



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การทำนายค่าความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพาราแปรรูป เกรดคละด้วยเทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้

Prediction of moisture content, modulus of elasticity and specific gravity of mixed grade Para rubber timber using near-infrared hyperspectral imaging technique

ธัญพร โส๊ะอัน สิรินาถ น้อยพิทักษ์*

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

Thanyaphon Soaon Sirinad Noypitak*

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

* Corresponding author.

E-mail: fengsnn@ku.ac.th; Telephone: 0 85175 5727; Fax: 0 3435 1896

วันที่รับบทความ 21 สิงหาคม 2566; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 14 ตุลาคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ 1 พฤศจิกายน 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งเกรดคละและแสดงแผนภาพการทำนายด้วยการใช้เทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared hyperspectral imaging; NIR-HSI) ในช่วงความยาวคลื่น 900-1,700 nm รูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (Reflectance mode) โดยนำข้อมูลการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งมาสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Squares Regression; PLSR) ผลการวิจัยพบว่าการนำค่าการดูดกลืนแสงมาปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ให้ผลทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการทำนาย (R_p) สูงสุดเท่ากับ 0.95 0.74 และ 0.51 ตามลำดับ ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (RMSEP) เท่ากับ 0.72 %db 1.49 จิกะปาสคาล และ 0.03 ตามลำดับ นอกจากนี้เทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้สามารถแสดงภาพผลการทำนายในลักษณะการกระจายตัวของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งได้ชัดเจนทั่วพื้นที่ผิวหน้าตัดด้วยความรวดเร็ว และไม่ต้องทำลายตัวอย่าง อย่างไรก็ตามควรมีการพัฒนาสมการทำนายให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยการเพิ่มจำนวนตัวอย่างที่มีช่วงของข้อมูลที่กว้างขึ้นเพื่อครอบคลุมการทำนายตัวอย่างในอนาคต

คำสำคัญ

ไม้ยางพาราแปรรูป ไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ ความชื้น โมดูลัสยืดหยุ่น ความถ่วงจำเพาะ

Abstract

This research aims to study the prediction of percent moisture content (MC), modulus of elasticity (MOE) and specific gravity (SG) of dried mixed grade para rubber timber and demonstrate the prediction diagram by using near infrared hyperspectral imaging technique (NIR-HSI) in 900-1,700 nm range of reflectance mode. The absorbance data of para rubber timber were utilized to predict moisture percentage, modulus of elasticity and specific gravity by partial least squares regression (PLSR) method. The results revealed that the absorbance data which were pretreated using mathematical method obtained the highest correlation coefficients (R_p) of the MC, MOE, and SG prediction equation of

0.95, 0.74 and 0.51, respectively. The root mean square error of prediction (RMSEP) was 0.72 %db, 1.49 GPa and 0.03, respectively. In addition, the near-infrared hyperspectral imaging technique effectively illustrated the distribution of MC, MOE, and SG values of para rubber timber across the entire surface area in a non-destructive and quickly. However, it should focus on developing more accurate prediction equations by expanding the sample size and covering a broader range for future sample predictions.

Keywords

Para rubber timber; near infrared hyperspectral imaging; moisture content; modulus of elasticity; specific gravity

1. คำนำ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญต่อการพัฒนาประเทศอย่างมาก ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพารามากกว่า 25 ล้านไร่ ซึ่งถือว่ามากเป็นอันดับสองของโลก [1] มีมูลค่าส่งออกในปี 2564 อยู่ที่ 175,978 ล้านบาท [2] โดยทั่วไปถึงแม้เมื่อต้นยางพารามีอายุมากจะให้ผลผลิตน้ำยางลดลง แต่ลำต้นของยางพารายังคงมีมูลค่าสูง เนื่องจากสามารถไปแปรรูปเพื่อส่งออกได้อีกหลายด้าน เช่น ไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง เฟอร์นิเจอร์ ฝ้าภายนอก ของเล่นเด็ก ฯลฯ เนื่องจากมีสมบัติเฉพาะตัวที่มีลวดลายสวยงามเป็นเอกลักษณ์ และเนื้อไม้ยางพาราสีขาวนวลสวย [3]

ไม้ยางพาราที่แปรรูปแล้วสามารถส่งออกแบ่งได้เป็น 2 เกรด คือเกรด A และเกรด B ตามมาตรฐาน มอก. 2423-2552 [4] การจำแนกตามเกรดการปฏิบัติงานจริงของโรงเลื่อย แบ่งจำแนกเป็นเกรด AB เกรด C และเกรดพาเลท (P) โดยไม้เกรด A เป็นไม้ที่ตัดตำหนิออกแล้วได้ไม้เกลี้ยงไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของความยาวที่กำหนด เกรด B เมื่อตัดตำหนิออกแล้วจะได้ไม้เกลี้ยงไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ของความยาวที่กำหนด เกรด C เป็นไม้ที่มีตำหนิ มีตำหนิ มีรอยไส้อยู่ทั่วเนื้อไม้ แต่เมื่อตัดตำหนิออกแล้วได้ไม้เกลี้ยงยาวไม่น้อยกว่าร้อยละ 60 ของความยาวที่กำหนดนิยมส่งขายในประเทศ เกรด P มีลักษณะตำหนิ ไม้ลายตลอดแนวนิยมนำไปใช้ทำชั้นวางพาเลทและเกรด AB หัวดำ (ABB) เรียกตามเกรดที่จำแนกโดยโรงเลื่อยในภาคตะวันออก เพราะเป็นไม้ที่ถูกแช่น้ำ ทำให้เนื้อไม้ชื้นเป็นสีดำบางส่วน และก่อนส่งออกไม้ยางพาราแปรรูปจำเป็นต้องมีการลดความชื้นในไม้ให้ไม่เกิน 12 %dry basis ตามมาตรฐานการส่งออก [4] โดยในปัจจุบันโรงเลื่อยมีการสุ่มตัวอย่างตรวจสอบความชื้นระหว่างกระบวนการคัดแยกเกรดในไม้ยางพาราแปรรูปแต่ละแพ็ค โดยอุปกรณ์ที่โรงเลื่อยนิยมใช้ในการตรวจสอบหาความชื้น เช่น เครื่องมือวัดความชื้นแบบเข็มตอก ซึ่งทำให้

ไม่เกิดความเสียหาย เครื่องมือวัดความชื้นแบบดิจิตอล ซึ่งมีข้อจำกัดที่ต้องทราบค่าความถ่วงจำเพาะ [3]

