

การทำนายค่าโมดูลัสแตกหักไม้ยางพาราแปรรูปแห้งด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ Prediction of Modulus of Rupture of Oven Dried Sawn Timber Hevea Wood Using Near Infrared Spectroscopy

วรวัชรณ์ นกน้อย¹, สิรินาถ น้อยพิทักษ์^{1*}, อนุปันต์ 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, 73140, Thailand

*Corresponding author: Tel: +668-5175-5727, Fax: +66-0-3435-1896, E-mail: fengsnh@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการทำนายค่าโมดูลัสแตกหักของไม้ยางพาราแปรรูปจำนวน 214 ตัวอย่าง ด้วยการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ด้วยเครื่อง Near infrared spectrophotometer ช่วงเลขคลื่น 12000–4000 cm^{-1} (833-2500 nm) รูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (diffuse reflectance mode) สร้างสมการทำนายค่าโมดูลัสแตกหัก ด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) ผลการวิจัยพบว่าการใช้ค่าสเปกตรากการดูดกลืนแสงสามารถ ให้สมรรถนะในการทำนายโมดูลัสแตกหักไม้ยางพาราแปรรูปสูงสุดมีค่า R_p เท่ากับ 0.78 และ ค่า RMSEP เท่ากับ 17.11 MPa

คำสำคัญ: ไม้ยางพาราแปรรูป, สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้, โมดูลัสแตกหัก

Abstract

This research studied the prediction of modulus of rupture of sawn timber Hevea wood samples of 214 by using near infrared spectroscopy with near infrared spectrophotometer in a range of 12000–4000 cm^{-1} (833-2500 nm) in diffuse reflectance mode. The predictive models were built by the partial least squares regression (PLSR). The result showed the using spectra absorbance yielded the best performance of model with coefficient of determination of prediction (R_p) equal to 0.78 and root mean square error of prediction (RMSEP) of 17.11 MPa in predicting modulus of rupture

Keywords: Hevea Wood, Near Infrared Spectroscopy, Modulus of Rupture

1 บทนำ

ยางพารา (*Hevea brasiliensis* Mull. Arg.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางพาราอันดับหนึ่งของโลกในปี 2559 มีพื้นที่ปลูกยางมากกว่า 21 ล้านไร่ (สถาบันวิจัยยาง, 2552) ปัจจุบันไม้ยางพารากำลังกลายเป็นที่นิยมของตลาดโลก ในปี 2559 มีมูลค่าการส่งออกไม้ยางพาราแปรรูป 50,824.29 ล้านบาท (Rubber Intelligence Unit, 2561) โดยไม้ยางพาราเป็นผลพลอยได้จากการตัดโค่นต้นยางเก่าที่มีอายุ 25 ปีขึ้นไป ให้ผลผลิตน้ำยางน้อย (จิรวัดน์, 2556) แต่ลำต้นยางพารายังคงมีมูลค่าสูง และมีศักยภาพที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์จากการแปรรูปเพื่อส่งออกได้อีกหลายด้าน (สาลินี, 2557) ซึ่งในปัจจุบันการนำไม้ยางพาราแปรรูปมาเป็นวัตถุดิบเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ไม้แปรรูป เฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจากลักษณะเฉพาะตัว ลวดลายสีขาวนวล และความสวยงามของตัวไม้ (ฐิตาภรณ์ และคณะ, 2555; ทรงกลด และคณะ, 2552) ก่อนส่งขายไม้ยางพารา

แปรรูปนั้นต้องถูกลดความชื้นเนื้อไม้ไม่ให้เกินกว่า 12% dry basis (%db) ตามมาตรฐานการส่งออก ซึ่งสามารถจำแนกเพื่อการส่งออกได้เป็น 2 เกรด คือ เกรด A และเกรด B (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2552) และจำแนกตามการปฏิบัติงานจริงของโรงเลื่อยได้เพิ่มอีก 2 เกรด คือ เกรด C และเกรดไม้พาเลท (P) (กรมสรรพากร, 2556) โดยในทางปฏิบัติ การส่งออกไม้ยางพาราแปรรูปนั้นโรงเลื่อยมักจำหน่ายเกรด A และ B รวมกันเป็นเกรด AB

