse reflectance mode. The predictive models were built by the partial least squares regression (PLSR). The result showed the spectra pretreated with second derivative yielded the best performance of model with coefficient of determination of prediction set (R_p^2), root mean square error of prediction (RMSEP) and residual prediction deviation (RPD) of moisture content equal to 0.945, 4.13% dry basis (%db) and 4.55 respectively. Using near-infrared spectroscopy technique to predict the percentage of moisture content of fresh, treated and oven dried sawn timber Hevea wood offered a rapid and non-destructive measurement.

Keywords Moisture content, Sawn Timber Hevea Wood, Near Infrared Spectroscopy

1 บทนำ

ยางพารา (*Hevea brasiliensis* Mull. Arg.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางพาราอันดับหนึ่งของโลกในปี 2559 มีพื้นที่ปลูกยางมากกว่า 21 ล้านไร่ (Rubber Authority of Thailand, 2009) ปัจจุบันน้ำยางมีราคาตกต่ำ แต่ในทางกลับกันไม้ยางพารากำลังกลายเป็นที่นิยมของตลาดโลก ในปี 2560 มีมูลค่าการส่งออกไม้ยางพาราแปรรูป 50,824.29 ล้านบาท (Rubber Intelligence Unit, 2017) ไม้ยางพาราเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการโค่นต้นยางพาราเก่าที่มีอายุ 25 ปีขึ้นไปซึ่ง

ให้ผลผลิตน้ำยางน้อย (Riyaphan, 2013) แต่ลำต้นยางพารายังคงมีมูลค่าสูง และมีศักยภาพที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์จากการแปรรูปเพื่อส่งออกได้อีกหลายด้าน (Chuayyok, 2014) ซึ่งในปัจจุบันการนำไม้ยางพาราแปรรูปมาเป็นวัตถุดิบเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ไม้แปรรูป เฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจากลักษณะเฉพาะตัวลวดลายสีขาวนวลจึงถูกเรียกว่าเป็นไม้สักขาว (White Teak) และความสวยงามของตัวไม้ (Phumichai et al., 2012; Jarusombuti et al., 2009) ไม้ยางพาราที่ผ่านการแปรรูปแล้วสามารถจำแนกเพื่อการส่งออกได้เป็น 2 เกรด คือ เกรด A และเกรด B (Thai Industrial Standards Institute, 2009) และ

จำแนกตามการปฏิบัติงานจริงของโรงเลื่อยได้เพิ่มอีก 2 เกรด คือ เกรด C และ เกรดไม้พาเลท (P) (The Revenue Department, 2013) โดยในทางปฏิบัตินั้น การส่งออกไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งนั้นทางโรงเลื่อยมักจำหน่ายเกรด A และ B รวมกันเป็น เกรด AB และจำเป็นต้องลดความชื้นเนื้อไม้ไม่ให้เกินกว่า 12% dry basis (%db) ตามมาตรฐานการส่งออก (Thai Industrial Standards Institute, 2009) โรงเลื่อยนิยมใช้อุปกรณ์ในการตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ความชื้น เช่น เครื่องมือวัดความชื้นแบบเข็มตอก โดยที่ผู้ตรวจต้องทำการตอกเข็มหัวโพรบเข้าไปในเนื้อไม้ยางพาราเพื่อตรวจสอบความชื้น ดังนั้นทำให้เกิดความเสียหายกับผลิตภัณฑ์ไม้ยางพารา ไม่สามารถนำขึ้นไม้ที่ถูกตรวจสอบแล้วไปจำหน่ายต่อได้

ดังนั้นการนำเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy; NIRS) มาใช้ตรวจสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูป ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง มีความสะดวกรวดเร็ว จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ในต่างประเทศได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในเนื้อไม้ประเภทต่างๆ มากมาย (Tsuchikawa, 2007) เช่น การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในไม้โอ๊คสีแดงสด (Defo et al., 2007) การใช้เทคนิค NIRS แบบ on-line ตรวจสอบความชื้นในอุตสาหกรรมแผ่นไม้อัด (veneer) (Adedipe and Andoh, 2008) การใช้เทคนิค NIRS ในการหาความชื้นของไม้สนสด 2 สายพันธุ์ที่ระดับความชื้น 3 ระดับ เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องมือวัดความชื้นเชิงพาณิชย์ (Watanabe et al., 2011) นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์เทคนิค NIRS ในการตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ความชื้นในไม้อัดเม็ด เพื่อลดเวลาในการตรวจสอบความชื้นเมื่อเทียบกับการหาความชื้นโดยการนำไปอบในตู้อบลมร้อน (Sundaram et al. 2015) แต่ในประเทศไทยยังไม่มีรายงานการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้กับไม้ยางพาราแปรรูป ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้เทคนิค NIRS ในการทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเนื้อไม้ยางพาราแปรรูปที่ครอบคลุมทั้งไม้ที่มีความชื้นสูงและไม้ที่มีความชื้นต่ำ (ไม้ยางพาราแปรรูปสดและไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง) โดยที่ไม่ต้องทำลายตัวอย่าง

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปสด และอบแห้งเกรด AB, C และ พาเลท (P) ซึ่งลักษณะของไม้ยางพาราแปรรูปเกรด AB นั้นมีเนื้อสวย เมื่อตัดตำหนิออกแล้วต้องได้ไม้เกลี้ยงท่อนยาวที่สุด ยาวไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของความยาวที่กำหนดซึ่งนิยมใช้ส่งออกต่างประเทศ ไม้ยางพาราแปรรูปเกรด C นั้นอาจมีตำหนิหรือไม้อมไส้ แต่เมื่อตัดตำหนิออกแล้วได้ไม้เกลี้ยงยาวไม่น้อยกว่าร้อยละ 60 ของความยาวที่กำหนด นิยมส่งขายต่างประเทศในเกรดรอง หรือขายในประเทศ และไม้ยางพาราแปรรูปเกรด P มี