นอกจากนั้น Tsuchikawa [5] ได้รายงานการประเมินคุณภาพไม้ชนิดต่าง ๆ ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared spectroscopy; NIRS) ทั้งในรูปแบบการวิจัย และใช้จริงในสายการผลิตอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ เช่น การวัดลักษณะทางกายภาพของเนื้อไม้ ปริมาณความชื้นความหนาแน่น ฯลฯ [6] แต่อย่างไรก็ตามเทคนิค NIRS ยังมีข้อจำกัดในลักษณะการวัดเป็นจุด ไม่สามารถวัดข้อมูลได้ตลอดแผ่นเนื้อไม้ ฉะนั้นเทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ จึงเป็นเทคนิคที่น่าสนใจ เพราะสามารถวัดข้อมูลได้ตลอดทั้งแผ่นเนื้อไม้ และยังสามารถวัดค่าองค์ประกอบ สมบัติการกระจายของเนื้อไม้ได้หลากหลาย ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องใช้ NIR-HSI ประเมินคุณภาพไม้ชนิดต่าง ๆ เช่น Ma et al. [7] ได้ศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำระหว่างการอบแห้งเนื้อไม้ต้นไซเปรสญี่ปุ่นโดยทำแผนภาพความชื้นด้วยวิธี PLSR พบว่ามีค่า $R^2 = 0.98$ ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายตัวเอง (RMSEC) = 8.81% Haddadi et al. [8] ทำนายค่าความหนาแน่น ค่าความถ่วงจำเพาะของกระดานไม้สน โดยสร้างโมเดลในการทำนายด้วยวิธี PLSR พบว่ามีความแม่นยำในการทำนายค่าความหนาแน่นเท่ากับ $R^2 = 0.81$, RMSEP = 39 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร RPD = 2.3 และมีความแม่นยำในการทำนายค่าความถ่วงจำเพาะ $R^2 = 0.53$, RMSEP = 0.007, RPD = 1.39 Sofianto et al. [9] ศึกษาผลกระทบจากตาไม้และรูบนตัวอย่างแผ่นไม้อัดต่อการจัดแบ่งเกรดคุณภาพตามความแข็งแรง เพื่อให้ทำนายและแสดงแผนภาพค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นไม้อัดด้วยวิธี PLSR พบว่ามีค่า $R^2 = 0.69$ ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายกลุ่มตัวอย่างแบบครอสวาเลชัน (RMSECV) = 0.88 จิกะปาสกาล Thumm et al. [10] ได้รายงานองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างไม้ตัดตามขวาง

เพื่อให้ได้เห็นภาพการกระจาย และการแปรผันของลิกนิน กาแลคโตส และกลูโคสในตัวอย่างไม้สนด้วยวิธี PLSR มีค่า R^2 เท่ากับ 0.84, 0.87 และ 0.87 ตามลำดับ และค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนาย (SEP) เท่ากับ 1.48, 0.68 และ 0.95 ตามลำดับ เห็นได้ว่าเทคนิค NIR-HSI มีศักยภาพในการทำนายทั้งค่าทางเคมีในเนื้อไม้ ค่าความหนาแน่น ค่าความถ่วงจำเพาะในเนื้อไม้ และค่าความแข็งแรงในเนื้อไม้

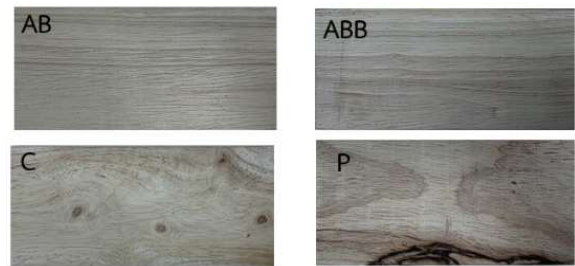
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพาราแปรรูปแบบไม่ทำลายตัวอย่างด้วยเทคนิคไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ และแสดงแผนภาพการกระจายตัวของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพาราแปรรูป ซึ่งในประเทศไทยยังไม่มีรายงานการวิจัยที่แสดงแผนภาพการทำนายสมบัติของไม้ยางพาราแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ซึ่งจะนำไปสู่แนวทางการพัฒนาสร้างระบบสายพานคัดแยกคุณภาพไม้ยางพาราแปรรูป เพื่อยกระดับมาตรฐานคุณภาพไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งให้น่าเชื่อถือต่อประเทศผู้ซื้อ ช่วยสร้างรายได้ให้กับประเทศไทยในอนาคต

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวอย่างไม้ยางพารา

การเตรียมตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง จำนวน 303 ตัวอย่าง ประกอบด้วยเกรด AB จำนวน 111 ตัวอย่าง เกรด ABB จำนวน 37 ตัวอย่าง เกรด C จำนวน 78 ตัวอย่าง และเกรด P จำนวน 77 ตัวอย่าง ตามการปฏิบัติงานจริงจาก 3 โรงเลื่อยในพื้นที่จังหวัดระยองดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งที่โรงเลื่อยได้ลดความชื้นให้มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่ำกว่า 12 % ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ไม้ยางพาราแปรรูป [4] แล้วเก็บรักษาไว้ในโกดังก่อนการส่งออก นำตัวอย่างมาตัดให้มีขนาด 2.54 ซม. × 2.54 ซม. × 40 ซม. 303 ตัวอย่าง สำหรับการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Moisture content; MC), ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity; MOE) และค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity; SG) ตัวอย่างทั้งหมดถูกขัดผิวหน้าให้เรียบเสมอทั้ง 4 ด้าน จากนั้นเก็บตัวอย่างไว้

อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค NIR-HSI และเก็บข้อมูลเพิ่มอีก 45 ตัวอย่าง จากไม้เกรด AB, C และ P เนื่องจากไม่มีตัวอย่างไม้เกรด ABB ในตอนที่ทำการเก็บข้อมูลเพิ่มเติม ซึ่งในจำนวนนี้มีข้อมูลผิดปกติจำนวน 2 ตัวอย่าง จึงได้ทำการตัดข้อมูลออก รวมเป็นตัวอย่างทั้งหมด 346 ตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างที่เก็บข้อมูลเพิ่มมีขนาด 2.54 ซม. × 2.54 ซม. × 7.62 ซม. พร้อมขัดผิวหน้าให้เรียบเสมอทั้ง 4 ด้าน สำหรับการหาเฉพาะค่าความชื้น เพื่อขยายช่วงความชื้นให้ครอบคลุมตั้งแต่ 0-5.87 %db โดยการนำไม้ยางพาราแปรรูปไปด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำมาวางทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องที่ 25 องศาเซลเซียส ทำการชั่งน้ำหนักทุก 1 ชั่วโมง เพื่อนำไปหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เพิ่มขึ้นทีละ 5 ตัวอย่าง ก่อนทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค NIR-HSI

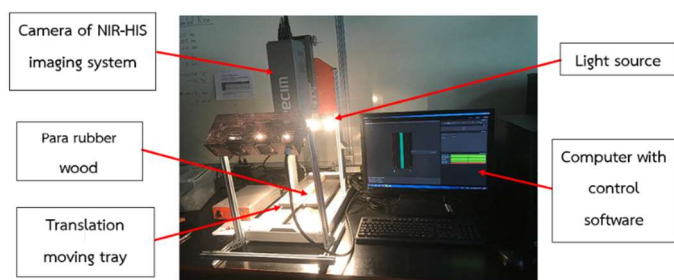


รูปที่ 1 เกรดของไม้ยางพารา

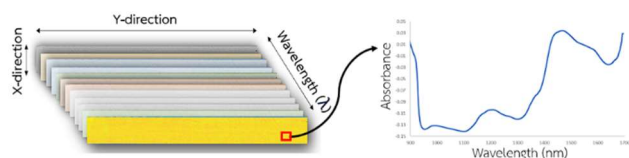
2.2 การวัดภาพไฮเปอร์สเปกตรัม

ตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปทั้งหมดสแกนด้วยเครื่องถ่ายภาพไฮเปอร์สเปกตรัม (Hyperspectral imaging; HSI) (N17E, SPECIM Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) มีช่วงความยาวคลื่น 900-1,700 นาโนเมตร (nm) ความละเอียด 3.51 nm พร้อมด้วยชุดหลอดไฟทั้งสแตนด์บายและสแตนด์บาย (DECOSTAR, Carrollton, GA, US.) จำนวน 3 หลอด ด้านหัวของไม้ และอีก 3 หลอด ด้านท้ายของไม้ เพื่อเพิ่มความเข้มของแสง ความสูงระหว่างกล้องถ่ายภาพซีซีดี (Charged-coupled Device; CCD, Xeva 992, Xenics Infrared Solution Ltd., Oulu, Finland) กับตัวอย่างเท่ากับ 20 ซม. ด้วยรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (Reflectance mode)

ตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปถูกวางอยู่บนถาดเลื่อนด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ 9 มิลลิเมตรต่อวินาที และเคลื่อนที่ผ่านกล้องถ่ายภาพดังแสดงในรูปที่ 2 ข้อมูลความยาวคลื่น (Wavelength) และข้อมูลตำแหน่ง (Spatial) ถูกรวบรวมและบันทึกด้วยโปรแกรมลูมิ ซอฟต์แวร์ สวิต (LUMO Software Suite, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) อยู่ในรูปแบบของข้อมูล 3 มิติ หรือเรียกอีกอย่างว่า ไฮเปอร์คิวบ์ (Hypercube) [11] โดยข้อมูลของตำแหน่งจะอยู่ในรูปของแกน x ขนาด 320 พิกเซล และแกน y ตามความยาวของวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านกล้องถ่ายภาพ โดยในแต่ละพิกเซลจะมีข้อมูลสเปกตรัมบรรจุอยู่ 1 เส้น มีจำนวนการเก็บข้อมูลการสะท้อนแสง 256 ค่า ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 ระบบถ่ายภาพไฮเปอร์สเปกตรัม (NIR-HSI)



รูปที่ 3 ข้อมูลไฮเปอร์คิวบ์และสเปกตรัมที่ได้รับในแต่ละพิกเซล

2.3 การทดสอบหาค่าเชิงกลของไม้ยางพาราแปรรูป

นำแต่ละตัวอย่างไปหาค่าความแข็ง ได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity; MOE) ด้วยการทดสอบหาค่าแรงที่ขีดปฏิกิริยา (นิวตัน) และระยะโก่งตัวที่ตำแหน่งปฏิกิริยา (มม.) ด้วยเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ (Universal testing machine; UTM, 5596, Instron Engineering Co, High Wycombe, England) ซึ่งนำตัวอย่างมาวางบนแท่นกดที่มีระยะห่างของแท่นรองรับ (Span) 37 ซม. โดยใช้หัวกดที่มีลักษณะมน ที่ความเร็วในการกดคงที่ 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที ตามมาตรฐานของสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน

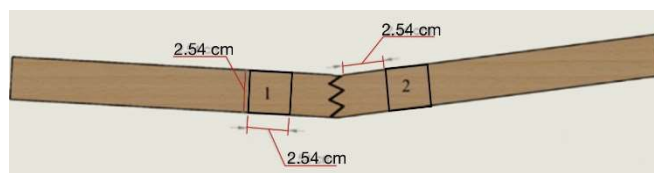
(American Society for Testing and Materials; ASTM) D143 [12] ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวไม้ตามแนวตั้งฉากกับเส้นไม้ดังรูปที่ 4 ถูกบันทึกและคำนวณค่า MOE ด้วยโปรแกรมทดสอบวัสดุบลูฮิลล์ ยูนิเวอร์แซล (Bluehill Universal, Instron Engineering Co, High Wycombe, England) ดังสมการที่ (1)

$$MOE = \frac{P_{pl}L^3}{4\Delta_{pl}bd^3} \quad (1)$$

โดยที่ MOE คือโมดูลัสยืดหยุ่น (นิวตันต่อตารางเมตร) P_{pl} คือค่าแรงที่ขีดปฏิกิริยา (นิวตัน) Δ_{pl} คือระยะโก่งตัวที่ตำแหน่งปฏิกิริยา (มม.) b คือความกว้างของตัวอย่างไม้ (มม.) d คือความหนาของตัวอย่างไม้ (มม.) และ L คือความยาวของตัวอย่างไม้ระหว่างแท่นรองรับ (มม.)

2.4 การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูป ด้วยวิธีการอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D143

นำตัวอย่างจากการทดสอบหาค่าเชิงกลมาตัดจำนวน 2 ชิ้นต่อ 1 ตัวอย่าง ที่ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4 ขนาด 2.54 ซม. × 2.54 ซม. × 2.54 ซม. แล้วนำไปหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Moisture content; MC) ฐานแห้ง (Dry basis; %db) ด้วยการอบแบบตู้อบลมร้อนตามวิธีมาตรฐาน ASTM D143 [12] ที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่



รูปที่ 4 ตำแหน่งของไม้ยางพาราที่นำมาหาค่าความชื้น

2.5 การหาค่าความถ่วงจำเพาะ

การหาความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity; SG) แบบวิธีการแทนที่น้ำตามวิธีมาตรฐาน TAPPI [13] โดยการนำตัวอย่างไม้ยางพาราตำแหน่งที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4 ที่ผ่านการ

อบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะทำให้ได้น้ำหนักมวลแห้ง แล้วมาชั่งน้ำหนักหลังอบทันที (W) จากนั้นนำแท่งโลหะเสียบตัวอย่างไม้ยางพารา กดตัวอย่างให้จมปริมน้ำพอดีในภาชนะที่ใส่น้ำ แล้วชั่งน้ำหนักน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยตัวอย่าง (W_w) แล้วนำค่าที่ได้คำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะ จากอัตราส่วนของน้ำหนักตัวอย่าง (W) ต่อน้ำหนักน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยตัวอย่าง (W_w) ดังสมการที่ (2)

$$SG_{wood} = \frac{W}{W_w} \quad (2)$$

2.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะมาวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละเกรดไม้ของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA) ด้วยโปรแกรมเอสพีเอสเอส (SPSS version 28, IBM; Armonk, NY, USA)

2.7 การวิเคราะห์สร้างสมการทำนาย

2.7.1 ตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูลค่าอ้างอิง

โดยนำข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะ ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงมาตรวจสอบข้อมูลที่ผิดปกติ (Outlier) โดยพิจารณาจากค่ามาตรฐาน (Standard score; Z) ดังสมการที่ (3) ถ้าหากค่า Z ของตัวอย่างใดมีค่ามากกว่า 3 หรือน้อยกว่า -3 ถือว่าตัวอย่างนั้นเป็นข้อมูลที่ผิดปกติ [14] ก่อนที่จะมีการสร้างสมการสอบเทียบมาตรฐาน (Calibration model)

$$Z = \frac{X_i - \bar{X}}{SD} \quad (3)$$

โดยที่ Z คือค่ามาตรฐาน (Standard score) X_i คือค่าข้อมูลของตัวอย่าง $\bar{X}$ คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลตัวอย่างทั้งหมด และ SD คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลตัวอย่างทั้งหมด