ปัจจุบันการคัดชั้นคุณภาพ หรือเกรดไม้ยางพาราแปรรูปของโรงเลื่อยนั้นทำได้ด้วยการตรวจสอบด้วยสายตาเท่านั้น โดยพิจารณาจำแนกจากลักษณะเนื้อไม้ ตาหินต่างๆ เช่น รอยแตก ร้าว ตาไม้ เปลือกไม้ ไล่ไม้ ที่เกิดขึ้นบนเนื้อไม้ โดยที่ยังไม่มีอุปกรณ์ หรือเครื่องมือเพื่อช่วยในการตรวจสอบคุณภาพ อย่างไรก็ตามหากโรงเลื่อยสามารถรันตัดได้ทั้งความสวยงามของเนื้อไม้

และความแข็งแรงของไม้ยางพาราแปรรูปก็จะเป็นการเพิ่มมาตรฐานสินค้าไม้ยางพาราแปรรูปได้

การนำเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy; NIRS) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง มีความสะดวกรวดเร็วในการวัดตัวอย่างมาทำนายค่าคุณสมบัติเชิงกลของไม้ยางพาราแปรรูป จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากค่าความแข็งแรงของเนื้อไม้ที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีภายในเนื้อไม้ โดย Tsuchikawa and Kobori (2015) พบว่าเซลลูโลสในเนื้อไม้มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรง ปัจจุบันมีการใช้เทคนิค NIRS กับไม้ยางหลากหลาย เช่น การใช้ NIRS สร้างสมการตรวจสอบค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าโมดูลัสแตกหัก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของไม้ Pernambuco ผลที่ได้สามารถทำนายค่าคุณสมบัติเชิงกลของไม้ได้ (Scimleck et al., 2011) ทั้งยังมีการใช้ NIRS ในการทำนายค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าโมดูลัสแตกหัก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ของไม้สน จากหลายแหล่งทางภาคใต้ของ ประเทศสหรัฐอเมริกา (Schimleck et al., 2005) การใช้ NIRS ในการประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และโมดูลัสแตกหัก ของต้นสนชนิด hybrid ซึ่งในการทดสอบแรงดัดสถิต พบว่าการดูดกลืนในกลุ่มของ OH ในบริเวณ semicrystalline หรือ crystalline ของเซลลูโลสมีผลต่อการสร้างสมการทำนายของค่าความแข็งแรง (Fujimoto et al, 2007) ปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีรายงานการใช้เทคนิค NIRS กับไม้ยางพาราแปรรูปเพื่อหาโมดูลัสการแตกหักดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิค NIRS ทำนายค่าโมดูลัสแตกหักในไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง เพื่อเพิ่มมาตรฐานการส่งออก และมูลค่าของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง สร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้ค้า ว่าสินค้าไม้ยางพาราแปรรูปไม่เพียงถูกพิจารณาเรื่องของคุณภาพของเนื้อไม้เท่านั้นยังมีการพิจารณาการตรวจสอบถึงความแข็งแรงของเนื้อไม้เพิ่มเติมด้วย

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งเกรด AB, C และ พาเลท (P) ดัง Figure 1 จากโรงเลื่อยไม้ยางพาราแปรรูปในภาคใต้ จ.นครศรีธรรมราช และภาคตะวันออก จ.ระยอง จำนวน 214 ตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง เกรด AB จำนวน 92 ตัวอย่าง เกรด C จำนวน 92 ตัวอย่าง และ เกรด P จำนวน 30 ตัวอย่าง เพื่อให้มีความแปรปรวนของข้อมูลตัวอย่าง ในการสร้างสมการทำนายครอบคลุมทั้งเกรดไม้ และพื้นที่การปลูก ซึ่งไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์ที่โรงเลื่อยได้ลดความชื้นให้ไม้เปเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่ำกว่า 12% ก่อนการส่งออกต่างประเทศเพื่อให้สินค้าเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. ไม้ยางพาราแปรรูป (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2552) จากนั้นนำตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปมาทำการตัดแต่งให้มีขนาด $2.54 \times 2.54 \times 40 \text{ cm}^3$ และทำการขีดผิวให้เรียบเสมอกัน

จากนั้นเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง 25°C เป็นเวลา 24 hr ก่อนนำไปทดสอบหาค่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดย่านใกล้ และค่าโมดูลัสแตกหัก



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

2.2 การวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง

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

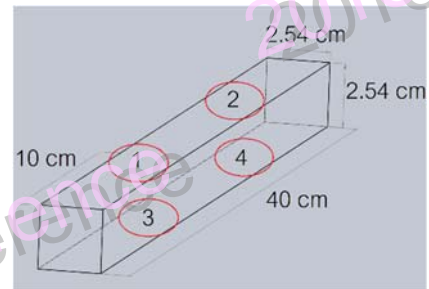


Figure 2 Positions of measurement

2.3 การหาค่าโมดูลัสแตกหักของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูป

นำตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง มาหาค่าโมดูลัสแตกหัก (Modulus of rupture; MOR) ด้วยการทดสอบแรงดัดสถิต ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการต้านการแตกหักของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) (5596, Instron Engineering Co, High Wycombe, England) ซึ่งนำตัวอย่างมาวางบนแท่นกดที่มีระยะห่างของแท่นรองรับ (span) 37 cm โดยใช้หัวกดที่มีลักษณะมน ที่มีความเร็วในการกดคองที่ $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ตาม

มาตรฐาน ASTM D143 (ASTM, 2000) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวไม้ตามแนวตั้งฉากกับเส้นไม้ ดัง Figure 3

การหาค่า MOR นั้นต้องทำการวัดขนาดความกว้าง (b) และความหนา (d) ของทุกชิ้นตัวอย่างก่อนนำไปทดสอบ แล้วนำค่าแรงสูงสุด (P_{max}) ที่ได้จากการหาแรงดัดสถิต และความยาวของตัวอย่างไม้ระหว่างแท่นรองรับ (L) มาคำนวณหาค่าโมดูลัสแตกหักของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง (Baar et al. 2015) ตามสมการที่ (1)



Figure 3 Testing modulus of rupture with Universal testing machine (UTM)

$$MOR = \frac{3P_{max}L}{2bd^2} \quad (1)$$

2.4 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

นำข้อมูลค่าโมดูลัสแตกหักมาตรวจสอบตัดข้อมูลที่ผิดปกติ (outlier) ของค่าอ้างอิงโดยพิจารณาค่ามาตรฐานของค่าโมดูลัสแตกหัก (standard score ; Z) ถ้าหากค่า Z มากกว่า 3 หรือน้อยกว่า -3 ถือว่าเป็น outlier (Meier, 2014) จากนั้นนำค่าโมดูลัสแตกหักมาวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละเกรดไม้ของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งด้วยวิธี One way ANOVA ด้วยโปรแกรม SPSS version 11.5 แล้วนำข้อมูลสเปกตรากการดูตกถิ่นของแสงมาทำการปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี First derivative, Second derivative, Multiplicative scatter correction (MSC), Standard normal variate (SNV) เพื่อลดอิทธิพลที่ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัม และลดการกระเจิงของแสงก่อนนำไปวิเคราะห์ จากนั้นแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ใช้สร้างสมการทำนาย (calibration set) จำนวน 148 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ใช้ในการทดสอบสมการทำนาย (prediction set) จำนวน 66 ตัวอย่าง จากนั้นใช้โปรแกรม The Unscrambler 9.8 (CAMO, USA) สร้างสมการทำนายค่าโมดูลัสแตกหัก ด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) แบบ Full cross validation ด้วยข้อมูลในกลุ่มที่สร้างสมการทำนายโดยมีการกำหนดให้ค่าการดูตกถิ่นแสงเป็นตัวแปรอิสระ และค่าโมดูลัส

แตกหักเป็นตัวแปรตาม โดยพิจารณาค่าสมรรถนะของสมการทำนายที่ดีที่สุดจากค่าทางสถิติ คือ ค่า Correlation of coefficient of calibration (r_c) ที่มีค่าสูง และค่า Root mean square error of calibration (RMSEC) ที่มีค่าต่ำ จากนั้นเมื่อได้สมการทำนายแล้วทำการทดสอบสมการทำนายด้วยข้อมูลในกลุ่มที่ใช้ทดสอบสมการ แล้วพิจารณาค่าสมรรถนะการทำนายจากค่าทางสถิติ คือ Correlation of coefficient of prediction (r_p) ที่มีค่าสูง ค่า Root mean square error of prediction (RMSEP) ที่มีค่าต่ำ

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสแตกหักของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง

ผลของค่าโมดูลัสแตกหักไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง พบว่าค่าโมดูลัสแตกหักเฉลี่ยของเกรด AB, C และ P มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่าเฉลี่ยโมดูลัสแตกหักของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งเกรด A เท่ากับ 97.09 ± 15.74 MPa เกรด C เท่ากับ 72.54 ± 21.43 MPa และเกรด P เท่ากับ 37.62 ± 22.66 MPa ดัง Table 1 ข้อมูลของโมดูลัสแตกหักของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม calibration และกลุ่ม prediction โดยได้แสดงค่าโมดูลัสแตกหักสูงสุด ต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดัง Table 2 ซึ่งในกลุ่ม calibration ได้มีการจัดข้อมูลตัวอย่างที่มีค่าโมดูลัสแตกหักสูงสุด และต่ำสุดที่ครอบคลุมพื้นที่การปลูกและ เกรดของตัวอย่างไม้ยางพาราเพื่อให้ได้การทำนายที่ครอบคลุมข้อมูลโมดูลัสแตกหักทั้งหมด ทำให้การแบ่งกลุ่ม calibration set ของแต่ละเกรดมีจำนวนไม่เท่ากัน

Table 1 Descriptive statistics of modulus of rupture in dry Hevea wood.

Grades	Number of Samples	Number		
		Min	Max	Mean±SD
AB	92	60.54	135.76	97.09 ± 15.74^a
C	92	16.64	110.94	72.54 ± 21.43^b
P	30	7.94	87.04	37.62 ± 22.66^c
Total	214	7.94	135.76	78.20 ± 27.78

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

Table 2 Statistical data of modulus of rupture in the calibration and prediction sets.

Parameter	Grades	Data set	Number of samples	Min	Max	Mean±SD
Modulus of rupture (Mpa)	AB	Calibration set	66	60.54	135.76	97.56±16.57
		Prediction set	26	76.04	129.65	95.90±13.63
	C	Calibration set	63	16.64	110.94	70.99±21.56
		Prediction set	29	24.89	109.44	75.92±21.12
	P	Calibration set	19	7.94	87.04	33.63±22.33
		Prediction set	11	10.07	77.32	44.52±22.56
	Total	Calibration set	148	7.94	135.76	78.04±28.74
		Prediction set	66	10.07	129.65	78.55±25.72

3.2 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง

จากการวิเคราะห์สเปกตรากการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้งพบว่าสเปกตรากใน ช่วงต้น และช่วงท้ายของเลขคลื่นนั้นมีสัญญาณรบกวนมากจึงได้ตัดเหลือช่วงเลขคลื่น 12,000–4,000 cm^{-1} (833-2,500 nm) ดัง Figure 4 เมื่อพิจารณาตำแหน่งที่พีคเด่นชัดที่เลขคลื่น 8316 cm^{-1} (1203 nm) 6866 cm^{-1} (1457 nm) 6287 cm^{-1} (1591 nm) 5215 cm^{-1} (1917 nm) 4752 cm^{-1} (2104 nm) พบว่าเป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะ OH (Osborne et al., 1993 ; Fujimoto et al., 2010) และเลขคลื่น 7344 cm^{-1} (1362 nm) 5832 cm^{-1} (1715 nm) 4389 cm^{-1} (2278 nm) 4281 cm^{-1} (2336 nm) ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ CH

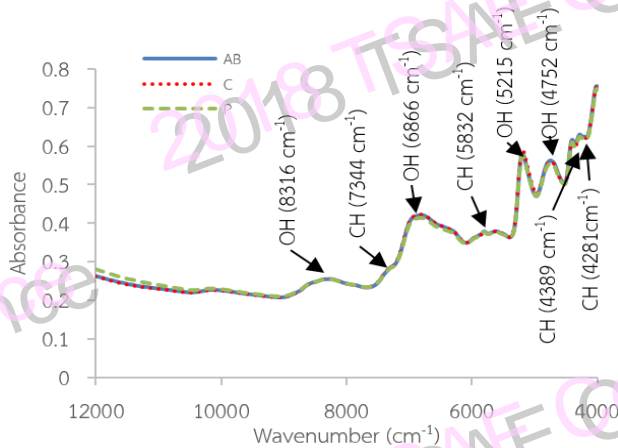


Figure 4 The average absorbance spectra of 3 grades of the oven dried sawn timber Hevea wood.

3.3 ผลการสร้างสมการทำนายค่าโมดูลัสแตกหักของไม้ยางพาราแปรรูปอบแห้ง

สมการทำนายค่าโมดูลัสแตกหัก เมื่อใช้ค่าการดูดกลืนแสงพบว่าให้ผลการทำนายสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสมการทำนาย มีค่า R_p เท่ากับ 0.78 และค่า RMSEP เท่ากับ 17.11 MPa ดัง Table 3 และ Figure 5 เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ใน Figure 6 ที่ใช้ค่าการดูดกลืนแสง พบว่าเลขคลื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยสูงมี

ค่าที่สำคัญส่งผลต่อสมการทำนายค่าโมดูลัสแตกหัก คือ ตำแหน่งการสั่นของพันธะ OH ของเซลลูโลส (cellulose) ได้แก่ เลขคลื่น 6542 cm^{-1} (1529 nm) (Fujimoto et al., 2010) พันธะ OH ของ starch ได้แก่ 4443 cm^{-1} (2251 nm) (Osborne et al., 1993) พันธะ OH ของ carboxyl ได้แก่ 5268 cm^{-1} (1898 nm) ซึ่งพันธะ OH ของเซลลูโลส (cellulose) ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้ส่งผลต่อสมการทำนายค่าโมดูลัสแตกหัก (Fujimoto et al., 2008) พันธะ CH ของเซลลูโลส (cellulose) ได้แก่ 7568 cm^{-1} (1321 nm) (Osborne et al., 1993) พันธะ CH ของ lignin ได้แก่ 5963 cm^{-1} (1677 nm) (Fujimoto et al., 2010)

Table 3 Statistical data of PLSR models obtained for prediction of Modulus of rupture

Pretreatment	LV	Calibration		Prediction	
		R_c	RMSEC (MPa)	R_p	RMSEP (MPa)
Absorbance	9	0.85	15.11	0.78	17.11
1st derivative	5	0.85	15.21	0.73	18.49
2nd derivative	3	0.84	15.56	0.64	21.43
MSC	7	0.81	16.87	0.76	16.93
SNV	7	0.81	16.86	0.76	16.91

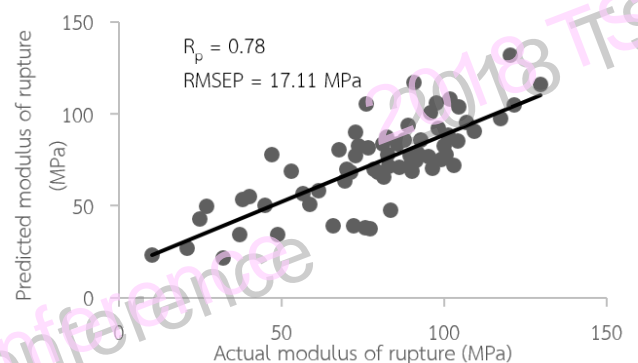


Figure 5 Plot of reference versus predicted values from prediction set of modulus of rupture.

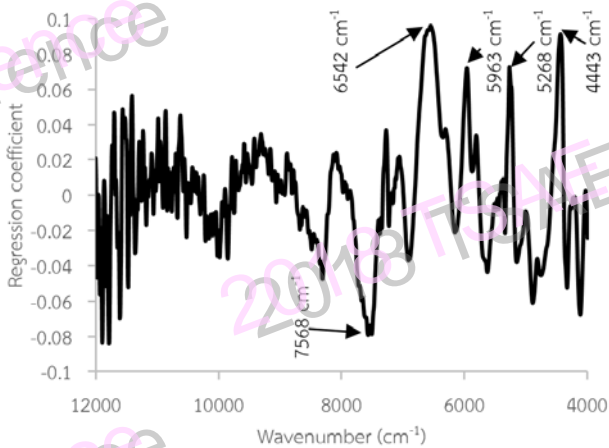


Figure 6 Regression coefficient of PLSR model over dried sawn timber Hevea wood samples for using absorbance.

4 สรุป

จากงานวิจัยนี้พบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ มาใช้ทำนายค่าโมดูลัสแตกหักของไม้ยางพาราแปรรูป จากผลการทดสอบในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) โดยการใช้ค่าการดูดกลืนแสง นำมาสร้างสมการทำนายค่าโมดูลัสแตกหักให้ผลการทำนายที่ดีที่สุด มีค่า R_p เท่ากับ 0.78 ค่า RMSEP เท่ากับ 17.11 MPa

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ RDG60T0121 และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ Near Infrared Spectrophotometer ในการทำวิจัยครั้งนี้

6 เอกสารอ้างอิง

กรมสรรพากร. 2556. คู่มือแนะนำการชำระภาษีอากรกิจการโรงเลื่อยไม้ยางพารา. แหล่งที่มา: <http://www.rd.go.th/publish/47243.0.html>, 27 เมษายน 2560.
 จีรวัดน์ ธิยาพันธ์. 2556. คุณสมบัติทางเคมีและเชิงกลของไม้ยางพารา 7 โคลนพันธุ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 ฐิตาภรณ์ ภูมิไชย, จีรวัดน์ ธิยาพันธ์, เฉลิมพล ภูมิไชย, กรรณิการ์ ธีระวัฒน์สุข, กฤษดา สังข์สิงห์. 2555. คุณสมบัติของไม้ยางพาราเพื่อการคัดเลือกพันธุ์ยาง. วารสารยางพารา 10, 34-44.

ทรงกลด จารุสมบัติ, ธีระ วิณิน, อำไพ เปี่ยมอรุณ. 2552. ผลผลิตจากไม้ยางพารา. แหล่งข้อมูล: http://kukr.lib.ku.ac.th/cb/BKN_FOR/search_detail/result/309097. เข้าถึงเมื่อ 20 มกราคม 2561.

สถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย. 2552. การศึกษาผลผลิตไม้ อัตราการแปรรูป คุณภาพและสมบัติของไม้ยางพาราพันธุ์แนะนำ 4 พันธุ์, แหล่งข้อมูล: http://www.rubberthai.com/news/newsinfo/2552/news_June52/news_0502.htm. เข้าถึงเมื่อ 30 มกราคม 2561.

สาลินี ช้วยยก. 2557. ผลผลิตและค่าใช้จ่ายในการทำไม้ยางพาราในจังหวัดสุราษฎร์ธานี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2552. ไม้ยางแปรรูป. มอก. 2423-2552.

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

Baar, J., Tippner, J., Rademacher, P. 2015. Prediction of Mechanical Properties-Modulus of Rupture and Modulus of Elasticity-of Five Tropical Species by Nondestructive Methods. Journal of Maderas. Ciencia y tecnología 17(2):239-252.

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.

Fujimoto, T., Yamamoto, H., and Tsuchikawa, S. 2007. Estimation of wood stiffness and strength properties of hybrid larch by near-infrared Journal of Applied Spectroscopy.61 (8): 882-888.

Meier, KJ., Brudney, JL., Bohte, J. 2014. Applied Statistics for Public and Nonprofit Administration. (8th ed.). Boston, USA: Wadsworth.

Osborne, B.G., Fearn, T., Hindle, P.H. 1993. Practical NIR spectroscopy with application in food and beverage analysis (2nd). Harlow, England: Longman Scientific and Technical.

Rubber Intelligence Unit. 2560. สถิติการส่งออกผลิตภัณฑ์ไม้ยางพารา. แหล่งข้อมูล: <http://rubber.oie.go.th/ImExThaiByProduct.aspx?pt=ex&hgid=4>. เข้าถึงเมื่อ 1 กุมภาพันธ์ 2561.

Schimleck, L.R., Jones, P.D., Clark, A., Daniels, R.F., Peter, G.F. 2005. Near infrared spectroscopy for the nondestructive estimation of clear wood properties of Pinus taeda L. from the southern United States. Journal of Forest Products 55: 21–28.

Schimleck, L. R, Monteiro De Matos, J.L., Da Silva Oliveira, J.T, Bolzon Muniz, G.I. 2011. Non-Destructive Estimation of Pernambuco (Caesalpinia echinata) Clear Wood Properties Using Near Infrared Spectroscopy. Journal of Infrared Spectroscopy 19:411–419.

Tsuchikawa, S., Kobori, H. 2015. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology Journal of Wood Science 61:213-2