ลักษณะตำหนิ ไม้ลายตลอดแนวนิยมนำไปใช้ทำชั้นวางพาเลท ดัง Figure 1 จากโรงเลื่อยไม้ยางพาราแปรรูปในภาคใต้ จ. นครศรีธรรมราช และภาคตะวันออก จ.ระยอง จำนวน 328 ตัวอย่าง เพื่อให้มีความแปรปรวนของข้อมูลตัวอย่างในการสร้างสมการทำนายที่ครอบคลุมเกรดไม้ พื้นที่การปลูก และระดับเปอร์เซ็นต์ความชื้นในไม้ยางพาราแปรรูปสดถึงไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง จึงได้สุ่มเลือกตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูป 3 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 ไม้ยางพาราแปรรูปสด (fresh wood) จำนวน 70 ตัวอย่าง (เกรด AB จำนวน 30 ตัวอย่าง เกรด C จำนวน 29 ตัวอย่าง และเกรด P จำนวน 11 ตัวอย่าง)

กลุ่มที่ 2 ไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง (oven dried wood) จำนวน 216 ตัวอย่าง (เกรด AB จำนวน 92 ตัวอย่าง เกรด C จำนวน 92 ตัวอย่าง และเกรด P จำนวน 32 ตัวอย่าง) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งที่โรงเลื่อยได้ลดความชื้นให้มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่ำกว่า 12 % ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ไม้ยางพาราแปรรูป (Thai Industrial Standards Institute, 2009) แล้วเก็บรักษาไว้ในโกดังเพื่อเตรียมส่งออกต่างประเทศ

กลุ่มที่ 3 ไม้ยางพาราแปรรูปสดที่ถูกนำมาลดความชื้นด้วยการอบ (treated wood) จำนวน 42 ตัวอย่าง (เกรด AB จำนวน 14 ตัวอย่าง เกรด C จำนวน 14 ตัวอย่าง และเกรด P จำนวน 14 ตัวอย่าง) โดยนำตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปสดมาอบลดความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 45°C เพื่อให้ได้ช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ครอบคลุมในช่วงที่ขาดหายไประหว่างไม้ยางพาราสดและไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง สำหรับใช้สร้างสมการทำนายที่มีค่าการกระจายตัวของตัวอย่างที่ครอบคลุมตลอดช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราสดไปถึงช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง ซึ่งเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นมีด้วยกัน 14 ช่วงเวลา ได้แก่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 30 และ 36 hr ตามลำดับ โดยนำตัวอย่างที่ทำกรลดความชื้นออกมาวิเคราะห์ช่วงเวลาแต่ละ 1 ตัวอย่าง รวมเป็น 3 ตัวอย่างต่อหนึ่งช่วงเวลา และวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 25°C เป็นเวลา 24 hr ก่อนทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง

ตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปทั้ง 3 กลุ่ม นั้นถูกตัดแต่งให้มีขนาด 2.54 x 2.54 x 40 cm และทำการขีดผิวให้เรียบเสมอกัน จากนั้นเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง 25°C เป็นเวลา 24 hr ก่อนนำไปทดสอบหาค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ และหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น

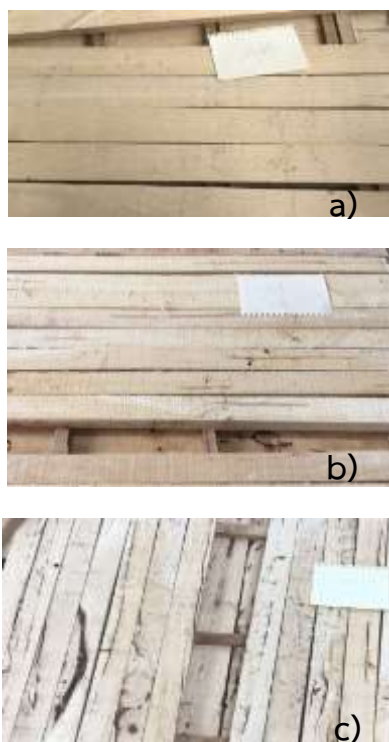


Figure 1 Grades of oven dried sawn timber Hevea wood
a) AB grade b) C grade and c) P grade

2.2 การวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูป

นำตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Fourier Transform Near Infrared Spectrophotometer (FT-NIR MPA, Bruker Co, Karlsruhe, Germany) ดัง Figure 2a มีช่วงเลขคลื่น $12489\text{--}3594\text{ cm}^{-1}$ ($800\text{--}2700\text{ nm}$) รูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (diffuse reflectance mode) ที่ resolution เท่ากับ 16 cm^{-1} และ scan average เท่ากับ 32 ครั้ง วัดค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมด ขึ้นละ 4 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 3 ซ้ำ เพื่อให้ได้ค่าสเปกตรัมเฉลี่ยทั่วทั้งชิ้นตัวอย่างดัง Figure 2b ที่อุณหภูมิห้อง 25°C โดยข้อมูลสเปกตรัมจะถูกบันทึกไว้ด้วยโปรแกรม OPUS 6.5

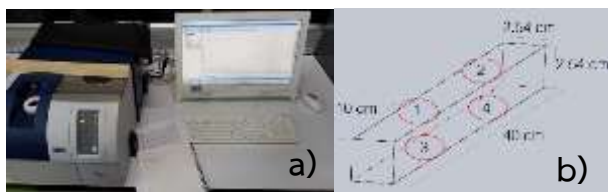


Figure 2 Measurement of sawn timber Hevea wood using a) near infrared spectrophotometer and b) the 4 positions of measurement

2.3 การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูป

นำตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปมาวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้นแบบเข็มตอก (RC-1E, Delmhorst