2.7.2 ตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูลสเปกตรัม

นำข้อมูลสเปกตรัมมาตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูลโดยตรวจดูความผิดปกติของเส้นสเปกตรัมด้วยสายตา ก่อนและตรวจดูด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis; PCA) ด้วยโปรแกรมเดอะอันสแครมเบลอร์ (The Unscrambler version 9.8, Camo, Oslo, Norway) ถึงข้อมูลสเปกตรัมที่ผิดปกติจากกลุ่มข้อมูลทั้งหมด

2.7.3 การวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างสมการทำนาย

ข้อมูลไฮเปอร์คิวถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมอีวินซ์ (Evince, Prediktera, Umeå, SWEDEN) เริ่มจากการตัดข้อมูลเฉพาะส่วนที่เป็นเนื้อไม้ยางพาราในตำแหน่งที่สนใจ (Region of interest) และตัดส่วนพื้นหลัง (Background) ออก แล้วทำการเฉลี่ยข้อมูลสเปกตรัมจากทุกพิกเซลในตำแหน่งที่สนใจมาเฉลี่ยเป็นเส้นสเปกตรัม ซึ่งเป็นตัวแทนของตัวอย่างนั้น ๆ นำข้อมูลทั้งหมดมาสร้างสมการทำนาย MC, MOE และ SG ด้วยเทคนิค PLSR โดยใช้โปรแกรม The Unscrambler version 9.8 (Camo, Oslo, Norway) ข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มด้วยอัตราส่วน 2:1 คือกลุ่มสำหรับสร้างสมการสอบเทียบ (Calibration set) และกลุ่มสำหรับทดสอบสมการ (Prediction set) โดยค่าอ้างอิงน้อยที่สุดและมากที่สุดถูกจัดอยู่ในกลุ่มสำหรับสร้างสมการสอบเทียบ ทำการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมของการดูกลืนค่าแสงที่ได้ เพื่อลดผลของการกระเจิงแสงใน สเปกตรัมด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น วิธีการปรับเรียบ (Smoothing; SM) แบบซาวิตซ์กีโกเลย์ (Savitzky golay) จำนวน 3-13 จุด, วิธีการแปลงค่าเป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First derivative; 1D) แบบซาวิตซ์กีโกเลย์ (Savitzky golay) จำนวน 3-17 จุด, วิธีการแปลงค่าเป็นอนุพันธ์อันดับสอง (Second derivative; 2D) แบบซาวิตซ์กีโกเลย์ (Savitzky golay) จำนวน 3-17 จุด, วิธีการปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (Multiplicative scatter correction; MSC) และ วิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard normal variate; SNV) แล้วนำไปสร้างสมการสอบเทียบด้วยเทคนิค PLSR แล้วพิจารณาสมการการทำนายที่ดีที่สุดจากค่าทางสถิติ คือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการสอบเทียบ (R_c) ที่มีค่าสูง ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายตัวเอง (RMSEC) ที่มีค่าต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการทำนาย (R_p) ที่มีค่าสูง ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (RMSEP) ที่มีค่าต่ำ และค่า

การประเมินผลความสามารถของสมการเทียบมาตรฐาน (Ratio of standard error of performance to standard derivation; RPD) ที่มีค่าสูง ซึ่งค่า RPD มาจากอัตราส่วนระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของกลุ่มการทำนายต่อค่าผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบสมการ (SEP) [15]

2.8 สร้างแผนภาพการทำนายค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบไม้ยางพาราแปรรูป

เริ่มจากหาตำแหน่งความยาวคลื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงสุด ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความยาวคลื่นกับค่าอ้างอิงแล้วแสดงสมการถดถอยอย่างง่าย (Simple linear regression) นำค่าความชันของสมการถดถอยที่ได้นั้นมาคูณกับข้อมูลในแต่ละพิกเซลของความยาวคลื่นที่ถูกเลือกไว้บวกด้วยค่าจุดตัดแกนตั้ง (Intercept) ทำให้ได้ค่าการทำนายในแต่ละพิกเซลของภาพ แสดงข้อมูลของการกระจายตัวของค่าที่ทำนายได้เป็นค่าระดับสีน้ำเงินถึงสีแดงเพื่อใช้แสดงแผนภาพ MC หรือแผนภาพ MOE หรือแผนภาพ SG ของชิ้นไม้ชิ้นๆ โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB R2021b, MathWork; Co.; US.) ในการประมวลผล

3. ผลและวิจารณ์

จากการตรวจสอบความผิดปกติ (Outliers) ของค่า สเปกตรการดูดกลืนแสงด้วยสายตา ก่อน และตรวจดูด้วยวิธี PCA ด้วยโปรแกรม The Unscrambler version 9.8 (Camo, Oslo, Norway) ถึงข้อมูลสเปกตรที่ผิดปกติจากกลุ่มข้อมูลทั้งหมด ซึ่งไม่พบข้อมูลที่ผิดปกติ

3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง

ผลทางสถิติของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (MC) ไม้ยางพาราแปรรูป จากวิธีอบแห้งตามมาตรฐาน [12] แสดงดังตารางที่ 1 พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของเกรด ABB สูงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับเกรด AB, C และ P ของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง ส่วนเกรด AB กับ C และเกรด AB กับ P ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง

หลังจากโรงเลื่อยได้ทำการอบแห้ง เพื่อลดความชื้นให้มีค่าต่ำกว่า 12 %db แล้วจะถูกนำมาเก็บรักษาไว้ในโกดัง ซึ่งบริเวณที่เก็บรักษานั้นมีอากาศสามารถไหลเวียนได้ ทำให้ความชื้นของตัวอย่างไม้ยางพาราอบแห้งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาตามสภาพความชื้นในอากาศ [16] ซึ่งเกรด AB อาจถูกเก็บรักษาก่อนจำหน่ายไว้เป็นเวลานานกว่าเกรดอื่น ๆ จึงทำให้มีช่วงความชื้นอยู่ ระหว่าง 6.94-11.24 %db ส่วนเกรด AB มีค่าความชื้นอยู่ ในช่วง 0.31-12.47 %db เห็นได้ว่าค่าความชื้นสูงสุดของเกรด AB ที่เก็บรักษาไว้ในโกดังเกินกว่ามาตรฐานการส่งออก (< 12 %db) จำเป็นต้องตรวจสอบ และลดความชื้นอีกครั้ง

ผลของค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (MOE) เฉลี่ยของไม้ยางพาราแปรรูป พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของเกรด AB, ABB, C และ P มีค่าสูงและลดลงตามลำดับเกรดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 1 เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปในเกรด AB นั้นมีเนื้อสวຍคุณภาพดี แทบไม่มีตำหนิ ตาไม้ รอยแตกร้าว ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของไม้ยางพาราแปรรูปในเกรด AB นั้นมีค่าสูงมากกว่าเกรด ABB ที่ถูกทิ้งแช่น้ำมาก่อนอาจจะทำให้มีคุณภาพ และความแข็งแรงต่ำกว่าเกรด AB ส่วนเกรด C ที่มีตำหนิ ตาไม้ รอยแตกร้าวอยู่บ้างพอสมควร แต่ในเกรดไม้ยางพาราแปรรูปเกรด P นั้นมีตำหนิ ตาไม้ รอยแตกร้าวที่มาก จึงส่งผลให้ตัวอย่างที่มีรอยแตกร้าวมากสามารถทนทานต่อแรงที่กระทำได้น้อย จึงส่งผลให้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อยตาม [17]