Instrument Corporation, New Jersey, USA) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่โรงเลื่อยใช้ตรวจสอบความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งในปัจจุบัน โดยตอกลึกเป็นระยะครึ่งหนึ่งของความหนาตัวอย่าง ดัง Figure 3 จากนั้นนำตัวอย่างไปหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นตามวิธีมาตรฐาน (ASTM, 2000) โดยตัวอย่างถูกตัดแบ่งให้มีขนาด $2.54 \times 2.54 \times 2.54\text{ cm}$ จำนวน 4 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง ซึ่งตำแหน่งตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปที่ใช้ในการหาความชื้นนั้นเป็นตำแหน่งที่มีการวัดค่าการดูดกลืนแสง แล้วนำตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปที่ได้ขนาดตามที่ต้องการ ซึ่งน้ำหนักก่อนอบแห้ง (W_f) ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (CY 204, Citizen Scale India Pvt. Ltd, Maharashtra, India) แล้วนำไปอบในตู้อบลมร้อน (FD240, BINDER, Tuttlingen, Germany) ที่อุณหภูมิ 103°C จนกว่าน้ำหนักคงที่ นำตัวอย่างที่ผ่านการอบด้วยตู้อบลมร้อนแล้วใส่โถดูดความชื้น (desiccator) เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำหนักหลังอบเปลี่ยนแปลงแล้วจึงนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักหลังอบ (W_d) ด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิทัล 4 ตำแหน่ง นำค่าที่ได้มาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห่งดงสมการที่ (1)



Figure 3 Measurement of moisture content using pin moisture meter

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

2.4 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

นำข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรวจสอบข้อมูลที่ผิดปกติ (outlier) ของค่าอ้างอิงโดยพิจารณาค่ามาตรฐาน (standard score ; Z) ของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพารา ถ้าหากค่า Z มากกว่า 3 หรือน้อยกว่า -3 ถือว่าเป็น outlier (Meier, 2014) จากนั้นนำค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละเกรดไม้ของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปทั้ง 3 กลุ่ม ด้วยวิธี One way ANOVA และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้ยางพาราแปรรูประหว่างการวัดด้วยวิธีการลมร้อนตามมาตรฐาน และการใช้เครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์แบบเข็มตอกด้วยวิธี T-Test ด้วยโปรแกรม SPSS version 11.5 จากนั้นนำข้อมูลสเปกตรามาตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูลโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Principal Component Analysis (PCA) แล้วนำข้อมูลสเปกตรากการดูดกลืนแสงเริ่มต้นและสเปกตรานำมาทำการปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธี Smoothing, First derivative, Second derivative,

Multiplicative scatter correction (MSC), Standard normal variate (SNV) ทั้งนี้เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมการทำนายที่วิเคราะห์สร้างจากสเปกตรัมเริ่มต้นและสเปกตรัมที่มีการลดอิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัม และลดการกระเจิงของแสง จากนั้นแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้สร้างสมการทำนาย (calibration set) จำนวน 223 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ใช้ในการทดสอบสมการทำนาย (prediction set) จำนวน 103 ตัวอย่าง จากนั้นใช้โปรแกรม The Unscrambler 9.8 (CAMO, USA) สร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) แบบ Full cross validation ด้วยข้อมูลในกลุ่มที่สร้างสมการทำนายโดยมีการกำหนดให้ค่าการดูดกลืนแสงเป็นตัวแปรอิสระและค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเป็นตัวแปรตาม โดยพิจารณาค่าสมรรถนะของสมการทำนายที่ดีที่สุดจากค่าทางสถิติ คือ ค่า Coefficient of determination of calibration (R_c^2) ที่มีค่าสูง และค่า Root mean square error of calibration (RMSEC) ที่มีค่าต่ำ จากนั้นเมื่อได้สมการทำนายแล้วทำการทดสอบสมการทำนายด้วยข้อมูลในกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการ แล้วพิจารณาค่าสมรรถนะการทำนายจากค่าทางสถิติ คือ Coefficient of determination of prediction (R_p^2) ที่มีค่าสูง ค่า Root mean square error of prediction (RMSEP) ที่มีค่าต่ำ และค่า Residual prediction deviation (RPD) ที่มีค่าสูง ซึ่งค่า RPD มาจากอัตราส่วนระหว่าง Standard deviation (SD) ของกลุ่มการทำนาย ต่อค่า Standard error of prediction (SEP) ซึ่งจะใช้เป็นตัวชี้วัดความแม่นยำในการทำนายของสมการ โดยถ้าหากมีค่า 0.0-2.3 มีความถูกต้องในการทำนายต่ำมาก ไม่แนะนำให้ใช้, 2.4-3.0 มีความถูกต้องในการทำนายต่ำ สามารถแบ่งระดับปริมาณได้อย่างหยาบ, 3.1-4.9 มีความถูกต้องในการทำนายปานกลาง สามารถแบ่งระดับปริมาณได้, 5.0-6.4 มีความถูกต้องในการทำนายที่ดี สามารถประยุกต์ใช้กับการควบคุมคุณภาพ, 6.5-6.8 มีความถูกต้องในการทำนายที่ดีมาก สามารถประยุกต์ใช้กับการควบคุมกระบวนการ และ 8.0 ขึ้นไป มีความถูกต้องในการทำนายยอดเยี่ยม ประยุกต์ใช้ได้กับทุกงาน (Williams, 2001)

3 ผลและวิจารณ์

จากการตรวจสอบความผิดปกติ (outliers) ของค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง FT-NIR MPA ด้วยวิธี PCA พบว่ามีความผิดปกติของเส้นสเปกตรัม 1 ตัวอย่าง และเมื่อตรวจสอบความผิดปกติของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากตัวอย่างไม้อย่างพาราแปรรูปทั้งหมด พบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ผิดปกติ 1 ค่า เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ตรวจสอบนั้นมีค่า Z ต่ำกว่า -3 ดังนั้นจากตัวอย่างอย่างทั้งหมด 328 ตัวอย่าง เมื่อนำตัวอย่างที่มีความผิดปกติออกจึงเหลือตัวอย่างนำไปวิเคราะห์ต่อจำนวน 326 ตัวอย่าง

3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้อย่างพาราแปรรูป

ผลของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้อย่างพาราแปรรูป จากวิธีการหาความชื้นด้วยวิธีอบตามมาตรฐาน (ASTM, 2000) แสดงดัง Table 1 พบว่าไม่มีความแตกต่างของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของเกรด AB, C และ P ของไม้อย่างพาราแปรรูปสด และไม่มี ความแตกต่างของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของเกรด AB, C และ P ของไม้อย่างพาราแปรรูปที่ลดความชื้น (อบที่อุณหภูมิ 45°C) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเปอร์เซ็นต์ความชื้นในเกรด AB, C และ P ของไม้อย่างพาราแปรรูปอบแห้งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องด้วยตัวอย่างไม้อย่างพาราแปรรูปอบแห้งนั้นหลังจากโรงเลื่อยได้ทำการอบลดความชื้นให้มีค่าต่ำกว่า 12%db แล้ว จะถูกนำมาเก็บรักษาในโกดัง ซึ่งบริเวณที่เก็บรักษานั้นอากาศสามารถไหลเวียนได้ ทำให้ความชื้นของตัวอย่างไม้อย่างพาราอบแห้งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาตามสภาพความชื้นในอากาศ (Ratanawilai and Nuntadusi, 2012) จะเห็นได้ว่าในเกรด C นั้นอาจมีการเก็บรักษาจนจำหน่ายไว้เป็นเวลายาวนานกว่าเกรด P และ เกรด AB ตามลำดับ ส่งผลให้ไมเกรด C มีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสูงกว่าเกรด P และ เกรด AB ตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ฉะนั้นก่อนโรงเลื่อยจำหน่ายจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นก่อนส่งมอบสินค้า ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้อย่างพาราแปรรูปสดมีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นอยู่ในช่วง 43.45-68.19%db ไม้อย่างพาราแปรรูปอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 5.73-12.57%db และไม้อย่างพาราแปรรูปที่ลดความชื้น (อบที่อุณหภูมิ 45°C) มีค่าอยู่ในช่วง 16.52-48.39%db ดัง Table 1

เมื่อทำการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยวิธี T-test ในตัวอย่างไม้อย่างพาราแปรรูประหว่างวิธีการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยการอบลมร้อนตามวิธีมาตรฐาน ASTM (2000) กับการใช้เครื่องวัดความชื้นแบบเข็มตอก พบว่าการวัดค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้อย่างพาราแปรรูปอบแห้งนั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้อย่างพาราแปรรูปสดและไม้อย่างพาราแปรรูปที่ถูกลดความชื้น มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญดัง Table 2 เนื่องจากในการใช้เครื่องวัดความชื้นแบบเข็มตอกนั้น ต้องมีการตอกหัวโพรบลงไปในส่วนของเนื้อไม้ ซึ่งในตัวอย่างไม้อย่างพาราแปรรูปอบแห้งได้มีการวางเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว ภายในเนื้อไม้มีความชื้นที่ไม่เกิน 12% ทำให้มีความชื้นสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นตัวอย่าง แต่ไม้อย่างแปรรูปสด และไม้อย่างพาราแปรรูปที่ถูกลดความชื้นนั้น บริเวณผิวของตัวอย่างที่สัมผัสกับอากาศทำให้เกิดการระเหยของความชื้นได้ดีกว่าส่วนด้านในของตัวอย่าง ทำให้เมื่อตอกหัวโพรบเข้าไปในตัวอย่างเข็มของหัวโพรบอาจอยู่ใกล้กับบริเวณขอบของตัวอย่างทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม้อย่างพาราแปรรูปโดยใช้วิธีอบตามมาตรฐาน และใช้เครื่องวัดความชื้นแบบเข็มตอกล้วนเป็นการทำลายตัวอย่างไม้ ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำตัวอย่างนั้นไปจำหน่ายต่อได้

ข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม calibration และกลุ่ม prediction โดยได้แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่ำสุด สูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดัง Table 3 ซึ่งในกลุ่ม calibration ได้มีการ

จัดข้อมูลตัวอย่างที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่ำสุด และสูงสุดที่ครอบคลุมพื้นที่การปลูก ครอบคลุมเกรดไม้ และความชื้นในไม้ยางพาราแปรรูปสดและแห้ง เพื่อให้ได้การทำนายที่ครอบคลุมค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นทั้งหมด

Table 1 Descriptive statistics of moisture content sawn timber Hevea wood of standard method

Types of wood	Grades	Number of Samples	Moisture Content (%dry basis)		
			Min	Max	Mean±SD
Fresh Wood	AB	29	44.05	67.34	55.22±5.50 ^a
	C	28	48.24	68.19	55.41±4.16 ^a
	P	11	43.45	62.84	52.34±5.05 ^a
	Total	68	43.45	68.19	54.83±4.97
Oven dried Wood	AB	92	5.73	12.57	7.92±1.44 ^c
	C	92	7.68	11.98	10.06±1.17 ^a
	P	32	7.40	11.04	8.89±0.80 ^b
	Total	216	5.73	12.57	8.98±1.59
Treated Wood	AB	14	16.52	44.27	29.55±8.57 ^a
	C	14	16.96	48.39	29.4±8.19 ^a
	P	14	20.69	42.40	32.17±6.98 ^a
	Total	42	16.52	48.39	30.37±7.85

Different superscripts in the same column indicate that the values are significantly different ($p < 0.05$) by Duncan's multiple range test.