ผลของค่าความถ่วงจำเพาะ (SG) เฉลี่ยของไม้ยางพาราแปรรูป อบแห้งนั้น เกรด AB ค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับเกรด C และ P ของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง ส่วนเกรด AB กับ ABB, เกรด ABB กับ C และเกรด C กับ P ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากการหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลแห้ง ทำให้ผลที่ได้มานั้นแตกต่างกันน้อยซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.56-0.81 (ตารางที่ 1) แต่เห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกับ 0.648 ตามที่ Hossain et al. [18] ได้มีการรายงานไว้

ข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพาราแปรรูปถูกแบ่ง 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสำหรับสร้างสมการสอบเทียบ และกลุ่มสำหรับทดสอบ

สมการ โดยได้แสดงค่าต่ำสุด สูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังตารางที่ 2 ซึ่งในกลุ่มสำหรับสร้างสมการสอบเทียบ ได้มีการจัดข้อมูลตัวอย่างที่มีค่าต่ำสุด และสูงสุดที่ครอบคลุมเกรดไม้ และความชื้นในไม้แห้ง

ตารางที่ 1 ค่าสถิติของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (MC) โมดูลัสความยืดหยุ่น (MOE) และความถ่วงจำเพาะ (SG) ของไม้ยางพาราแปรรูป

Parameter	Grades	No.	Min	Max	Mean±SD
MC (%db)	AB	126	0.31	12.47	6.67±2.29 ^{b,c}
	ABB	37	6.94	11.24	8.40±0.69 ^a
	C	93	0.28	11.35	6.05±2.35 ^c
	P	90	0.34	10.17	6.85±2.41 ^b
	Total	346	0.28	12.47	6.74±2.31
MOE (จิกะปาสคาล)	AB	111	5.40	15.27	11.10±1.65 ^a
	ABB	37	5.26	12.34	9.75±1.30 ^b
	C	78	3.10	13.69	10.07±2.05 ^b
	P	77	1.90	11.71	8.99±2.30 ^c
	Total	303	1.90	15.27	9.75±2.07
SG	AB	111	0.59	0.81	0.69±0.04 ^a
	ABB	37	0.64	0.73	0.69±0.02 ^{a,b}
	C	78	0.56	0.76	0.67±0.04 ^{b,c}
	P	77	0.57	0.78	0.68±0.04 ^c
	Total	303	0.56	0.81	0.68±0.04

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

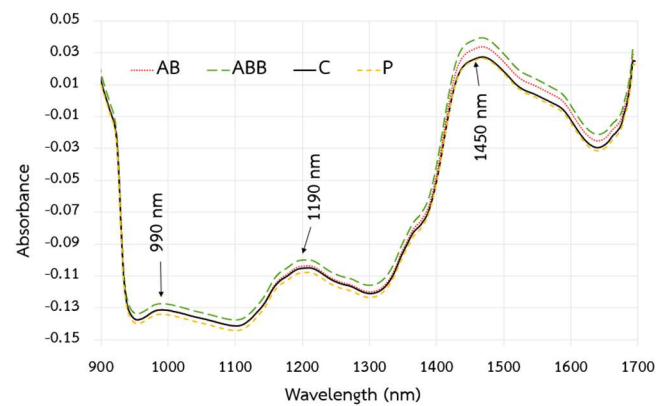
ตารางที่ 2 ค่าสถิติของไม้ยางพาราแปรรูปในกลุ่ม Calibration และกลุ่ม Prediction

Parameter	Set	No.	Min	Max	Mean	SD
MC (%db)	Cal	231	0.28	12.47	6.74	2.31
	Pred	115	0.31	11.35	6.79	2.28
MOE (จิกะปาสคาล)	Cal	202	1.90	15.27	10.11	2.09
	Pred	101	3.10	14.99	10.18	2.04
SG	Cal	202	0.56	0.81	0.68	0.04
	Pred	101	0.57	0.78	0.68	0.04

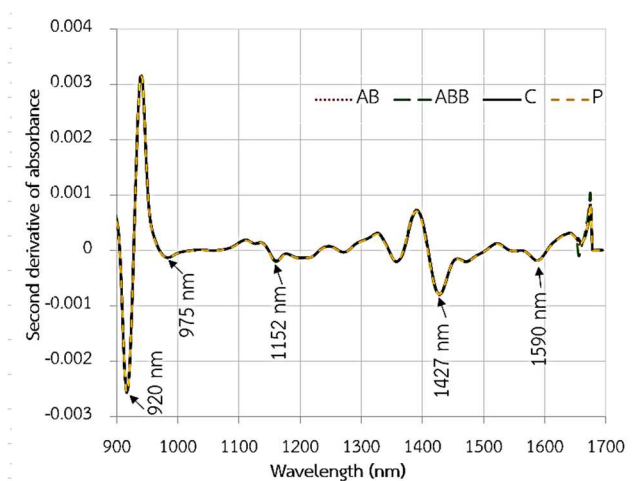
Cal: Calibration set, Pred: Prediction set, SD: Standard deviation.

3.2 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูป

สเปกตรากการดูดกลืนแสงของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งด้วยเครื่อง Hyperspectra imaging แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูปเกรด ABB มีค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่าเกรด AB, C และ P ตามลำดับ เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงมาปรับแต่งด้วยวิธี Second derivative ทำให้เกิดพีคเด่นแสดงดังรูปที่ 6 พบตำแหน่งพีคการดูดกลืนแสงที่เด่นชัดที่ตำแหน่งของพันธะ O-H ของพิกนน้ำที่ความยาวคลื่น 975 nm [19], 1,152 nm [20], 1,427 nm [21] และ 1,450 nm [22] นอกจากนั้นเป็นการสั่นของพันธะ O-H และ C-H ของแป้ง (Starch) ที่ความยาวคลื่น 990 nm [23] และเป็นการสั่นของพันธะ C-H ของ Cellulose ที่ความยาวคลื่น 1,590 nm [21]



รูปที่ 5 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของไม้ยางพาราในเกรด AB, ABB, C และ P



รูปที่ 6 สเปกตรากการดูดกลืนแสงเฉลี่ยของไม้ยางพาราในเกรด AB, ABB, C และ P ที่ปรับแต่งด้วยวิธี Second derivative.