Table 2 Comparison statistics of moisture content sawn timber Hevea wood between standard method and pin moisture meter

Type of wood	Measurement method	Moisture content (%db)	P-value	T-test
		Mean±SD		
Fresh wood	Standard (ASTM, 2000)	54.83±4.97	0.0000	*
	Pin moisture meter	41.74±3.26		
Oven dried wood	Standard (ASTM, 2000)	8.98±1.59	0.1685	ns
	Pin moisture meter	8.79±2.30		
Treated wood	Standard (ASTM, 2000)	30.37±7.85	0.0001	*
	Pin moisture meter	35.52±7.18		

* indicate that the values are significantly different and ns indicate that the values are non-significantly different ($p < 0.05$) by Student's t-test

3.2 สเปกตรารการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูป

ผลจากการวัดสเปกตรารการดูดกลืนแสงผลจากการวัดค่าสเปกตรารการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูปพบว่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของไม้ยางพาราแปรรูปสดมีค่าสูงกว่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งดัง Figure 4 และ Figure 5 สเปกตรารเฉลี่ยที่ปรับแต่งด้วย Second derivative แสดงถึงอิทธิพลของน้ำที่มีอยู่ในไม้ยางพาราแปรรูป

ซึ่งสามารถเห็นพิกที่เด่นชัดที่ตำแหน่งของพันธะ OH ของน้ำที่เลขคลื่น 7004 cm^{-1} (1428 nm) และ 5215 cm^{-1} (1916 nm) (Fujimoto et al., 2010) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการดูดกลืนของไม้ยางพาราแปรรูปสด ไม้ยางพาราแปรรูปที่ถูกลดความชื้น และไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง ตามลำดับ นอกจากนั้นเป็นการสั่นของพันธะ CH ที่เลขคลื่น 4420 cm^{-1} (2270 nm) (Fujimoto et al., 2008) และ 4019 cm^{-1} (2488 nm) (Osborne et al., 1993)

Table 3 The calibration models of fresh wood oven dried wood and treated wood using PLSR obtained for moisture content.

Parameters	Group	Data set	Number of Samples	Min	Max	Mean±SD
Moisture Content (%dry basis)	Fresh wood	Calibration set	47	43.45	68.19	54.99±5.36
		Prediction set	21	46.17	63.21	54.49±4.03
	Oven dried wood	Calibration set	147	5.73	12.57	9.02±1.59
		Prediction set	69	6.17	11.69	8.88±1.60
	Treated wood	Calibration set	29	16.52	48.39	30.59±8.27
		Prediction set	13	18.39	42.07	29.90±7.11
	Total	Calibration set	223	5.73	68.19	21.51±19.17
		Prediction set	103	6.17	63.21	20.83±18.74

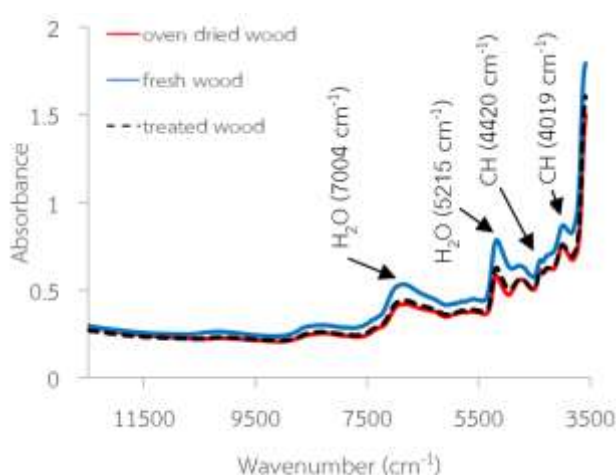


Figure 4 The average absorbance spectra of fresh wood, oven dried wood and treated wood of the sawn timber Hevea wood.

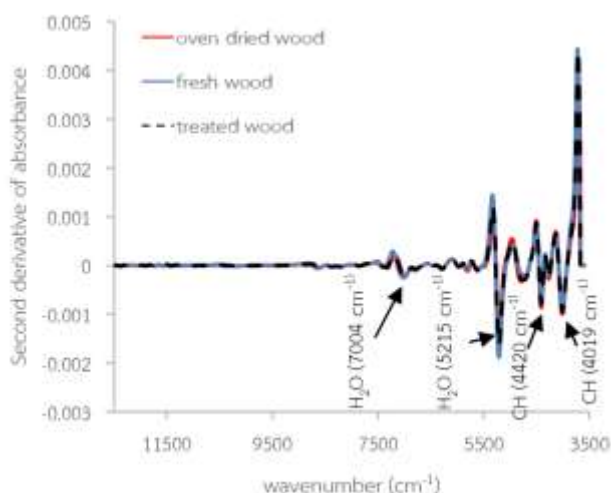


Figure 5 The average second derivative of absorbance spectra of fresh wood, oven dried wood and treated wood of the sawn timber Hevea wood.

3.3 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป

การสร้างสมการทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นซึ่งนำข้อมูลสเปกตรัมในช่วงเลขคลื่น 12489–3594 cm^{-1} (800–2700 nm) ไม้ยางพาราทั้งหมดมาปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์พบว่า การปรับแต่งด้วยวิธี Second derivative แบบ Savitzky Golay ให้ผลการสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสมการทำนายมีค่า R_c^2 เท่ากับ 0.96 และค่า RMSEC เท่ากับ 3.64%db ดัง Table 4 และ Figure 6 และมีค่าผลการทำนายที่ดีที่สุดมีค่า R_p^2 เท่ากับ 0.95 ซึ่งแสดงว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้และประกันคุณภาพได้ (William, 2007) มีค่า RMSEP เท่ากับ 4.13%db และค่า RPD เท่ากับ 4.55 ซึ่งถือว่าความถูกต้องในการทำนายปานกลาง สามารถแบ่งระดับปริมาณได้ ดัง Table 4 และ Figure 7 เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ใน Figure 8 ที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี Second derivative พบว่า เลขคลื่นที่ 5176 cm^{-1} (1940 nm) เป็นการสั่นของพันธะ OH ของน้ำ (Osborne et al., 1993; Fujimoto et al., 2010) ที่ส่งผลต่อการทำนายซึ่งเกี่ยวข้องกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่อยู่ในไม้ยางพาราแปรรูปซึ่งสัมพันธ์กับค่าการดูดกลืนแสง เลขคลื่นที่ 6495 cm^{-1} (1540 nm) และ 6603 cm^{-1} (1510 nm) เป็นการสั่นของ O-H first overtone ของเซลลูโลส (Schwanninger et al., 2011) เลขคลื่นที่ 8238 cm^{-1} (1215 nm) เป็นการสั่นของ C-H second overtone ของเซลลูโลสเช่นกัน (Osborne et al., 1993) เลขคลื่นที่ 8377 cm^{-1} (1195 nm) เป็นการสั่นของพันธะ C-H second overtone ของลิกนิน (Schwanninger et al., 2011) ซึ่งตรงกับรายการงานของ Rowell (2005) ในเนื้อไม้มีองค์ประกอบทางเคมี และพอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ ซึ่งพอลิเมอร์นั้นประกอบด้วย เซลลูโลส ลิกนิน และ เฮมิเซลลูโลส ซึ่ง Hodge and Woodbridge (2010) ได้มีการใช้ NIRS ในการทำนายค่าลิกนิน และ เซลลูโลสในไม้สน Ramadevi et al. (2010) ได้มีการตรวจสอบปริมาณค่าลิกนินในไม้ยูคาลิปตัสเช่นกัน โดย Mvondo et al. (2017) ได้รายงานวาระดับความเข้มข้นของฟิ

เซลลูโลส และลิกนินที่ 3340 cm^{-1} นั้นจะส่งผลต่อปริมาณการดูดซับน้ำในเนื้อไม้ Iroko, Bbilinga และ Tali ในส่วนของพีคที่มีสัมประสิทธิ์การถดถอยที่สูงดังเลขคลื่นที่ 7575 cm^{-1} (1320 nm) 5909 cm^{-1} (1695 nm) 5747 cm^{-1} (1740 nm) 5307 cm^{-1} (1890 nm) และ 4921 cm^{-1} (2030 nm) อาจเกิดจากองค์ประกอบอื่นที่อยู่ภายในเนื้อไม้ยางพาราแปรรูป

Table 4 Statistical data of PLSR models obtained for calibration set and prediction set of moisture content

Pretreatment	LV	Calibration		Prediction		
		R_c^2	RMSE C (%db)	R_p^2	RMSE P (%db)	RPD
S	4	0.93	5.26	0.91	5.58	3.36
Abs	4	0.93	4.93	0.92	5.20	3.60
1 st	2	0.93	4.96	0.92	5.31	3.53
2 nd	4	0.96	3.64	0.95	4.13	4.55
MSC	3	0.94	4.58	0.94	4.55	4.13
SNV	3	0.94	4.58	0.94	4.57	4.10
S+2 nd	3	0.95	4.27	0.94	4.54	4.12
S+MSC+2 nd	2	0.95	4.12	0.95	4.22	4.43

LV, Latent values; Abs, Absorbance; 1st, First derivative; 2nd, Second derivative; MSC, Multiplicative scatter

correction; SNV, Standard normal variate; S, Smoothing เมื่อพิจารณา Figure 8 พบว่าช่วงสัมประสิทธิ์การถดถอยที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น $12489\text{--}9000\text{ cm}^{-1}$ ($800\text{--}1111\text{ nm}$) มีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก จึงทำการตัดเฉพาะช่วงเลขคลื่น $9000\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ ($1111\text{--}2700\text{ nm}$) ซึ่งเป็นช่วงที่มีสัมประสิทธิ์ถดถอยสูงมาปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Second derivative แล้วสร้างสมการทำนาย พบว่ามีค่า R_c^2 เท่ากับ 0.94 และค่า RMSEC เท่ากับ 4.64%db ซึ่งมีค่าการทำนาย R_p^2 เท่ากับ 0.93 และค่า RMSEP เท่ากับ 4.74%db และเมื่อนำเฉพาะพีคน้ำในช่วงเลขคลื่น $5180\text{--}5150\text{ cm}^{-1}$ ($1930\text{--}1940\text{ nm}$) $6900\text{--}6850\text{ cm}^{-1}$ ($1450\text{--}1460\text{ nm}$) และ $10260\text{--}10150\text{ cm}^{-1}$ ($975\text{--}985\text{ nm}$) (Siesler et al., 2002) มาสร้างสมการทำนายด้วยวิธี Multiple linear regression (MLR) พบว่า มีค่า R_c^2 เท่ากับ 0.94 และค่า RMSEC เท่ากับ 4.64%db ซึ่งมีค่าการทำนาย R_p^2 เท่ากับ 0.92 และค่า RMSEP เท่ากับ 5.04%db แสดงให้เห็นถึง

ความสำคัญของอิทธิพลของน้ำ แต่จะเห็นได้ว่าสมการทำนายที่สร้างจากช่วงเลขคลื่นทั้งหมด $12489\text{--}3594\text{ cm}^{-1}$ ($800\text{--}2700\text{ nm}$) ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุด

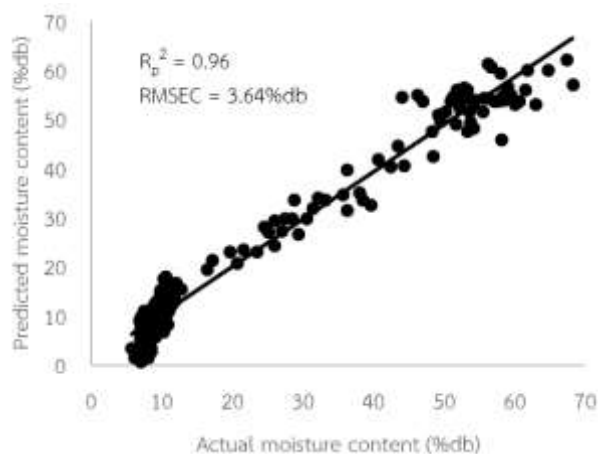


Figure 6 Plot of reference versus predicted values from calibration set of moisture content.