3.3 ผลการสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพาราแปรรูป

การสร้างสมการทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้น ซึ่งนำข้อมูลสเปกตราในช่วงความยาวคลื่น 900-1,700 nm ไม้ยางพาราทั้งหมดทุกเกรตถูกนำมาปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ พบว่าการปรับแต่งด้วยวิธี SM จำนวน 7 จุดร่วมกับวิธี SNV ดังตารางที่ 3 ให้ผลการสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสมการทำนายมีค่า R_c เท่ากับ 0.95 และค่า RMSEC เท่ากับ 0.75 %db และมีค่าผลการทดสอบการทำนายที่ดีที่สุดมีค่า R_p เท่ากับ 0.95 ซึ่งแสดงว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ และประกันคุณภาพได้ [15] มีค่า RMSEP เท่ากับ 0.72 %db ดังรูปที่ 7 (A) และรูปที่ 7 (B)

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ในรูปที่ 7 (C) สเปกตราที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี SM จำนวน 7 จุดร่วมกับวิธี SNV พบว่าความยาวคลื่นที่ 942 nm [24], 961 nm [23], 1,152 nm [20] และ 1,450 nm [22] เป็นการสั่นของพันธะ O-H ของน้ำที่ส่งผลต่อค่าการทำนาย ซึ่งเกี่ยวข้องกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่อยู่ในไม้ยางพาราแปรรูป ความยาวคลื่นที่ 1,366 nm เป็นการสั่นของพันธะ C-H ของเซลลูโลส ความยาวคลื่นที่ 1,672 nm เป็นการสั่นของพันธะ C-H first overtone ของลิกนิน [21] ในส่วนของพิกที่มีสัมประสิทธิ์การถดถอยที่สูงความยาวคลื่นที่ 1,225 nm, 1,323 nm และ 1,401 nm อาจเกิดจากองค์ประกอบอื่นที่อยู่ภายในเนื้อไม้ยางพาราแปรรูป

การสร้างสมการทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ซึ่งนำข้อมูลสเปกตราไม้ยางพาราทั้งหมดทุกเกรตมาปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี SM จำนวน 7 จุดร่วมกับวิธี 1D จำนวน 17 จุด ดังตารางที่ 3 ให้ผลการสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสมการทำนายมีค่า R_c เท่ากับ 0.76 และค่า RMSEC เท่ากับ 1.37 จิกะปาสคาล และมีค่าผลการทำนายที่ดีที่สุดมีค่า R_p เท่ากับ 0.74 มีค่า RMSEP เท่ากับ 1.49 จิกะปาสคาล ดังรูปที่ 8 (A) และรูปที่ 8 (B) ซึ่งยังให้ผลการทำนายไม่สูงนัก เนื่องจากเป็นการทำนายค่าทางอ้อมที่ความแข็งแรงของไม้ยางพารา ซึ่งมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินอยู่ [25]

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ใน Figure 8 (C) ที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี SM จำนวน 7 จุดร่วมกับวิธี 1D จำนวน 17 จุด พบว่าความยาวคลื่นที่ 1,364 nm [19], 1,490 nm [23] และ 1,550 nm [21] เป็นการสั่นของพันธะ O-H ที่เกี่ยวข้องกับเซลลูโลส ความยาวคลื่นที่ 975 nm [19] เป็นการสั่นของพันธะ O-H ที่เกี่ยวข้องกับน้ำ ความยาวคลื่นที่ 990 [23] เป็นการสั่นของพันธะ C-H ของแป้ง ความยาวคลื่นที่ 1,520 nm [21] เป็นการสั่นของพันธะ N-H ของโปรตีน ในส่วนของพิกที่มีสัมประสิทธิ์การถดถอยที่สูงความยาวคลื่นที่ 1,108 nm, 1,245 nm, 1,295 nm และ 1,633 nm อาจเกิดจากองค์ประกอบอื่นที่อยู่ภายในเนื้อไม้ยางพาราแปรรูป

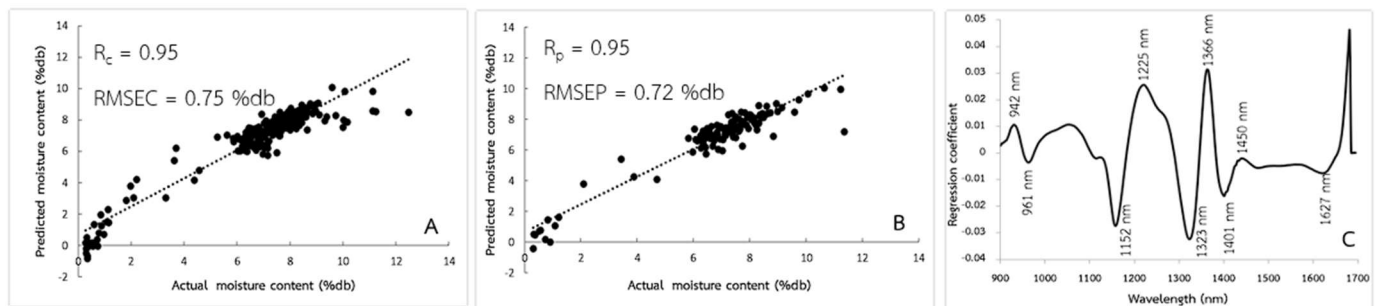
การสร้างสมการทำนายค่าความถ่วงจำเพาะ ซึ่งนำข้อมูลสเปกตราไม้ยางพาราทั้งหมดทุกเกรตมาปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี SM จำนวน 7 จุด ดังตารางที่ 3 ให้ผลการสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสมการทำนายมีค่า R_c เท่ากับ 0.62 และค่า RMSEC เท่ากับ 0.03 และมีค่าผลการทำนายค่า R_p เท่ากับ 0.51 มีค่า RMSEP เท่ากับ 0.03 ดังรูปที่ 9 (A) และรูปที่ 9 (B) ซึ่งมีค่าไม่สูงนักเนื่องจากอิทธิพลของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างขณะวัดสเปกตรา แต่เมื่อนำตัวอย่างมาหาค่าอ้างอิงใช้ตัวอย่างที่ลดความชื้นแล้ว ซึ่งหากต้องการให้สมการแม่นยำมากขึ้นอาจทำได้โดยการนำตัวอย่างที่ลดความชื้นแล้วมาวัดสเปกตราควบคู่กับการหาค่าอ้างอิงจากตัวอย่างที่ลดความชื้นแล้ว

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ในรูปที่ 9 (C) ที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี SM จำนวน 7 จุด พบว่าความยาวคลื่นที่ 1,368 nm และ 1,550 nm เป็นการสั่นของพันธะ O-H ที่เกี่ยวข้องกับเซลลูโลส [21] ความยาวคลื่นที่ 942 nm [24] และ 961 nm [23] เป็นการสั่นของพันธะ O-H ที่เกี่ยวข้องกับน้ำ ความยาวคลื่นที่ 1,512 nm [23] เป็นการสั่นของพันธะ N-H ของโปรตีน ในส่วนของพิกที่มีสัมประสิทธิ์การถดถอยที่สูงความยาวคลื่นที่ 1,142 nm, 1,295 nm, 1,470 nm และ 1,636 nm อาจเกิดจากองค์ประกอบอื่นที่อยู่ภายในเนื้อไม้ยางพาราแปรรูป

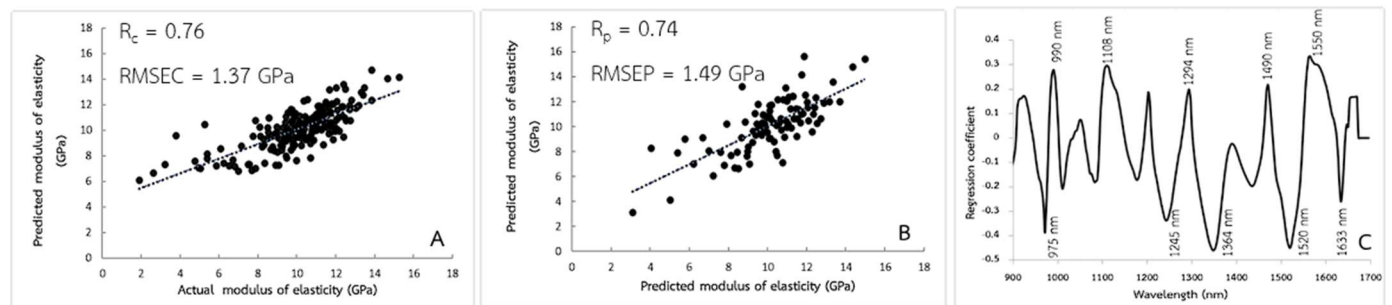
ตารางที่ 3 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (MC) ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (MOE) และค่าความถ่วงจำเพาะ (SG) ของไม้ยางพาราแปรรูปในกลุ่ม Calibration และกลุ่ม Prediction ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี PLSR

Parameter	Pretreatment	LV	Calibration		Prediction		RPD
			R_c	RMSEC	R_p	RMSEP	
MC (%db)	SM(7)+SNV	4	0.95	0.75	0.95	0.72	2.72
MOE (จิกะปาสคาล)	SM(13)+1D(17)	13	0.76	1.37	0.74	1.49	1.31
SG	SM(7)	12	0.62	0.03	0.51	0.03	1.14

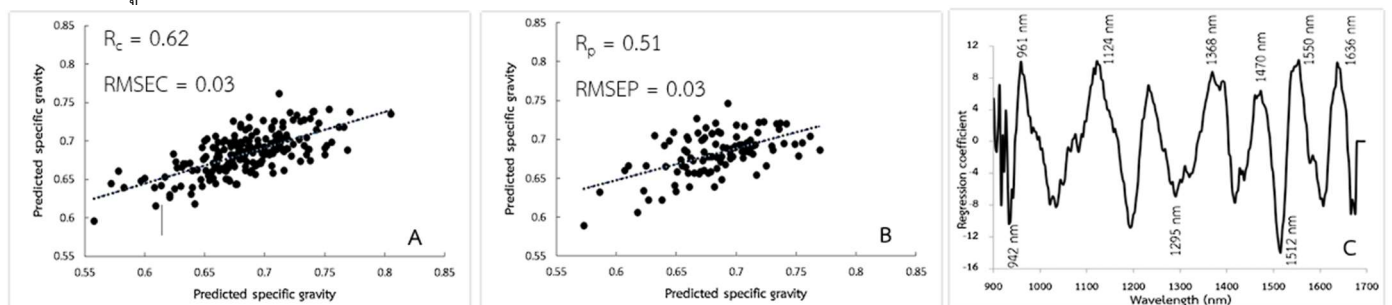
LV: latent variables, SM(i): Savitzky golay smoothing with i smoothing points, SNV: standard normal variate, 1D(i): Savitzky golay first derivative with i smoothing points, i: number of smoothing points.



รูปที่ 7 กราฟผลการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในกลุ่ม Calibration (A), กลุ่ม Prediction (B) และ Regression coefficient การทำนายที่ดีที่สุดของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยวิธี PLSR



รูปที่ 8 กราฟผลการทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในกลุ่ม Calibration (A), กลุ่ม Prediction (B) และ Regression coefficient การทำนายที่ดีที่สุดของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยวิธี PLSR



รูปที่ 9 กราฟผลการทำนายค่าความถ่วงจำเพาะในกลุ่ม Calibration (A), กลุ่ม Prediction (B) และ Regression coefficient การทำนายที่ดีที่สุดของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยวิธี PLSR

3.4 ผลการสร้างแผนภาพการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพารา

แผนภาพการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 968.42 nm ซึ่งเป็นตำแหน่งการดูดกลืนแสงของน้ำ [23] แสดงดังรูปที่ 10 (A) สามารถเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นจากระดับความชื้นสีน้ำเงินแสดงค่าต่ำสุด 0 %db ถึงระดับสีแดงแสดงค่าสูงสุด 13 %db ซึ่งทำให้เห็นถึงการกระจายตัวของความชื้นตลอดทั่วผิวหน้าของตัวอย่างตามที่ Awais et al. [26] ได้รายงานการสร้างแผนภาพทำนายการกระจายความชื้นบนผิวไม้ไว้ว่าบริเวณเนื้อไม้มีความชื้นต่ำ 0.92 %db มีสีค่อนข้างสีน้ำเงินและเนื้อไม้ที่มีความชื้นสูง 12.47 %db มีสีค่อนข้างสีแดง

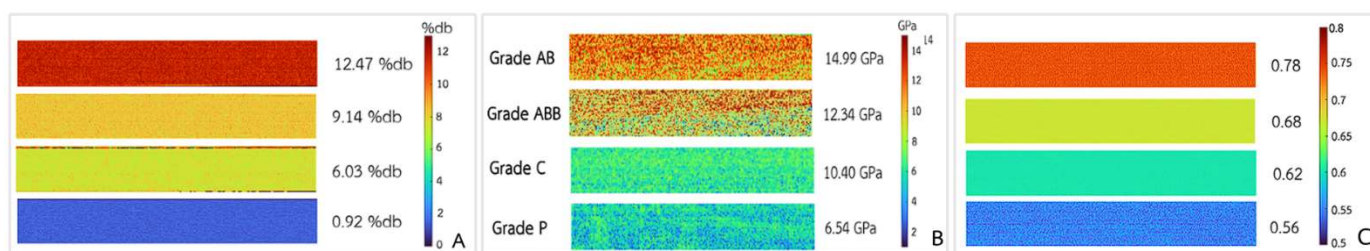
แผนภาพการทำนายค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของไม้ยางพาราแปรรูป ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 1,420.8 nm ซึ่งเป็นตำแหน่งการดูดกลืนแสงของเซลลูโลส [21] แสดงดังรูปที่ 10 (B) สามารถเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงจากระดับความชื้นสีน้ำเงินแสดงค่าต่ำสุด 0 จิกะปาสคาล ถึงระดับสีแดงแสดงค่าสูงสุด 15 จิกะปาสคาล ซึ่งทำให้เห็นถึงการกระจายตัวของความแข็งแรงตลอดทั่วผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างไม้ทั้ง 4 ขึ้นดังรูปที่ 10 (B) ประกอบด้วยเกรด AB, ABB, C และ P ตามลำดับมีค่า MOE จากการทดสอบจริง คือ 14.99 จิกะปาสคาล, 12.34 จิกะปาสคาล, 10.40 จิกะปาสคาล และ 6.54 จิกะปาสคาล ตามลำดับ ทำให้แสดงสีค่อนข้างแดงส้ม (เกรด AB) สีส้มเหลืองแดงฟ้า (เกรด ABB) สีเขียวเหลือง (เกรด C) และสีค่อนข้างฟ้าสีน้ำเงิน (เกรด P) ทำให้ง่ายต่อการคัดคุณภาพความแข็งแรงของไม้ยางพาราเช่นเดียวกับ Sofianto et al. [9] แสดงแผนภาพค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นไม้อัด

แผนภาพการทำนายค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพาราแปรรูป ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น 978.17 nm ซึ่งเป็นตำแหน่งการดูดกลืนแสงของน้ำ [19] และเป็นตำแหน่งที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงสุด ระหว่างความสัมพันธ์ของ

ค่าการดูดกลืนแสงที่ 978.17 nm และค่าความถ่วงจำเพาะแสดงดังรูปที่ 10 (C) สามารถเปรียบเทียบค่าความถ่วงจำเพาะจากระดับความชื้นสีน้ำเงินแสดงค่าต่ำสุด 0 ถึงระดับสีแดงแสดงค่าสูงสุด 0.8 ซึ่งทำให้เห็นถึงการกระจายตัวตลอดทั่วผิวหน้าของตัวอย่างเช่นเดียวกับ Haddadi et al. [8] แสดงแผนภาพค่าความถ่วงจำเพาะพื้นฐานช่วง 0-0.55

4. สรุปผลการศึกษา

จากการวิจัยนี้พบว่าข้อมูลไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared hyperspectral imaging; NIR-HSI) สามารถนำมาใช้สร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (MC) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (MOE) และค่าความถ่วงจำเพาะ (SG) ในไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งทุกเกรด จากการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงทั้งช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Squares Regression; PLSR) และเทคนิค NIR-HSI ยังสามารถแสดงผลการทำนายในลักษณะการกระจายตัวของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งได้ทั่วพื้นที่ผิวหน้าตัดได้อย่างรวดเร็ว และไม่ต้องทำลายตัวอย่าง นำไปสู่แนวทางการพัฒนาสร้างระบบสายพานคัดแยกคุณภาพไม้ยางพาราแปรรูปในขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพไม้ เพื่อยกระดับมาตรฐานคุณภาพไม้ยางพาราให้เป็นที่น่าเชื่อถือกับประเทศผู้นำเข้า และสร้างรายได้ที่เพิ่มขึ้นในอนาคต อย่างไรก็ตามผลการวิจัยสามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานของโรงเลื่อยในขั้นตอนการตรวจความชื้นก่อนการส่งออก และตรวจสอบค่าความแข็งแรงก่อนคัดแยกเกรด แต่ควรมีการปรับปรุงสมการให้มีการทำนายได้แม่นยำมากขึ้นด้วยการเพิ่มจำนวนตัวอย่างให้มีช่วงข้อมูลความชื้น โมดูลัสยืดหยุ่น และค่าความถ่วงจำเพาะที่กว้างขึ้นเพื่อที่จะครอบคลุมการทำนายตัวอย่างในอนาคตได้



รูปที่ 10 แผนภาพการกระจายของไม้ยางพาราแปรรูป (A) ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ความยาวคลื่น 968.42 nm, (B) ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นที่ความยาวคลื่น 1420.8 nm และ (C) ค่าความถ่วงจำเพาะที่ความยาวคลื่น 978.17 nm

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่สนับสนุนทุนการศึกษา และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่กรุณาสันับสนุนงบประมาณวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร. เข้าถึงได้จาก: <https://www.oae.go.th>. [เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2565].
- [2] ศูนย์ข้อมูลยางและไม้ยาง สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. สถิติส่งออกยางพาราไทย. เข้าถึงได้จาก: <http://rubber.oie.go.th>. [เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2565].
- [3] วรวรรณ์ นกน้อย. การทำนายปริมาณความชื้น ความถ่วงจำเพาะ และความแข็งแรงไม้ยางพาราด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ [วิทยานิพนธ์]. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร). กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2561.
- [4] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. ไม้ยางพาราแปรรูป. มอก. 2423-2552.
- [5] Tsuchikawa S. A Review of Recent Near Infrared Research for Wood and Paper. *January Applied Spectroscopy Reviews*. 2007; 42(1): 43-71.
- [6] สุริดา เรืองชาปณ์. การพัฒนาและทดสอบสมการทำนายความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา [วิทยานิพนธ์]. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วิศวกรรมเกษตร).
- กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2563.
- [7] Ma T, Morita G, Inagaki T, Tsuchikawa S. Moisture transport dynamics in wood during drying studied by long- wave near- infrared hyperspectral imaging. *Cellulose*. 2022; 29: 133-145.
- [8] Haddadi A, Leblon B, Burger J, Pirouz Z, Groves K, Nader J. Using near- infrared hyperspectral images on subalpine fir board. Part 2: Density and basic specific gravity estimation. *Wood Material Science & Engineering*. 2015; 10(1): 41-56.
- [9] Sofianto IA, Inagaki T, Ma T, Tsuchikawa S. Effect of knots and holes on the modulus of elasticity prediction and mapping of sugi (Cryptomeria japonica) veneer using near- infrared hyperspectral imaging (NIR- HSI). *Holzforchung*. 2019; 73(3): 259-268.
- [10] Thumm A, Riddell M, Nanayakkara B, Harringtona J, Meder R. Near infrared hyperspectral imaging applied to mapping chemical composition in wood samples. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 2010; 18: 507-515.
- [11] Wu D, Sun DW. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review-Part I: Fundamentals. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2013; 19: 1-14.

- [12] American Society for Testing and Materials (ASTM). *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, D 143-94*; 2000.
- [13] Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI). *Test methods Standard Practice*; 2006.
- [14] Meier KJ, Brudney JL, Bohte J. *Applied Statistics for Public and Nonprofit Administration* (8th ed.). Boston USA: Wadsworth; 2014.
- [15] Williams P. Grains and seeds. In: Ozaki Y, McClure W.F, Christy A.A. (Eds.). *Near-Infrared Technology in food science and technology*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc; 2007. p. 165-217.
- [16] Chanpet M, Rakmak N, Matan N, Siripatana C. Effect of air velocity, temperature and relative humidity on drying kinetics of rubberwood. *Heliyon*. 2020; 6(10): 1-15.
- [17] Gerhards CC. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immedia effects. *Wood and Fiber*. 1982; 14(1): 4-36.
- [18] Hossain M, Mondal S, Banerjee A, Lekshmi NM, Manojkuma B. Changes in the Specific Gravity in Rubber Wood Treated with Cashewnut Shell Liquid and Nano Based Wood Preservatives. *Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2018; 7(10): 720-723.
- [19] Workman J, Weyer L. *Practical guide and spectral atlas for interpretive near-infrared spectroscopy* (2nd ed.). United States of America; 2012.
- [20] Iwamoto M, Kawano S, Abe H. Analysis of hydrogen bonding related to water in foods. *NIR News*. 1995; 6(3): 10-12.
- [21] Fujimoto T, Kurata Y, Matsumoto K, Tsuchikawa S. Feasibility of near-infrared spectroscopy for online multiple trait assessment of sawn lumber. *Journal of Wood Science*. 2010; 56: 452-459.
- [22] Williams P, Norris K. *Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. American Association of Cereal Chemists. USA; 2001.
- [23] Osborne BG, Fearn T, Hindle PH. *Practical NIR spectroscopy with application in food and beverage analysis*. Longman Scientific and Technical: Harlow; 1993.
- [24] Ozaki Y, Siesler HW, Kawata S, Heise HM. *Near-Infrared Spectroscopy. Principles, Instruments, Applications*. WILEY-VCH: Germany; 2002.
- [25] จิตาภรณ์ ภูมิไชย์, กฤษดา สังข์สิงห์, จิรวัดน์ รียาพันธ์, เฉลิมพล ภูมิไชย์. คุณสมบัติทางเคมีและเชิงกลของไม้ยางพารา. *วารสารวิชาการเกษตร*. 2558; 33(2): 144-158.
- [26] Awais M, Altgen M, Makela M, Belt T, Rautkari L. Quantitative prediction of moisture content distribution in acetylated wood using near-infrared hyperspectral imaging. *Journal of Materials Science*. 2022; 5(7): 3416-3429.