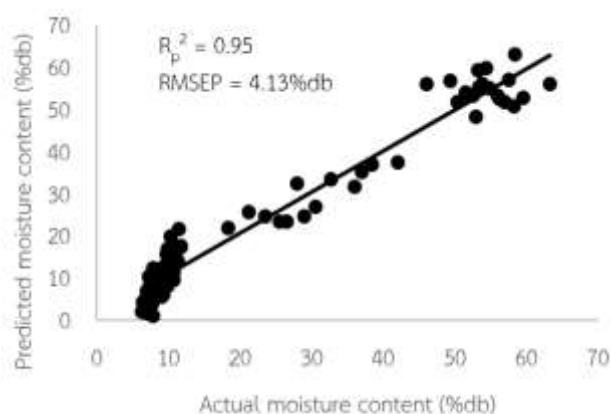


Figure 7 Plot of reference versus predicted values from prediction set of moisture content.

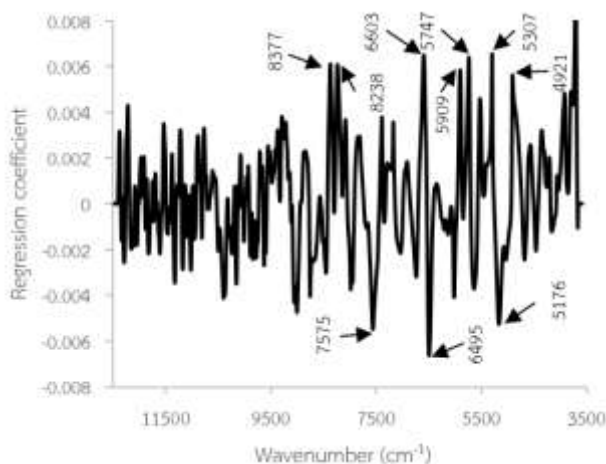


Figure 8 Regression coefficient plot of PLSR model based on second derivative of absorbance spectra.

อย่างไรก็ตามไม้ยางพาราแปรรูปที่โรงเลื่อยส่งออกนั้นเป็นไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง ดังนั้นจึงได้นำเฉพาะตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งมาสร้างสมการทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยมีการปรับแต่งค่าการดูกลืนด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Second derivative พบว่าให้ผลการสร้างสมการทำนายมีค่า R_c^2 เท่ากับ 0.89 และค่า RMSEC เท่ากับ 0.53%db ดัง Figure 9 ซึ่งมีค่าการทำนาย R_p^2 เท่ากับ 0.80 และค่า RMSEP เท่ากับ 0.70%db ดัง Figure 10

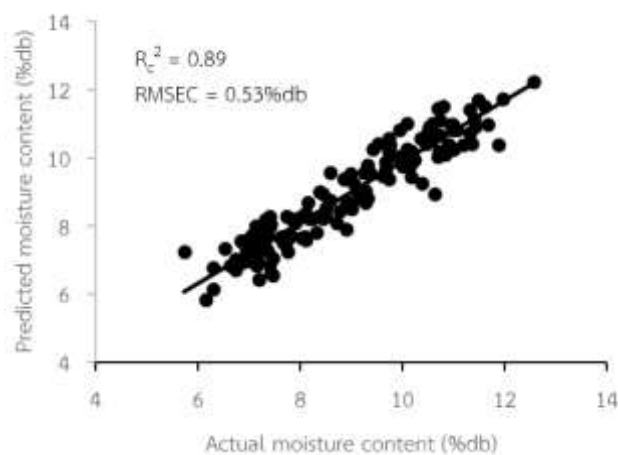


Figure 9 Plot of oven dried wood of reference versus predicted values from calibration set of moisture content.

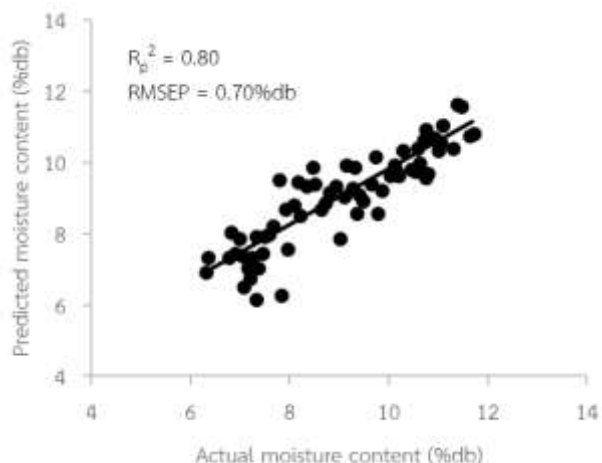


Figure 10 Plot of oven dried wood of reference versus predicted values from prediction set of moisture content.

4 สรุป

จากการวิจัยนี้พบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ มาใช้ทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในไม้ยางพาราแปรรูปสด ไม้ยางพาราแปรรูปสดที่ถูกลดความชื้นและไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง จากการวิเคราะห์ค่าการดูกลืนแสงในช่วงเลขคลื่นด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) โดยมีการปรับแต่งสเปกตรากการดูกลืนแสงด้วยวิธีทาง

คณิตศาสตร์แบบ Second derivative แล้วนำมาสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นให้ผลการทำนายดีที่สุด มีค่า R_p^2 เท่ากับ 0.95 มีค่า RMSEP เท่ากับ 4.13%db และมีค่า RPD เท่ากับ 4.55 ซึ่ง การใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีนั้นสามารถตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้อย่างรวดเร็ว และไม่ต้องทำลายตัวอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความชื้นแบบเข็มตอก ที่ต้องมีการทำลายตัวอย่างทำให้เกิดความเสียหาย และเครื่องวัดความชื้นแบบเข็มตอกนั้น หากใช้วัดความชื้นในตัวอย่างไม้แปรรูปสดนั้นมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีหาความชื้นแบบอบมาตรฐาน

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสนที่สนับสนุนทุนการศึกษา ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ RDG60T0121 และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณวิจัยในครั้งนี้ และศูนย์เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ Near Infrared Spectrophotometer ในการทำวิจัยครั้งนี้

6 เอกสารอ้างอิง

- Adedipe, O.E. Dawson-Andoh, D. 2008. Predicting moisture content of yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera* L.) veneer using near infrared spectroscopy. *Journal of Forest Product*, 58, 28-33.
- American Society for Testing and Materials. 2000. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. D 143-94.
- Chuayyok, S., 2014. Productivity and cost of Para rubber logging operations in Surat Thani province. MS dissertation Bangkok: The Graduate School, Kasetsart University. (In Thai)
- Defo, M., Taylor, A.M. Bond, B. 2007. Determination of moisture content and density of fresh-sawn red oak lumber by near infrared spectroscopy. *Journal of Forest Product*, 57, 68-72.
- Fujimoto, T., Kurata, Y., Matsumoto, K., Tsuchikawa, S. 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.
- Fujimoto, T., Kurata, Y., Matsumoto, K., Tsuchikawa, S. 2010. Feasibility of near-infrared spectroscopy for

- online multiple trait assessment of sawn lumber. Journal of Wood Science, 56, 452-459.
- Hodge, G.R., Woodbridge, G.R. 2010. Global near infrared models to predict lignin and cellulose content of pine wood. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 18, 367-380.
- Jarusombuti, S., Veenin, T., Peamaroon, A. 2009. Rubber wood product. Available at: http://kukrlib.ku.ac.th/db/BKN_FOR/search_detail/result/309097. Accessed on 20 January 2018. (In Thai)
- Meier, K.J., Brudney, J.L., Bohte, J. 2014. Applied Statistics for Public and Nonprofit Administration. (8th ed.). Boston, USA: Wadsworth.
- Mvondo, R.R.N., Meukam, P., Jeong, J., Meneses, D.D.S., Nkeng, E.G. 2017. Influence of water content on the mechanical and chemical properties of tropical wood species. Journal of Results in Physics, 7, 2096-2103.
- Osborne, B.G., Fearn, T., Hindle, P.H. 1993. Practical NIR spectroscopy with application in food and beverage analysis (2nd). Burnt Mill, Harlow: Longman Scientific and Technical.
- Phumichai, T., Riyaphan, J., Phumichai, C., Teerawatanasuk, K., Sungsing, K. 2012. Propoties of Para rubber for selection species. Para Rubber Eletronic Bulletin, 10, 34-44. (In Thai)
- Ramadevi, P., Meder, R., Varghese, M. 2010. Rapid estimation of kraft pulp yield and lignin in Eucalyptus camaldulensis and Leucaena leucocephala by diffuse reflectance near-infrared spectroscopy (NIRS). Journal of Southern Forests, 72, 107-111.
- Ratanawilai, T., Nuntadusi, C. 2012. Effect of heating sequence of microwave and hot-air techniques on rubberwood drying. Complete research report. Prince of Songkla University. (In Thai)
- Riyaphan, J. 2013. Chemical and mechanical properties of wood in seven Para rubber (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg) clones. MS dissertation Bangkok: The Graduate School, Kasetsart University. (In Thai)
- Rowell, R.M. 2005. Handbook of Wood Chemistry and wood Composites. New York: Taylor and Francis.
- Rubber Authority of Thailand. 2009. Studies on wood production lumber recovery quality and wood property of 4 recommended rubber clones. Available at: http://www.rubberthai.com/news/newsinfo/2552/news_June52/news_0502.htm. Accessed on 30 January 2018. (In Thai)
- Rubber Intelligence Unit. 2017. Export statistics of rubber wood products. Available at: <http://rubber.oie.go.th/ImExThaiByProduct.aspx?pt=ex&hgid=4>. Accessed on 1 Febuary 2018. (In Thai)
- Schwanninger, M., Rodrigues, J.C., Facker, K. 2011. A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. American Journal of Near Infrared Spectroscopy, 19, 287-308.
- Siesler, H.W., Ozaki, Y., Kawata, S., Heise, H.M. 2002. Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instrument, Applications. (1st). Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH.
- Sundaram, J., Mani, S., Kandala, C.V.K., Holser, R.A. 2015. Application of NIR reflectance spectroscopy on rapid determination of moisture content of wood pellets. Journal of Analytical Chemistry, 6, 923-932.
- Thai Industrial Standards Institute. 2009. Timber Hevea Wood. TISI. 2423-2552. (In Thai)
- The Revenue Department. 2013. Manual Suggestions for Paying Taxes Hevea Sawmill. Available at: <http://www.rd.go.th/publish/47243.0.html>. Accessed on 31 January 2018. (In Thai)
- Tsuchikawa, S. 2007. A review of recent near infrared research for wood and paper. Journal of Applied Spectroscopy Reviews, 42, 43-71.
- Watanabe, K., Mansfile, S.D., Avramidis, S. 2011. Application of near-infrared spectroscopy for moisture-based sorting of green hem-fir timber. Journal of Wood Science, 57: 288-294.
- Williams, P., Norris, K.H. 2001. Near-Infrared Technology: in the Agricultural and Food Industries. (2nd ed.). St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists.
- Williams, P. 2007. Grains and seeds. In: Ozaki, Y., McClure, W.F., Christy, A.A. (Eds), Near-Infrared Technology in food science and technology (pp. 165-217). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc