

การตรวจสอบค่าความร้อนสูงของชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของ
พืชเศรษฐกิจในประเทศไทยด้วยสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

EVALUATION OF HIGHER HEATING VALUE OF BIOMASS FROM
AGRICULTURAL WASTE OF ECONOMIC CROPS IN THAILAND BY NEAR
INFRARED SPECTROSCOPY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-100-105

การตรวจสอบค่าความร้อนสูงของชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของ
พืชเศรษฐกิจในประเทศไทยด้วยสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

EVALUATION OF HIGHER HEATING VALUE OF BIOMASS FROM
AGRICULTURAL WASTE OF ECONOMIC CROPS IN THAILAND BY NEAR
INFRARED SPECTROSCOPY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-100-105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบค่าความร้อนสูงของชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของ
พืชเศรษฐกิจในประเทศไทยด้วยสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

EVALUATION OF HIGHER HEATING VALUE OF BIOMASS FROM
AGRICULTURAL WASTE OF ECONOMIC CROPS IN THAILAND BY NEAR
INFRARED SPECTROSCOPY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-100-105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EVALUATION OF HIGHER HEATING VALUE OF BIOMASS FROM
AGRICULTURAL WASTE OF ECONOMIC CROPS IN THAILAND BY NEAR
INFRARED SPECTROSCOPY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

KMITL-2018-EN-M-100-105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตรวจสอบค่าความร้อนสูงของชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของพืชเศรษฐกิจ
ในประเทศไทยด้วยสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

Thesis Title Evaluation of Higher Heating Value of Biomass from Aricultural Wastes of
Economic Crops in Thailand by Near Infrared Spectroscopy

นักศึกษา นายจรรูวัฒน์ แป๊ะอู๋

รหัสประจำตัว 60601137

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.นารัถระพี นาคะวัจนะ

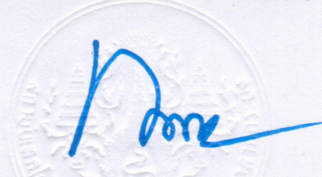
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-100-105

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อนุพันธ์	เทอดวงศ์วรกุล
รศ.ดร.ปานมนัส	ศิริสมบุญ
ผศ.ดร.รวิภัทร	ลาภเจริญสุข
ดร.วันพุทธ	แช่ฉั่ว
ดร.นารัถระพี	นาคะวัจนะ

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง AE-302 อาคาร CCA

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจสอบค่าความร้อนสูงของชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของพืชเศรษฐกิจในประเทศไทยด้วยสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้
นักศึกษา	นายจรรุวัฒน์ แป๊ะอู๋
รหัสประจำตัว	60601137
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.นารณระพี นาคะวังนะ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการตรวจสอบค่าความร้อนสูงของชีวมวลที่ได้มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของพืชเศรษฐกิจในประเทศไทยทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว ชังข้าวโพด แกลบ ชี้อ้อยไม่ ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดฟาง และเหง้ำมันสำปะหลัง ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ โดยใช้เครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วงเลขคลื่น $12,500-3,600\text{ cm}^{-1}$ โหมดการวัดแบบ Diffuse reflectance แล้วสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูงรวมของแต่ละชนิดและสมการทำนายค่าความร้อนสูงรวมของชีวมวลทั้ง 5 ชนิด (Global model) ด้วยวิธี Partial least squares regression (PLSR) ทำการตรวจสอบสมการทำนายค่าความร้อนสูงชีวมวลแต่ละชนิดด้วยวิธี Full cross validation พบว่า สมการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าวโดยใช้ค่าการดูดกลืนคลื่นที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (R^2) อยู่ที่เท่ากับ 0.896 ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (RMSECV) เท่ากับ 133 Jg^{-1} ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับอัตราส่วนของค่าความผิดพลาดมาตรฐานการทำนาย (RPD) เท่ากับ 3.11 และค่าความคลาดเคลื่อน (Bias) เท่ากับ 11.2 Jg^{-1} สมการทำนายค่าความร้อนสูงของชังข้าวโพดโดยใช้ค่าการดูดกลืนคลื่นที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Second derivative มีค่า R^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.911 ค่า RMSECV เท่ากับ 51.4 Jg^{-1} RPD เท่ากับ 3.38 และค่า Bias เท่ากับ -5.38 Jg^{-1} สมการทำนายค่าความร้อนสูงของแกลบโดยใช้ค่าการดูดกลืนคลื่นที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Multiplicative scattering correction มีค่า R^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.945 ค่า RMSECV เท่ากับ 50.7 Jg^{-1} RPD เท่ากับ 4.28 และค่า Bias เท่ากับ 3.17 Jg^{-1} สมการทำนายค่าความร้อนสูงของชี้อ้อยไม่ ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดฟางโดยใช้ค่าการดูดกลืนคลื่นที่ไม่ปรับแต่งสเปกตรัม มีค่า R^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.942 ค่า RMSECV เท่ากับ 292 Jg^{-1} RPD เท่ากับ 4.15 และค่า Bias เท่ากับ -7.57 Jg^{-1} สมการทำนายค่าความร้อนสูงของเหง้ำมันสำปะหลังโดยใช้ค่าการดูดกลืนคลื่นที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First Derivative มีค่า R^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.834 ค่า RMSECV เท่ากับ 376 Jg^{-1} RPD เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.45 และค่า Bias เท่ากับ -3.63 Jg^{-1} ส่วนการตรวจสอบสมการทำนายค่าความร้อนสูงของชีวมวลรวม 5 ชนิด ด้วยวิธี Test set validation พบว่า สมการสมการทำนายค่าความร้อนสูงของชีวมวลรวม 5 ชนิดโดยใช้ค่าการดูดกลืนคลื่นที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative ร่วมกับ MSC พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.913 ค่า RMSEP เท่ากับ 353 Jg^{-1} และค่า Bias เท่ากับ -20.6 Jg^{-1} ซึ่งสรุปได้ว่าเทคนิคด้วยสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้นี้สามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าความร้อนของชีวมวลได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในโรงงานไฟฟ้าชีวมวลสำหรับตรวจสอบค่าความร้อนของชีวมวล



Thesis	Evaluation of Higher Heating Value of Biomass from Agricultural Waste of Economic Crops in Thailand by Near Infrared Spectroscopy
Student	Mr.Jaruwat Paeoui
Student ID.	60601137
Degree	Master of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Dr. Natrapee Nakawajana

ABSTRACT

This research aimed to investigate the use of near infrared spectroscopy for predicting higher heating value of biomass from agricultural waste of economic Crops in Thailand including rice straw, maize cob, husk, sawdust wood from the cultivation of straw mushroom, cassava rhizome by FT-NIR spectrometer. The wavenumber range of 12,500 – 3,600 cm^{-1} with the diffuse reflectance mode were used. The calibration models of each plant and the global model were established by partial least squares regression (PLSR) the calibration models of each plant were validated by full cross validation. The results showed that the raw spectra of rice straw were pretreated by first derivative method, the performance of model provided coefficient of determination (R^2) of 0.890, root mean square error of cross validation (RMSECV) of 133 Jg^{-1} , ratio of prediction to deviation (RPD) of 3.11 and bias of -11.2 Jg^{-1} . The raw spectra of maize cob were pretreated by second derivative method, The performance of model R^2 of 0.911, RMSECV of 51.4 Jg^{-1} , RPD of 3.38 and bias of -5.38 Jg^{-1} , The raw spectra of husk were pretreated using multiple scatter correction (MSC) method, the performance of model provided R^2 of 0.945, RMSECV of 50.7 Jg^{-1} , RPD of 4.28 and bias of 3.17 Jg^{-1} , The raw spectra of sawdust wood from the cultivation of straw mushroom (no pretreatment), the performance of model provided R^2 of 0.942, RMSECV of 292 Jg^{-1} , RPD of 4.15 and bias of -7.57 Jg^{-1} , The raw spectra of cassava rhizome were pretreated using first derivative method, the performance of model provided R^2 of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ III ย่างอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.834, RMSECV of 376 Jg^{-1} , RPD of 2.45 and bias of -3.63 Jg^{-1} The calibration model of 5 plants (Global model) was validated by Test set validation The results showed that The global model were pretreated using first derivative and multiple scatter correction (MSC) method, the performance of model provided R^2 of 0.913, RMSEP of 353 Jg^{-1} and bias of -20.3 Jg^{-1} . The result showed that the prediction of HHV of model including 5 types of biomass was of high accuracy. Hence, this technique could be used as a non-destructive and rapid method to predict the HHV value and could be applied to use in biomass power plant for investigation of HHV value in biomass.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยได้รับการอนุเคราะห์เครื่องมือจากศูนย์วิจัยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปีสำหรับผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร เพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณกองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.นารัษฎี นาคะวัจนะ ที่ช่วยให้คำแนะนำ คำปรึกษาในการจัดทำโครงการ รวมทั้งอาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่ช่วยให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ชาววิศวกรรมเกษตร ที่สละเวลาให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ ทั้งกำลังกายและกำลังใจในการทดลองเสมอ

ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนการทำงานและให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยเสมอมา คุณงามความดีที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพระเจ้าขอมอบให้แก่บิดามารดาที่รักและเคารพ ตลอดจนครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่คณะผู้วิจัย

จารุวัฒน์ แป๊ะอู๋

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ชีวมวล.....	5
2.1.1 พลังงานชีวมวล.....	5
2.1.2 องค์ประกอบของสารชีวมวล.....	5
2.1.2.1 ภาพรวมขององค์ประกอบของสารชีวมวล.....	5
2.1.2.2 องค์ประกอบทั่วไปของสารชีวมวล.....	6
2.1.3 พืชเชื้อเพลิงชีวมวลของประเทศไทย.....	8
2.1.3.1 ข้าว.....	8
2.1.3.2 มันสำปะหลัง.....	8
2.1.3.3 ข้าวโพด.....	8
2.1.3.4 ยางพารา.....	9
2.1.4 ศักยภาพชีวมวล.....	9
2.1.4.1 ข้าว.....	10
2.1.4.2 มันสำปะหลัง.....	11
2.1.4.3 ข้าวโพด.....	11
2.1.4.4 ยางพารา.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.5 สมบัติของชีวมวล.....	11
2.2 ค่าความร้อน.....	12
2.2.1 ค่าความร้อน.....	12
2.2.2 ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูง-ต่ำ.....	13
2.2.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อน.....	13
2.2.3.1 Isoperibol Calorimeter.....	14
2.2.3.2 Adiabatic Calorimeter.....	14
2.2.3.3 Dynamic IKA Calorimeter.....	15
2.2.4 หลักการทำงานของเครื่อง Bomb Calorimeter.....	15
2.3 ความชื้นในพืช.....	15
2.4 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR Spectroscopy).....	16
2.4.1 สเปกโทรสโกปี.....	17
2.4.2 หลักการพื้นฐานของสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้.....	18
2.4.3 การทำงานเครื่อง NIR spectrometer.....	18
2.4.4 เทคนิคในการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	19
2.5 การเลือกวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น.....	19
2.5.1 การลบโดยค่าคงที่ (Subtraction of a Constant Offset).....	19
2.5.2 การลบโดยเส้นตรง (Subtraction of a Straight Line).....	20
2.5.3 Vector Normalization.....	20
2.5.4 Min-Max-Normalization.....	20
2.5.5 Multiplicative Scatter Correction.....	21
2.5.6 อนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First Derivative).....	21
2.5.7 อนุพันธ์อันดับสอง (Second Derivative).....	21
2.6 การเลือกจำนวนเฟคเตอร์ที่เหมาะสม (Selecting the Appropriate Number of Factor).....	22
2.6.1 การสร้างสมการโดยวิธี partial least square regression (PLS-Regression).....	22
2.6.2 การทำ validation แบบ Full cross validation และแบบ Test set validation	26
2.7 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสมการ.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.1 สัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2)	26
2.7.2 ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (root mean squared error of cross validation; RMSECV).....	27
2.7.3 Root mean square error of estimation (RMSEE).....	28
2.7.4 อัตราส่วนระหว่าง SEP กับ SD (Ratio of SEP to the SD, RPD)	28
2.7.5 ความผิดพลาด (Bias).....	29
2.7.6 ประโยชน์ของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR).....	29
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	33
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง.....	33
3.3 การทดลอง.....	35
3.3.1 การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง FT- NIR Spectrometer.....	35
3.3.2 การวัดค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb calorimeter (C200, IKA, Germany).....	36
3.4 การวัดความชื้นอ้างอิง.....	37
3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	38
3.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัม.....	38
3.5.2 การสร้างสมการในการทำนาย.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	40
4.1 ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของตัวอย่างซีวมวล.....	40
4.2 ค่าสถิติของความร้อนสูงและความชื้นเฉลี่ยของพืชแต่ละชนิด.....	44
4.3 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของซีวมวลแต่ละชนิด.....	45
4.3.1 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของฟางข้าว.....	45
4.3.2 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของซังข้าวโพด.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.3 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของแคลบ	46
4.3.4 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของซีลี้อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการเพาะเห็ดฟาง.....	47
4.3.5 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของเหง้ามันสำปะหลัง.....	48
4.3.6 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของโมเดลรวมพืชทั้ง 5 ชนิด.....	49
4.4 องค์ประกอบสำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของชีวมวลทั้ง 5 ชนิด.....	53
4.3.1 องค์ประกอบสำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าว.....	53
4.3.2 องค์ประกอบสำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของซังข้าวโพด.....	54
4.3.3 องค์ประกอบสำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของแคลบ.....	54
4.3.4 องค์ประกอบสำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของซีลี้อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการเพาะเห็ดฟาง.....	55
4.3.5 องค์ประกอบสำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของเหง้ามันสำปะหลัง.....	56
4.3.6 องค์ประกอบสำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของโมเดลรวม.....	57
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	59
บรรณานุกรม.....	61
ภาคผนวก ก ค่าความร้อนและค่าความชื้นของชีวมวล.....	64
ภาคผนวก ข วิธีการใช้เครื่อง Bomb Calorimeter.....	70
ภาคผนวก ค วิธีการโปรแกรม OPUS7.0.....	80
ภาคผนวก ง ผลงานวิจัยที่ได้เผยแพร่.....	88
ประวัติผู้เขียน.....	99

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในวัสดุเหลือใช้หรือกากทาง การเกษตร.....	6
ตารางที่ 2.2 ผลการประเมินศักยภาพชีวมวลปี พ.ศ. 2551.....	1
ตารางที่ 2.3 สมบัติของชีวมวล.....	12
ตารางที่ 2.4 การแบ่งช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด.....	17
ตารางที่ 2.5 การแปลความหมายของค่า R^2	27
ตารางที่ 2.6 การอธิบายผลของค่า RPD	29
ตารางที่ 4.1 ค่าสถิติของความร้อนสูงและความชื้นเฉลี่ยของพืชแต่ละชนิด.....	44
ตารางที่ 4.2 สมการทำนายค่าความร้อนสูงที่สร้างจากเทคนิค Partial Least Square Regression (PLSR) แบบ Cross Validation ของชีวมวลแต่ละชนิด.....	51
ตารางที่ 4.3 สมการทำนายค่าความร้อนสูงที่สร้างจากเทคนิค Partial Least Square Regression (PLSR) แบบ Test Set Validation ของชีวมวลทั้ง 5 ชนิด.....	52

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบหลักของสารชีวมวล.....	8
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนและค่าความชื้นของชีวมวล.....	13
รูปที่ 2.3 Isoperibol Calorimeter.....	14
รูปที่ 2.4 Adiabatic Calorimeter.....	14
รูปที่ 2.5 ลักษณะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
รูปที่ 2.6 รูปแบบการวัดการดูดกลืนแสง.....	19
รูปที่ 2.7 NIR สเปกตรัมของมือคน : วัดแบบการสะท้อนแบบแพร่.....	20
รูปที่ 2.8 ข้อมูลสเปกตรัมและความเข้มข้นในรูปแบบเมทริกซ์.....	23
รูปที่ 2.9 Schematic diagrams for the factorization of the spectral data matrix X	24
รูปที่ 3.1 ฟางข้าว (รูปที่ A), เหน้ามันสำปะหลัง (รูปที่ B), แกลบ (รูปที่ C), ชี้เลื่อยไม้ ยางพาราที่เหลือจากการเพาะเห็ดฟาง (รูปที่ D), ชั่งข้าวโพด(รูปที่ E) และชีวมวลทั้ง5ชนิดที่ ถูกบดจนเป็นผง (รูปที่ F).....	34
รูปที่ 3.2 การเทชีวมวลลงในถ้วยควอทซ์.....	35
รูปที่ 3.3 การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR (MPA, Bruker, Germany).....	35
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างที่นำมาอัดเม็ด.....	36
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างที่ได้หลังจากการอัด.....	36
รูปที่ 3.6 เครื่อง Bomb calorimeter (C200, IKA, Germany)	37
รูปที่ 3.6 เครื่อง Pellet press.....	37
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของตัวอย่างฟางข้าว.....	41
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของตัวอย่างชั่งข้าวโพด.....	41
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของตัวอย่างแกลบ.....	42
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของตัวอย่างชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้ เพาะเห็ดฟาง.....	42
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของตัวอย่างเหน้ามันสำปะหลัง.....	43
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมเฉลี่ยการดูดกลืนคลื่นของตัวอย่างชีวมวลทั้ง 5 ชนิด.....	43
รูปที่ 4.7 สเปกตรัมอนุพันธ์อันดับที่สองเฉลี่ยของชีวมวลทั้ง 5 ชนิด.....	44
รูปที่ 4.8 กราฟ Scatter plot ระหว่างค่านำนายและค่าวัดจริงของการทำนายค่าความ ร้อนสูงของฟางข้าวของชุด Calibration set และ Validation set.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 กราฟ Scatter plot ระหว่างค่าทำนายและค่าวัดจริงของการทำนายค่าความร้อนสูงของซังข้าวโพดของชุด Calibration set และ Validation set.....	46
รูปที่ 4.10 กราฟ Scatter plot ระหว่างค่าทำนายและค่าวัดจริงของการทำนายค่าความร้อนสูงของแกลบของชุด Calibration set และ Validation set.....	47
รูปที่ 4.11 กราฟ Scatter plot ระหว่างค่าทำนายและค่าวัดจริงของการทำนายค่าความร้อนสูงของเหง้ามันสำปะหลังที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดของชุด Calibration set และ Validation set.....	48
รูปที่ 4.12 กราฟ Scatter plot ระหว่างค่าทำนายและค่าวัดจริงของการทำนายค่าความร้อนสูงของขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดของชุด Calibration set และ Validation set.....	49
ภาพที่ 4.13 กราฟ Scatter plot ระหว่างค่าทำนายและค่าวัดจริงของการทำนายค่าความร้อนสูงของโมเดลรวมของพีชทั้ง 5 ชนิดของชุด Validation set(A) และ Calibration set(B)	50
รูปที่ 4.14 กราฟ Regression coefficient plot ของสมการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าว.....	53
รูปที่ 4.15 กราฟ Regression coefficient plot ของสมการทำนายค่าความร้อนสูงของซังข้าวโพด.....	54
รูปที่ 4.16 กราฟ Regression coefficient plot ของสมการทำนายค่าความร้อนสูงของขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดซังข้าวโพด.....	55
รูปที่ 4.17 กราฟ Regression coefficient plot ของสมการทำนายค่าความร้อนสูงของแกลบ.....	56
รูปที่ 4.16 กราฟ Regression coefficient plot ของสมการทำนายค่าความร้อนสูงของเหง้ามันสำปะหลัง.....	57
รูปที่ 4.17 กราฟ Regression coefficient plot ของสมการทำนายค่าความร้อนสูงของโมเดลรวม.....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

เมื่อกล่าวถึงพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยนั้นมีความหลากหลาย แต่ที่ประเทศเราส่งออกและมีรายได้เข้าประเทศอย่างเป็นกอบเป็นกำ ได้แก่ ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ปาล์ม น้ำมัน และยางพารา เป็นต้น พืชเศรษฐกิจเหล่านี้ล้วนได้รับการสนับสนุนจากภาครัฐให้มีการเพาะปลูกเป็นจำนวนมาก แน่แน่นอนว่าเมื่อมีผลผลิตเป็นจำนวนมาก ก็ย่อมจะต้องมีวัสดุเหลือใช้หรือเหลือทิ้งจากการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรหรือจากการเก็บเกี่ยวของพืชเหล่านี้เป็นจำนวนมาก ด้วยเช่นกัน

ชีวมวล (Biomass) เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานของพืชที่ต้องอาศัยแสงอาทิตย์ในการสังเคราะห์แสงหรือเจริญเติบโต จากนั้นจึงเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งหรือแปรสภาพเป็นของเหลวที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนพลังงานจากฟอสซิลได้ ซึ่งชีวมวลที่นำมาใช้เป็นพลังงานมาจากแหล่งที่มา 2 แหล่ง ได้แก่ จากการปลูกพืชเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานโดยเฉพาะ และจากเศษวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปหรือจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตรที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานได้ (กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556) ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีพืชมากมายหลายชนิดที่เป็นชีวมวล โดยจะกล่าวถึงเฉพาะชีวมวลที่ได้มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พบว่ามีศักยภาพสูงที่จะสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้หลายชนิด เช่น ข้าว มันสำปะหลัง ข้าวโพด ยางพารา เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554) ตัวอย่างเช่น ข้าว เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีการปลูกกันทั่วทุกภาค เมื่อเก็บเกี่ยวแล้วจะได้ข้าวเปลือกและเหลือฟางข้าว เมื่อข้าวเปลือกนำไปเข้าโรงสีออกมาจะได้ข้าวสาร รำ และแกลบ ซึ่งฟางข้าวและแกลบเป็นเชื้อเพลิงที่ดี เพราะมีความชื้นต่ำและแกลบมีขนาดเล็กอีกด้วย เหมาะที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม หรือมันสำปะหลังได้มีการนำส่วนของเหง้ามาเป็นชีวมวล ซึ่งเหง้ามันสำปะหลัง สามารถเผาไหม้ให้ความร้อนสูงเทียบเท่าไม้พืน สามารถนำมาป้อนเป็นเชื้อเพลิงในระบบเผาไหม้ให้พลังงานความร้อนเป็นต้นกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้า จึงจัดเป็นชีวมวลที่มีศักยภาพในการนำมาเผาไหม้หรือไม่ว่าจะเป็นข้าวโพด จะนำส่วนของซึ่งข้าวโพดที่เหลือจากการนำเมล็ดออกแล้ว สามารถนำไปเผาเป็นถ่านอัดแท่งได้ นอกจากนี้วัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปยางพารา อาทิเช่น ชี้อ้อยไม่ยางพาราจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในการอบไม่ยางพาราหรือในโรงงานแปรรูปไม่ยางพาราเอง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางส่วนถูกนำไปจำหน่ายเป็นเชื้อเพลิง หรือนำไปอัดเป็นไม้อัดและเผาถ่าน บางส่วนจะถูกนำไปเป็นวัสดุใช้ในการเพาะเห็ดฟาง เป็นต้น (สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี, 2550)

ชีวมวลแต่ละชนิดจะให้พลังงานการเผาไหม้ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณความจุพลังงานของชีวมวลนั้นๆ เพื่อที่จะจัดตั้งระบบพลังงานชีวมวล และเลือกใช้ชีวมวลให้เหมาะสมกับความต้องการนั้น จำเป็นที่ต้องหาปริมาณพลังงานของชีวมวลที่จะถูกใช้เป็นวัตถุดิบตั้งแต่ต้น นั่นก็คือ ค่าความร้อน กล่าวคือ ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะเป็นตัวบ่งชี้พลังงานที่ชีวมวลมีอยู่ ซึ่งค่าความร้อนจากการเผาไหม้ก็คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดจากเมื่อสสารถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์นั่นเอง ชีวมวลที่ดีควรมีค่าความร้อนสูง โดยทั่วไปค่าความร้อนวัดโดยการใช้เครื่อง Bomb calorimeter ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการพลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้ ใช้เวลานานประมาณ 15 นาที ในการตรวจสอบ และมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างแพง ต้องใช้สารเคมี ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้ทางผู้วิจัยเกิดแนวคิดในการที่จะหาค่าความร้อนของชีวมวลด้วยเทคนิคที่สามารถทำการวัดได้อย่างรวดเร็วและมีราคาถูกนั้นก็คือ การนำเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้มาใช้ในการตรวจสอบค่าความร้อนของชีวมวลนั่นเอง

ที่ผ่านมาเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ได้ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของชีวมวลในต่างประเทศอย่างแพร่หลาย แต่สำหรับในประเทศไทยพบว่ายังมีไม่มาก อาทิเช่น ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เพื่อทำนายค่าความร้อนรวมถึงปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนของฟางข้าว (Huang et al., 2008, 2009) ใช้ทำนายปริมาณความชื้น ความร้อน แกล์ และ คาร์บอน ของพืชพลังงาน 2 ชนิด นั่นคือ หญ้ายักษ์มิสแคนทัสและข้าวเหนียวแบบหมุนเวียนช่วงสั้น (Fagan et al., 2011) ใช้ในการทำนายดัชนีคุณภาพของเมล็ดชีวมวลจากหญ้าล้มลุกและหญ้ายักษ์มิสแคนทัส (Gillespie et al., 2015) ใช้สำหรับประเมินค่าความชื้นของเมล็ดสับดูดา (Posom and Sirisomboon, 2015) ใช้ตรวจสอบปริมาณความชื้นและค่าความร้อนสูงของกระถินยักษ์แบบอัดเม็ด (Posom et al., 2016) รวมไปถึงใช้ในการวิเคราะห์อย่างรวดเร็วของค่าความร้อนสูงและองค์ประกอบของธาตุชีวมวลของข้าวฟ่าง (Zhang et al., 2017) ซึ่งพบว่ามีความถูกต้องและแม่นยำสูง เทคนิคนี้ได้รับการยอมรับในวงกว้างและมีความน่าเชื่อถือและเหมาะที่จะนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมชีวมวล ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยจึงมีความพยายามที่จะทำการวิจัยโดยนำเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้มาใช้ในการตรวจสอบค่าความร้อนของชีวมวลที่ได้มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของพืชเศรษฐกิจในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้มาใช้ในการตรวจสอบค่าความร้อนของชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของพืชเศรษฐกิจในประเทศไทย ประเทศไทย ได้แก่ ฟางข้าว, ชังข้าวโพด, แกลบ, ชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดฟาง, และเหง้ามันสำปะหลัง โดยอ้างอิงจากค่าความร้อนที่วัดด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter และค่าการดูดกลืนคลื่นที่วัดด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เพื่อนำมาตรวจสอบค่าความร้อนของชีวมวลที่ได้มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของพืชเศรษฐกิจในประเทศไทย จำนวน 5 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว, ชังข้าวโพด, แกลบ, ชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดฟางและเหง้ามันสำปะหลัง
2. ศึกษาผลของสัญญาณที่ได้จากเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ที่วัดด้วยเครื่อง FT – NIR Spectrometer ที่ช่วงเลขคลื่น $12,500 - 3,600 \text{ cm}^{-1}$ ด้วยการวัดแบบสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse reflectance) และนำผลของสัญญาณไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความร้อนของชีวมวลแต่ละชนิด ดำเนินการทดลองกับชีวมวลทั้ง 5 ชนิด ชนิดละ 30 ตัวอย่าง และสร้างแบบจำลองของชีวมวลแต่ละชนิดและแบบจำลอง Global model ของพืชทั้ง 5 ชนิด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แบบจำลองจากเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบค่าความร้อนของชีวมวลที่ได้มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของพืชเศรษฐกิจในประเทศไทย

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพืชชีวมวลทั้ง 5 ชนิดที่ใช้เป็นตัวอย่างในการทดลอง เช่น สมบัติของชีวมวลแต่ละชนิด รอบการปลูกและเก็บเกี่ยวพืชเศรษฐกิจและชีวมวลเศรษฐกิจเหล่านั้น พื้นที่เพาะปลูกและผลผลิต การตรวจสอบค่าความร้อนของชีวมวลโดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เป็นต้น

- 2 ทำการทดลองกับตัวอย่างชีวมวลทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว, ชังข้าวโพด, แกลบ, ชี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดฟางและเหง้ามันสำปะหลัง ชนิดละ 30 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 150 ตัวอย่าง โดยการสุ่มตัวอย่างจากหลากหลายพื้นที่ของประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สแกนตัวอย่างชีวมวลทั้ง 5 ชนิด (150 ตัวอย่าง) โดยใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer ที่ช่วงเลขคลื่น $12,500-3,600 \text{ cm}^{-1}$ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ค่าความร้อนโดยใช้ Bomb calorimeter

4 นำข้อมูลทั้งหมดมาสร้างสมการ (Calibration model) ของชีวมวลทั้ง 5 ชนิด ชนิดละ 1 สมการ ด้วยวิธี Partial Least Squares Regression และตรวจสอบความสามารถของสมการทำนาย โดยใช้วิธี Full cross validation โดยพิจารณาความแม่นยำสมการโดยคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการทำนาย (Root mean square error of prediction, RMSEP) และ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias)

5. สร้างสมการ (Calibration Model) รวมของชีวมวลทั้ง 5 ชนิดด้วยวิธี Partial least squares regression และตรวจสอบความสามารถของสมการทำนายโดยใช้วิธี Test set validation โดยสุ่ม 70% ของ 150 ตัวอย่าง (ให้ครอบคลุมค่าที่น้อยที่สุดและมากที่สุด) ไปสร้างสมการทำนาย (Calibration model) จากนั้นการพิสูจน์สมการทำนาย (Validation) โดยใช้ในการดูคลื่นคลื่น (Optical data) 30% ของตัวอย่างที่เหลือจากการสร้างสมการทำนาย (Calibration) แทนค่าไปในสมการดังกล่าวซึ่งจะได้ค่าความร้อนทำนาย จากนั้นวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการและความผิดพลาดในการทำนายโดยเปรียบเทียบกับค่าวัดจริงโดยวิธีมาตรฐานของตัวอย่าง 30% ที่เหลือโดยคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการทำนาย (Root mean square error of prediction, RMSEP) และ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล

2.1.1 พลังงานชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) หมายถึง วัสดุหรือสารที่ได้จากธรรมชาติหรือสิ่งมีชีวิตโดยไม่เน้นการกลายเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายชนิด เช่น ข้าว น้ำตาล มันสำปะหลัง ยางพาราและน้ำมันปาล์ม เป็นต้น

ในอดีตชีวมวลส่วนใหญ่ จะถูกทิ้งซากให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ภายในพื้นที่การเพาะปลูกหรือบางครั้งเกษตรกรกำจัดโดยการเผาทำลาย ซึ่งเป็นการสร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม แต่อันที่จริงแล้วชีวมวลเหล่านี้มีคุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงอย่างดีและให้ค่าพลังงานความร้อนในระดับที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้และเนื่องจากภาวะถดถอยของแหล่งพลังงาน จึงได้มีการเสาะแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพและมีปริมาณที่มากพอ ดังนั้นชีวมวลจึงเป็นเป้าหมายสำคัญที่ถูกพิจารณา เพื่อเป็นทางเลือกของแหล่งพลังงานใหม่

การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อนไอน้ำหรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า ดังนั้นการนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนในท้องถิ่น นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม จะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและไม่สร้างสภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการปลูกทดแทนทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อย สำหรับในประเทศไทยนั้น นอกเหนือจากพลังงานแสงอาทิตย์แล้ว พลังชีวมวลจัดได้ว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการใช้เป็นพลังงานหลักทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554)

2.1.2 องค์ประกอบของสารชีวมวล (คู่มือสารชีวมวลเอเชีย, 2008)

2.1.2.1 ภาพรวมขององค์ประกอบของสารชีวมวล

สารชีวมวลนั้นมีหลากหลายชนิดซึ่งมีองค์ประกอบต่างกัน องค์ประกอบหลักของชีวมวลได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แต่ปริมาณขององค์ประกอบจะแตกต่างกันดังแสดงตารางที่ 2.1 สาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชีวมวลต่างชนิดกัน ย่อมมีองค์ประกอบต่างกัน เช่น ธัญพืชมีแป้งมาก ในขณะที่ของเสียจากปศุสัตว์มีโปรตีนมาก เนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกัน จากทัศนคติของการใช้พลังงานสารชีวมวลที่ประกอบด้วย ลิกโนเซลลูโลส จะประกอบไปด้วยเซลลูโลสและลิกนินจำนวนมากเช่น ต้นไม้

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในวัสดุเหลือใช้หรือกากทางการเกษตร

วัสดุลิกโนเซลลูโลส	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
ซังข้าวโพด ¹	33.6	37.2	19.3
ฟางข้าว ¹	44.3	35.5	20.4
แกลบ ¹	34.4	29.3	19.2
เห้งน้ำมันสำปะหลัง ²	21.5	12.9	21.8
ไม้ยางพารา ³	42.3	34.7	24.0

ที่มา: ¹ Dolly and Radhika (2018)

² Pitcha et al. (2012)

³ รัฐธรรมนูญ และคณะ (2558)

2.1.2.2 องค์ประกอบทั่วไปของสารชีวมวล

เซลลูโลส

โพลีแซคคาไรด์ที่ดิกูโคสถูกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้ากลูโคซิดิกซึ่งมีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{12}O_6)_n$ คือ ดิกรีของโพลิเมอร์โรเซชันซึ่งมีความกว้างตั้งแต่หลายพันจนถึงหลายหมื่นจำนวนผลิตภัณฑ์ของการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสคือ ดิกูโคส (โมโนแซคคาไรด์) แต่บางส่วนให้ผลิตภัณฑ์เป็นไดแซคคาไรด์ (เซลลูไบโอส) และโพลีแซคคาไรด์ซึ่งมีลำดับ $n = 3$ ถึง 10 เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นผลึกและด้านทานต่อกรดและด่าง รูป 2.1-a แสดงโครงสร้างสูตรของเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส

โพลีแซคคาไรด์ซึ่งมีจำนวนยูนิคาร์บอนเท่ากับ 5 โมโนแซคคาไรด์รวมถึง ดีไซโลสและดีอะราไบโนส และ คาร์บอนเท่ากับ 6 โมโนแซคคาไรด์รวมถึง ดีแมนโนส ดิกาแลคโตสและดิกูโคส โมโนแซคคาไรด์ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 5 มีจำนวนมากกว่า โมโนแซคคาไรด์ที่มีคาร์บอนเท่ากับ 6 สูตรโมเลกุลโดยเฉลี่ยคือ $(C_5H_8O_4)_n$ เนื่องจากดิกรีโพลิเมอร์โรเซชันของเฮมิเซลลูโลสเท่ากับ 50 - 200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีขนาดเล็กกว่าเซลลูโลส จึงสามารถสลายพันธะได้ง่ายกว่าเซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลสเป็นจำนวนมากสามารถละลายได้ในสารละลายเบส เฮมิเซลลูโลสทั่วไปคือไซแลน ซึ่งประกอบด้วยไซโลสด้วยพันธะ 1,4 รูป 2.1-c แสดงสูตรโครงสร้างของไซแลน เฮมิเซลลูโลสอื่นๆ ได้แก่ กูโคแมนแนน อย่างไรก็ตามเซลลูโลสทั้งหมดขึ้นกับชนิดและส่วนของพืช

ลิกนิน

สารประกอบที่ประกอบด้วย ยูนิตฟีนิลโพรเพนและอนุพันธ์ ซึ่งเชื่อมกันเป็นสามมิติ โครงสร้างนั้นซับซ้อนและยังไม่มีผลเข้าใจอย่างแท้จริง รูป 2.1-d แสดงยูนิตที่ประกอบกันเป็นลิกนิน โครงสร้างสามมิตินั้นยากที่จะสลายโดยจุลชีพและสารเคมี นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงทางกลและการป้องกันร่วมด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินถูกพบอย่างสากลในสารชีวมวลชนิดต่างๆ และแหล่งคาร์บอนธรรมชาติจำนวนมากมายบนโลก

แป้ง

คล้ายเซลลูโลส แป้งเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยยูนิตของดีกลูโคส แต่ถูกเชื่อมกันโดยพันธะแอลฟาไกลูโคไซด์ เนื่องจากความต่างของโครงสร้างพันธะ เซลลูโลสละลายน้ำ แต่บางส่วนของแป้ง ในรูป 2.1-b จะละลายในน้ำร้อน (อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 10,000 จนถึง 50,000 ประมาณ 10% - 20% ของแป้ง) และบางที่ไม่ละลาย (อะไมโล-18- เพกซิน ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 50,000 ถึง 100,000 ประมาณ 80%-90% ของแป้ง) แป้งถูกพบในเมล็ด ราก และลำต้น ซึ่งถือเป็นอาหาร

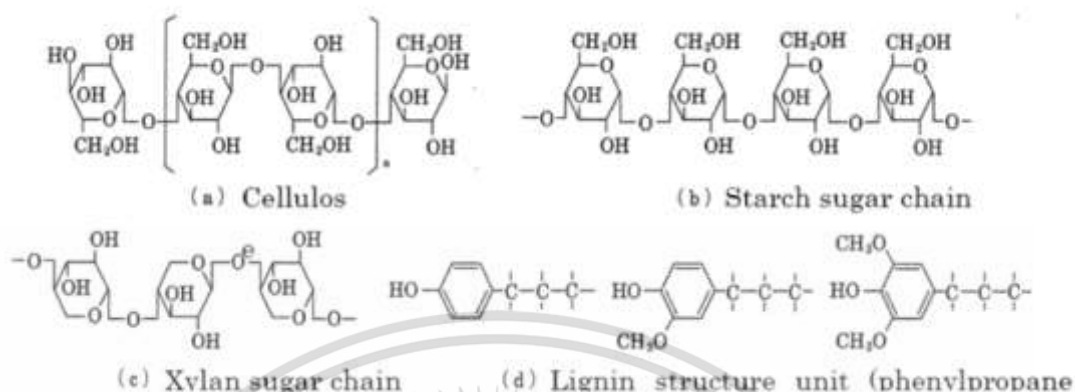
โปรตีน

เป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งกรดอะมิโนหลายตัวถูกโพลีเมอร์ไรซ์เข้าด้วยกัน คุณสมบัติต่างกันขึ้นกับชนิดของกรดอะมิโนและอัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโนและลำดับของโพลีเมอร์ไรเซชัน โปรตีนไม่ใช่สารประกอบพื้นฐานของสารชีวมวลและมีสัดส่วนน้อยกว่าสามสารข้างต้นที่กล่าวมา

สารอื่นๆ (อินทรีย์และอนินทรีย์)

ปริมาณของสารประกอบอินทรีย์อื่นๆมีได้หลากหลายขึ้นกับชนิด สารอินทรีย์ที่มีจำนวนมาก ได้แก่ กลีเซอรอล (ตัวอย่าง เช่น น้ำมันผักกาดก้านขาว น้ำมันปาล์ม และน้ำมันจากพืชชนิดต่างๆ) และซูโครสในอ้อยและต้นบีท ตัวอย่างอื่นๆเช่น อัลคาลอยด์ รงควัตถุ เทอร์ปีน และซีผึ้ง ถึงแม้ว่าจะพบสารเหล่านี้ได้น้อยแต่คุณค่ามากเนื่องจากใช้เป็นส่วนผสมของยาสารชีวมวลนั้นประกอบไปด้วยสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่ แต่ยังประกอบด้วยสารอนินทรีย์เช่นซีเถ้าในจำนวนน้อย หมายเหตุนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะพื้นฐานได้แก่ แคลเซียม โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม เหล็กและโซเดียม สารและปริมาณขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบตั้งต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบหลักของสารชีวมวล

ที่มา: คู่มือสารชีวมวลเอเชีย (2008)

2.1.3 พืชเชื้อเพลิงชีวมวลของประเทศไทย

2.1.3.1 ข้าว

เป็นพืชระยะสั้น ใช้เวลาปลูก 3-4 เดือน มีพื้นที่การเพาะปลูกมากที่สุดประมาณ 69.35 ล้านไร่ (ปี พ.ศ. 2552) ซึ่งถือว่ามากที่สุดในบรรดาพืชทั้งหมด และข้าวก็เป็นพืชที่ต้องการน้ำมากที่สุดเช่นกัน สามารถจำแนกตามลักษณะการปลูกได้ 2 แบบ ได้แก่ ข้าวนาปี และ ข้าวนาปรัง กล่าวคือ ข้าวนาปี คือข้าวที่ปลูกในฤดูฝน ซึ่งมีการเพาะปลูกครอบคลุมทุกภาคในประเทศไทย สามารถเก็บเกี่ยวได้ในช่วงเดือนสิงหาคมถึงเดือนเมษายน และข้าวนาปรัง คือ ข้าวที่ปลูกนอกฤดูฝน ส่วนใหญ่อยู่ในเขตชลประทาน จะเริ่มเก็บเกี่ยวได้ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนตุลาคม เศษวัสดุที่เหลือจากการเกษตรหรือชีวมวลจากข้าว ได้แก่ แกลบ และฟางข้าว (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554)

2.1.3.2 มันสำปะหลัง

เป็นพืชล้มลุกชนิดหนึ่ง ใช้ระยะเวลาการให้ผลผลิตประมาณ 8-13 เดือน ขึ้นอยู่กับพันธุ์ที่ปลูก ปัจจุบันปลูกมากในภาคอีสานตอนใต้และภาคตะวันออก ได้แก่ จังหวัดนครราชสีมา สระแก้ว ชัยภูมิ และกำแพงเพชร เป็นต้น มันสำปะหลังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดขมและชนิดหวาน ซึ่งชนิดขมนิยมปลูกในประเทศ แต่ไม่เหมาะสำหรับการบริโภคโดยตรง เนื่องจากมีกรดไฮโดรไซยานิกสูง เป็นพิษต่อร่างกาย ต้องนำไปแปรรูปเป็นมันอัดเม็ดและมันเส้นซึ่งไปผสมกับหัวมันสดเพื่อลดต้นทุนและใช้เพื่อเลี้ยงสัตว์ เช่น สุกร โคนมและโคเนื้อ หรือนำแป้งมันเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร สำหรับชนิดหวาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนใหญ่ปลูกไว้รอบๆบ้านเพื่อการบริโภค นำมาหนึ่งหรือทอด ชีวมวลจากมันสำปะหลังที่นำมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานได้ ได้แก่ เหง้า และลำต้นของมันสำปะหลัง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554)

2.1.3.3 ข้าวโพด

เป็นพืชล้มลุก ใช้ระยะเวลาปลูกผลผลิต 3-4 เดือน เช่นเดียวกับข้าว ข้าวโพดที่ปลูกในประเทศไทย มี 2 ประเภท คือ ข้าวโพดหวานสำหรับบริโภคโดยตรงและข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สำหรับผสมในอาหารสัตว์ ซึ่งมีสัดส่วนการปลูกมากกว่าข้าวโพดหวานมาก และมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมสัตว์ โดยทั่วไปการปลูกข้าวโพดมี 2 ช่วง รุ่นที่ 1 ปลูกในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม เก็บเกี่ยวผลผลิตอยู่ในช่วงเดือนสิงหาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ รุ่นที่ 2 ปลูกในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคม มีช่วงเก็บเกี่ยวผลผลิตอยู่ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมิถุนายน พื้นที่ส่วนใหญ่ที่เพาะปลูกอยู่ที่ภาคเหนือ ภาคอีสานตอนล่างและภาคกลาง ได้แก่ จังหวัดเพชรบูรณ์ นครราชสีมา ลพบุรี นครสวรรค์ น่าน เลย และตาก เศษวัสดุที่เหลือจากปาล์มที่นำมาใช้ประโยชน์เป็นชีวมวล ได้แก่ ชังและลำต้นข้าวโพด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554)

2.1.3.4 ยางพารา

เป็นไม้ที่ถูกนำมาแปรรูปมากที่สุดในช่วงที่ผ่านมา พื้นที่เพาะปลูกมากกว่า 80% ของพื้นที่ทั้งหมดอยู่ในภาคใต้ ผลผลิตของยางพารา คือ น้ำยาง และเมื่อต้นยางพารามีอายุประมาณ 25-30 ปี การผลิตน้ำยางจะหมดสภาพลง โดยที่ยางพาราที่หมดสภาพเหล่านี้จะถูกโค่นเพื่อนำไม้ยางเข้าสู่กระบวนการแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์ต่อไป ซึ่งการโค่นไม้ยางพารานั้น มักจะทำการโค่นในช่วงฤดูแล้ง (ช่วงเดือนธันวาคมถึงพฤษภาคม) เนื่องจากง่ายต่อการเข้าไปในพื้นที่ โดยจังหวัดที่มีการโค่นไม้ยางพาราสูง ได้แก่ จังหวัดสุราษฎร์ธานี สงขลา ตรัง และนครศรีธรรมราช โดยวัสดุที่เหลือทิ้งในสวนยางพาราประกอบด้วย เนื้อไม้และส่วนปลายยอด กิ่ง ก้านและใบ ตอไม้และรากไม้ ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ เกษตรกรนิยมนำไปเผาทิ้งหรือบางส่วนอาจนำไปเป็นวัตถุดิบเพื่อใช้ในการเผาถ่าน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน , 2554)

2.1.4 ศักยภาพชีวมวล

ผลการประเมินศักยภาพชีวมวลแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 (ผลการประเมินศักยภาพชีวมวลครั้งล่าสุดคือ ปี พ.ศ. 2551 ครั้งต่อมาคือ ปี พ.ศ. 2556 ยังคงอยู่ในกระบวนการประเมิน)

ตารางที่ 2.2 ผลการประเมินศักยภาพชีวมวลปี พ.ศ. 2551

พืช	ผลผลิตต่อปี (ล้านตัน)	ชีวมวล	ปริมาณ	ปริมาณชีว	ศักยภาพ พลังงาน (TJ)
			ชีวมวล เกิดขึ้น (ล้านตัน)	มวลที่ยังไม่มี การใช้ (ล้านตัน)	
ข้าว	32.026	แกลบ	6.73	0.0383	518.29
		ฟางข้าว	15.69	4.6294	57,079.99
มัน สำปะหลัง	25.156	เหง้า	5.03	3.3206	18,230.05
ข้าวโพด	4.249	ซัง	1.02	0.6832	6,572.76
ไม้ยางพารา	0.25	ขี้เลื่อย	0.75	0	-

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554

หมายเหตุ: ผลผลิตต่อปี เป็นปริมาณผลผลิตในปี พ.ศ.2551 ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร

ผลการประเมินศักยภาพชีวมวลปี พ.ศ. 2551 พบว่าชีวมวลบางชนิดไม่เหมาะสมนำมาเป็นพลังงานเนื่องจากความชื้นค่อนข้างสูงและบางชนิดต้องหาวีธีจัดเก็บรวบรวมเพื่อให้ต้นทุนถูกที่สุด เช่น ฟางข้าว และเหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น

2.1.4.1 ข้าว

เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือชีวมวลที่เกิดขึ้นจากการเพาะปลูกข้าว ได้แก่ แกลบ และ ฟางข้าว หากพิจารณาเฉพาะชีวมวลจากข้าว สามารถสรุปรายละเอียดได้โดยข้อมูลผลผลิตทางการเกษตรในปีเพาะปลูก พ.ศ. 2551 มีแกลบเกิดขึ้นประมาณ 6.73 ล้านตัน คิดเป็น 21% ของผลผลิตข้าวทั้งหมด และมีฟางเกิดขึ้น 15.69 ล้านตัน คิดเป็น 49% ของผลผลิตข้าวทั้งหมด และคาดว่าจะมีปริมาณฟางข้าวประมาณ 4.63 ล้านตันต่อปี คิดเป็นศักยภาพพลังงานเท่ากับ 57,080 TJ

ศักยภาพแกลบที่เกิดขึ้น ณ ปัจจุบัน ส่วนใหญ่นั้นมักจะนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมทำกระดาษ เป็นต้น เนื่องจากมีราคาถูกเมื่อเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา ที่มีแนวโน้มด้านราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้แกลบเป็นที่น่าสนใจของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ อีกทั้งเมื่อเผาไหม้แล้วเถ้าที่เกิดขึ้นยังสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมในการผลิตสารกึ่งตัวนำอีกด้วย ฉะนั้นปริมาณแกลบที่จะเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือชีวมวลมีเพียง 38,423 ตันต่อปี หรือคิดเป็นศักยภาพพลังงานเท่ากับ 519.47 TJ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.2 มັນสำปะหลัง

ชีวมวลที่ได้จากมันสำปะหลังสามารถจำแนกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรก เหน้งมันสำปะหลัง และส่วนที่สองคือ ลำต้น ยอด และใบ ซึ่งจากข้อมูลในปี พ.ศ. 2551 มีปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังทั้งประเทศอยู่ที่ 25.15 ล้านตัน จะมีปริมาณวัสดุเหลือใช้ที่เกิดขึ้นจากมันสำปะหลัง (เหน้งมันสำปะหลัง) เกิดขึ้นประมาณ 5.03 ล้านตัน คิดเป็น 20% ของผลผลิตมันสำปะหลังทั้งหมดและคาดว่าจะมีปริมาณเหน้งเหลือทิ้งประมาณ 3.32 ล้านตันต่อปี มีศักยภาพพลังงานประมาณ 18,230.05 TJ ในส่วนของลำต้นของมันสำปะหลังมีปริมาณเฉลี่ยอยู่ที่ 2.26 ล้านตันต่อปี มีศักยภาพพลังงานประมาณ 14,356.63 TJ เนื่องจากส่วนใหญ่ลำต้นจะนำไปใช้เป็นตอพันธุ์

2.1.4.3 ข้าวโพด

ชีวมวลที่ได้จากข้าวโพดสามารถจำแนกออกเป็น 2 ส่วน คือ ชังข้าวโพด และ ส่วนของลำต้น ยอดและใบ ซึ่งจากข้อมูลในปีเพาะปลูก พ.ศ. 2551 มีปริมาณผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ทั้งประเทศ 4.249 ล้านตัน จะมีปริมาณวัสดุเหลือใช้ที่เกิดขึ้นจากข้าวโพด คือ ชังข้าวโพด เกิดขึ้นประมาณ 1.02 ล้านตัน คิดเป็น 24% ของผลผลิตข้าวโพดทั้งหมด และคาดว่าจะเหลือใช้ประมาณ 0.683 ล้านตัน คิดเป็นศักยภาพพลังงานเท่ากับ 6,572.76 TJ

2.1.4.4 ยางพารา

วัสดุที่เหลือทิ้งจากการโค่นไม้ยางพารา ได้แก่ รากไม้ยางพาราและกิ่งไม้เล็กๆ ซึ่งเหลือในพื้นที่ปลูกยางพาราประมาณ 40% ของปริมาณต้นยางพาราทั้งหมด แต่ยากในการเก็บรวบรวมเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นเกษตรกรจึงนิยมเผาทิ้งหรือบางส่วนเอานำกิ่งไม้เล็กๆ ที่พอรวบรวมได้ไปเป็นวัตถุดิบในการเผาถ่าน

สำหรับวัสดุที่เหลือจากการแปรรูปไม้ยางพารา อาทิ ปีกไม้ ไม้เลื้อยหรือซีกบ จะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานแปรรูปเอง และบางส่วนถูกนำไปจำหน่ายเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือนำไปทำเป็นไม้อัดและเผาถ่าน ดังนั้น ศักยภาพที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นไปได้น้อยมาก ส่วนที่เหลือทิ้งในสวนยางพารา เนื้อไม้ยางพาราจำพวกกิ่งไม้ รากไม้ สามารถประเมินคงเหลือที่นำมาใช้ได้ประมาณ 0.986 ล้านตัน แต่ค่อนข้างยากต่อการเก็บรวบรวม ดังนั้นสามารถประเมินศักยภาพพลังงานได้ประมาณ 6,478.90 TJ

2.1.5 สมบัติของชีวมวล

สมบัติที่สำคัญของชีวมวล (Properties of Biomass Sources) ถือเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับผู้ที่สนใจในการนำชีวมวลที่ตนมีมาแปลงเป็นพลังงาน เนื่องจากสมบัติเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยในการเลือกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการแปลงชีวมวลเป็นพลังงาน (Conversion process) และบ่งบอกความยากง่ายของการนำชีวมวลที่มีมาแปลงเป็นพลังงานในแต่ละกระบวนการ เพื่อเลือกกระบวนการแปลงชีวมวลเป็นพลังงานที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสมบัติที่สำคัญของชีวมวล ได้แก่ ค่าความชื้น (Moisture Content) ในชีวมวล, ค่าความร้อน (Calorific Value), สัดส่วนของคาร์บอนคงที่และสารระเหย (Proportion of Fixed Carbon and Volatile), สัดส่วนเถ้า (Ash/Residue Content), สัดส่วนโลหะอัลคาไล (Alkali metal), อัตราส่วนเซลลูโลส/ลิกนิน (Cellulose/Lignin Ratio) และ ขนาดและความหนาแน่นรวม (Size and bulk density)

ชีวมวลแต่ละประเภทจะให้พลังงานจากการเผาไหม้แตกต่างกัน ตามลักษณะองค์ประกอบต่างๆ ของชีวมวลแต่ละชนิด และสัดส่วนความชื้นที่สะสมอยู่ในชีวมวล โดยสมบัติของชีวมวลที่เป็นพืชหลักและศักยภาพในการนำมาใช้สำหรับประเทศดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.3 สมบัติของชีวมวล

พืช	ชีวมวล	ค่าความร้อนต่ำ (kJ/kg)	ความชื้น (%)
ข้าว	แกลบ	14,204	8.20
	ฟางข้าว	12,330	10.00
มันสำปะหลัง	เหง้า	5,494	59.40
ข้าวโพด	ชัง	16,220	7.00
ไม้ยางพารา	ขี้เลื่อย	8,600	45.00

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554

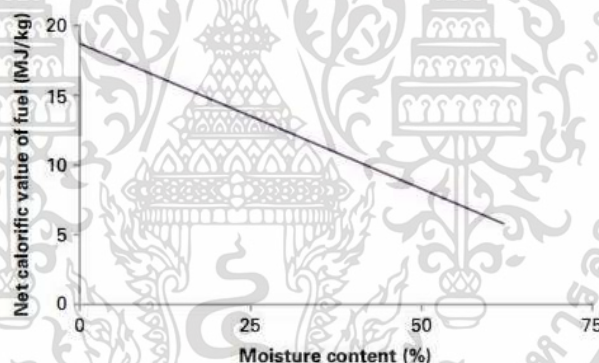
2.2 ค่าความร้อน (Calorific Value)

2.2.1 ค่าความร้อน (นิรนาม, 2560a)

เป็นปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยอากาศ (Combustion) ของชีวมวลแต่ละชนิด โดยทั่วไปค่าความร้อนจะแสดงในรูปของปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักหรือหนึ่งหน่วยปริมาตร ยกตัวอย่างเช่น MJ/kg สำหรับของแข็ง, MJ/CM (ลูกบาศก์เมตร) สำหรับของเหลว และ MJ/N.CM (ลูกบาศก์เมตรปกติ, Normal Cubic meter) สำหรับก๊าซ (อ้างอิงที่ อุณหภูมิ 0 °C และความดัน 1.01325 bar) เป็นต้น

2.2.2 ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูง-ต่ำ

สารชีวมวลประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เมื่อถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะให้น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและไอน้ำที่ได้จากการเผาไหม้จะมีปริมาณความร้อนแฝงมากและความร้อนจะถูกปล่อยออกเมื่อเกิดการควบแน่น ค่าความร้อนสามารถอ้างอิงได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ ค่าความร้อนสูง (Higher heating value: HHV) และ ค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value: LHV) HHV นี้คือค่าความร้อนสูงสุดของชีวมวลนั้น ๆ เป็นค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้และรวมกับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำของความชื้นที่อยู่ในชีวมวลนั้น ๆ ฉะนั้นค่า HHV นั้นไม่ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นที่อยู่ในชีวมวล ส่วน LHV คือ ค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ชีวมวล ซึ่งค่าความชื้นจะมีผลโดยตรงกับค่า LHV นี้ (หรือก็คือ ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ที่รวมค่าความร้อนแฝงคือ ค่าความร้อนสูง ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ที่หักค่าความร้อนแฝงออกคือ ค่าความร้อนต่ำ นั่นเอง) ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนของชีวมวล และค่าความชื้นของชีวมวล ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนและค่าความชื้นของชีวมวล

ที่มา: The carbon trust (2012)

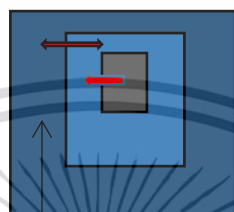
2.2.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อน (นิรนาม. 2561a)

การวิเคราะห์ค่าความร้อนแบบ Bomb calorimeter เป็นการวัดค่าความร้อนด้วยบอมบ์แคลอริมิเตอร์ ซึ่งเป็นการวัดความร้อนที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยออกซิเจน น้ำเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาการเผาไหม้ ค่าความร้อนที่ได้จึงเป็นค่าความร้อนสูง ซึ่งค่าความร้อนสูงรวมค่าพลังงานที่ปลดปล่อยโดยการควบแน่นของน้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงตอนเริ่มต้นและน้ำที่เกิดจากไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง แต่ในงานวิจัยนี้ค่าความร้อนที่ได้เป็นค่าความร้อนสูงของชีวมวลที่ผ่านการทำแห้งแล้ว ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนต่ำ โดยการวิเคราะห์ค่าความร้อนแบบ Bomb calorimeter แบ่งออกเป็น 3 ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.1 Isoperibol Calorimeter

ในการวัดแบบ Isoperibol Calorimeter อุณหภูมิของเวสเซล (Vessel) ด้านนอกจะถูกทำให้คงที่ตลอดการทดลอง ถึงแม้ว่าอุณหภูมิของเวสเซลด้านนอกจะถูกทำให้คงที่แต่ไม่ได้หมายความว่าระบบจะถูกแยกออกอย่างสมบูรณ์ ยังคงมีอุณหภูมิเล็กน้อยแลกเปลี่ยนกันระหว่างเวสเซลด้านในและด้านนอก ควรรักษาอุณหภูมิห้องด้วยเครื่องปรับอากาศที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลองน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ปัจจัยการคลาดเคลื่อนเหล่านี้จะถูกคำนวณหักลบหลังจากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.3



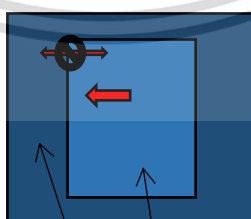
$$T_{ov} = \text{const.}$$

รูปที่ 2.3 Isoperibol Calorimeter

ที่มา: ยุทธภักดิ์ และคณะ (2560)

2.2.3.2 Adiabatic Calorimeter

ในการวัดแบบ Adiabatic Calorimeter อุณหภูมิของเวสเซลด้านนอกจะมีอุณหภูมิเดียวกับเวสเซลด้านในตลอดการทดลอง จึงทำให้ใกล้เคียงกับการแยกระบบออกจากสิ่งแวดล้อมได้สมบูรณ์ ถึงแม้ว่าอย่างไรก็ตามยังต้องรักษาอุณหภูมิห้องด้วยเครื่องปรับอากาศที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลองน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ไม่มีปัจจัยการคลาดเคลื่อนที่ถูกคำนวณหักลบหลังจากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.4



$$T_{ov} = T_{iv}$$

รูปที่ 2.4 Adiabatic Calorimeter

ที่มา: ยุทธภักดิ์ และคณะ (2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.3 Dynamic IKA Calorimeter

ขั้นตอนการวัดนี้ไม่มีหลักการจริง การวัดแบบนี้ถูกออกแบบมาสำหรับความต้องการเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เร็วกว่าแต่ยังคงมาตรฐานเหมือนการวัดในสองแบบแรก สรุปคือการใช้การวัดแบบ Dynamic IKA Calorimeter เป็นการทอนการวัดให้มีระยะเวลาสั้นลงแต่ยังคงมาตรฐานเหมือนการวัดแบบปกติ

2.2.4 หลักการทำงานของเครื่อง Bomb Calorimeter

การทำงานของ Bomb Calorimeter จะใช้หลักการของ direct calorimetry ซึ่งเป็นการวัดปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อการผลาญชีวมวลเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ชีวมวลจะถูกบรรจุใน chamber และ charged ด้วยออกซิเจนภายใต้ความดันสูง (high pressure) จากนั้นให้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนผ่าน fuse และทำให้เกิดการจุดระเบิด (ignites) เชื้อเพลิงซึ่งได้แก่ส่วนผสมของชีวมวลและออกซิเจน (biomass-oxygen mixture) เนื่องจาก calorimeter จะถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกัน ไม่ให้ความร้อนถ่ายเทออกไปสู่สภาวะแวดล้อม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำทำให้ทราบปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยจากชีวมวล

การคำนวณหาปริมาณความร้อนโดยใช้สูตร

$$Q = mC_p\Delta t \quad (2.1)$$

Q คือ ปริมาณความร้อน (kJ)

m คือ มวลของสาร (kg)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะ (J/kg K)

Δt คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (K)

เนื่องจากการคำนวณปริมาณความร้อนนี้เป็นปริมาณความร้อนที่น้ำได้รับและค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่าเป็น 4.187 kJ/kg K

2.3 ความชื้นในพืช (นิรนาม, 2560b)

นำวัตถุดิบที่ต้องการหาค่าความชื้นมาซึ่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่าไว้เป็นน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น จากนั้นจึงนำมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C จนกระทั่งน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงจากนั้นบันทึกค่าไว้เป็นน้ำหนักของตัวอย่างแห้งแล้ว โดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่

ความชื้นฐานเปียก (wet basis) เป็นค่าความชื้นที่มักใช้ในทางการค้า เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ความชื้นโดยทั่วไปในชีวิตประจำวัน สามารถคำนวณหาได้โดยใช้สมการ

$$\% \text{ความชื้นฐานเปียก} = \left(\frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

ความชื้นฐานแห้ง (dry basis) เป็นค่าที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง เพราะช่วยให้คำนวณได้สะดวก เนื่องจากน้ำหนักแห้งของตัวอย่างจะคงที่ สามารถคำนวณหาได้โดยใช้สมการ

$$\% \text{ความชื้นฐานแห้ง} = (\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}) \times 100 / \text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} \quad (2.3)$$

2.4 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR Spectroscopy) (ปานมนัส, 2556)

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near infrared spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการอันตรกิริยา (interaction) เมื่อคลื่นอินฟราเรด (ความยาวคลื่นระหว่าง 700-2500 nm ที่ส่องไปยังวัสดุ เช่น ผลิตผลทางการเกษตรและอาหาร จะเกิดการสั่นสะเทือนของพันธะทางเคมีอันเนื่องมาจากการยึดและการงอ โดยเฉพาะ O-H, C-H และ N-H จากการดูดซับคลื่น ซึ่งระดับพลังงานจะเปลี่ยนระดับมากกว่า 1 ระดับ (Overtone) หรือสั่นสะเทือนข้ามขั้นแรก (Fundamental vibration) ของพันธะตั้งแต่ 2 พันธะขึ้นไป เป็นผลรวมของการสั่นสะเทือน (Combination vibration) เครื่องมือที่ใช้คือ สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) มีแหล่งแสงที่ให้ช่วงคลื่นเนียร์อินฟราเรด

สำหรับการตรวจวัด (Detector) ภายในเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ จะมีส่วนที่ไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับช่วงคลื่นที่ต้องการตรวจวัด เช่น ช่วงคลื่น 350-1100 nm ใช้ Si (Silicon) ช่วงคลื่น 1100-2500 nm ใช้ PbS (Lead Sulphide) หรือ InGaAs (Indium Gallium Arsenide) ช่วงแสงที่มองเห็นได้ และช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ (400-2600 nm) ใช้ PbS ควบคู่ (Sandwiched) กับ Silicon photodiodes วิธีการจัดการเพื่อการสแกนด้วยสเปกโตรมิเตอร์ ทำได้หลากหลายวิธี เช่น การสะท้อน (Reflectance) วิธีที่ง่ายต่อการจัดวางตัวอย่าง แสงจะส่องไปยังวัสดุแล้วจะแพร่ลงในเนื้อบางส่วนของวัสดุจะสะท้อนกลับมาสู่ตัวตรวจวัด ซึ่งมีแหล่งของแสงส่องและตัวตรวจวัดที่ด้านล่าง อาจเรียกว่า การสะท้อนแบบแพร่ (Diffused reflectance) ปัจจุบันใช้สายไฟออปติคซึ่งมีความสะดวกมากกว่า การวัดจึงเป็นแบบการสะท้อนกลับด้วยหัววัดชนิดไฟเบอร์ออปติค หรือ แบบ Interactance โดยสายไฟเบอร์ออปติคจะเป็นตัวนำคลื่นที่สะท้อนออกมาส่งกลับไปให้ตัวตรวจวัด ซึ่งอยู่ใกล้เคียงเรียกว่า Interactance-Reflectance และวิธีส่องผ่านคลื่นไปในตัวอย่าง ก่อนรับแสงที่ผ่านออกมาจากวัสดุไปวิเคราะห์ เรียก วิธีส่องผ่าน (Transmittance) วิธีที่นิยมใช้กับของเหลวและสามารถใช้ได้กับวัสดุของแข็งได้บางชนิด เช่น กรณีของผลไม้ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้วิธีแบบสะท้อนให้เป็นวิธีแบบส่องผ่าน คือ FQA NIR GUN ซึ่งใช้ Gold cup และยังมีกรวัดแบบส่องผ่านสะท้อน (Transflectance) การให้คลื่นส่องผ่านวัสดุ ปกติจะใช้ของเหลวโดยของเหลวจะอยู่ในภาชนะทำด้วยอะลูมิเนียมตันๆ เมื่อคลื่นกระทบพื้นอะลูมิเนียมจะสะท้อนผ่านวัสดุตัวอย่างขึ้นมาเข้าสู่ตัว

ตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินฟราเรดย่านใกล้จะอยู่ในช่วงรังสีอินฟราเรด โดยมีตำแหน่งติดกับรังสีอินฟราเรดกลาง และรังสีวิสิเบิล (Visible light) มีช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 700 ถึง 2,500 nm ($14,300-4,000\text{ cm}^{-1}$) ช่วงคลื่นอินฟราเรด (IR) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การแบ่งช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด

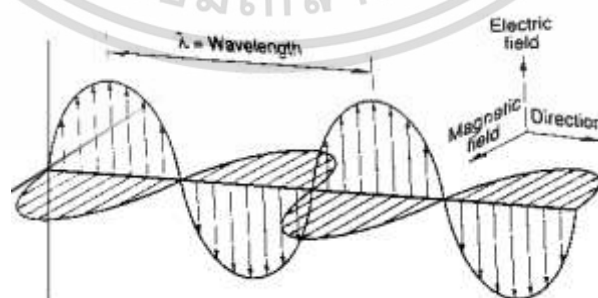
ช่วงคลื่น	ช่วงความยาวคลื่น (nm)	จำนวนคลื่น (cm^{-1})
อินฟราเรดย่านใกล้ (Near IR, NIR)	700-2,500	14,300-4,000
อินฟราเรดกลาง (Mid IR or fundamental IR)	2,500-50,000	4,000-200
อินฟราเรดย่านไกล (Far IR)	50,000-1,000,000	200-10

ที่มา: Osborne et al. (1993)

2.4.1 สเปกโทรสโกปี

สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) เป็นวิชาว่าด้วยการวัดและวิเคราะห์รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ซึ่งสสารดูดกลืนเข้าไปหรือเปล่งออกมา ดังนั้นก่อนที่จะเข้าสู่หลักการของ สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ จึงต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเสียก่อน

รังสีแม่เหล็กไฟฟ้ามีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่นและอนุภาค เมื่อพิจารณารังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบคลื่น จะมีลักษณะเป็น Sine wave ที่ประกอบด้วย 2 ส่วนตั้งฉากกัน คือ ส่วนที่มีสมบัติไฟฟ้า (Electric component) และส่วนที่มีสมบัติแม่เหล็ก (Magnetic component) ดังรูปที่ 2.5 ด้วยคุณสมบัติที่เป็นคลื่นจึงสามารถเกิดปรากฏการณ์เกี่ยวกับการสะท้อน (Reflection) การหักเห (Refraction) การเลี้ยวเบน (Diffraction) หรือการกระเจิง (Scattering) ได้ (ศุมาพร, 2550)



รูปที่ 2.5 ลักษณะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: คณิง และคณะ (2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านเข้าไปยังสาร จะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับอะตอมและโมเลกุลของสารนั้น รังสีบางส่วนจะถูกดูดกลืน (Absorb) บางส่วนจะสะท้อนกลับ (Reflect) บางส่วนอาจส่องผ่าน (Transmit) หรือมีการกระเจิง (Scatter) ปრაกฏการณ์เหล่านี้จะเกิดเพียงอันใดอันหนึ่งหรือเกิดพร้อมๆ กันได้ เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลเกิดอันตรกิริยา จะเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานในรูปแบบต่างๆ ซึ่งจะขึ้นกับพลังงานของช่วงรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดอันตรกิริยาด้วย

2.4.2 หลักการพื้นฐานของสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

อินฟราเรดย่านใกล้ เป็นคลื่นแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีหลักการดังนี้คือเมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ แล้วสารเกิดการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง NIR ทำให้โมเลกุลของสารเกิดการสั่นที่ความถี่สูง ในการสั่นของพันธะต่างๆ จะเกิดขึ้นที่ช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกันซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละพันธะรวมทั้งตำแหน่งของโมเลกุลและช่วงการดูดกลืนแสงก็เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชันด้วย ดังนั้นเมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตรงกับพันธะในโมเลกุลก็จะเกิดการสั่นและดูดกลืนรังสีไว้ ทำให้มีพลังงานมากกว่าปกติ จากเดิมที่โมเลกุลอยู่ในสภาวะพื้น (Ground vibration level) เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited vibration level) อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลกลับสู่สภาวะพื้นก็จะปล่อยพลังงานที่รับเพิ่มเข้าไปออกมาในรูปพลังงานความร้อน พลังงานของคลื่นแสงเมื่อผ่านเข้าไปในตัวอย่าง พลังงานจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง ความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีนั้น สารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้จะมี H-atom เป็นองค์ประกอบ เช่น O-H พบในแป้ง น้ำ น้ำตาล N-H พบในโปรตีน C-H พบในน้ำมัน

2.4.3 การทำงานของเครื่อง NIR spectrometer

เครื่อง NIR spectrometer ทำงานโดยอาศัยการดูดกลืนพลังงานแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของสารแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ส่วนใหญ่จำเป็นที่จะต้องมีความสามารถในการแยกลำแสงออกเป็นทีละความยาวคลื่นได้ เพื่อที่จะใช้แสงความยาวนั้นส่องไปยังตัวอย่างและวัดค่าความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมา เปรียบเทียบกับความเข้มของแสงที่ส่องเข้าไป (Reflectance type) หรือวัดความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มของแสงที่ส่องเข้าไป (Transmittance type) กระทำแบบนี้ทีละความยาวคลื่นและนำค่าความเข้มแสงที่ได้ในแต่ละความยาวคลื่นมาเขียนกราฟโดยให้แกนนอนเป็นค่าความยาวคลื่น แกนตั้งเป็นค่าการดูดกลืนแสง จะได้กราฟการดูดกลืนแสงหรือสเปกตรัมการดูดกลืนของแสงของตัวอย่างนั้นๆ ข้อมูลที่ได้นำไปวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

2.4.4 เทคนิคในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

Transmission เป็นการวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมาในด้านตรงกันข้ามกับด้านที่แสงตกกระทบ

Reflection แสงตกกระทบที่พื้นผิวของตัวอย่าง วัดปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาโดยรวมถึงแสงที่สะท้อนจากเนื้อตัวอย่างส่วนที่ใกล้ผิวตัวอย่างได้อีกด้วย

Transflection แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบตัวอย่าง ผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบแผ่นเซรามิก ทอง หรืออะลูมิเนียมในชั้นใต้สุด แล้วสะท้อนกลับมายังตัว detector

Interaction ใช้ในกรณี fiber optics probe แสงจากแหล่งกำเนิดแสงย่าน NIR ส่งผ่านลงมายังตัวอย่างในวงแหวนด้านนอกแล้วแสงที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างถูกส่งไปยังตัว detector บริเวณส่วนกลาง fiber optics probe

รูปที่ 2.6 รูปแบบการวัดดูดกลืนแสง

ที่มา: ศุมาพร (2545)

2.5 การเลือกวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น (Selecting the Data Preprocessing Model Method) ปานมนัส ศิริสมบุญ และคณะ. (2556)

วิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้นเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่สำคัญ ที่มีจุดประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองของสเปกตรัมในทางที่อัลกอริธึม PLS สามารถให้ความสัมพันธ์ที่ตรงระหว่างสเปกตรัมกับข้อมูลความเข้มข้น

ไม่มีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น: ไม่มีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น

2.5.1 การลบโดยค่าคงที่ (Subtraction of a Constant Offset): สเปกตรัมจะถูกปรับแบบเชิงเส้นเพื่อให้ค่า Y ที่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับศูนย์

การใช้งาน: เป็นการกำจัดปัญหาการขยับขึ้นของเบสไลน์ (Baseline Shift) เชิงเส้น สิ่งเหล่านี้เกิดจาก เช่น จากค่าที่แตกต่างกันของการขยายสัญญาณของที่แคบเตอร์ (Detector Amplification)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การลบโดยเส้นตรง (Subtraction of a Straight Line): ในแต่ละช่วงความถี่ที่เลือกไว้เส้นตรงหนึ่งจะถูกพิกเส้นสเปกตรัมโดยใช้วิธี partial least squares (PLS) เส้นตรงเส้นนี้จะถูกลบออกจากสเปกตรัมดังกล่าว

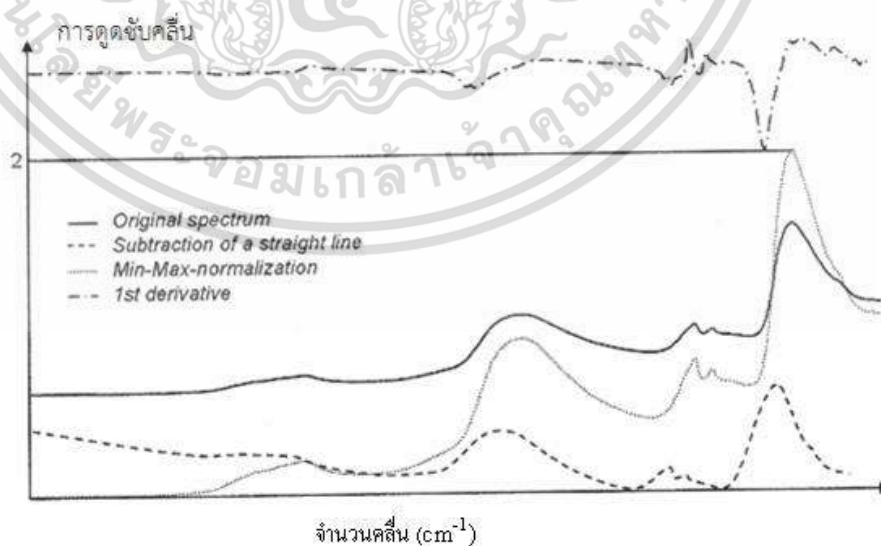
การใช้งาน: กำจัดปัญหาความเอียงเชิงเส้นของการขยับขึ้นของเบสไลน์ (ดูรูปที่ 2.7)

2.5.3 Vector Normalization: ชั้นแรกสเปกตรัมจะถูกหาค่ากลาง จากนั้นผลรวมของค่า ยกกำลังสองของค่า Y ทั้งหมดจะถูกคำนวณ และสเปกตรัมใดๆจะถูกหารด้วยค่ารากที่สองของผลรวมนี้ สิ่งนี้เรียกว่า vector norm ของสเปกตรัมที่ได้จะเท่ากับ 1 เสมอ

การใช้งาน: ในหลักการสเปกตรัมจะประกอบด้วยสองส่วนของข้อมูล คือความสูงของแถบการดูดซับ และโครงสร้าง หลังจากการนอร์มัลไลเซชัน (Normalization) ข้อมูลความสูงจะหายไป มีเพียงโครงสร้างข้อมูลยังคงอยู่ การนอร์มัลไลเซชัน (Normalization) ถูกใช้เพื่อ เช่น การกำจัดผลกระทบของเส้นทางผ่านเชิงแสง (Optical Path Length) ที่แตกต่างกันในกรณีของการวัดแบบส่องผ่าน ความยาวของเส้นทางผ่านเชิงแสงทำให้ความสูงของสัญญาณเปลี่ยนแปลง แต่โครงสร้างยังเหมือนเดิม ในทำนองเดียวกันการวัดแบบสะท้อนแบบแพร่ จะมีผลกระทบของการรบกวนเนื่องจากความหนาแน่นของวัสดุแตกต่างกันหรือขนาดอนุภาคแตกต่างกัน สิ่งเหล่านี้จะลดลง

2.5.4 Min-Max-Normalization (สำหรับสเปกตรัมการดูดซับ): สเปกตรัมจะถูกขยับเชิงเส้นเพื่อให้ค่า Y ที่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับศูนย์ แล้วสเปกตรัมจะถูกขยายเพื่อให้ค่า Y สูงสุดเท่ากับสองหน่วยของการดูดซับคลื่น (รูปที่ 2.7)

การใช้งาน: เทียบกับ Vector Normalization



รูปที่ 2.7 NIR สเปกตรัมของมือคน: วัดแบบการสะท้อนแบบแพร่

ที่มา: Jörg-Peter Conzen. (2006)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 Multiplicative Scatter Correction: ขั้นตอนแรก สเปกตรัมเฉลี่ยคำนวณจาก ทุกๆสเปกตรัมของชุดข้อมูลคาลิเบรชัน แล้วแต่ละสเปกตรัม $X(i)$ จะถูกแปรเปลี่ยนไปตาม

$$X(i) = u + v \cdot X(i)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ u และ v จะถูกเลือกเพื่อให้มีความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงแล้ว $X(i)$ กับสเปกตรัมเฉลี่ยน้อยที่สุด

การใช้งาน: วิธีการนี้มักจะใช้สำหรับการวัดแบบการสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse reflection)

2.5.6 อนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First Derivative): คำนวณอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของสเปกตรัม (รูปที่ 2.7)

การใช้งาน: โดยการคำนวณอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่ง สัญญาณที่มีความชันจะถูกเน้นมากกว่าสัญญาณที่ค่อนข้างแบนราบ วิธีนี้จะถูกใช้เน้นลักษณะชัดเจน แต่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่มีแถบการดูดซับคลื่นที่กว้าง การประยุกต์ใช้ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การประเมินแถบการดูดซับคลื่นที่กว้างนี้ มักจะทำในเทคโนโลยี NIR โดยการคำนวณอนุพันธ์ โครงสร้างเหล่านี้จะมีรูปร่างที่สูงชันขึ้น ซึ่งสามารถได้รับการประเมินได้ง่ายขึ้น

เมื่อใช้อนุพันธ์เป็นการจัดการข้อมูลเบื้องต้น จะต้องคำนึงถึงว่าสัญญาณรบกวนจะถูกจัดการเช่นกัน สิ่งนี้จะซ้อนทับบนสเปกตรัมเป็นสิ่งรบกวนเพิ่มเติม และสามารถทำให้สัญญาณของตัวอย่างเลวลง

2.5.7 อนุพันธ์อันดับสอง (Second Derivative): คำนวณอนุพันธ์อันดับสองของสเปกตรัม นั้น

การใช้งาน: เมื่อเทียบกับอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง แม้โครงสร้างที่ราบเรียบมากๆ สามารถประเมินได้ ผลการรบกวนของสัญญาณรบกวน ซึ่งโดยทั่วไปมีมากจนทำให้สเปกตรัมถูกวิเคราะห์ในช่วงสเปกตรัมที่จำกัดมากๆ รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นอิทธิพลของวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้นแบบต่างๆ ต่อลักษณะของ NIR-สเปกตรัม (การวัดมือคนด้วยหัววัดไฟเบอร์ออปติก) สเปกตรัมเดิมแสดงให้เห็นการขจัด (Offset) เล็กน้อยของเบสไลน์ เช่นเดียวกับการขยับขึ้น (Drift) การขยับขึ้นนี้สามารถถูกกำจัดโดยการลบออกจากเส้นตรง (Subtraction of a Straight Line) (เส้นประ) และการขจัดถูกกำจัดโดยการ Min-Max Normalization (เส้นจุด) อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของเส้นสเปกตรัมเดิม (เส้นประ-จุด) ถูกขยายเพื่อแสดงให้ดูง่ายและขยับขึ้นสู่ตำแหน่งที่ค่าการดูดซับคลื่นสูง สามารถสังเกตเห็นโครงสร้างที่แหลมขึ้นมาได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมเดิมวิธีที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับระบบที่วิเคราะห์ จากประสบการณ์แสดงให้เห็นว่าในหลายกรณีการลบด้วยเส้นตรง การนอมนัลไลเซชันสเปกตรัม หรือการทำอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งได้ผลที่ดีที่สุดในการคาลิเบรชัน ในบางกรณีการใช้วิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น 2 วิธี รวมกันก็ได้ผลดีที่สุดเช่นกันบ่อยครั้งที่แบบจำลองแบบต่างๆให้ผลได้ดีเท่าเทียมกันซึ่งโดยทั่วไปควรทดสอบดูหลายๆวิธีเปรียบเทียบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การเลือกจำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสม (Selecting the Appropriate Number of Factors) (ปานมนัสและคณะ, 2556)

ใน PLS Regression ข้อมูลสเปกตรัมและข้อมูลความเข้มข้นจะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นรูปแบบของเมทริกและลดลงเป็นแฟคเตอร์จำนวนไม่มาก จำนวนแฟคเตอร์ ในแบบจำลองเคโมเมตริกจะถูกเรียกว่า “rank” การหาจำนวน rank มีความสำคัญกับคุณภาพในการวิเคราะห์

การเลือกจำนวนแฟคเตอร์ที่น้อยเกินไปจะนำไปสู่การอธิบายที่ไม่เพียงพอเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงในข้อมูลสเปกตรัมและความเข้มข้น (“under fitting”) มีเพียงความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อย ระหว่างสองชุดข้อมูลและผลจากการวิเคราะห์จากแบบจำลองนี้จะไม่เพียงพอ ถ้าเลือกแฟคเตอร์จำนวนมากเกินไปแบบจำลองจะพยายามที่จะคิดรวมแม้การเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดในชุดข้อมูล เช่นสัญญาณรบกวนในสเปกตรัม (“over fitting”) วิธีนี้ข้อมูลสเปกตรัมที่ไม่เกี่ยวข้องกับตัวอย่างจะถูกวมอยู่ในแบบจำลอง แบบจำลองเหล่านี้จะมีความผิดพลาดของผลการวิเคราะห์ ดังนั้นทุกๆ แบบจำลอง PLS มีจำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งรับประกันว่ามีความผิดพลาดน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ในการวิเคราะห์

มีแนวทางหลายอย่างนำไปสู่การหาจำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองางอย่าง เป็นค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของการทำนาย (RMSECV ของการพิสูจน์แบบไขว้หรือ RMSEP ของการพิสูจน์แบบชุดทดสอบ) ต้องมีค่าต่ำสุดจึงจะได้จำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสม ในทางตรงข้ามค่าของสัมประสิทธิ์ของการพิจารณา R^2 มีค่าสูงสุด ดังนั้นจำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองสามารถหาได้อย่างง่ายดาย: ขั้นที่ 1 คำนวณค่า R^2 และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการทำนายจากนั้นพล็อตค่าเหล่านี้ โดยให้แกนนอนเป็นจำนวนแฟคเตอร์ จำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อมีค่าตามทีกล่าวมามีค่าที่เหมาะสม (น้อยสุด) และ/ หรือจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีจำนวนแฟคเตอร์สูงขึ้น ถ้ามีจำนวนแฟคเตอร์ที่มากและได้ผลการทำนายที่ดีเหมือนกับที่มีจำนวนแฟคเตอร์น้อย จะแนะนำให้เลือกแบบจำลองที่มีจำนวนแฟคเตอร์น้อยสุด

ข้อจำกัด: การพิสูจน์วิธีการเป็นไปได้เฉพาะการใช้สเปกตรัมของชุดตัวอย่างที่เป็นอิสระ นั่นคือสเปกตรัมต้องไม่เป็นส่วนหนึ่งของชุดข้อมูลคาลิเบรชัน ซึ่งถ้าเป็นการพิสูจน์แบบไขว้ตัวอย่างทั้งหมดที่ถูกวัดแต่ละตัวอย่างจะถูกดึงออกจากชุดคาลิเบรชัน “leave-out spectra” ในกรณีของการพิสูจน์แบบชุดทดสอบตัวอย่างใหม่จะถูกวัดเพื่อเป็นชุดทดสอบ

2.6.1 การสร้างสมการโดยวิธี partial least square Regression (PLS-Regression) (ปานมนัสและคณะ, 2556)

การเปรียบเทียบวิธีการทางเคโมเมตริกที่ใช้ในเคมีวิเคราะห์สามารถพบได้ในอัลกอริธึมของ PLS ถูกสร้างขึ้นเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้มากที่สุด ดังนั้นจะอธิบายวิธีนี้เท่านั้น เนื่องจากขอบเขตและความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ของคำอธิบายทั้งหมดจะไม่ได้แสดงไว้

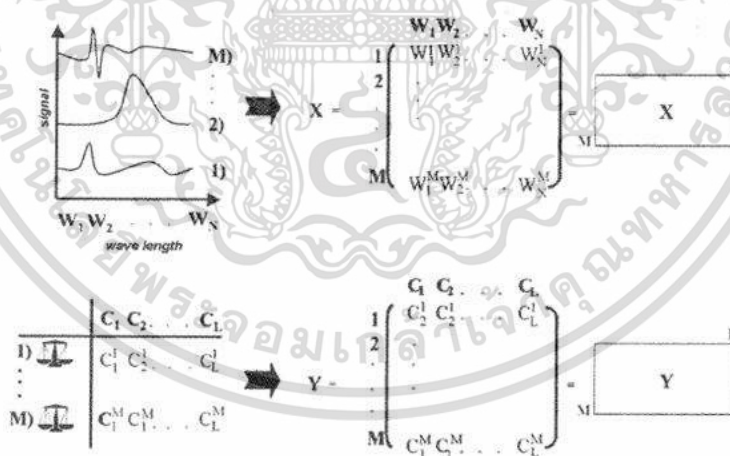
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะทำ PLS-Regression ของระบบใดๆข้อมูลของสเปกตรัมของสารต้องถูกเปรียบเทียบกับข้อมูลความเข้มข้นของสารนั้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งในโครงสร้างข้อมูลทั้งสองต้องได้รับการยอมรับและมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

สำหรับวัตถุประสงค์นี้จำเป็นต้องวัดตัวอย่างจำนวนมาก สำหรับการแสดงผลทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงทั้งในชุดข้อมูลทั้งสองจะต้องเขียนเมทริกซ์ของข้อมูล (ดูรูป 2.7) และไอเกนเวกเตอร์ ของข้อมูลเหล่านั้นจะถูกสร้างขึ้น ไอเกนเวกเตอร์เหล่านี้เรียกว่าแฟคเตอร์หรือองค์ประกอบเบื้องต้น ซึ่งสามารถใช้สำหรับการทำนายความเข้มข้นแทนสเปกตรัมดั้งเดิมเนื่องจากมันมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมดของระบบที่ศึกษา

การลดตัวแปรนี้มีประโยชน์อย่างชัดเจน ข้อมูลที่เกี่ยวข้องเชิงการวิเคราะห์จากชุดข้อมูลขนาดใหญ่ได้ถูกบีบอัดเป็นแฟคเตอร์ซึ่งจะถูกใช้สำหรับการคาลิเบรชัน

ในกรณีของคาลิเบรชัน PLS ไอเกนเวกเตอร์จะถูกเก็บโดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยแฟคเตอร์ แรกบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงหลักของสเปกตรัม มีความสำคัญที่มากที่สุดสำหรับแบบจำลองคาลิเบรชัน และเมื่อจำนวนแฟคเตอร์เพิ่มขึ้นแม้แต่การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในโครงสร้างข้อมูลก็ถูกบ่งชี้ ซึ่งมีผลสำคัญที่ตามมาของการประเมินสเปกตรัม นั่นคือจำนวนแฟคเตอร์ที่น้อยลงส่วนใหญ่จะบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของโครงสร้างของสเปกตรัม ขณะที่จำนวนแฟคเตอร์ที่สูงขึ้นส่วนใหญ่จะแสดงถึงส่วนที่เป็นสัญญาณรบกวนของสเปกตรัม



รูปที่ 2.8 ข้อมูลสเปกตรัมและความเข้มข้นในรูปแบบเมทริกซ์

ที่มา: Jörg-Peter Conzen. (2006)

ในตัวอย่างนี้ (รูปที่2.8) มีตัวอย่างคาลิเบรชัน M ตัวอย่างที่วัดและ - ในขั้นตอนที่สอง - N ความยาวคลื่นทั้งหมดของผลสเปกตรัมจะถูกเขียนในแถว (M,N) เมทริกซ์ เมทริกซ์นี้จะเทียบเท่ากับข้อมูลสเปกตรัมเมทริกซ์ X ในทางเดียวกันค่าองค์ประกอบทั้งหมด L จะเขียนลงไปใน (M,L) เมทริกซ์ของข้อมูลความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกจำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสมเป็นความสำคัญกลางสำหรับคุณภาพของแบบจำลอง PLS ถ้ามีจำนวนแฟคเตอร์น้อยเกินไปโครงสร้างสเปกตรัมจะไม่ถูกรู้เพียงพอ Regression ที่เกี่ยวข้องจึงไม่สามารถนำไปสู่ผลการวิเคราะห์ที่น่าพอใจ นั่นคือแบบจำลอง “underfitting” ถ้าจำนวนแฟคเตอร์มีมาก การวิเคราะห์ก็จะไม่ดี เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนเชิงสเปกตรัมหลายส่วนมากเกินไป (Overfitting)

ใน PLS Regression ข้อมูลสเปกตรัมเมทริกซ์ X และข้อมูลความเข้มข้นเมทริกซ์ Y ถูกลดเหลือเพียง 2-3 แฟคเตอร์ เมทริกซ์ดั้งเดิมจึงแสดงเป็นผลรวมของ A ผลคูณของสิ่งที่เรียกว่า scores vector t_i กับ loading vector p_i หรือ q_i ตามลำดับ

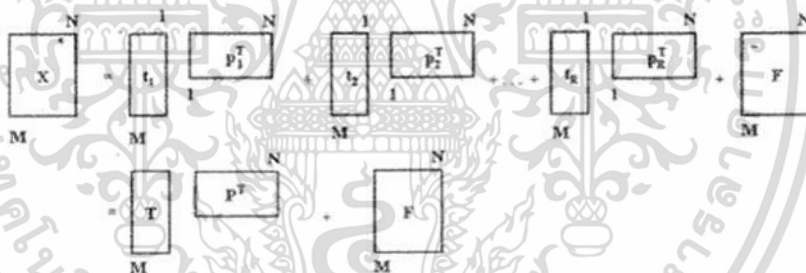
ข้อมูลสเปกตรัม:

$$X = t_1 p_1^T + t_2 p_2^T + t_3 p_3^T + \dots + t_R p_R^T + F \quad (2.4)$$

ข้อมูลความเข้มข้น:

$$Y = t_1 q_1^T + t_2 q_2^T + t_3 q_3^T + \dots + t_R q_R^T + G \quad (2.5)$$

ในกรณี score และ loading จะแสดงเป็น vector ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 Schematic diagrams for the factorization of the spectral data matrix X ที่มา Jörg-Peter Conzen. (2006)

ค่า R แสดงถึง จำนวน factor และ T หมายถึง Transpose ของแต่ละ loading vector F และ G คือ เมทริกซ์ของ error (Residual metrics) ของ ข้อมูลสเปกตรัมและข้อมูลความเข้มข้นตามลำดับ ค่าเหล่านี้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของข้อมูล ซึ่งไม่ได้คำนึงในการสร้างแฟคเตอร์ (factorization)

โดยทั่วไป จำนวนสำหรับค่าการดูซ้ำที่ได้จากการวัดจะมากกว่าตัวเลขขององค์ประกอบที่แสดงให้เห็น ดังนั้นระบบนี้คือ “over-determined” และจึงสามารถไม่เพียงแต่จะสร้างความสัมพันธ์กับจุดของข้อมูลสเปกตรัมจุดเดียว (เช่น จุดสูงสุดของการคาลิเบรชันแบบตัวแปรเดียว) แต่ยังมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างข้อมูลสเปกตรัมทั้งหมด ข้อมูลชุดคาลิเบรชันด้วยวิธีนี้จะมีค่าข้อมูลที่ได้มากกว่าการคาลิเบรชันด้วยวิธีตัวแปรเดียวมาก นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ที่จะหาตัวแปรที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิดปกติ ในระหว่างการวิเคราะห์และสามารถตัดสินใจได้ว่าองค์ประกอบของสิ่งรบกวนที่ไม่รู้ค่า ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กับชุดของข้อมูล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมตรงข้ามกับการคาลิเบรชันแบบตัวแปรเดียว เป็นไปได้ที่จะใช้ข้อมูลเชิงสเปกตรัมของด้านข้างของพีค ซึ่งสามารถวิเคราะห์สเปกตรัมได้โดยโครงสร้างของสเปกตรัมเอง ด้วยเหตุนี้แถบการดูดซับที่ซ้อนทับกัน (overlapping bands) สามารถที่จะแยกออกจากกันได้ ในสเปกตรัม トラบิตที่มีความแปรปรวนในรูปร่างสเปกตรัมน้อย ในทำนองเดียวกันสามารถรับรู้ถึงโครงสร้างของสเปกตรัมบริเวณที่มีสัญญาณรบกวนมากได้ ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงการทำนายความเข้มข้นสารให้แม่นยำ

ใน PLS Regression เบื้องต้นข้อมูลจะถูกทำให้เป็นองค์ประกอบหลัก (Principal Components) แล้วคำนวณหา scores vectors จากข้อมูลสเปกตรัมและข้อมูลความเข้มข้น ซึ่งวิธีการจะครอบคลุม (Robust) ต่อความไม่ถูกต้องของค่าการวัดค่าอ้างอิงและการวัดค่าตัวอย่าง

ความสำคัญพิเศษของ PLS Regression สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี เกิดจากการสร้างแฟกเตอร์ (Factorization) ของข้อมูล X และ Y โดยไม่เป็นอิสระต่อกันและเกิดขึ้นพร้อมกัน เมื่อประเมินสเปกตรัมของการดูดซับสามารถที่จะประมาณว่าการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลสเปกตรัมมีต้นกำเนิดจากความแปรปรวนของความเข้มข้นที่สอดคล้องกัน นั่นหมายความว่า การเปลี่ยนแปลงของข้อมูลสเปกตรัมควรจะไปสู่การเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกันของสเปกตรัมเพราะฉะนั้น scores vectors ของเมทริกซ์ของข้อมูลความเข้มข้นและข้อมูลสเปกตรัมควรจะเหมือนกัน อย่างไรก็ตามในกรณีของตัวอย่างจริง ถ้าเมทริกซ์นั้นถูกลดขนาดลงโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์อย่างบริสุทธ์ (นั่นคือเป็นอิสระ) ค่าความผิดพลาดในการเตรียมตัวอย่างและในวิธีอ้างอิงที่ใช้ในการวัดค่าความเข้มข้นและการเกิดดริฟท์ (Drift) ของเครื่องวัดและสัญญาณรบกวนในสเปกตรัมจะก่อให้เกิดความแตกต่างของ scores vectors ดังนั้นในวิธี PLS จะสมมุติว่า scores vectors ที่เหมือนกัน (Identical) สำหรับชุดข้อมูลทั้งสองที่จำนวนแฟกเตอร์ใดๆ ซึ่งจะถูกเลือกเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าเริ่มต้นมีค่าน้อยที่สุด เป็นการประนีประนอมระหว่างความเหมาะสมของแฟกเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายตัวอย่างและความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นในระหว่างชุดข้อมูล

อัลกอริธึมที่มีชื่อว่า PLS1 เพียงแค่นำค่าความเข้มข้นของเพียงหนึ่งองค์ประกอบทางเคมีมาพิจารณาข้อมูลอื่นๆ ทั้งหมดจะถูกตีความว่าเป็นสิ่งรบกวน นั่นคือ Y-เมทริกซ์ของข้อมูลความเข้มข้นเป็นเวกเตอร์เดียว ส่วนในอัลกอริธึม PLS2 ความเข้มข้นขององค์ประกอบทุกอย่างในระบบจะถูกนำมาพิจารณาในการคาลิเบรชัน สำหรับการทำนายตัวอย่างใหม่แบบจำลองนี้นำไปสู่การวิเคราะห์องค์ประกอบทุกอย่างในเวลาเดียวกัน ตรงข้ามการคาลิเบรชันแบบ PLS1 ข้อมูลทั้งหมดของเมทริกซ์ความเข้มข้นจะถูกนำสัมพันธ์กันกับข้อมูลสเปกตรัมเมทริกซ์ โดยทั่วไปแล้ว การทำนายแบบ PLS2 จะให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีกว่าการทำนายแบบ PLS1 จากเหตุผลดังกล่าวโดยทั่วไปจึงแนะนำให้ใช้อัลกอริธึม PLS1 ในการวิเคราะห์ระบบที่มีหลายองค์ประกอบ อัลกอริธึมแบบนี้ก็สามารถถูกนำมาประยุกต์ใช้

อย่างประสบความสำเร็จในทุกองค์ประกอบ ดังนั้นแบบจำลองที่สำหรับทุกองค์ประกอบที่ต้องการจะถูกสร้างขึ้นเช่นเดียวกับแบบอัลกอริธึม PLS2

2.6.2 การทำ Validation แบบ Full cross validation และแบบ Test set validation

Full cross validation เป็นการทดสอบภายในกลุ่มตัวอย่าง (Internal validation) โดยตัวอย่างที่นำมาทดสอบสมการ คือ ตัวอย่างชุดเดียวกับที่ใช้สร้างสมการทำนายค่าทางเคมี โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ตัดตัวอย่างที่ 1 ออกจากชุดตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการทำนายค่าทางเคมี จากนั้นใช้ตัวอย่างที่เหลือทำการคำนวณหาสมการ เมื่อได้สมการแล้วจึงนำตัวอย่างที่ 1 มาทดสอบสมการ ขั้นต่อไปใส่ตัวอย่างที่ 1 กลับคืน และตัดตัวอย่างที่ 2 ออกจากชุดตัวอย่าง แล้วจึงสร้างสมการทำนายค่าทางเคมี นำสมการที่ได้การทำนายของตัวอย่างที่ 2 ทำขั้นตอนข้างต้นซ้ำจนกระทั่งหาค่าทางเคมีของตัวอย่างครบทั้งชุด ดังนั้นตัวอย่างแต่ละความเข้มข้นจะถูกตัดออกจากชุดตัวอย่างที่ 1 ครั้งเท่ากัน ทำการหาค่า RMSECV (Root square error of cross validation)

Test set validation เป็นการทดสอบภายนอกกลุ่มตัวอย่าง (External validation) โดยตัวอย่างทั้งหมดของชุดคาลิเบรชันถูกใช้ในการทำโมเดล โมเดลนี้ยังคงคงที่สำหรับการพิสูจน์ต่อไป นั่นคือ สเปกตรัมในการวิเคราะห์จะไม่ถูกเอาออกจากชุดคาลิเบรชันอีกต่อไป เพื่อที่จะประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายต้องวัดตัวอย่างอื่นๆ และจัดให้เป็นชุดทดสอบสำหรับการพิสูจน์ ตัวอย่างเฉพาะของชุดทดสอบจะถูกวิเคราะห์ นั่นคือชุดข้อมูลของการพิสูจน์ภายนอกจะถูกแบ่งเป็นชุดคาลิเบรชันและตัวอย่างที่วิเคราะห์ ซึ่งตรงข้ามกับการพิสูจน์แบบไขว้ (cross validation) ที่จะไม่มีการแลกเปลี่ยนระหว่าง 2 ชุดตัวอย่าง การเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองกับข้อมูลความเข้มข้นเดิมของชุดทดสอบ จะถูกใช้คำนวณ RMSEP (root mean square error of prediction)

สรุป การพิสูจน์ภายนอกแตกต่างจากการพิสูจน์ภายใน โดยความจริงที่ว่าในการพิสูจน์ภายนอก ไม่มีตัวอย่างที่ถูกนำออกมาจากชุดข้อมูลคาลิเบรชัน แบบจำลองนั้นคงที่สำหรับทุกๆ การวิเคราะห์ ในทางตรงกันข้ามการพิสูจน์แบบไขว้ก็ยอมรับการประเมินแบบจำลองจากชุดข้อมูลคาลิเบรชันแต่เพียงอย่างเดียว ในที่นี้แม้แต่การมีจำนวนตัวอย่างจำกัดก็ยังสามารถสร้างชุดข้อมูลที่ใหญ่ (จำนวนมาก) เพียงพอสำหรับการสร้างและการพิสูจน์แบบจำลอง

2.7 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสมการ

2.7.1 สัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2)

แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวนในข้อมูล Y ค่าของ R^2 จะเป็นบวกเสมอ เช่น ถ้า $R = 0.97$ แล้ว $R^2 = 0.941$ หมายความว่า 94.1% ของความแปรปรวนในข้อมูล X และ 5.9% ของความแปรปรวนในข้อมูล X เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่น เช่น การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตรียมตัวอย่าง วิธีการทดลองอ้างอิง และอื่นๆ ค่า R^2 เป็นบวกเสมอโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ R ในทางปฏิบัติ R^2 ให้ข้อมูลมากกว่า R และใช้กันมากกว่า R การแปลความหมายของค่า R และ R^2 แสดงดังตารางที่ 1 R^2 คำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$R^2 = \left[1 - \frac{\sum_1^n (y_i^{meas} - y_i^{pred})^2}{\sum_1^n (y_i^{meas} - \bar{y})^2} \right] \times 100 \quad (2.6)$$

เมื่อ y^{meas} คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี
 y^{pred} คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIRS
 n คือ จำนวนตัวอย่าง

ตารางที่ 2.5 การแปลความหมายของค่า R^2 (ดัดแปลงจาก Williams. 2007)

R^2	ความหมาย
ถึง 0.25	ไม่สามารถใช้ใน NIR calibration
0.26-0.49	เป็นความสัมพันธ์ที่ไม่ดี ควรหาเหตุผล
0.50-0.64	OK สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) อย่างหยาบๆ
0.66-0.81	OK สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบๆ
0.83-0.90	ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย
0.92-0.96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
0.98+	ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้

2.7.2 ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้

(root mean squared error of cross validation; RMSECV)

Cross-validation สามารถใช้ตัวอย่างชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อการทำการพิสูจน์แบบจำลอง (Validation) สิ่งนี้ทำโดยนำตัวอย่างออกหนึ่งตัวอย่างหรือกลุ่มของหลายตัวอย่างจากชุดสร้างแบบจำลองและสร้างแบบจำลองด้วยตัวอย่างที่เหลืออยู่ แล้วทำนายตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไปและบันทึกค่าความผิดพลาด แล้วนำตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไปนั้นกลับมาแล้วนำตัวอย่างอื่นออกไปละทำซ้ำกระบวนการจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองและทำนาย จะไม่มีตัวอย่างที่ถูกทำนายถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองซึ่งได้ใช้ในการทำนาย ถ้าเอาออกเพียงทีละ 1 ตัวอย่าง จะเรียกว่า “Full” หรือ “One-out” cross-validation ถ้านำชุดตัวอย่าง (จำนวนหลายตัวอย่าง) ออกจะเรียกว่า “Segmented” cross-validation ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าที่ถูกทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟา-เรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีเอกสารถูกเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ้างอิงของชุดสร้างแบบจำลอง คือ RMSECV วิธีพิสูจน์นี้เหมาะที่จะใช้กับข้อมูลที่มีจำนวนตัวอย่างน้อยๆ เช่น น้อยกว่า 100 ตัวอย่าง ค่า RMSECV คำนวณได้จากสมการ 2.5

$$RMSECV = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (Y_i^{meas} - Y_i^{pred})^2} \quad (2.7)$$

2.7.3 Root mean square error of estimation (RMSEE)

เป็นค่าที่ใช้วิเคราะห์ข้อผิดพลาดของชุดคาลิเบรชัน (Calibration) ไม่เหมาะในการใช้กับชุดทำนาย (Validation) สูตรการคำนวณ RMSEE คือ

$$RMSEE = \left\{ \left[\sum_{i=1}^M (Y_i^{meas} - Y_i^{pred})^2 \right] / M - R - 1 \right\}^{1/2} \quad (2.8)$$

M คือ จำนวนตัวอย่าง

i คือ เลขที่ตัวอย่าง

R คือ จำนวนแพคเตอร์

2.7.4 อัตราส่วนระหว่าง SEP กับ SD (Ratio of SEP to the SD, RPD)

RPD ย่อมาจาก Ratio of (Standard error of) Prediction (Validation) to (Standard) Deviation แต่เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) กับอัตราส่วนของค่าความผิดพลาดมาตรฐานการทำนาย (SEP) ของข้อมูลของค่าอ้างอิงของชุดทำนาย ค่า SEP ควรต่ำกว่า SD มากๆ ซึ่งอัตราส่วนควรเท่ากับ 5 หรือมากกว่า บางกรณีตัวอย่างมีความสม่ำเสมอมาก ค่า SD จึงไม่สูง ซึ่ง RPD อาจจะไม่สูง ดังนั้น RPD เท่ากับ 2.5-3.0 ก็อาจแสดงถึงการวิเคราะห์ที่แม่นยำถ้า SD มีค่าเพียง 0.4-0.5

ตารางที่ 2.6 การอธิบายผลของค่า RPD (Williams. 2007)

ค่า RPD	การแบ่งกลุ่ม	การประยุกต์ใช้
0.0-2.3	ไม่ดีเลย	ไม่แนะนำ
2.4-3.0	ไม่ดี	คัดเลือกแบบหยาบๆ
3.1-4.9	พอใช้	คัดเลือก
5.0-6.4	ดี	ควบคุมคุณภาพ
6.5-8.0	ดีมาก	ควบคุมขั้นตอน
8.1+	ดีเยี่ยม	ได้ทุกการประยุกต์ใช้

2.7.5 ความผิดพลาด (Bias)

เมื่อทำนายค่าตัวแปรที่ต้องการของข้อมูลในชุดตัวอย่างทดสอบแบบจำลอง (Validation set) ค่า Bias หมายถึง ความแตกต่างระหว่างค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงและค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและเป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลอง (Calibration model) ในโลกความเป็นจริงของทางการค้าและอุตสาหกรรม Bias เป็นหนึ่งในสิ่งที่สำคัญมากในทางสถิติ Bias สามารถเกิดขึ้นได้แม้เมื่อค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และ SEP ที่แสดงว่าแบบจำลองนั้นดีเยี่ยม

2.7.6 ประโยชน์ของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR)

Osborne et al. (1993) อ้างโดย อภิตุลย์ (2555) ได้กล่าวว่าเครื่องมือแต่ละประเภทต่างก็มีข้อจำกัดในการใช้งาน แต่เครื่อง NIR มีประโยชน์ และข้อดีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ทางเคมี หรือการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น สำหรับการนำเครื่อง NIR ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมีประโยชน์มากมาย เช่น

- 1.ง่ายต่อการเตรียมตัวอย่าง ไม่จำเป็นต้องชั่งตัวอย่างก่อนนำมาวัดค่า
- 2.ใช้เวลารวดเร็วในการวัด
- 3.การตรวจสอบเป็นแบบไม่ทำลาย ทำให้ตัวอย่างที่นำมาตรวจสอบสามารถจำหน่าย ส่งออก หรือบริโภคต่อได้ เป็นการประหยัดต้นทุนของผลิตภัณฑ์อีกทางหนึ่ง
- 4.ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ลดต้นทุนในการดูแลรักษาสภาพแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี
- 5.สะดวกต่อการใช้งาน เนื่องจากในการปฏิบัติไม่จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีประสบการณ์ หรือต้องได้รับการฝึกฝนโดยเฉพาะ สามารถปฏิบัติตามคู่มือการใช้งานได้ทันที
- 6.ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี และเครื่องแก้ว ทำให้สามารถลดต้นทุนในเรื่องสารเคมี และอุปกรณ์เครื่องแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับนำไปควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นประโยชน์เช่นเดียวกับกับอุตสาหกรรมอื่นที่สามารถประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ได้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Huang et al. (2008) ศึกษาการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เพื่อทำนายค่าความร้อนของฟาง ที่ความยาวคลื่นที่ 400 – 2500 nm จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 222 ตัวอย่าง โดยที่ 172 ตัวอย่างเป็นตัวอย่างฟางข้าว และอีก 50 ตัวอย่างเป็นตัวอย่างฟางข้าวสาลี ทำการเก็บเกี่ยว 2 ปี คือในปี 2005 และ 2006 เดิมการกำหนดค่าความร้อนของฟางข้าวให้มีความละเอียด จะต้องใช้เครื่องวัดความร้อนที่มีราคาแพงและใช้เวลานาน เป็นสาเหตุให้มีการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองที่ง่ายและรวดเร็วในการทำนายค่าความร้อนของฟางข้าว ผลการทดลองพบว่า ค่า R^2 ของแบบจำลองอยู่ที่ 0.9604 นั้นหมายถึงแบบจำลองการทำนายค่าความร้อนด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้มีศักยภาพที่จะทำนายค่าความร้อนของฟางข้าวได้

Huang et al. (2009) ได้ทำนายค่าความร้อนรวมถึงปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจนของฟางข้าว ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ โดยใช้ตัวอย่างฟางข้าว 222 ตัวอย่าง จาก 24 จังหวัดในประเทศจีน ผลการศึกษาพบว่า ความถูกต้องของการทำนาย (R^2) และค่า Standard error of predictions (SEP) มีดังนี้ คือ R^2 เท่ากับ 0.96 และ SEP เท่ากับ 181 J/g สำหรับการทำนายค่าความร้อน, R^2 เท่ากับ 0.97 และ SEP เท่ากับ 0.37% สำหรับการทำนายปริมาณคาร์บอน, R^2 เท่ากับ 0.77 และ SEP เท่ากับ 0.17% สำหรับการทำนายปริมาณไฮโดรเจน และ R^2 เท่ากับ 0.87 และ SEP เท่ากับ 0.10% สำหรับการทำนายปริมาณไนโตรเจน อีกทั้งยังมีการสร้างแบบจำลองโดยการวิเคราะห์ Multiple linear regression (MLR) พบว่าให้ผลการทำนายที่ดี (SEP = 224 J/g) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้สามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วกับฟางข้าว อีกทั้งช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ด้วย

Fagan et al. (2011) ได้ทำนายปริมาณความชื้น, ความร้อน, เถ้า และ คาร์บอน ของพืชพลังงาน 2 ชนิด นั่นคือ หญ้ายักษ์มิสแคนทัส (*Miscanthus x giganteus*) และ ข้าวเหนียวแบบหมุนเวียนช่วงสั้น (short rotation coppice willow) ซึ่งเป็นไม้โตเร็ว ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ พบว่า การทำนายปริมาณความชื้น, ความร้อน, เถ้า และ คาร์บอน มีค่า R^2 ดังนี้ 0.99, 0.99, 0.58 และ 0.88 ตามลำดับ และค่า RMSECV เท่ากับ 0.90%, 0.13 MJ/kg, 0.42% และ 0.57% ตามลำดับ เห็นได้ว่าแบบจำลองทำนายปริมาณความชื้นและค่าความร้อนมีความถูกต้องดีเยี่ยม ในขณะที่ทำนายปริมาณคาร์บอนได้ดี แต่ทำนายปริมาณเถ้าได้ไม่ดี จากผลการทดลองดังกล่าว

ชี้ให้เห็นเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้มีศักยภาพในการทำนายดัชนีคุณภาพของพืชพลังงาน แต่จะต้องมีช่วงของตัวอย่างที่นำมาสร้างแบบจำลองที่กว้างขึ้น

Everard et al. (2012) ศึกษาการทำนายค่าความร้อนรวมของชีวมวลโดยใช้เทคนิคแสงย่านที่สามารถมองเห็นได้ (Visible) และเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ตัวอย่างชีวมวลที่ทำการศึกษาได้แก่ หญ้ายักษ์มิสแคนทัส และพืชหมุนเวียนช่วงสั้นอีกสองชนิด ตัวอย่างชีวมวลถูกบดให้เหลือขนาดเล็กกว่า 3 mm (จำนวน 44 ตัวอย่าง) ใช้Hyperspectral สแกนตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น 2 ระบบด้วยกัน คือ Hyperspectral สแกนในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1000 nm และในช่วงความยาวคลื่น 880 – 1680 nm สร้างแบบจำลองทำนายด้วยวิธี PLSR พบว่า ค่าความร้อนของหญ้ายักษ์มิสแคนทัสและพืชหมุนเวียนช่วงสั้นอีกสองชนิดอยู่ในช่วง 13.1 – 18.6 MJ/kg, RMSECV เท่ากับ 0.30 MJ/kg, R^2 เท่ากับ 0.97 และเมื่อสร้างแบบจำลอง PLSR ด้วยข้อมูลการดูดกลืนแสงของหญ้ายักษ์มิสแคนทัสเพียงอย่างเดียว (ค่าความร้อนในช่วง 13.1 – 18.3 MJ/kg) พบว่ามีค่า RMSECV เท่ากับ 0.28 MJ/kg และ R^2 เท่ากับ 0.96 สรุปได้ว่าเทคนิคแสงย่านที่สามารถมองเห็นได้และเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้มีศักยภาพในการทำนายชีวมวลจากค่าความร้อนรวมได้อย่างรวดเร็ว

Gillespie et al. (2015) ได้ศึกษาการทำนายดัชนีคุณภาพของเมล็ดชีวมวลโดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ชีวมวลที่ทำการตรวจสอบมีหลายชนิด ได้แก่ ไม้ หญ้ามิสแคนทัส และหญ้าล้มลุกที่เป็นพืชพลังงาน พบว่า แบบจำลองทำนายปริมาณความชื้นมีค่า RMSECV เท่ากับ 0.73% ค่า R^2 อยู่ที่ 0.85 สำหรับคาร์บอนมีค่า RMSECV เท่ากับ 2.74% ค่า R^2 อยู่ที่ 0.78 การทำนายเถ้าให้ค่ามีค่า RMSECV อยู่ที่ 0.62% ค่า R^2 อยู่ที่ 0.82 และค่าความร้อนพบว่ามีค่า RMSECV เท่ากับ 0.24 MJ/kg และ $R^2 = 0.94$ จากผลการทดลองดังกล่าวเห็นได้ว่าแบบจำลองทำนายค่าความชื้นมีค่าดีและแบบจำลองสำหรับทำนายค่าความร้อนมีความถูกต้องดีเยี่ยม ขณะที่แบบจำลองสำหรับทำนายปริมาณเถ้าและคาร์บอนถือว่าดีและเหมาะสม ตามลำดับ นั่นชี้ให้เห็นว่าเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้มีศักยภาพในการทำนายดัชนีคุณภาพของเมล็ดชีวมวลหลายชนิด

Posom and Sirisomboon (2015) ได้ประเมินค่าความชื้นของเมล็ดสบู่ดำ (*Jatropha curcas*) และค่าความร้อนของกากที่เหลือหลังจากสกัดน้ำมัน จำนวนทั้งสิ้น 100 ตัวอย่าง จากทั้งแบบเมล็ดสีเขียว สีเหลือง สีดำ และเมล็ดอบแห้ง โดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ด้วยโหมดการวัดแบบ diffuse reflection ใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer ที่เลขคลื่นช่วง 12,500 – 4,000 cm^{-1} ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้ถูกนำมาใช้สร้างแบบจำลองทำนายค่าความชื้น ส่วนการประเมินค่าความร้อนของกากที่เหลือหลังจากการสกัดน้ำมันนั้น ใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer ที่เลขคลื่นช่วง 12,500 – 4,000 cm^{-1} เช่นเดียวกัน แต่ใช้โหมดการวัดแบบ transfection สร้างแบบจำลองด้วยวิธี PLSR และตรวจสอบแบบจำลองด้วยวิธี Test set พบว่า แบบจำลองสำหรับทำนายค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นมีค่า R^2 อยู่ที่ 0.969, RMSEP เท่ากับ 4.0%wb, bias เท่ากับ -0.7%wb และ RPD เท่ากับ 5.7 ส่วนแบบจำลองสำหรับทำนายค่าความร้อนให้ค่า R^2 อยู่ที่ 0.860, RMSEP เท่ากับ 360 J/g, bias เท่ากับ -17 J/g และ RPD เท่ากับ 2.6 นอกจากนี้ยังพบว่า การสั่นสะเทือนของพันธะของเส้นใย (Fiber) และเซลลูโลส (Cellulose) มีผลต่อการทำนายค่าความร้อนอีกด้วย

Posom et al. (2016) ได้ตรวจสอบปริมาณความชื้น (Moisture content: MC) และค่าความร้อนสูง (HHV) ของกระถินยักษ์ (*Leucaena leucocephala*) แบบอัดเม็ด (Pellet) ด้วยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ โดยที่ความชื้นของเม็ดจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมในแต่ละตัวอย่าง ตัวอย่างถูกแสงเพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยโหมดการวัดแบบ diffuse reflection ที่ช่วงเลขคลื่น $12,500 - 4,000 \text{ cm}^{-1}$ และสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายด้วยวิธี PLSR (Partial least squares regression) ผลการทำนายพบว่าแบบจำลองสำหรับทำนายค่าความชื้นและค่าความร้อนสูงมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficients of determination: R^2) อยู่ที่ 0.995 และ 0.964 ค่า Root mean square error of cross validation (RMSECV) เท่ากับ 0.187%wb and 79.2 J/g, bias of -0.0008%wb and 1.29 J/g และค่า RPD (ratio of prediction to deviation) เท่ากับ 13.9 และ 5.30 ตามลำดับ แบบจำลองสำหรับทำนายมีความถูกต้องอย่างยอดเยี่ยม นั่นหมายถึงวิธีการตรวจสอบปริมาณความชื้นและค่าความร้อนสูงอย่างรวดเร็วนี้อาจจะนำไปใช้ในการตรวจสอบเม็ดชีวมวลเพื่อการค้าได้

Zhang et al. (2017) ทำการวิเคราะห์ห้อย่างรวดเร็วของค่าความร้อนสูงและองค์ประกอบของธาตุชีวมวลของข้าวฟ่างโดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ซึ่งเทคนิคนี้เป็นเทคโนโลยีการตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพและมีต้นทุนต่ำ มีศักยภาพในการจำแนกชนิดของมวลชีวภาพได้อย่างถูกต้อง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลอง NIR ร่วมกับเคโมเมตริกเพื่อประเมินค่าความร้อนสูงและองค์ประกอบของธาตุชีวมวลของข้าวฟ่าง สร้างแบบจำลองสำหรับทำนายด้วยวิธี PLSR และ Principle component regression (PCR) พบว่า แบบจำลองสำหรับทำนายค่าความร้อนสูง, ปริมาณคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ไนโตรเจน, กำมะถัน และออกซิเจนของชีวมวลข้าวฟ่าง มีค่า R^2 เท่ากับ 0.96, 0.96, 0.87, 0.86, 0.84, และ 0.83 ตามลำดับ ความถูกต้องในการทำนายค่าความร้อนสูงและปริมาณคาร์บอนพบว่าดีเยี่ยม สำหรับการทำนายปริมาณไฮโดรเจน, ไนโตรเจน และออกซิเจน อยู่ในระดับที่เชื่อถือได้ ซึ่งจะเห็นว่าแบบจำลองเหล่านี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่ดีเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างพันธะเคมีกับค่าความร้อนสูง และส่วนประกอบของธาตุชีวภาพของข้าวฟ่าง นั้นช่วยให้สามารถตรวจสอบค่าความร้อนและส่วนประกอบของธาตุในชีวมวลได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องโดยที่มีต้นทุนต่ำ (จากเดิม 200 เหรียญสหรัฐ เหลือเพียง 1 เหรียญสหรัฐ) และลดเวลาจากเดิม 100 นาที เป็น 1 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวัดสเปกตรัม FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ช่วงความยาวคลื่น $12,500 - 3600 \text{ cm}^{-1}$
2. เครื่องชั่งไฟฟ้า (AR2140 Adventure, OHAUSS, ความละเอียด 0.0001 g)
3. เครื่องวัดค่าความร้อนสูง Bomb calorimeter (C200, IKA, Germany)
4. เครื่องอัดเม็ด (Pellet press)
5. ตู้อบลมร้อน (ULM 500, Memmert, Germany)

3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง

ตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ฟางข้าว แกลบ ชังข้าวโพด มันสำปะหลัง และซีลี้อยที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดฟาง ชนิดละ 30 ตัวอย่าง รวม 150 ตัวอย่างนำมาจากพื้นที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ ฟางข้าวและแกลบ ถูกเก็บเกี่ยวมาจากโรงสีข้าวในจังหวัดปทุมธานี และจังหวัดฉะเชิงเทรา ส่วนชังข้าวโพดและมันสำปะหลังถูกเก็บเกี่ยวมาจาก จังหวัดนครสวรรค์ ในส่วนซีลี้อยไม้ยางพาราที่เหลือให้จากการเพาะเห็ดฟางนั้นได้เก็บเกี่ยวฟาร์มเห็ดใน จังหวัดนครปฐมและราชบุรี ตัวอย่างชีวมวลทั้งหมดนี้ถูกนำมาย้งห้องปฏิบัติการสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นำชีวมวลมาทำการตัดให้มีขนาดเล็กลงแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเป็นการเตรียมตัวอย่างให้สามารถบดได้ง่ายขึ้นจากนั้นนำตัวอย่างชีวมวลแต่ละตัวอย่างบดด้วยเครื่องบด (Pulver-issette14, Fritsch, Germany) เป็นเวลา 5 นาที โดยผ่านรูตระแกรงที่มีขนาด 0.2 mm (รูปที่ 3.1F) จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่บดเรียบร้อยแล้วเก็บใส่ถุงซิปล็อคเพื่อรอทำการทดลองต่อไป คือ การวัดค่าการดูดกลืนคลื่นด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany) หลังจากวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแล้วนำชีวมวลบริเวณที่ถูกสแกนบริเวณกันถ้วยควอซีไปวัดค่าความร้อนสูง Bomb calorimeter (C200, IKA, Germany) และความชื้นอ้างอิงด้วยอุณหภูมิ $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมงในขั้นตอนต่อไป



(A)



(B)



(C)



(D)



(E)



(F)

รูปที่ 3.1 ฟางข้าว (รูปที่ A), เหง้ามันสำปะหลัง (รูปที่ B), แกลบ (รูปที่ C), ชี้อเลื่อยไม้
 ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดฟาง (รูปที่ D), ชั่งข้าวโพด (รูปที่ E) และชีวมวลทั้ง 5 ชนิดที่ถูกบด
 จนเป็นผง (รูปที่ F)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดลอง

3.3.1 การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง FT- NIR Spectrometer

การทดลองใช้ตัวอย่างชีวมวลแบบผง (รูปที่ 3.1F) ตามหัวข้อ 3.1 และทำการทดลองภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ (ประมาณ 25 ± 1 °C) การทำนายค่าความร้อนสูงของชีวมวลทั้ง 5 ชนิด รวมตัวอย่างในการทดลองทั้งหมด 150 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นการทดสอบกับฟางข้าว 30 ตัวอย่าง แกลบ 30 ตัวอย่าง ชังข้าวโพด 30 ตัวอย่าง มันสำปะหลัง 30 ตัวอย่างและขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดฟาง 30 ตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างทำการตวงให้ได้ปริมาตรตัวอย่างเท่ากัน โดยใช้ช้อนตักแล้วเทลงถ้วยควอทซ์ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.8 cm สูง 5 cm) (รูปที่ 3.2) จากนั้นนำมาสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany) (รูปที่ 3.3) ซึ่งมีการวัดแบบ Diffuse Reflectance ที่ช่วงจำนวนคลื่นระหว่าง $12500 - 3600$ cm^{-1} (ความยาวคลื่น 800-2500 nm) สแกนทุกๆ 8 cm^{-1} การสแกนซ้ำ 32 ครั้งต่อ 1 spectrum จากนั้นนำตัวอย่างมาอัดให้เป็นเม็ดน้ำหนักประมาณ 0.5-1.0 g นำไปหาค่าความร้อน (ขั้นตอนในข้อที่ 3.3.2) ต่อไป



รูปที่ 3.2 การเทชีวมวลลงในถ้วยควอทซ์



รูปที่ 3.3 การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR (MPA, Bruker, Germany)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การวัดค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb calorimeter (C200, IKA, Germany)

หลังจากตัวอย่างทั้ง 150 ตัวอย่างผ่านการตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลื่นด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer แล้วนำแต่ละตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 0.5-1 กรัม ที่มีลักษณะเป็นผง (รูปที่ 3.4) มาอัดให้เป็น pellet น้ำหนัก 0.5-1 กรัม (รูปที่ 3.5) โดยใช้เครื่อง Pellet press (รูปที่ 3.7) จากนั้นนำตัวอย่างวางลงใน Crucible แล้วนำ Crucible ใส่ใน Crucible hold แล้วผูกด้วยฝ้าย (Cotton thread) ที่ตำแหน่งศูนย์กลางลวด เมื่อผูกด้วยฝ้ายเสร็จแล้วนำตัวอย่างวางทับปลายทั้งสองของด้ายฝ้ายโดย ขั้นตอนนี้ควรระวังอย่าให้ด้ายถูกตรงบริเวณขอบของ Crucible และต้องให้ตัวอย่างวางบนปลายเส้นด้ายฝ้าย จากนั้นนำ Bomb head ใส่ลงใน Oxygen bomb ปิดฝา เติมออกซิเจนลงใน Vessel โดยการเปิดวาล์วของถังแก๊สออกซิเจน ตั้ง Pressure gauge ไว้ที่ 30 bar จากนั้นกด O₂ Fill Key เครื่องจะทำการเติมออกซิเจนให้อัตโนมัติโดยใช้เวลาประมาณ 30 วินาที จากนั้นนำชุด oxygen bomb วางลงในเครื่อง bomb calorimeter (รูปที่ 3.6) โดยต้องวางลงให้ตรงตำแหน่งพอดี หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในเครื่องโดยให้น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิในช่วง 20-25 °C อยู่ในช่องระดับน้ำที่กำหนด ปรับค่าการวัดเป็นแบบ isoperibol ใส่ค่าน้ำหนักของตัวอย่างแล้วกด Start รอประมาณ 17 นาที เครื่องจะแสดงค่าความร้อน ออกมาในหน่วย Jg⁻¹

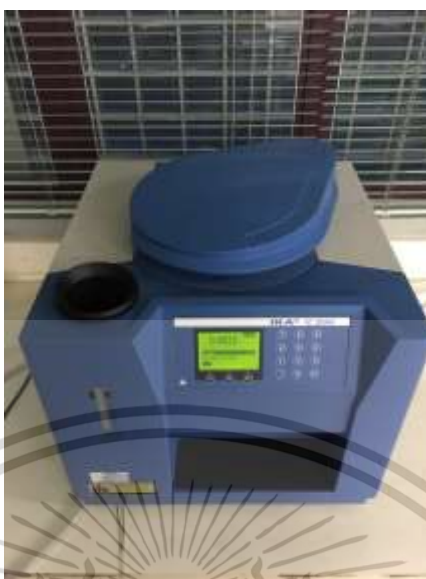


รูปที่ 3.4 ตัวอย่างที่นำมาอัดเม็ด



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างที่ได้หลังจากการอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เครื่อง Bomb calorimeter(C200, IKA, Germany)



รูปที่ 3.7 เครื่องอัดเม็ด (Pellet press)

3.4 การวัดความชื้นอ้างอิง

ซีวมวลบริเวณที่ถูกสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ปริมาณ 0.3 g (3 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง) ถูกแบ่งไปทำการวัดค่าความชื้นโดยใส่ลงในกระป๋องอลูมิเนียมที่ใช้เป็นภาชนะในการอบแห้งอบแล้วนำไปใส่ตู้อบ (ULM 500, Memmert, Germany) (รูปที่ 3.6) ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาตามกำหนดนำมาทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณความชื้นฐานแห้ง (%) จากสมการ:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$MC = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100 \quad (3.1)$$

MC คือ ค่าความชื้น % w.d. (ฐานแห้ง), m_i คือน้ำหนักก่อนน้ำไปอบและ m_f คือน้ำหนักหลังน้ำไปอบ ทำทั้งหมด 3 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่างแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง จากการการทดลองจำเป็นต้องตัดค่าบางส่วนที่มีค่านอกกลุ่ม (Outlier) ออกจากผลการทดลอง ซึ่งอาจเกิดจากตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการทดลอง ซึ่งตัวอย่างที่ผ่านการตรวจสอบแล้วนั้นจะต้องมีค่าอยู่ในช่วง ± 3 หากค่าอยู่นอกช่วงดังกล่าวนี้ต้องตัดออกจากกลุ่มเพราะเกิดจากตัวอย่างผิดปกติ หรือเกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการทดลอง

$$-3 \leq \frac{(X_i - \bar{X})}{SD} \leq 3 \quad (3.2)$$

เมื่อ X_i คือ ค่าที่ได้จากวิธีมาตรฐานแต่ละตัวอย่าง

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ย

SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง

3.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัม

การวิเคราะห์สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) จากค่าการดูดซับคลื่นที่ช่วงเลขคลื่นระหว่าง 12500-3600 cm^{-1} (ความยาวคลื่น 800-2500 nm) ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ของชีวมวลทั้ง 5 ชนิด จะวิเคราะห์จากแถบการดูดซับคลื่นปรากฏในสเปกตรัม โดยพิจารณาให้สอดคล้องกับองค์ประกอบที่มีในชีวมวล

3.5.2 การสร้างสมการในการทำนาย

การสร้างสมการทำนาย (calibration Model) สเปกตรัมไม่มีหรือมีการจัดการเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ เช่น Constant offset elimination, Straight line subtraction, Vector normalization (SNV), Min- max normalization, Multiplicative scattering correction (MSC), First derivative, Second derivative, First derivative + Straight line subtraction, First derivative + SNV และ First derivative + MSC โดยจะสร้างสมการทำนายของชีวมวลทั้ง 5 ชนิด ชนิดละ 1 สมการด้วยวิธี Partial Least Squares Regression และตรวจสอบความสามารถของสมการทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้วิธี Full cross validation โดยพิจารณาความแม่นยำสมการโดยคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (coefficient of determination, R^2) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการทำนาย (Root Mean Square error of prediction, RMSEP) และ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias) และสร้างสมการรวมของชีวมวลทั้ง 5 ชนิดด้วยวิธี Partial Least Squares Regression และตรวจสอบความสามารถของสมการทำนายโดยใช้วิธี Test set validation โดยสุ่ม 70% ของ 150 ตัวอย่าง (ให้ครอบคลุมค่าน้อยที่สุดและมากที่สุด) ไปสร้างสมการทำนาย (calibration Model) จากนั้นการพิสูจน์สมการทำนาย (Validation) โดยใช้การดูดกลืนคลื่น (Optical data) 30% ของตัวอย่างที่เหลือจากการสร้างสมการทำนาย (calibration) แทนค่าไปในสมการดังกล่าวซึ่งจะได้ค่าความร้อนทำนาย จากนั้นวิเคราะห์ความแม่นยำของสมการและความผิดพลาดในการทำนายโดยเปรียบเทียบกับค่าวัดจริงโดยวิธีมาตรฐานของตัวอย่าง 30% ที่เหลือ โดยคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (coefficient of determination, R^2) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการทำนาย (Root Mean Square error of prediction, RMSEP) และ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

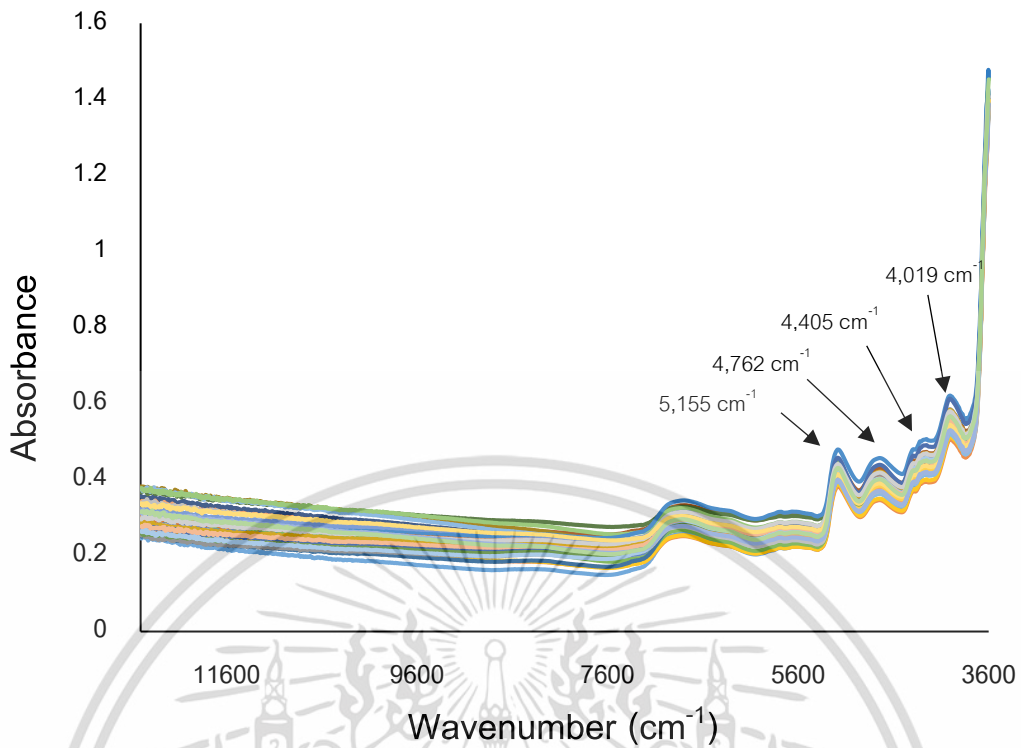
ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของตัวอย่างชีวมวล

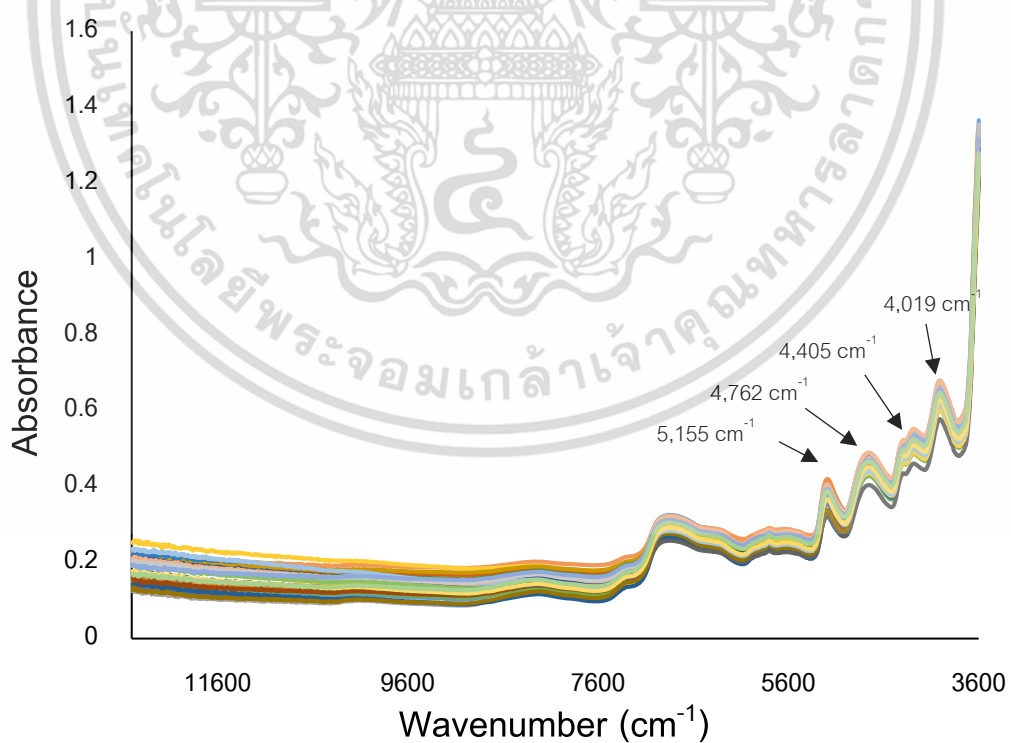
ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของตัวอย่างชีวมวลได้แก่ ฟางข้าว 30 ตัวอย่าง ชังข้าวโพด 30 ตัวอย่าง แกลบ 30 ตัวอย่าง ชี้อ้อยไม่ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ด 30 ตัวอย่าง เหง้ามันสำปะหลัง 30 ตัวอย่าง และชีวมวลทั้ง 5 ชนิดดังแสดงใน รูปที่ 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, และ 4.6 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของตัวอย่างฟางข้าวมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือพบว่ามี การดูดกลืนคลื่นอย่างชัดเจนที่เลขคลื่น $5,155\text{ cm}^{-1}$, $4,762\text{ cm}^{-1}$, $4,405\text{ cm}^{-1}$ และ $4,019\text{ cm}^{-1}$ โดยที่การดูดกลืนคลื่นที่เลขคลื่น $5,155\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของน้ำ (Workman and Weyer, 2008) ซึ่งหมายถึงความชื้นที่เป็นองค์ประกอบหลักอย่างหนึ่งของชีวมวล และที่เลขคลื่น $4,762\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของสตาร์ช (Workman and Weyer, 2008) นอกจากนี้คือ ที่เลขคลื่น $4,405\text{ cm}^{-1}$ และ $4,019\text{ cm}^{-1}$ (Workman and Weyer, 2008) เป็นการดูดกลืนคลื่นของเซลลูโลส กล่าวคือ ทั้งสตาร์ชและเซลลูโลสล้วนแต่เป็นองค์ประกอบขั้นต้นของสารชีวมวล

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมอนุพันธ์อันดับที่สองเฉลี่ยของชีวมวลทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว ชังข้าวโพด แกลบ ชี้อ้อยไม่ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ด และเหง้ามันสำปะหลัง ที่ได้จากฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (รูปที่ 4.7) ซึ่งขจัดปัญหาขยับขึ้น (Baseline shift) และทำให้พีคที่ซ้อนทับกันในสเปกตรัมดั้งเดิมชัดเจนขึ้น พบว่า ชีวมวลทั้ง 5 ชนิดมีการดูดกลืนคลื่นที่ความยาวคลื่นเดียวหรือใกล้เคียงกัน ได้แก่ $7,182$, $5,832$, $5,789$, $5,295$, $5,245$, $4,404$, $4,353$, $4,304\text{ cm}^{-1}$ ($1,392$, $1,714$, $1,727$, $1,888$, $1,906$, $2,270$, $2,297$, $2,323$, nm) ซึ่งเลขคลื่นที่ $7,182$, $5,832$, $5,789$, $4,304\text{ cm}^{-1}$ ($1,392$, $1,714$, $1,727$, $2,323$ nm) เป็นการดูดกลืนคลื่นของโครงสร้างทางเคมี คือ CH_2 , CH_3 , CH_2 , CH_2 ตามลำดับ ซึ่งทั้งสี่นี้พบว่าเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของลิกนิน อีกทั้งยังมีที่เลขคลื่นที่ $5,245\text{ cm}^{-1}$ ($1,906\text{ nm}$) เป็นการดูดกลืนคลื่นของสตาร์ช (Osborne and Fearn, 1993) และที่เลขคลื่น $5,295$, $4,404$, $4,353\text{ cm}^{-1}$ ($1,888$, $2,270$, $4,353\text{ nm}$) เป็นการดูดกลืนคลื่นของน้ำ, เซลลูโลส และโปรตีน ตามลำดับซึ่งถูกรายงานโดย Workman and Weyer (2008)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

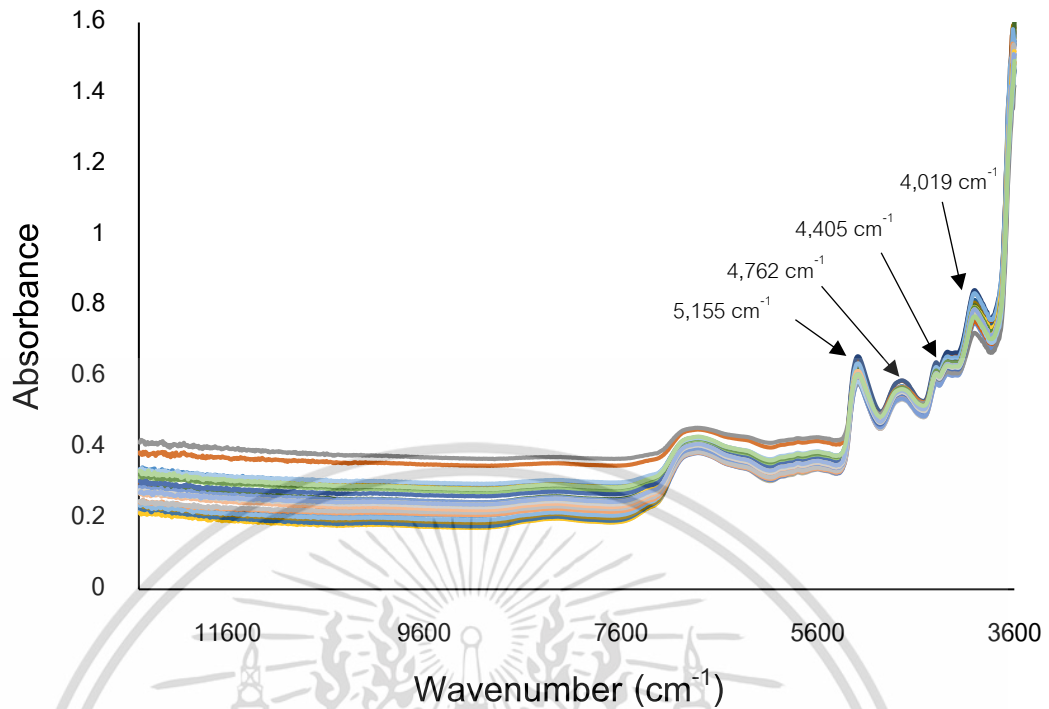


รูปที่ 4.1 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของตัวอย่างฟางข้าว

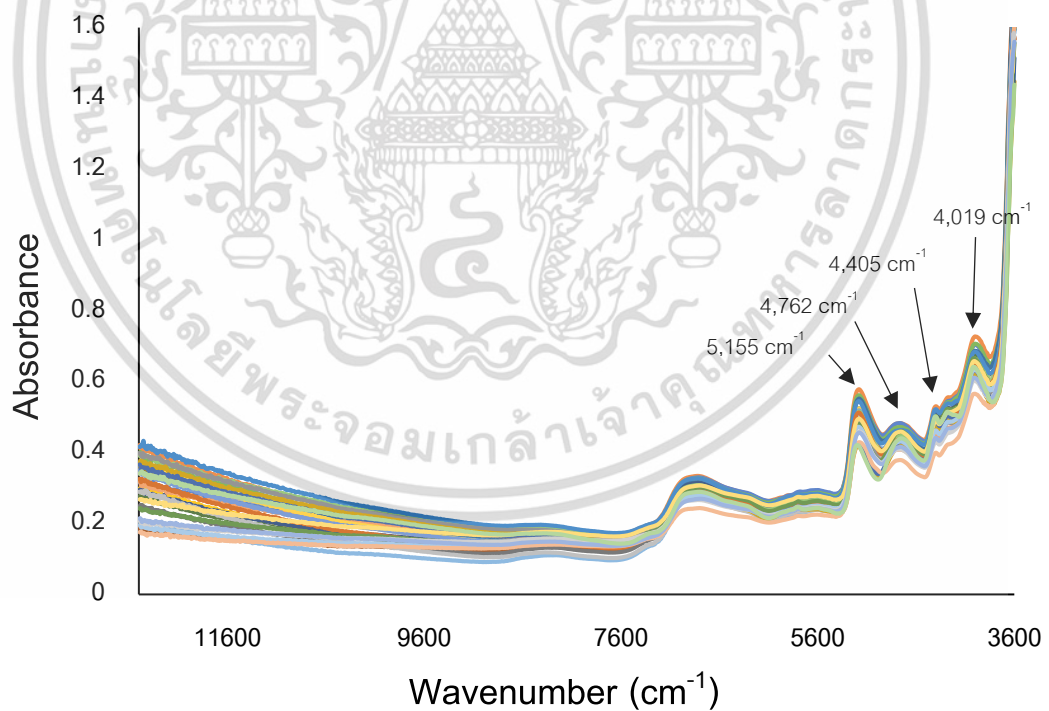


รูปที่ 4.2 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของตัวอย่างซังข้าวโพด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

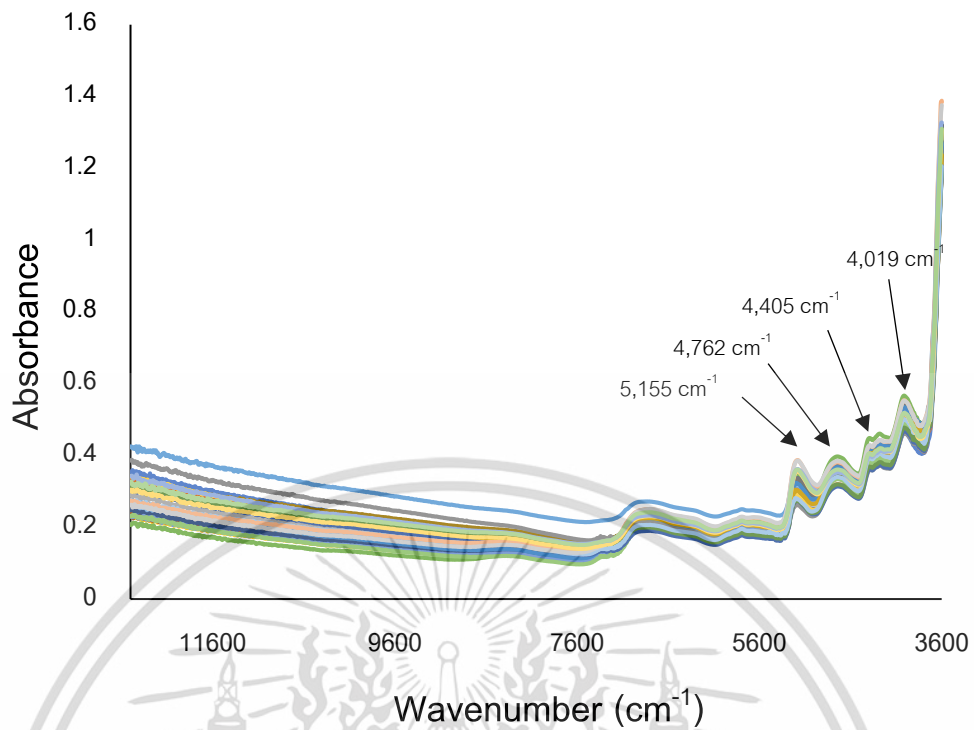


รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของตัวอย่างแกลบล

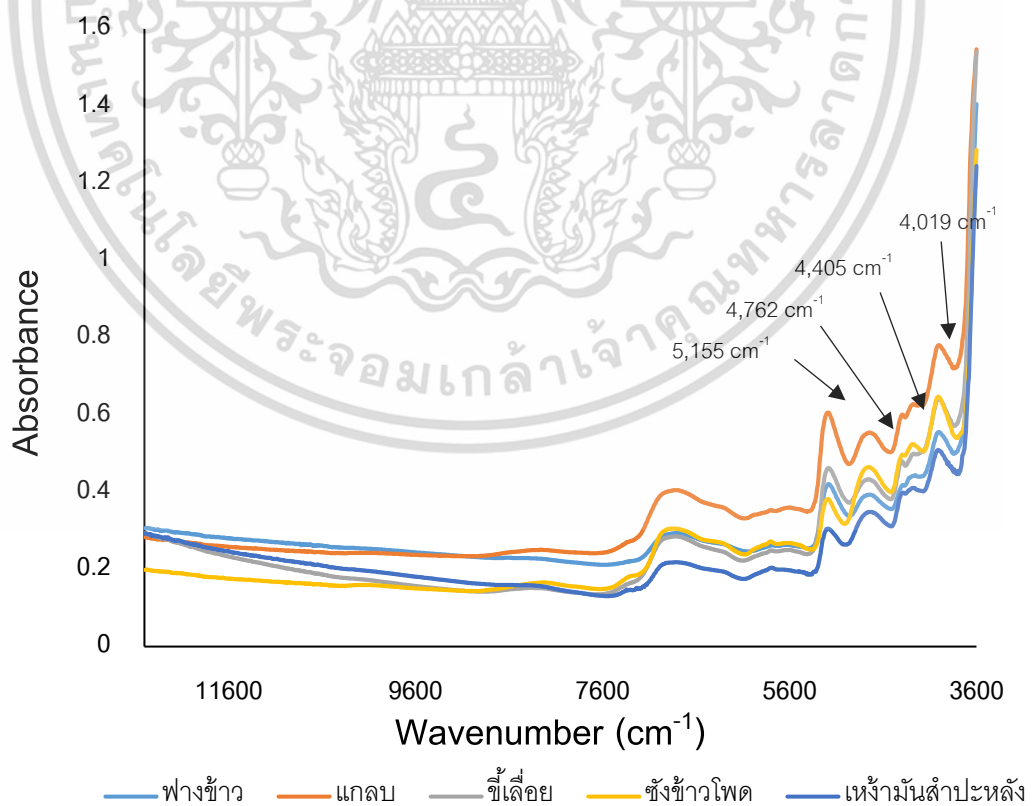


รูปที่ 4.4 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของตัวอย่างซีเลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

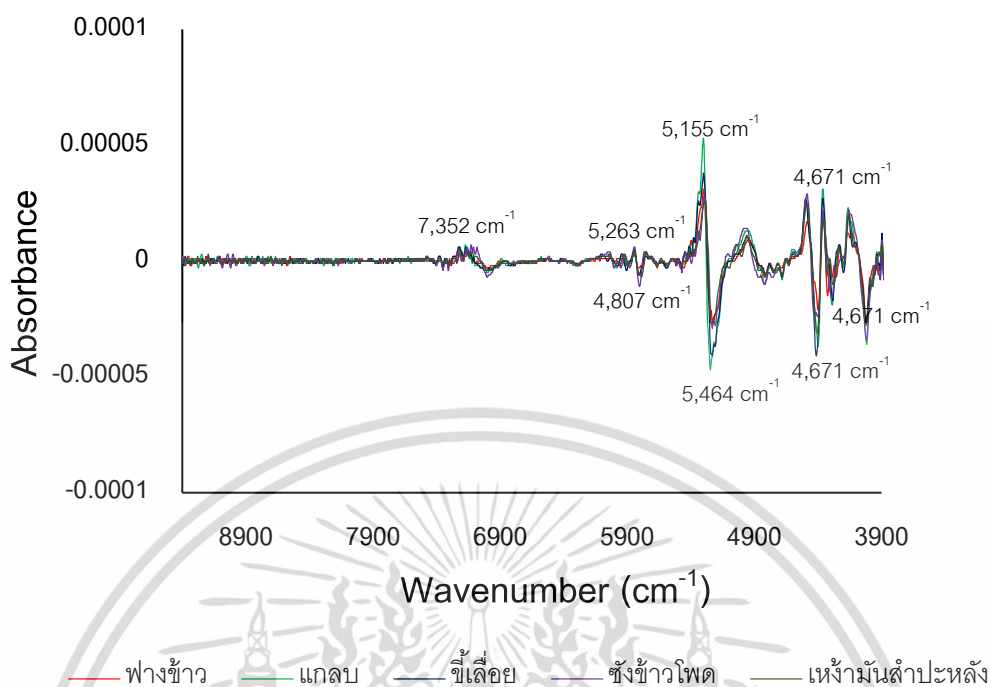


รูปที่ 4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของตัวอย่างเหง้ามันสำปะหลัง



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมเฉลี่ยการดูดกลืนคลื่นของตัวอย่างชีวมวลทั้ง 5 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 สเปกตรัมอินฟราเรดอันดับที่สองเฉลี่ยของชีวมวลทั้ง 5 ชนิด

4.2 ค่าสถิติของความร้อนสูงและความชื้นเฉลี่ยของพืชแต่ละชนิด

ชีวมวลที่ทำการทดลองมีจำนวนทั้งหมด 150 ตัวอย่าง ได้แก่ ฟางข้าว 30 ตัวอย่าง ชังข้าวโพด 30 ตัวอย่าง แกลบ 30 ตัวอย่าง ขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ด 30 ตัวอย่าง เหง้ามันสำปะหลัง 30 ตัวอย่าง นำมาวัดการดูดกลืนคลื่นด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer จากนั้นนำไปวัดค่าความร้อนสูงด้วยวิธีการ Bomb Calorimeter จะได้ค่าตาม ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าสถิติของความร้อนสูงและความชื้นเฉลี่ยของพืชแต่ละชนิด

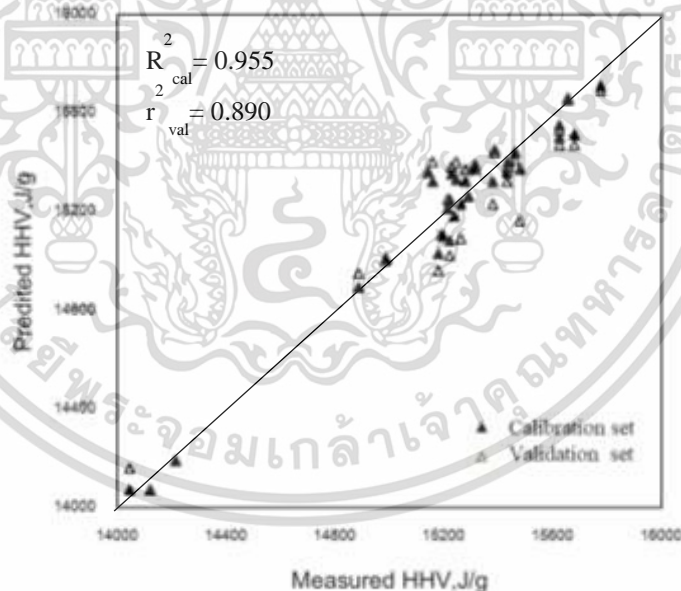
Biomass	Minimum (J/g)	Maximum (J/g)	Mean \pm SD (J/g)	%MC Avg
ฟางข้าว	14,036.0	15,770.0	15,206.1 \pm 412.9	8.8
ชังข้าวโพด	16,880.0	17,733.5	17,396 \pm 172.7	9.3
แกลบ	14,635.0	15,396.5	15,016.7 \pm 216.8	7.7
ขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือให้จากการเพาะเห็ด	12,604.5	17,777.0	15,072.5 \pm 1,210.9	9.5
เหง้ามันสำปะหลัง	13,583.0	17,003.0	15,653.2 \pm 854.8	5.5

4.3 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของชีวมวลแต่ละชนิด

4.3.1 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของฟางข้าว

สมการทำนายถูกสร้างขึ้นมาจากกลุ่มตัวอย่างสำหรับสร้างสมการทำนาย (Calibration set) จำนวน 30 ตัวอย่าง พบว่าสมการทำนายค่าความร้อนสูงที่ดีที่สุดได้มาจากข้อมูลค่าของฟางข้าวที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First Derivative โดยใช้ช่วงเลขคลื่นที่ $7,502.2 - 4,597.7\text{cm}^{-1}$ ผลที่ได้ดังแสดงใน ตารางที่ 4.2 และจากการเปรียบเทียบค่าทำนายและค่าจริงของค่าความร้อนสูงของฟางข้าว (รูปที่ 4.8) จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนสูงอยู่ใกล้เส้น Target line ซึ่งบ่งบอกถึงการทำนายได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

จาก ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.8 แสดงผลการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าว พบว่า ผลการทำนายค่าความร้อนสูง มีค่า r_{val}^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.890 ซึ่งสมการที่มีค่า R^2 ที่ 0.83 – 0.90 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและรวมถึงงานวิจัยได้แต่ต้องระมัดระวังในการใช้งาน แนะนำโดย Williams (2007) ค่า RMSECV และ ค่า Bias เท่ากับ 133 Jg^{-1} และ 11.2 Jg^{-1} ตามลำดับ



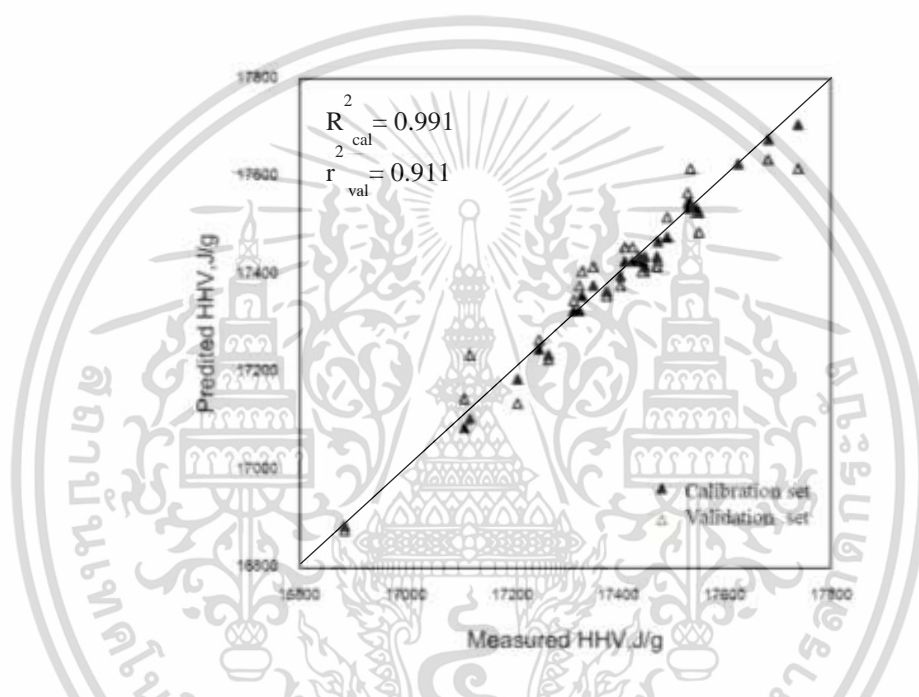
รูปที่ 4.8 กราฟ Scatter plot ระหว่างค่าทำนายและค่าวัดจริงของการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าวของชุด Calibration set และ Validation set

4.3.2 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของซังข้าวโพด

สมการทำนายถูกสร้างขึ้นมาจากกลุ่มตัวอย่างสำหรับสร้างสมการทำนาย (Calibration set) จำนวน 30 ตัวอย่าง พบว่าสมการทำนายค่าความร้อนสูงที่ดีที่สุดได้มาจากข้อมูลค่าของฟางข้าวที่ผ่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Second Derivative โดยใช้ช่วงเลขคลื่นที่ $5,450.2 - 4,246.7\text{cm}^{-1}$ ผลที่ได้ดังแสดงใน ตารางที่ 4.2 และจากการเปรียบเทียบค่าทำนายและค่าจริงของค่าความร้อนสูงของซังข้าวโพด (รูปที่ 4.9) จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนสูงอยู่ใกล้เส้น Target line ซึ่งบ่งบอกถึงการทำนายได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

จาก ตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.9 แสดงผลการทำนายค่าความร้อนสูงซังข้าวโพด พบว่า ผลการทำนายค่าความร้อนสูง มีค่า r^2_{val} อยู่ที่เท่ากับ 0.911 ซึ่งสมการที่มีค่า R^2 ที่ 0.91 – 0.96 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและรวมถึงการประกันคุณภาพใช้งานได้ แนะนำโดย Williams (2007) ค่า RMSECV และ ค่า Bias เท่ากับ 51.4 Jg^{-1} และ -5.38 Jg^{-1} ตามลำดับ

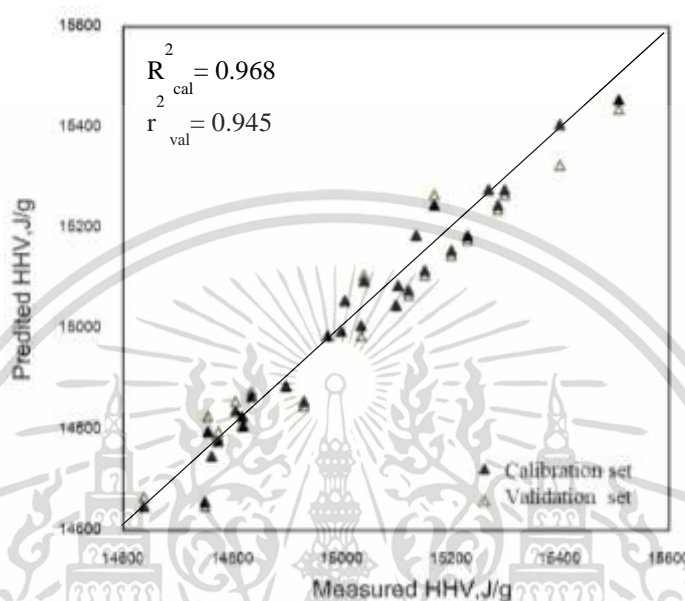


รูปที่ 4.9 กราฟ Scatter plot ระหว่างค่าทำนายและค่าวัดจริงของการทำนายค่าความร้อนสูงของซังข้าวโพดของชุด Calibration set และ Validation set

4.3.3 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของแกลบ

สมการทำนายถูกสร้างขึ้นมาจากกลุ่มตัวอย่างสำหรับสร้างสมการทำนาย (Calibration set) จำนวน 30 ตัวอย่าง พบว่าสมการทำนายค่าความร้อนสูงที่ดีที่สุดได้มาจากการดูการดูการคลี่ของฟางข้าวที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Multiplicative scattering correction โดยใช้ช่วงเลขคลื่นที่ $6,102.2 - 5,774.2\text{cm}^{-1}$ และ $4,601.6 - 4,256.7\text{cm}^{-1}$ ผลที่ได้ดังแสดงใน ตารางที่ 4.2 และจากการเปรียบเทียบค่าทำนายและค่าจริงของค่าความร้อนสูงของแกลบ (รูปที่ 4.10) จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนสูงอยู่ใกล้เส้น Target line ซึ่งบ่งบอกถึงการทำนายได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

จาก ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10 แสดงผลการทำนายค่าความร้อนสูงของแกลบ พบว่า ผลการทำนายค่าความร้อนสูง มีค่า r^2_{val} อยู่ที่เท่ากับ 0.945 ซึ่งสมการที่มีค่า R^2 ที่ 0.91 – 0.96 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและรวมถึงการประกันคุณภาพใช้งานได้ แนะนำโดย Williams (2007) ค่า RMSECV และ ค่า Bias เท่ากับ 50.7 Jg^{-1} และ 3.17 Jg^{-1} ตามลำดับ



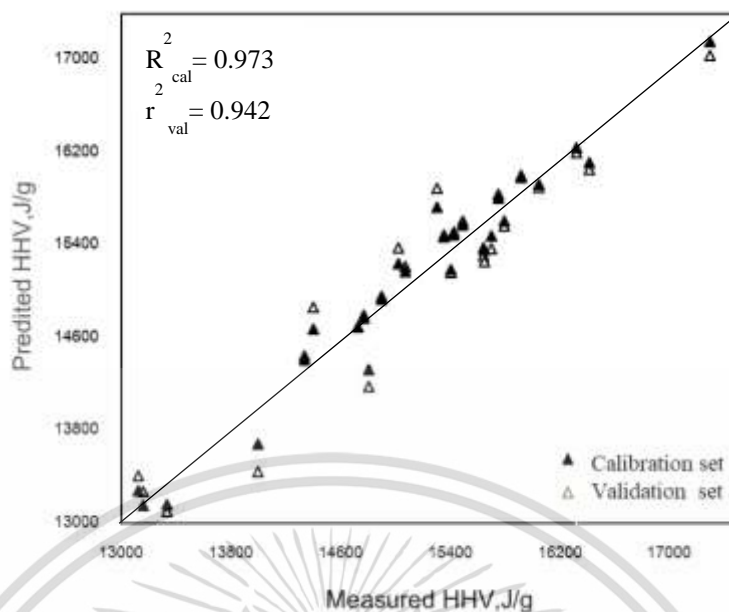
รูปที่ 4.10 กราฟ Scatter plot ระหว่างค่าทำนายและค่าวัดจริงของการทำนายค่าความร้อนสูงของแกลบของชุด Calibration set และ Validation set

4.3.4 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของซีเลื่อยไม้

ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ด

สมการทำนายถูกสร้างขึ้นมาจากกลุ่มตัวอย่างสำหรับสร้างสมการทำนาย (Calibration set) จำนวน 30 ตัวอย่าง พบว่าสมการทำนายค่าความร้อนสูงที่ดีที่สุดได้มาจากข้อมูลค่าการดูดกลืนคลื่นของซีเลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดโดยไม่มีการปรับแต่งสเปกตรัมโดยใช้ช่วงเลขคลื่นที่ $6,102 - 5,446.3 \text{ cm}^{-1}$ ผลที่ได้ดังแสดงใน ตารางที่ 4.2 และจากการเปรียบเทียบค่าทำนายและค่าจริงของค่าความร้อนสูงของซีเลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ด (รูปที่ 4.11) จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนสูงอยู่ใกล้เส้น Target line ซึ่งบ่งบอกถึงการทำนายได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

จาก ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.11 แสดงผลการทำนายค่าความร้อนสูงของซีเลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดพบว่า ผลการทำนายค่าความร้อนสูง มีค่า r^2_{val} อยู่ที่เท่ากับ 0.942 ซึ่งสมการที่มีค่า R^2 ที่ 0.91 – 0.96 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและรวมถึงการประกันคุณภาพใช้งานได้ แนะนำโดย Williams (2007) ค่า RMSECV และ ค่า Bias เท่ากับ 292 Jg^{-1} และ -7.57 Jg^{-1} ตามลำดับ



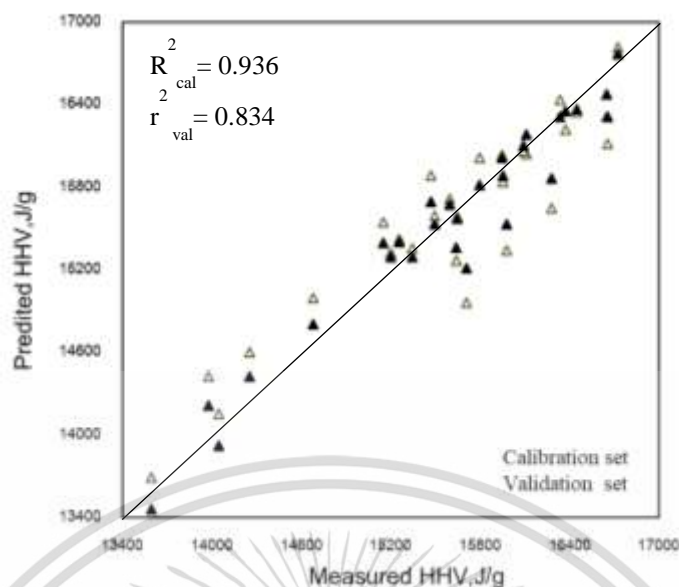
รูปที่ 4.11 กราฟ Scatter plot ระหว่างค่าทำนายและค่าวัดจริงของการทำนายค่าความร้อนสูงของซีเลื่อยไม้ยางพาราที่หลีกเลี่ยงการใช้เพาะเห็ดฟางของชุด Calibration set และ Validation set

4.3.5 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของมันสำปะหลัง

สมการทำนายถูกสร้างขึ้นมาจากกลุ่มตัวอย่างสำหรับสร้างสมการทำนาย (Calibration set) จำนวน 30 ตัวอย่าง พบว่าสมการทำนายค่าความร้อนสูงที่ดีที่สุดได้มาจากข้อมูลค่าการดูดกลืนคลื่นของมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First Derivative โดยใช้ช่วงเลขคลื่นที่ $6,102.2 - 5,774.2 \text{ cm}^{-1}$ และ $4,601.3 - 4,256.7 \text{ cm}^{-1}$ ผลที่ได้ดังแสดงใน ตารางที่ 4.2 และจากการเปรียบเทียบค่าทำนายและค่าจริงของค่าความร้อนสูงของซีเลื่อยไม้ยางพาราที่หลีกเลี่ยงการใช้เพาะเห็ด (รูปที่ 4.12) จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนสูงอยู่ใกล้เส้น Target line ซึ่งบ่งบอกถึงการทำนายได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

จาก ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.12 แสดงผลการทำนายค่าความร้อนสูงของเลื่อยไม้ยางพาราที่หลีกเลี่ยงการใช้เพาะเห็ดพบว่า ผลการทำนายค่าความร้อนสูง มีค่า R^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.834 ซึ่งสมการที่มีค่า R^2 ที่ 0.91 – 0.96 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและรวมถึงการประกันคุณภาพใช้งานได้ แนะนำโดย Williams (2007) ค่า RMSECV และ ค่า Bias เท่ากับ 376 Jg^{-1} และ 3.63 Jg^{-1} ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

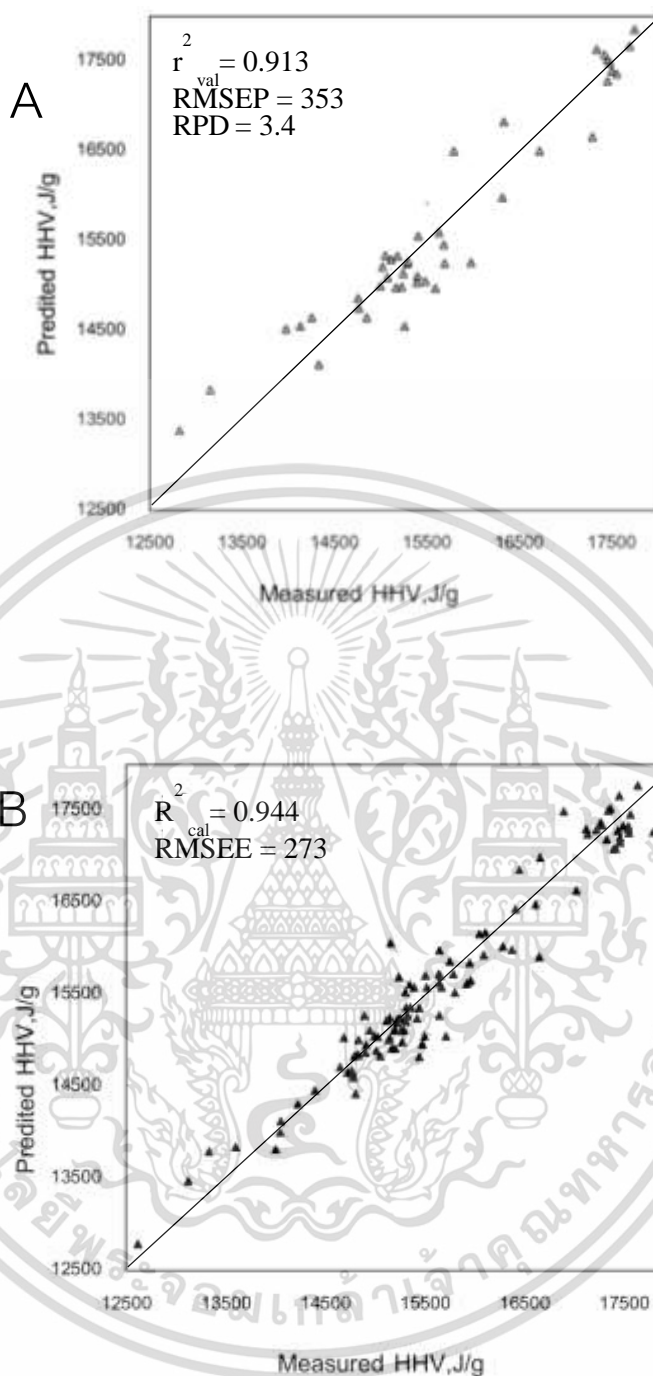


รูปที่ 4.12 กราฟ Scatter plot ระหว่างค่าทำนายและค่าวัดจริงของการทำนายค่าความร้อนสูงของเหง้ามันสำปะหลัง Calibration set และ Validation set

4.3.6 การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model) ของโมเดลรวมของชีวมวลทั้ง 5 ชนิด

สมการทำนายถูกสร้างขึ้นมาโดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มตัวอย่างสำหรับสร้างสมการทำนาย (Calibration set) จำนวน 105 ตัวอย่าง และกลุ่มสำหรับทำนาย (Prediction set) จำนวน 45 ตัวอย่าง พบว่าสมการทำนายค่าความร้อนสูงที่ดีที่สุดได้มาจากข้อมูลค่าการดูดกลืนคลื่นของชีวมวล 5 ชนิดที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative + Multiplicative scattering correction โดยใช้ช่วงเลขคลื่นที่ $7,502 - 4,597.7 \text{ cm}^{-1}$ ผลที่ได้ดังแสดงใน ตารางที่ 4.3 และจากการเปรียบเทียบค่าทำนายและค่าจริงของค่าความร้อนสูงของโมเดลรวมของพืชทั้ง 5 ชนิด (รูปที่ 4.13) จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนสูงอยู่ใกล้เส้น Target line ซึ่งบ่งบอกถึงการทำนายได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

จาก ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.13 แสดงผลการทำนายค่าความร้อนสูงของชีวมวล 5 ชนิด พบว่า ผลการทำนายค่าความร้อนสูง มีค่า r^2_{val} อยู่ที่เท่ากับ 0.913 ซึ่งสมการที่มีค่า R^2 ที่ 0.91 – 0.96 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและรวมถึงการประกันคุณภาพใช้งานได้ แนะนำโดย Williams (2007) ค่า RMSEP, ค่า RPD และ ค่า Bias เท่ากับ 353 Jg^{-1} , 3.4 Jg^{-1} และ -20.6 Jg^{-1} ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 กราฟ Scatter plot ระหว่างค่าทำนายและค่าวัดจริงของการทำนายค่าความร้อนสูงของโมเดลรวมของชีวมวลทั้ง 5 ชนิดของชุด Validation set (A) และ Calibration set (B)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 สมการทำนายค่าความร้อนสูงที่สร้างจากเทคนิค Partial Least Squares Regression (PLSR) แบบ Cross Validation ของชีวมวลแต่ละชนิด

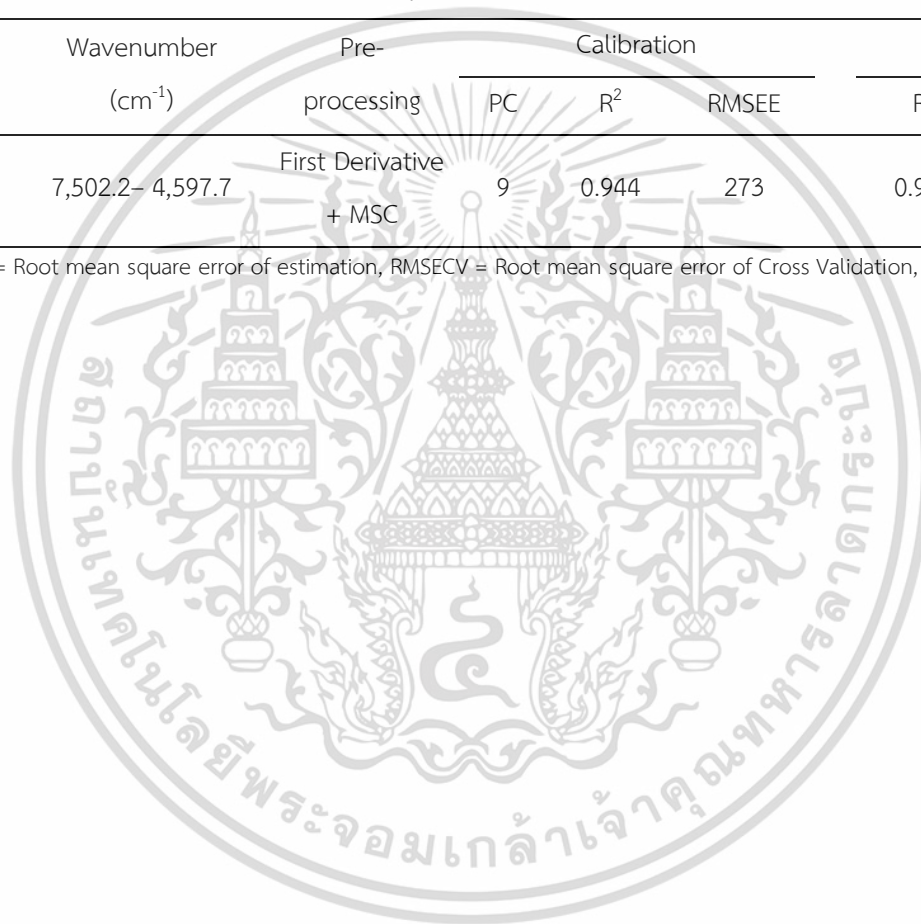
Biomass	Parameter	Wavenumber (cm ⁻¹)	Pre- processing	Calibration			Validation			
				PC	R ²	RMSEE	R ²	RMSECV	RPD	Bias
ฟางข้าว		7,502.2 – 4,597.7	First Derivative	6	0.955	100	0.890	133	3.11	11.2
ซังข้าวโพด		5,450.2 – 4,246.7	Second Derivative	7	0.991	19.3	0.911	51.4	3.38	-5.38
แกลบ	Higher heating Value (J/g)	6,102.2 – 5,774.2	MSC	4	0.968	42.8	0.945	50.7	4.28	3.17
		4,601.3 – 4,256.7								
ขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่ เหลือจากการเพาะเห็ด		6,102 – 5,446.3	-	7	0.973	234	0.942	292	4.15	-7.57
เหง้ำมันสำปะหลัง		9,403 – 7,498.3	First	6	0.931	266	0.834	376	2.45	3.63
		5,450.3 – 4,246.7	Derivative							

R² = The coefficient of determination, RMSEE = Root mean square error of estimation, RMSECV = Root mean square error of Cross Validation, RPD = Residual prediction deviation, Bias = Mean value of deviation

ตารางที่ 4.3 สมการทำนายค่าความร้อนสูงที่สร้างจากเทคนิค Partial Least Square Regression (PLSR) แบบ Test Set Validation ของชีวมวลทั้ง 5 ชนิด

Biomass	Parameter	Wavenumber (cm ⁻¹)	Pre- processing	Calibration			Validation			
				PC	R ²	RMSEE	R ²	RMSEP	RPD	Bias
ชีวมวล 5 ชนิด	Higher heating Value (J/g)	7,502.2– 4,597.7	First Derivative + MSC	9	0.944	273	0.913	353	3.4	-20.6

R² = The coefficient of determination, RMSEE = Root mean square error of estimation, RMSECV = Root mean square error of Cross Validation, RPD = Residual prediction deviation, Bias = Mean value of deviation

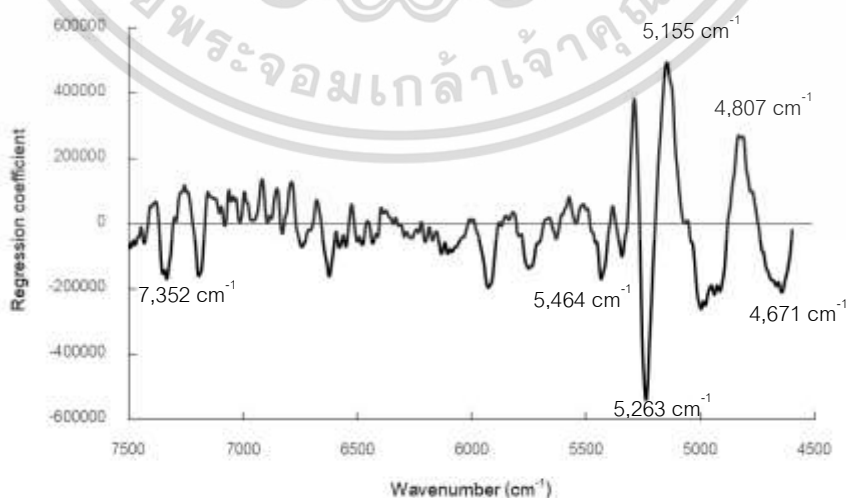


4.4 องค์ประกอบที่สำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงชีวมวลทั้ง 5 ชนิด

สารชีวมวลนั้นมีหลากหลายชนิดซึ่งมีองค์ประกอบต่างกัน องค์ประกอบขั้นต้นได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน สตาร์ช และโปรตีน ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของสมการทำนาย ซึ่งจะพิจารณาจากค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Regression Coefficient) ที่มีค่าสูงจากช่วงเลขคลื่นที่นำมาสร้างสมการทำนาย โดยแต่ละพีชนั้นจะใช้ช่วงคลื่นที่นำมาสร้างสมการทำนายที่แตกต่างกัน รายละเอียดอธิบายดังต่อไปนี้

4.4.1 องค์ประกอบที่สำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าว

ในการสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าวใช้ช่วงคลื่นที่ $7,502.2 - 4,597.7\text{cm}^{-1}$ ดังแสดงได้จาก รูปที่ 4.12 พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการในช่วงเลขคลื่นที่นำมาสร้างสมการทำนายพบว่า เลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายค่าความร้อนสูงนั้น ได้แก่ $7,352\text{cm}^{-1}$ (1,360 nm), $5,464\text{ cm}^{-1}$ (1,830 nm), $5,285\text{ cm}^{-1}$ (1,892 nm), $5,263\text{ cm}^{-1}$ (1,909 nm), $5,155\text{ cm}^{-1}$ (1,940 nm), $4,807\text{ cm}^{-1}$ (2,080 nm) และ $4,671\text{cm}^{-1}$ (2,140 nm) โดยที่เลขคลื่น $4,671\text{cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของโครงสร้างทางเคมีคือ $\text{HC}=\text{CH}$ และที่ $7,352\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของโครงสร้างทางเคมี คือ CH_3 ซึ่งทั้งสองนี้พบว่าเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของลิกนิน (Posom and Sirisomboon, 2017) นอกจากนี้ยังมีที่เลขคลื่น $4,807\text{ cm}^{-1}$ (2,080 nm) และ $5,263\text{ cm}^{-1}$ (1,909 nm) พบว่าเป็นการดูดกลืนคลื่นของสตาร์ช อีกทั้งยังมีที่เลขคลื่น $5,464\text{ cm}^{-1}$ (1,830 nm) เป็นการดูดกลืนคลื่นของเฮมิเซลลูโลส (Osborne and Fearn, 1993) และที่เลขคลื่น $5,155\text{ cm}^{-1}$ (1,940 nm), $5,285\text{ cm}^{-1}$ (1,892 nm) เป็นการดูดกลืนคลื่นของน้ำซึ่งถูกรายงานโดย Workman and Weyer (2008)

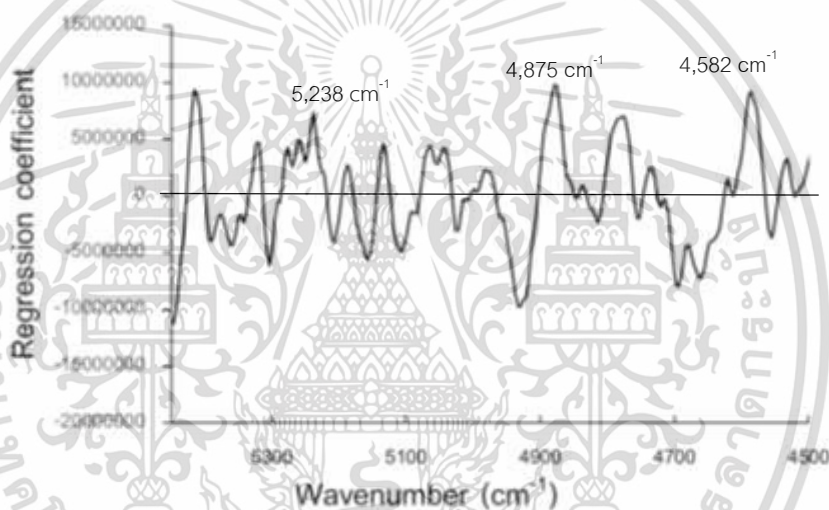


รูปที่ 4.14 กราฟ Regression coefficient plot ของสมการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งการแจ้งขึ้นเพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 องค์ประกอบที่สำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของซังข้าวโพด

ในการสร้างสมการทำนายค่าความร้อนของซังข้าวโพดในช่วงคลื่นที่ $5,450.2 - 4,246.7\text{cm}^{-1}$ ดังแสดงได้จาก รูปที่ 4.13 พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการในช่วงเลขคลื่นที่นำมาสร้างสมการทำนายพบว่า เลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายค่าความร้อนสูงนั้น ได้แก่ $5,238\text{ cm}^{-1}$ (1,909 nm), $4,875\text{ cm}^{-1}$ (2,050 nm), $4,582\text{ cm}^{-1}$ (2,190 nm), และ $4,771\text{ cm}^{-1}$ (2,096 nm) ที่เลขคลื่น $5,238\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของสตาร์ซ และที่เลขคลื่น $4,875\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของโปรตีน นอกจากนี้ยังมีที่เลขคลื่น $4,582\text{ cm}^{-1}$ (2,190 nm) ที่เป็นการดูดกลืนคลื่นของโครงสร้างทางเคมี HC=CH ซึ่งพบว่าเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของลิกนิน และเลขคลื่น $4,771\text{ cm}^{-1}$ (2,096 nm) พบว่าเป็นการดูดกลืนคลื่นของสตาร์ซ ซึ่งถูกรายงานโดย Osborne and Fearn (1993)



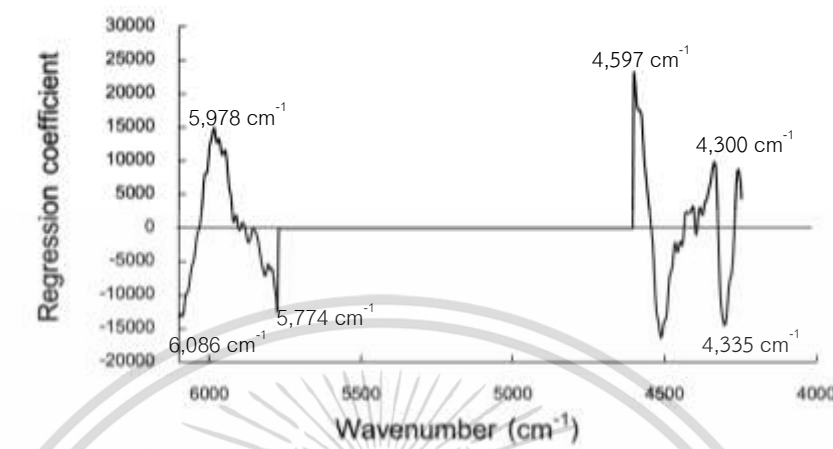
รูปที่ 4.15 กราฟ Regression coefficient plot ของสมการทำนายค่าความร้อนสูงของซังข้าวโพด

4.4.3 องค์ประกอบที่สำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของแกลบ

ในการสร้างสมการทำนายค่าความร้อนของแกลบในช่วงคลื่นที่ $6,102.2 - 5,774.2\text{cm}^{-1}$ และ $4,601.6 - 4,256.7\text{cm}^{-1}$ ดังแสดงได้จาก รูปที่ 4.14 พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการในช่วงเลขคลื่นที่นำมาสร้างสมการทำนายพบว่า เลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายค่าความร้อนสูงนั้น ได้แก่ $6,086\text{ cm}^{-1}$ (1,643 nm), $5,978\text{ cm}^{-1}$ (1,672 nm), $5,774\text{ cm}^{-1}$ (1,731 nm), $4,597\text{ cm}^{-1}$ (2,175 nm), $4,300\text{ cm}^{-1}$ (2,325 nm), $4,335\text{ cm}^{-1}$ (2,306 nm) โดยที่เลขคลื่น $6,086\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของโครงสร้างทางเคมีคือ $\text{CH}_2 = \text{CH}$ และที่เลขคลื่น $5,978\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของโครงสร้างทางเคมีคือ C-H ซึ่งทั้งสองนี้พบว่าเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของลิกนิน ถูกรายงานโดย Workman and Weyer (2008) อีกทั้งเลขคลื่นที่ $5,774\text{ cm}^{-1}$, $4,300\text{ cm}^{-1}$, $4,335\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของโครงสร้างทางเคมีคือ CH_2 ซึ่งทั้งสามนี้พบว่าเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

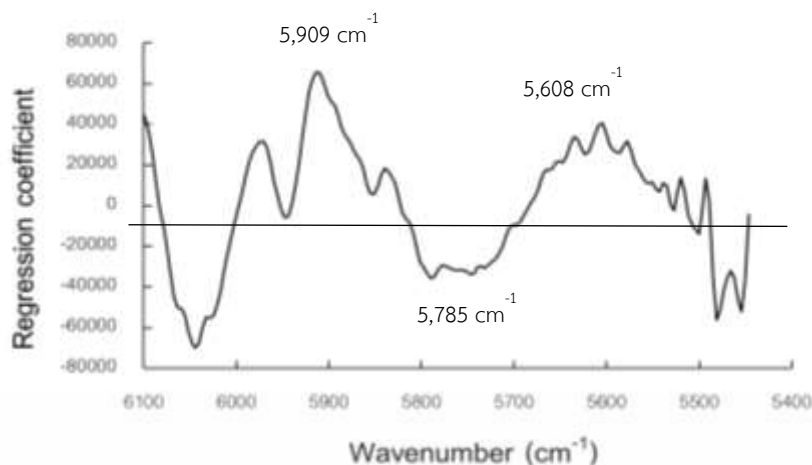
ของลิกนิน และที่เลขคลื่น $4,597\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของโปรตีน (Osborne and Fearn, 1993)



รูปที่ 4.16 กราฟ Regression coefficient plot ของสมการทำนายค่าความร้อนสูงของแกลบ

4.4.4 องค์ประกอบที่สำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของซีเลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ด

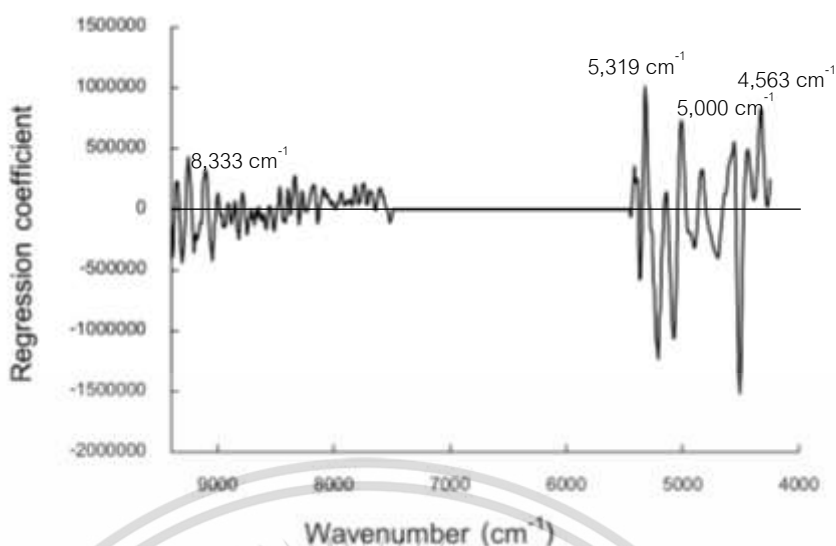
ในการสร้างสมการทำนายค่าความร้อนของซีเลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดฟาง ใช้ช่วงคลื่นที่ $6,102 - 5,446.3\text{ cm}^{-1}$ ดังแสดงได้จาก รูปที่ 4.15 พิจารณาความสัมพันธ์สัมพันธ์ของสมการในช่วงเลขคลื่นที่นำมาสร้างสมการทำนายพบว่า เลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายค่าความร้อนสูงนั้น ได้แก่ $5,909\text{ cm}^{-1}$ ($1,692\text{ nm}$), $5,785\text{ cm}^{-1}$ ($1,728\text{ nm}$), $5,608\text{ cm}^{-1}$ ($1,783\text{ nm}$) โดยที่เลขคลื่น $5,909\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของโครงสร้างทางเคมีคือ CH_3 และที่เลขคลื่น $5,785\text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของโครงสร้างทางเคมีคือ CH_2 ซึ่งทั้งสองนี้พบว่าเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของลิกนิน (Posom and Sirisomboon, 2017) นอกจากนี้ยังมีที่เลขคลื่น $5,608\text{ cm}^{-1}$ ($1,783\text{ nm}$) พบว่าเป็นการดูดกลืนคลื่นของเซลลูโลส (Osborne and Fearn, 1993)



รูปที่ 4.17 กราฟ Regression coefficient plot ของสมการทำนายค่าความร้อนสูงของซีเลื่อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ด

4.4.5 องค์ประกอบที่สำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของเห้ง้ำมันสำปะหลัง

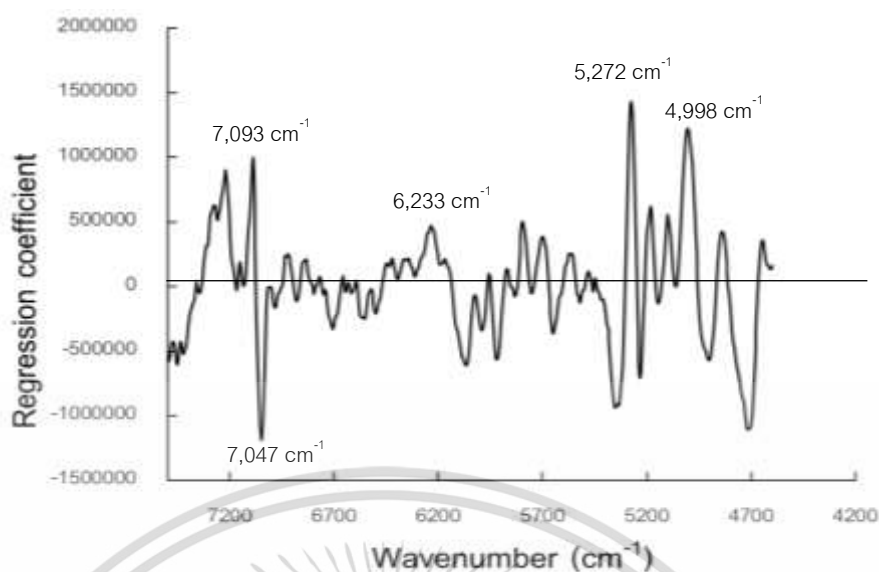
ในการสร้างสมการทำนายค่าความร้อนของเห้ง้ำมันสำปะหลังใช้ช่วงคลื่นที่ ช่วงเลขคลื่นที่ $9,403 - 7,498.3 \text{ cm}^{-1}$ และ ช่วงเลขคลื่นที่ $5,450.2 - 4,246.7 \text{ cm}^{-1}$ ดังแสดงได้จาก รูปที่ 4.16 พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการในช่วงเลขคลื่นที่นำมาสร้างสมการทำนายพบว่า เลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายค่าความร้อนสูงนั้น ได้แก่ $8,333 \text{ cm}^{-1}$ ($1,200 \text{ nm}$), $5,319 \text{ cm}^{-1}$ ($1,880 \text{ nm}$), $5,000 \text{ cm}^{-1}$ ($2,000 \text{ nm}$) และ $4,563 \text{ cm}^{-1}$ ($2,191 \text{ nm}$) โดยที่เลขคลื่น $8,333 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของโครงสร้างทางเคมีคือ CH_3 และที่ $5,319 \text{ cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นของโครงสร้างทางเคมี คือ $\text{HC}=\text{CH}$ ซึ่งทั้งสองนี้พบว่าเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของลิควินิน (Posom and Sirisomboon, 2017) นอกจากนี้ยังมีที่เลขคลื่น $5,000 \text{ cm}^{-1}$ และ $4,563 \text{ cm}^{-1}$ พบว่าเป็นการดูดกลืนคลื่นของสตาร์ช (Osborne and Fearn, 1993)



รูปที่ 4.18 กราฟ Regression coefficient plot ของสมการทำนายค่าความร้อนสูงของ
 เหน้้ำมันสำปะหลัง

4.4.6 องค์ประกอบที่สำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของโมเดลรวม

ในการสร้างสมการทำนายค่าความร้อนของโมเดลรวมในช่วงเลขคลื่นที่ 7,502.2 – 4,597.7 cm^{-1} ดังแสดงได้จาก รูปที่ 4.17 พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการในช่วงเลขคลื่นที่นำมาสร้างสมการทำนายพบว่า เลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายค่าความร้อนสูงนั้น ได้แก่ 7,093 cm^{-1} (1,409 nm), 7,047 cm^{-1} (1,419 nm), 6,233 cm^{-1} (1,609 nm), 5,230 cm^{-1} (1,912 nm), และ 4,998 cm^{-1} (2,000 nm), โดยที่เลขคลื่น 7,093 cm^{-1} , 7,047 cm^{-1} และ 6,233 cm^{-1} และ เป็นการดูดกลืนคลื่นของโครงสร้างทางเคมีคือ CH_2 ซึ่งทั้งสามนี้พบว่าเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของลิกนิน (Osborne and Fearn, 1993) นอกจากนี้ยังมีที่เลขคลื่น 5,230 cm^{-1} (1,912 nm) และ 4,998 cm^{-1} (2,000 nm)พบว่าเป็นการดูดกลืนคลื่นของสตาร์ซ (Osborne and Fearn, 1993)



รูปที่ 4.19 กราฟ Regression coefficient plot ของสมการทำนายค่าความร้อนสูงของ
ซีวมวล 5 ชนิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. ในการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าว ด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วงเลขคลื่น $12,500 - 3,600 \text{ cm}^{-1}$ ด้วยโหมดการวัดแบบ Diffuse Reflectance โดยสร้างสมการทำนายด้วยวิธี Partial least squares regression แบบ Cross validation พบว่า สมการที่ได้จากการวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของฟางข้าวโดยมีการปรับแต่งสเปกตรัมแบบ First Derivative มีค่า R^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.890 ค่า RMSECV เท่ากับ 133 Jg^{-1} ค่า RPD เท่ากับ 3.11 และค่า Bias เท่ากับ 11.2 Jg^{-1} ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและรวมถึงงานวิจัยได้แต่ต้องระมัดระวังในการใช้งาน

2. ในการทำนายค่าความร้อนสูงของของซังข้าวโพด ด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วงเลขคลื่น $12,500 - 3,600 \text{ cm}^{-1}$ ด้วยโหมดการวัดแบบ Diffuse Reflectance โดยสร้างสมการทำนายด้วยวิธี Partial least squares regression แบบ Cross validation พบว่า สมการที่ได้จากการวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของซังข้าวโพดโดยมีการปรับแต่งสเปกตรัมแบบ Second Derivative มีค่า R^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.911 ค่า RMSECV เท่ากับ 51.4 Jg^{-1} ค่า RPD เท่ากับ 3.38 และค่า Bias เท่ากับ -5.38 Jg^{-1} ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและรวมถึงการประกันคุณภาพการใช้งานได้จริง

3. ในการทำนายค่าความร้อนสูงของของแกลบ ด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วงเลขคลื่น $12,500 - 3,600 \text{ cm}^{-1}$ ด้วยโหมดการวัดแบบ Diffuse Reflectance โดยสร้างสมการทำนายด้วยวิธี Partial least squares regression แบบ Cross validation พบว่า สมการที่ได้จากการวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของแกลบโดยมีการปรับแต่งสเปกตรัมแบบ Multiplicative scattering correction มีค่า R^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.945 ค่า RMSECV เท่ากับ 50.7 Jg^{-1} ค่า RPD เท่ากับ 4.28 และค่า Bias เท่ากับ 3.17 Jg^{-1} ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและรวมถึงการประกันคุณภาพการใช้งานได้จริง

4. ในการทำนายค่าความร้อนสูงของซีลี้อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ด ด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วงเลขคลื่น $12,500 - 3,600 \text{ cm}^{-1}$ ด้วยโหมดการวัดแบบ Diffuse Reflectance โดยสร้างสมการทำนายด้วยวิธี Partial least squares regression แบบ Cross validation พบว่า สมการที่ได้จากการวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของซีลี้อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดโดยไม่มีมีการปรับแต่งสเปกตรัมมีค่า R^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.942 ค่า RMSECV เท่ากับ 292 Jg^{-1} ค่า RPD เท่ากับ 4.15 และค่า Bias เท่ากับ -7.57 Jg^{-1} ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและรวมถึงการประกันคุณภาพการใช้งานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ในการทำนายค่าความร้อนสูงของเหง้ามันสำปะหลัง ด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วงเลขคลื่น $12,500 - 3,600 \text{ cm}^{-1}$ ด้วยโหมดการวัดแบบ Diffuse Reflectance โดยสร้างสมการทำนายด้วยวิธี Partial least squares regression แบบ Cross validation พบว่า สมการที่ได้จากการวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของเหง้ามันสำปะหลังโดยมีการปรับแต่งสเปกตรัมแบบ First Derivative มีค่า R^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.834 ค่า RMSECV เท่ากับ 376 Jg^{-1} RPD เท่ากับ 2.45 และค่า Bias เท่ากับ -3.63 Jg^{-1} ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและรวมถึงการประกันคุณภาพการใช้งานได้จริง

6. การทำนายค่าความร้อนสูงของชีวมวลทั้ง 5 ชนิด ด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วงเลขคลื่น $12,500 - 3,600 \text{ cm}^{-1}$ ด้วยโหมดการวัดแบบ Diffuse Reflectance โดยสร้างสมการทำนายด้วยวิธี Partial least squares regression แบบ Full Cross validation พบว่า สมการที่ได้จากการวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นของฟางข้าวโดยมีการปรับแต่งสเปกตรัมแบบ First Derivative + Multiplicative scattering correction มีค่า R^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.913 ค่า RMSEP เท่ากับ 353 Jg^{-1} ค่า RPD เท่ากับ 3.63 และค่า Bias เท่ากับ -20.6 Jg^{-1} ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและรวมถึงการประกันคุณภาพการใช้งานได้จริง

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าความร้อนสูงของชีวมวลทั้ง 5 ชนิดได้แก่ ฟางข้าว ชังข้าวโพด แกลบ ชี้อยู่ไม่ยั้งพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ด และเหง้ามันสำปะหลัง ได้อย่างถูกต้อง รวดเร็ว และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในโรงงานไฟฟ้าชีวมวลสำหรับตรวจสอบค่าความร้อนของชีวมวล

บรรณานุกรม

- Everard, C. D., McDonnell, K. P. and Fagan, C. C., 2012. Prediction of biomass gross calorific values using visible and near infrared spectroscopy. *Biomass and Bioenergy* (45), 203 – 211.
- Fagan, C. Everard, C. D. and McDonnell, K., 2011. Prediction of moisture, calorific value, ash and carbon content of two dedicated bioenergy crops using near-infrared spectroscopy. *Bioresource Technology* (102), 5200 – 5206.
- Gillespie, G. D., Everard, C. D. and McDonnell, K. P., 2015. Prediction of biomass pellet quality indices using near infrared spectroscopy. *Energy* (80), 582 – 588.
- Huang, C., Han, L., Yang, Z. and Liu, X., 2008. Prediction of heating value of straw by proximate data, and near infrared spectroscopy. *Energy Conversion and Management* (49), 3433 – 3438.
- Huang, C., Han, L., Yang, Z. and Liu, X., 2009. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. *Waste Management* (29), 1793 – 1797.
- John, S. S, Workman, J. Jr and Mark, W.O. 2001. Application of NIR spectroscopy to agricultural products. In: *Handbook of near-infrared analysis*. Marcel Dekker, New York.
- Osborne, B.G., Fearn, T and Hindle, P.H., 1993. *Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage analysis*. Longman Science & Technology, New York.
- Posom, J., and Sirisomboon, P., 2015. Evaluation of the moisture content of *Jatropha curcas* kernels and the heating value of the oil extracted residue using near-infrared spectroscopy. *Biosystems Engineering* (130), 52 – 59.

Posom, J., Shrestha, A., Saechua, W. and Sirisomboon, P., 2016. Rapid non-destructive evaluation of moisture content and higher heating value of *Leucaena leucocephala* pellets using near infrared spectroscopy. *Energy* (107), 464 – 472. The Japan Institute of Energy. 2551. คู่มือสารชีวมวลเอเชีย. Japan.

Posom, J., and Sirisomboon, P. 2017. Evaluation of lower heating value and elemental composition of bamboo using near infrared spectroscopy. *Energy* 121: 147 – 158.

Workman, J. Jr. and Weyer, L. 2008. **Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy**. CRC Press, New York.

Williams, P. 2007. *Near-infrared Technology: Getting the best out of light*. (5th ed.). Nanaimo: Value Added Wheat CRC.

The Carbon Trust, 2012. *Biomass Fuel Procurement Guide: Key Considerations for Successful Procurement*. The Carbon Trust. UK

Zhang, K., Zhou, L., Brady, M., Xu, F., Yu, J. and Wang, D., 2017. Fast analysis of high heating value and elemental compositions of sorghum biomass using near-infrared spectroscopy. *Energy* (118), 1353 – 1360.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 4: พลังงานชีวมวล, พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท เอเบิล คอนซัลแตนท์ จำกัด, กรุงเทพฯ

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556. ฐานข้อมูลศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยประจำปีปลูก พ.ศ. 2556. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html (8 พฤษภาคม 2560)

คู่มือสารชีวมวลเอเชีย. 2552. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473\(51\)/FY473-13.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473(51)/FY473-13.pdf) (6 พฤษภาคม 2561)

วิชัย หฤทัยธนาสันต์, 2550. ความสำคัญของ NIRs Technology เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. โครงการสัมมนาวิชาการการควบคุมมาตรฐานคุณภาพของสินค้าทางการเกษตรและอุตสาหกรรมโดยวิธีไม่ทำลายเพื่อการแข่งขันบนเวทีการค้าโลก. 4 กรกฎาคม 2550. สถาบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค้นคว้า และพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ร่วมกับสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

สำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมส่งเสริมการเกษตร, 2550. พลังงานชีวมวลกับวิถีชีวิตรอบ
ด้าน. พลังงานชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ ปีที่ 3 ฉบับที่ 7. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<http://actech.agritech.doae.go.th/folder/sptf5007.pdf> (8 พฤษภาคม 2560)

นिरนาม. 2561a. การหาค่าพลังงานสะสมในอาหารและวิธีการใช้เครื่อง Bomb calorimeter [ระบบ
ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473\(51\)/FY473-13.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473(51)/FY473-13.pdf) (5
พฤษภาคม 2561)

นिरนาม. 2561b. การหาปริมาณความชื้น [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.engineerthailand.com/moisture.html> (11 พฤษภาคม 2561)

ปานมนัส ศิริสมบุรณ์. 2556. เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตเกษตรและ
อาหาร. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.nirsresearch.com>.

ปานมนัส ศิริสมบุรณ์, รวิภัทร ลาภเจริญสุขม กรรณพต แก้วสอน, พลนันท อ่อนไสว, บัณฑิต ทอง
สร้อย, อนุรักษ์ สอนสงวน, สมชาย กลัดสุข, ศิวดล รัตนโอภา, อภิชาติ สมผิว และกิ่งดาว
ชนะโชติ .2556 “การคาลิเบรชันแบบตัวแปรพหุ แนวเชิงปฏิบัติสำหรับการพัฒนา
แบบจำลองในเคมีวิเคราะห์” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา :
<http://www.nirsresearch.com>.

ยุทธภณท์ ว่องวิระยุทธ, โรจน์ศักดิ์ ประสานศรี, และนางสาววนิชา ภูประกิจ. 2560. “การวิเคราะห์
ค่าความร้อนสูงของกระถินยักษ์โดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี” วิทยานิพนธ์
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรม เกษตร บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อภิดุล แก้วกับทอง. 2555. “การตรวจสอบปริมาณเนื้อเยื่อแห้งของน้ำยางพาราสดและชันด้วยวิธีไม่
ทำลายโดยเทคนิค Near-infrared spectroscopy” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต วิศวกรรม เกษตร บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ผลการตรวจวัดค่าความร้อนและค่าความชื้นของซีเมนต์มวลแกลบ

ตัวอย่าง	ความชื้น (%db)	ค่าความร้อน (J/g)
1	8.5901	15166.0
2	8.5264	15227.0
3	8.4628	15038.0
4	8.3992	14803.0
5	8.3356	14927.5
6	8.2719	14769.0
7	8.2083	15134.0
8	8.1447	14752.5
9	8.0810	15284.0
10	8.0174	14771.0
11	7.9538	15149.5
12	7.8901	15198.5
13	7.8265	15504.0
14	7.7629	15295.0
15	7.6992	15119.0
16	7.6356	14635.0
17	7.5720	15097.5
18	7.5083	15100.0
19	7.4447	14747.0
20	7.3811	14894.5
21	7.3174	14816.5
22	7.2538	14972.0
23	7.1902	15032.0
24	7.1266	15266.0
25	7.0629	14995.0
26	6.9993	14759.0
27	6.9357	14833.0
28	6.8720	15003.0
29	6.8084	14814.5
30	6.7448	15396.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ผลการตรวจวัดค่าความร้อนและค่าความชื้นของชีวมวลฟางข้าว

ตัวอย่าง	ความชื้น (%db)	ค่าความร้อน (J/g)
1	8.6435	14114.0
2	7.8802	14036.0
3	8.5392	15215.5
4	8.4726	14207.5
5	9.0000	15473.0
6	9.8046	14980.0
7	8.2312	15213.5
8	8.5465	15222.0
9	8.0125	15134.0
10	8.4071	15255.5
11	9.1461	15239.5
12	8.3636	15372.5
13	8.3663	15186.0
14	8.3420	15174.0
15	9.3938	14880.0
16	9.1507	15232.0
17	8.9128	15154.0
18	9.0366	15273.0
19	8.9495	15425.5
20	8.4177	15675.0
21	9.2271	15619.5
22	8.6940	15770.0
23	8.7532	15649.5
24	8.9160	15618.5
25	8.7204	15380.5
26	8.5830	15283.5
27	8.9027	15308.0
28	9.1486	15457.0
29	9.6732	15428.5
30	10.2039	15206.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ผลการตรวจวัดค่าความร้อนและค่าความชื้นของชีวมวลซังข้าวโพด

ตัวอย่าง	ความชื้น (%db)	ค่าความร้อน (J/g)
1	9.3489	17733.5
2	9.6689	17678.0
3	9.3999	17621.5
4	9.1307	17526.0
5	9.3769	17488.5
6	9.5382	17528.0
7	9.4656	17532.5
8	9.3445	17105.5
9	9.4795	17374.0
10	9.5244	17423.0
11	9.0794	17400.0
12	9.1512	17470.5
13	9.4442	16880.0
14	9.1416	17206.5
15	9.3206	17548.5
16	9.0963	17435.5
17	9.1918	17116.5
18	9.2699	17542.5
19	9.1635	17468.0
20	9.5130	17442.0
21	9.3918	17322.0
22	9.3873	17247.5
23	8.2379	17311.5
24	9.0599	17327.5
25	9.0572	17265.0
26	9.1000	17349.0
27	9.1991	17445.0
28	9.2384	17409.0
29	9.3668	17445.0
30	9.7946	17440.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ผลการตรวจวัดค่าความร้อนและค่าความชื้นของชีวมวลแห้งมันสำปะหลัง

ตัวอย่าง	ความชื้น (%db)	ค่าความร้อน (J/g)
1	5.3101	13583.0
2	6.0487	15629.0
3	5.4585	15961.5
4	4.8740	15453.5
5	5.4851	16093.0
6	5.1581	16321.5
7	6.3361	17003.0
8	5.6787	16644.0
9	6.2135	13961.5
10	6.1799	14242.5
11	6.4406	15941.0
12	5.6910	15243.5
13	4.7544	16268.0
14	4.4742	14031.0
15	6.1216	15185.0
16	4.5105	15484.0
17	5.6470	16595.5
18	4.9937	16433.0
19	5.6923	15931.5
20	4.8080	14667.5
21	6.8041	15628.5
22	6.2283	16078.5
23	6.2988	16359.5
24	5.0310	15696.0
25	3.5145	15136.0
26	4.6233	15332.5
27	5.2061	16635.0
28	6.2105	16709.5
29	5.9470	15579.0
30	5.6512	15781.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ผลการตรวจวัดค่าความร้อนและค่าความชื้นของชีวมวลซีเลื้อยไม้ยางพาราที่เหลือจากการใช้เพาะเห็ดฟาง

ตัวอย่าง	ความชื้น (%db)	ค่าความร้อน (J/g)
1	9.0116	13141.0
2	11.2819	15291.5
3	10.2131	12604.5
4	10.3339	13984.5
5	10.1091	15477.0
6	10.3964	15905.0
7	10.7750	15782.0
8	10.7269	14318.0
9	10.5288	13105.5
10	10.4777	15682.5
11	10.3453	15407.5
12	10.1658	15387.5
13	10.7932	15630.5
14	11.3192	15735.0
15	10.8827	15337.5
16	11.2601	15637.5
17	11.4595	16398.5
18	10.9743	16031.5
19	10.9502	13317.5
20	11.2647	12812.0
21	10.9157	17777.0
22	6.3411	14709.5
23	6.9668	17282.0
24	7.2956	14382.5
25	7.1172	14883.5
26	6.7801	15057.0
27	7.0247	15009.5
28	7.2296	14754.0
29	7.2591	14788.0
30	5.7407	16306.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดลอง

การวัดค่าความร้อนของวัสดุด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter system c200

1.เตรียมชุดเวสเซลของ Bomb Calorimeter system c200



2.นำด้ายฝ้ายผูกกับสวดจุดจนวน (เพื่อเป็นตัวจุดชนวนในการเผาไหม้ชีวมวล)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการชั่งน้ำหนักวัสดุที่ต้องการวัดค่าความร้อน



4. นำวัสดุที่ต้องการวัดค่าความร้อนใส่ลงในถ้วยของชุด โดยให้วัสดุนั้นวางทับอยู่บนปลายทั้ง 2 ของเส้นด้าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำวัสดุใส่ในเวสเซล



6. ปิดฝาเวสเซลให้เรียบร้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำเวสเซลไปอัดแก๊ส



8. ปิดฝาจุดชนวน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. นำเวสเซลเข้าเครื่อง Bomb Calorimeter system c200



10. ปิดฝาเครื่อง Bomb Calorimeter system c200



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. นำน้ำที่ได้มีการเติมน้ำคาลิเบรทลงไป (ต้องรักษาอุณหภูมิให้ไม่เกิน 25 °C)



12. กด F2 เพื่อเริ่มการตั้งค่า

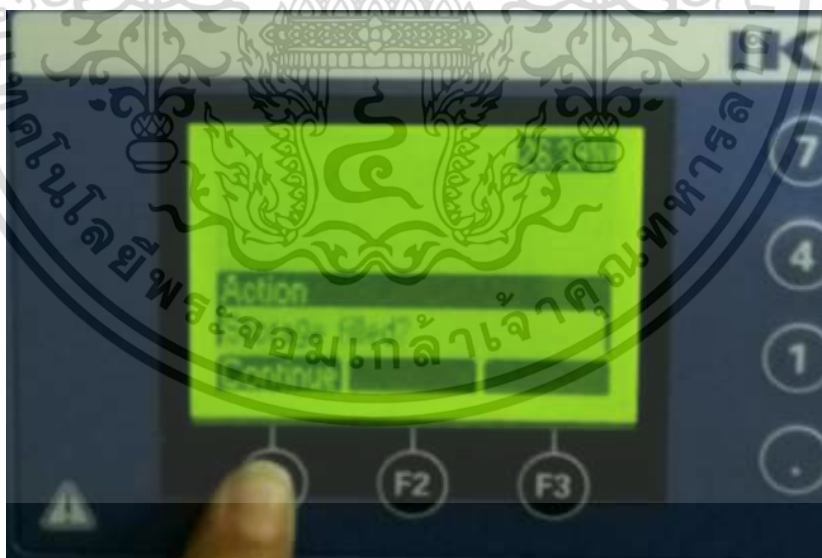


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. ใส่ค่าน้ำหนักของวัสดุที่ต้องการวัดค่าความร้อน ที่เราได้ทำการชั่งน้ำหนักไว้ก่อนหน้านี้อลงในช่อง Weight หลังจากนั้นกำหนดค่าต่างๆเสร็จแล้วกด F1

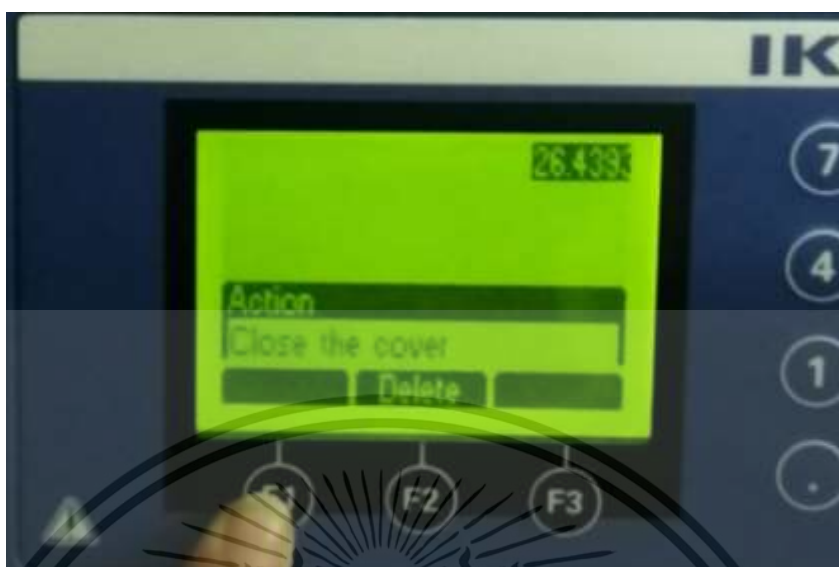


14. เครื่องจะถามว่า Storage filled? ให้กด F1 เพื่อดำเนินการต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. จากนั้นเครื่องจะถามอีกว่า Close the cover? ให้กด F1 เพื่อดำเนินการต่อไป

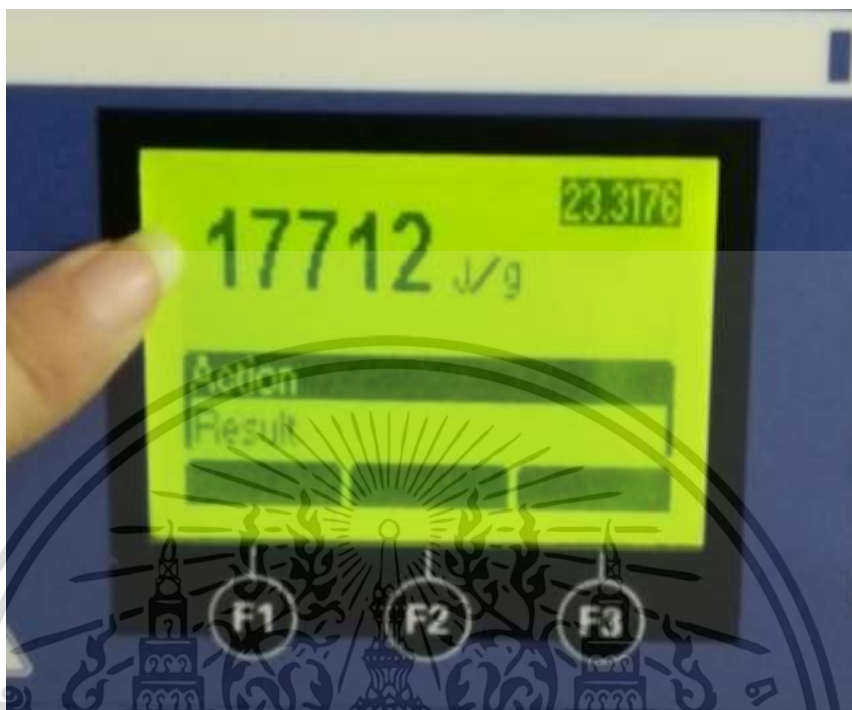


16. จากนั้นเครื่องก็จะ RUN อัตโนมัติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. จากนั้นก็ร่อนเครื่องประมวลผลเสร็จใช้เวลาประมาณ 17 นาที ก็จะได้ค่าความร้อนของวัสดุนี้ๆ ออกมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

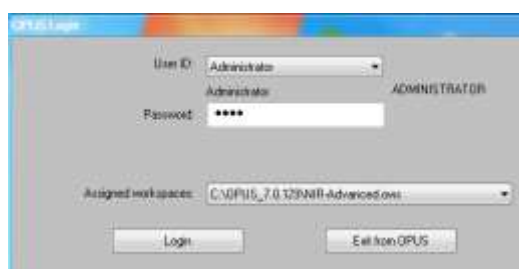


ภาคผนวก ค

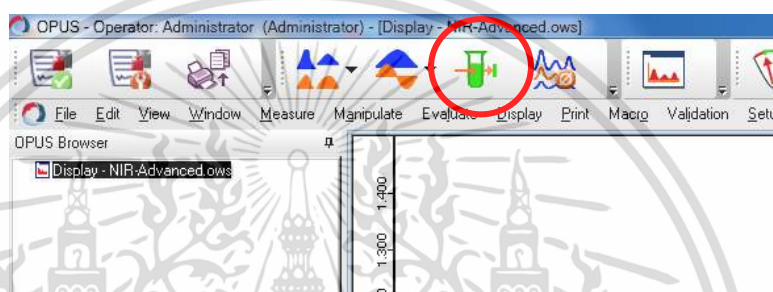
วิธีการโปรแกรม OPUS7.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

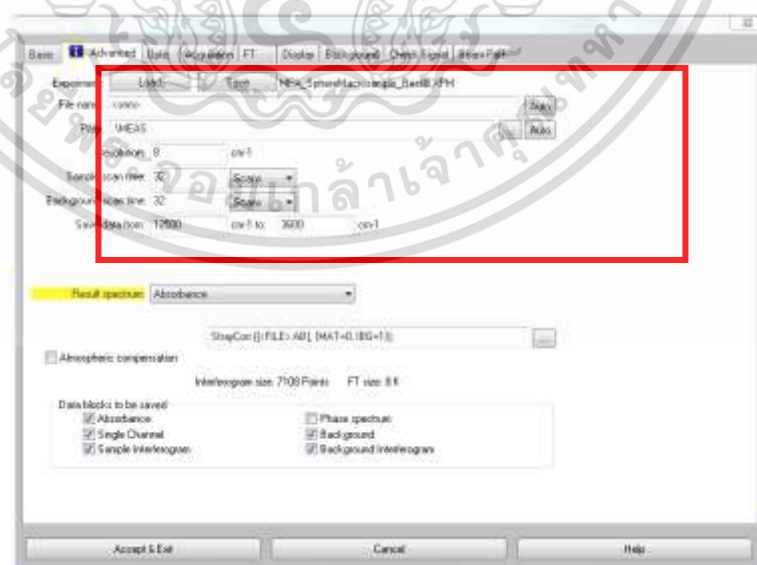
1. เปิดโปรแกรม OPUS 7.0 ใส่รหัส Password: OPUS กด Login



2. คลิกที่รูป  Advanced Data collection อยู่ด้านบน

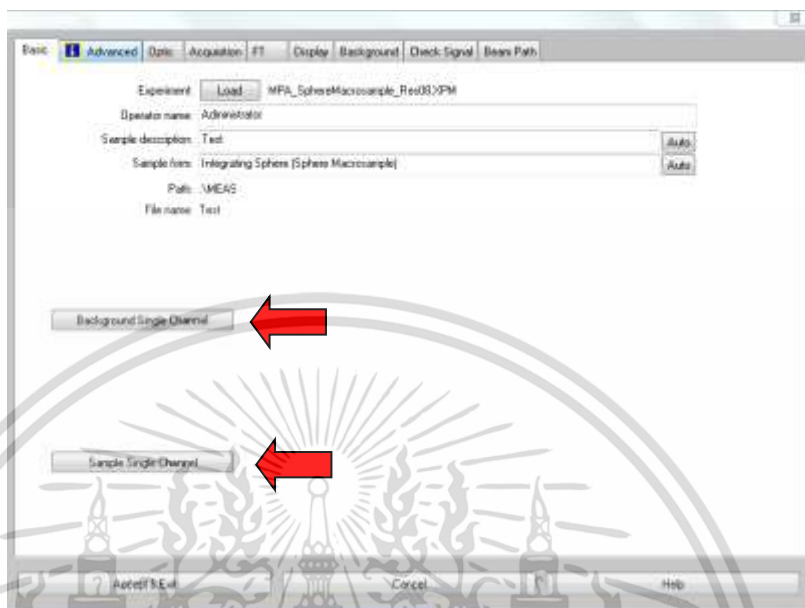


3. จากนั้นเมื่อได้หน้าต่างมาให้คลิกที่ Advanced จากนั้นเลือกไฟล์ที่ต้องการให้ spectrum เลือก กดที่ จุด 3 จุด โดยอยู่ตรงช่อง Parth และตั้งชื่อที่ File name จากนั้นตั้งค่าตามรูป Resolution 8 cm^{-1} , sample scan time 32 scan, Background scan time 32 scan, Save data from $12500\text{-}3600 \text{ cm}^{-1}$

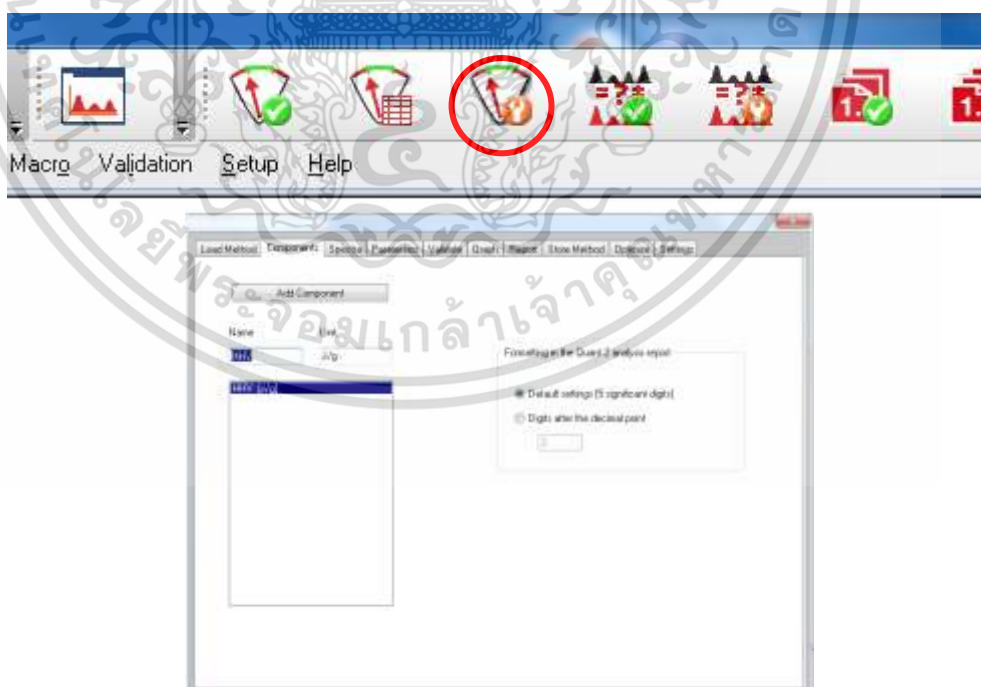


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หลังจากนั้นกลับไปคลิกที่ Basic คลิกที่ Background single Channel ก่อนการสแกน ครั้งแรกและทุกๆ 40-45 นาทีจากนั้นนำตัวอย่างที่ต้องการสแกนมาวางบนเครื่อง FT-spectrometer แล้วจึงกด Sample single Channel จะได้ spectrum ออกมา

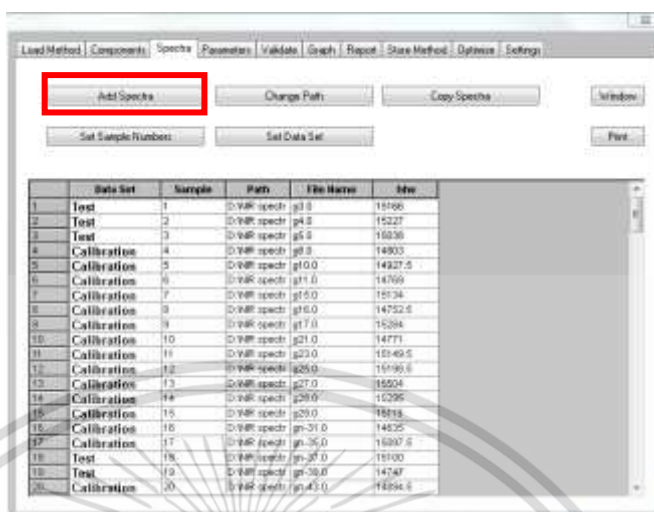


5. จากนั้นคลิกที่รูปตามด้านล่าง คือ Setup Quant 2 Method จากนั้นเราจะได้หน้าต่างขึ้นมา ให้คลิกที่ Components กด Add Components ใส่ค่า HHV ตามรูปด้านล่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กด spectra จากนั้นกด Add spectra เลือก spectra จากไฟล์ที่เราได้เลือกไว้ตอนที่ทำการสแกน และใส่ค่าวิเคราะห์ทางเคมีจะได้ตามรูปด้านล่าง



7. จากนั้นให้เราเลือก Validation ให้ดูว่าเราต้องการเลือกแบบไหนแบบ Cross Validation หรือ Test set Validation

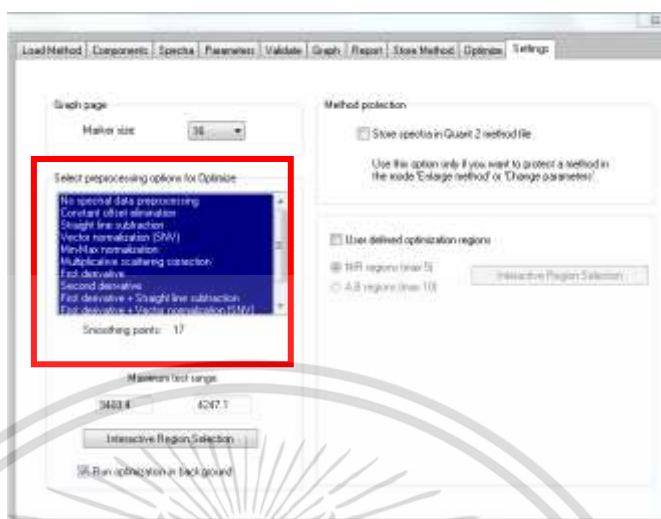


- 7.1 ถ้า Test set Validation เราต้องทำการเรียงข้อมูลค่าทางเคมีจาก น้อยไปมากก่อนโดยการกดตรงกรอบแดงที่เขียน HHV จากนั้นคลิกที่ Set data set ในกรณีนี้แบ่ง 70:30 เราจะเลือกให้ test set เป็น 30 ดังรูป

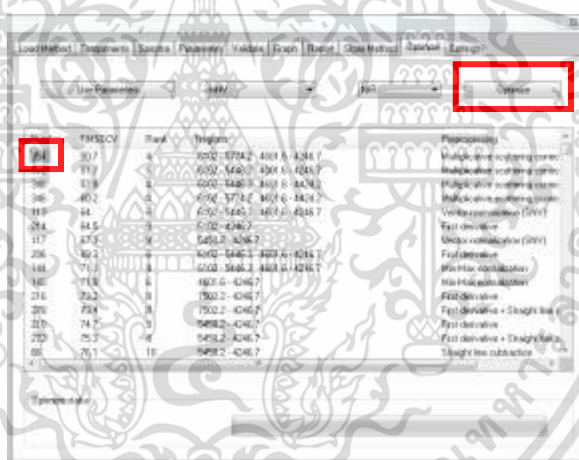


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.2 การนั้นคลิกที่ setting และเลือก Select preprocessing option for Optimize ตามรูป

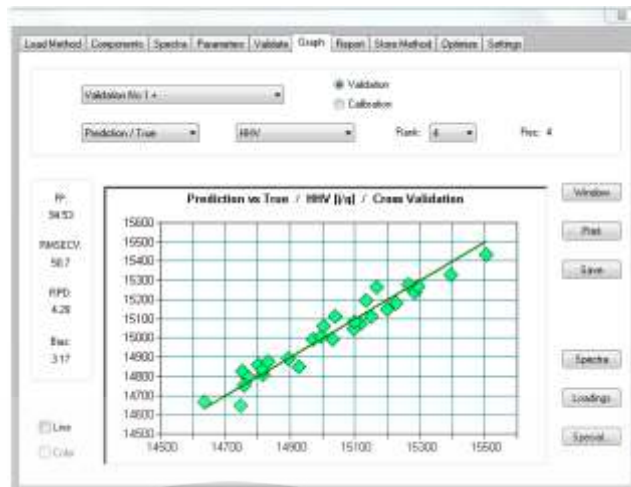


7.1.3 จากนั้นคลิก Optimize กด Optimize โปรแกรม OPUS จะเลือกสมการที่ดีที่สุดมาในช่องแรกเราจึงเลือก



7.1.4 คลิกที่ Graph เพื่อดูค่าทางสถิติต่างๆ และดูเส้น Target line ของสมการที่เราเลือกถ้าเราต้องการ Regression Coefficient กับ X-loading ให้กด Loading ทำการ Save

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

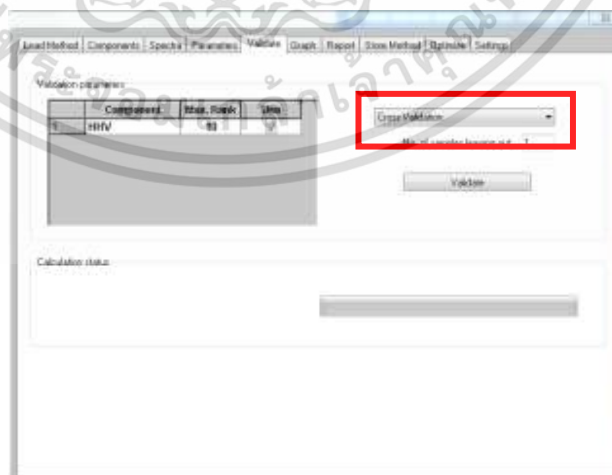


7.1.5 ทำการ Save ด้วยการคลิกที่ Store Method กด OK

Component	Rec	Rank	Raw Method	R ²	RMSECV	MAE	Use
HMV	4	4		94.53	59.7	1.1	2

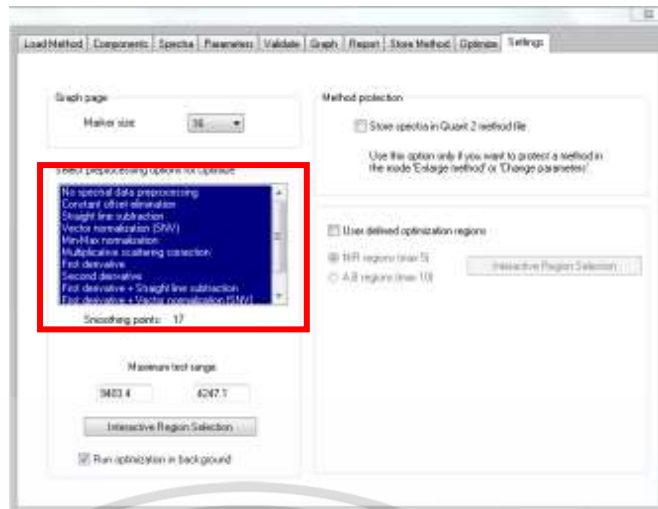
Path	In	Source
1	6182	5774.2
2	6976.6	4266.7

7.2 ถ้า Cross Validation เราเลือก Validation เลือก Cross Validation ไม่ต้องทำการเรียงข้อมูลทำตามรูปได้เลย

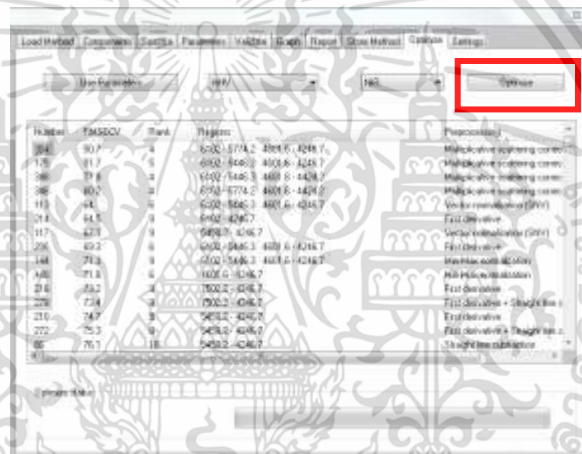


7.2.1 การนั้นคลิกที่ setting และเลือก Select preprocessing option for Optimize ตามรูป

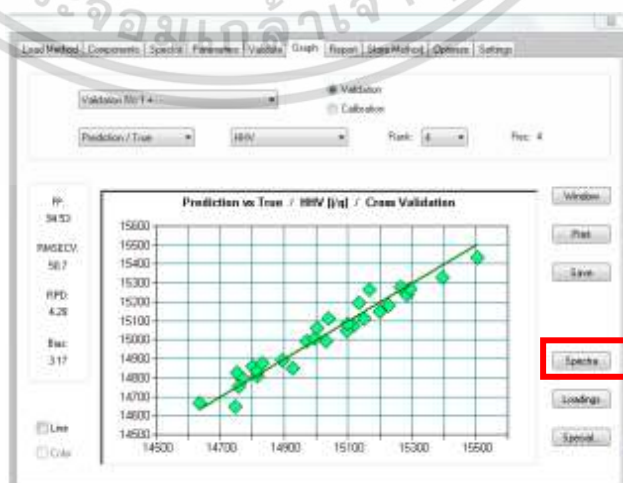
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



7.2.2 จากนั้นคลิก Optimize กด Optimize โปรแกรม OPUS จะเลือกสมการที่ดีที่สุดมาในช่องแรกเราจึงเลือก

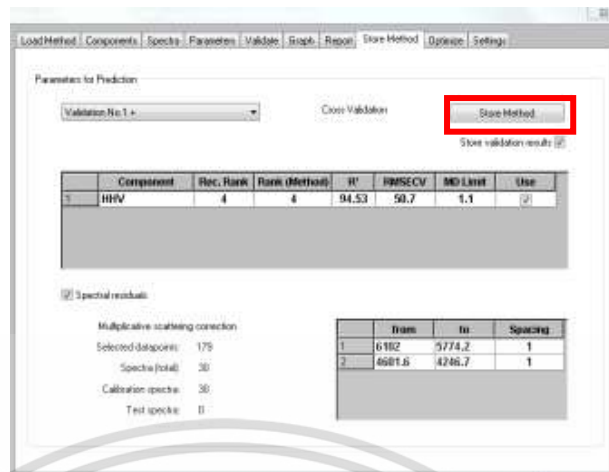


7.2.3 คลิกที่ Graph เพื่อดูค่าทางสถิติต่างๆ และดูเส้น Target line ของสมการที่เราเลือกถ้าเราต้องการ Regression Coefficient กับ X-loading ให้กด Loading ทำการ Save



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2.4 ทำการ Save ด้วยการคลิกที่ Store Method กด OK



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ผสมกับชีวมวลอื่น.....	142
การใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เพื่อทำนายค่าความชื้นสูงของฟางข้าว.....	148
การพัฒนาเครื่องคัดแยกกบวตในกระบวนการสีข้าวขนาดเล็ก.....	156
การออกแบบวงจรหารเลขโดยใช้ลอจิกเกต.....	164
การพัฒนาาระบบสารสนเทศกลุ่มอสมทรีพียเพื่อการผลิตออนไลน์.....	171
สัมประสิทธิ์การส่งผ่านคลื่นของเขื่อนกันคลื่นแบบลอยน้ำ.....	181
การวิเคราะห์ปริมาณน้ำในชุมชนเพื่อให้เป็นแนวทางในการจัดการน้ำ : กรณีศึกษา บ้านหนองบ่อ ตำบลหนองบ่อ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี.....	189
การเปรียบเทียบปริมาณฝนจากดาวเทียม TRMM กับสถานีตรวจวัดในลุ่มน้ำลำน้ำพองตอนบน.....	198
การคาดการณ์ปริมาณตะกอนจากอิทธิพลของปริมาณน้ำทำในอ่างเก็บน้ำอเนกประสงค์.....	207
การประเมินโครงการสูบน้ำทุ่งวัดสิงห์โดยใช้วิธีการประเมินแบบเร่งด่วน.....	216
การตรวจสอบการมีอยู่และกิจกรรมของแบคทีเรียกลุ่มอานาโมเบียในระบบบึงประดิษฐ์ แบบน้ำไหลได้ผิวในแนวตั้ง.....	227
การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและอัตราการไหล กรณีศึกษาลุ่มน้ำมูลส่วนที่ 3 กับลุ่มน้ำห้วยสำราญ อำเภอเมืองศรีสะเกษ จังหวัดศรีสะเกษ.....	237
การศึกษาผลของการใช้เทคนิคการระบายอากาศโดยใช้เครื่องสร้างลมเย็นแห้งต่อ ความสามารถในการลดระดับอุณหภูมิถึงแวดล้อมและอุณหภูมิแกนร่างกาย ของผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่อับอากาศ.....	250
การศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคที่ส่งผลต่อการเกิดชั้นหลอมสีขาว (White Layer) ในเหล็ก AISI 4140 ที่ผ่านกระบวนการตัดด้วยไฟฟ้าแบบใช้ลวด (Wire-cut EDM).....	257
การศึกษาการวัดระดับน้ำด้วยตัวรับรู้แบบความจุไฟฟ้าทรงกระบอกสองชั้นร่วมกับ วงจรกรองความถี่สูงผ่าน.....	265
ศึกษาปัจจัยในกระบวนการล้างต่อความเรียบผิวของเหล็กกล้าโรสนิมออกสเตนเนตคิด.....	273
อิทธิพลของความเร็วรอบการหมุนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบของ เครื่องเคลือบพอลิโธเรตแบบหมุน.....	281
การใช้แก๊สลอยสำหรับผลิตอิฐมวลเบาชนิดไม่อบไอน้ำ.....	290
แหล่งผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สูงสุดที่สามารถเชื่อมต่อได้ในระบบจำหน่าย ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในพื้นที่ห้วยยา.....	297
การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการหล่อเย็นงานกลึงเหล็กกล้าโรสนิม SUS เกรด 316.....	305

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 7-8 ธันวาคม 2560

การใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เพื่อทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าว
Using of Near Infrared Spectroscopy for Prediction of Higher Heating Value of Rice Straw

จารุวัฒน์ แป๊ะจู้¹ นาทระพี นาควะจันะ² และเจษฎา โพธิ์สม²

Jaruwat Pae-oui¹, Natrapee Nakawajana² and Jetsada Posom²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าวด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ โดยใช้เครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วงเลขคลื่น 12,500–3,600 cm^{-1} โหมดการวัดแบบ Diffuse Reflectance แล้วสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าวด้วยวิธี Partial Least Square Regression แบบ Cross Validation โดยใช้ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของฟางข้าวที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First Derivative สมการที่ดีที่สุดที่สำหรับทำนายค่าความร้อนสูง พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.0896 ค่า RMSECV เท่ากับ 133 Jg^{-1} และค่า Bias เท่ากับ 3.11 Jg^{-1} จากนั้นทำการทวนสอบสมการโดยใช้ตัวอย่างกลุ่ม unknown อื่นพบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.9703 ค่า RMSEP เท่ากับ 103 Jg^{-1} และค่า Bias เท่ากับ 12.4 Jg^{-1} แสดงให้เห็นว่ามีการทำนายค่าความร้อนสูงได้อย่างแม่นยำ ซึ่งสรุปได้ว่านี่สามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าความร้อนในฟางข้าวได้อย่างถูกต้องรวดเร็ว และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในโรงงานไฟฟ้าชีวมวลสำหรับตรวจสอบค่าความร้อนของชีวมวล

คำสำคัญ: ค่าความร้อนสูง, ฟางข้าว, เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

ABSTRACT

This research aimed to investigate the use of near infrared spectroscopy for predicting higher heating value of rich straw by FT-NIR spectrometer. The wavenumber range of 12,500–3,600 cm^{-1} with the diffuse reflection mode were used. The models were established using partial least square (PLS) regression and validated via full cross validation. The first derivative method was used as pretreated spectra before modelling. The performance of higher heating value (HHV) model provided coefficient of determination (R^2) of 0.896, root mean square error of cross validation (RMSECV) of 133 Jg^{-1} and bias of 3.11 Jg^{-1} . The calibration model validated by unknown set gave R^2 of 0.9703, root mean square error of prediction (RMSEP) of 103 Jg^{-1} and bias of 12.4 Jg^{-1} . The result showed that the prediction of HHV of rich straw had high accuracy. Hence, this technique could be used as a non-destructive and rapid method to predict the HHV value and could be applied to use in biomass power plant for investigation of HHV value in biomass.

Keyword: Higher heating value, Rich straw, Near infrared spectroscopy

¹ Corresponding author, e-mail address: natrapee.na@kmitl.ac.th

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

²Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น 40002

²Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, KhonKaen University, KhonKaen, 40002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 7-8 ธันวาคม 2560

คำนำ

ฟางข้าว (Rice Straw) เป็นส่วนของลำต้นแห้งของต้นข้าวที่นำมาผลิตข้าวออกแล้ว ซึ่งชาวนาจะเหลือทิ้งไว้ตามท้องนาหลังกระบวนการเก็บเกี่ยวข้าว ซึ่งพบว่าปริมาณฟางข้าวที่เหลือจากกระบวนการเก็บเกี่ยวอยู่ที่ประมาณ 19 ล้านตันต่อปี(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2560) อันที่จริงแล้ว ฟางข้าวนับว่าเป็นผลผลิตพลอยได้ชนิดหนึ่งจากเกษตรกรรม กล่าวคือ ประโยชน์ของฟางข้าวมีมากมาย ตั้งแต่นำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ ทำปุ๋ยหมัก คลุมดินสำหรับปลูกพืชเพื่อให้ความชุ่มชื้น ไปจนถึงเป็นชีวมวลเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีพืชมากมายหลายชนิดที่เป็นชีวมวล เช่น ข้าว ยางพารา อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้น หากกล่าวถึงพืชชีวมวลที่ได้มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจากพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย หนึ่งในนั้นคือ ชีวมวลจากข้าว ได้แก่ แกลบและฟางข้าว เนื่องจากข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีการปลูกกันทั่วทุกภาค ฟางข้าวเป็นชีวมวลที่มีศักยภาพเชิงพลังงานมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลอื่นๆ เพราะมีความชื้นต่ำประมาณ 10% และค่าความร้อนค่อนข้างสูง คืออยู่ที่ประมาณ $12\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2560)

ค่าความร้อน (Heating Value) คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อสารถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ นั่นหมายถึงค่าความร้อนจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงพลังงานที่ชีวมวลมีอยู่ ชีวมวลที่ดีควรมีค่าความร้อนสูง โดยทั่วไปค่าความร้อนวัดโดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้เวลาประมาณ 30 นาทีต่อตัวอย่าง ในการตรวจสอบ มีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างแพง และต้องมีการเตรียมตัวอย่าง ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้ทางผู้วิจัยเกิดแนวคิดริเริ่มที่จะหาค่าความร้อนของชีวมวลด้วยเทคนิคที่มีสามารถทำการวัดได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy: NIRs) มาใช้ในการตรวจสอบค่าความร้อนของชีวมวลฟางข้าว

ที่ผ่านมาเทคนิค NIRs ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย สำหรับใช้ในการตรวจสอบค่าความร้อนสูง อาทิ เช่น ใช้ NIRs ในการทำนายค่าความร้อนของฟางถูกรายงานโดย Huang et al. (2008) ต่อมาในปี 2011 Fagan et al. ได้ใช้ทำนายปริมาณความชื้น ความร้อน แฉา และ คาร์บอนคงตัว ของพืชพลังงาน 2 ชนิด นั่นคือ หญ้ายักษ์ มีลแคนทัส และข้าวเหนียวแบบหม่นเวียนช่วงคันอีกทั้ง Posom and Sinsomboon(2015) ได้รายงานว่าใช้ NIRs ในการประเมินค่าความชื้นของเมล็ดสับดำและค่าความร้อนของกากที่เหลือหลังจากสกัดน้ำมัน นอกจากนี้ ยังมีการนำ NIRs มาตรวจสอบปริมาณความชื้น และค่าความร้อนสูง ของกระถินยักษ์โดย Posom et al. (2016) และในปี 2017 ที่ผ่านมานี้ Zhang et al. ได้ใช้ NIRs ในการวิเคราะห์อย่างรวดเร็วเพื่อหาค่าความร้อนสูงและองค์ประกอบแบบละเอียดของข้าวฟ่าง เห็นได้ว่าเทคนิคนี้ได้รับการยอมรับในวงกว้าง มีความน่าเชื่อถือ และเหมาะสมที่จะนำมาใช้ ในวงการอุตสาหกรรมเกษตร อีกทั้งจากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า วิธี NIRs มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ตรวจสอบค่าความร้อนสูงของชีวมวล เพราะองค์ประกอบของสารชีวมวลมีการดูดกลืนคลื่นแสงอินฟราเรดย่านใกล้ ด้วยเหตุนี้ทางผู้จัดทำจึงมีความพยายามที่จะทำการวิจัยโดยใช้เทคนิค NIRs เพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนของฟางข้าว โดยงานวิจัยนี้จะนำตัวอย่างกลุ่มทวนลอบมาทำการทวนลอบความถูกต้องของผลการค่าความร้อน ทั้งนี้เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Huang et al.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 7-8 ธันวาคม 2560

(2008) ที่ไม่ได้มีการทวนสอบสมการทำนาย และงานวิจัยนี้ ค่าความร้อนที่ศึกษาจะเป็นค่าความร้อนสูง(Higher heating Value: HHV)

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างฟางข้าวถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มตัวอย่างสำหรับสร้างสมการทำนาย (Calibration set) จำนวน 30 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างมาจากแปลงขนาดคนละแปลงและกลุ่มตัวอย่างสำหรับทวนสอบความแม่นยำของสมการ (Unknownset) จำนวน 10 ตัวอย่าง ได้มาจากการเก็บตัวอย่างฟางข้าวจากแหล่งอื่นที่ไม่ซ้ำกับตัวอย่างที่ใช้สำหรับสร้างสมการโดยตัวอย่างฟางข้าวทั้งหมดถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C จนกระทั่งน้ำหนักไม่มีการเปลี่ยนแปลง แล้วนำไปใส่ถุงกันความชื้นเพื่อรอทำการทดลองต่อไปตัวอย่างฟางข้าวแต่ละตัวอย่างถูกบดด้วยเครื่องบด (Pulver-issette 14, Fritsch, Germany) เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีขนาดเล็กกว่า 0.2 mm จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่บดเรียบร้อยแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงต่อไป

การวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของฟางข้าว

การวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงทำการทดลองในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิห้องที่ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ โดยฟางข้าวถูกวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงโดยใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker Optics, Germany) ด้วยโหมดการวัดแบบ Diffuse Reflectance ที่ช่วงเลขคลื่น $12,500\text{--}3,600\text{ cm}^{-1}$ (Resolution 8 cm^{-1} , Sample scan time 32 scans) โดยใส่ตัวอย่างฟางข้าวลงไปในถ้วยควอทซ์ให้พอดีปากถ้วย แล้วนำมาวางบนแท่นของเครื่องเพื่อทำการวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสง จากนั้นเก็บตัวอย่างฟางข้าวด้านล่างของถ้วย เฉพาะส่วนที่โดนแสงโดยตรง สำหรับใช้เป็นตัวอย่างเพื่อวัดค่าความร้อนสูง(HHV)

การวัดค่าความร้อนสูงของฟางข้าว

นำตัวอย่างฟางข้าวแต่ละตัวอย่างจำนวน 0.5g ไปอัดเป็นเม็ดและหาความร้อนสูงด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter (c200, IKA, Germany) ตามมาตรฐาน ASTM E870 – 82(2006) โดยวัดตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณเพื่อสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าว ทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม OPUS 7.0 (Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany) สมการทำนายถูกสร้างขึ้นมาจากกลุ่มตัวอย่างสำหรับสร้างสมการทำนาย (Calibration set) จำนวน 30 ตัวอย่าง และกลุ่มตัวอย่างสำหรับทวนสอบความแม่นยำของสมการ (Unknown) จำนวน 10 ตัวอย่างที่มีค่าความร้อนสูงของทั้งสองกลุ่มตัวอย่าง ดังแสดงใน Table 1

สำหรับการสร้างสมการทำนาย(Calibration model)สมการถูกสร้างด้วยเทคนิค Partial Least Squares Regression (PLSR) โดยวิธีการพิสูจน์แบบไขว้ (Cross validation) โดยใช้ข้อมูลค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ทำการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ วิธี First Derivative, Second Derivative, Multiplicative Scatter Correction (MSC) และ Standard Normal Variate (SNV) เป็นตัวแปรอิสระและค่าความร้อนสูงที่วัดด้วยวิธี Bomb Calorimeter เป็นตัวแปรตามเพื่อให้ได้สมการทำนายที่ดีที่สุด โดยพิจารณาสมการที่มีค่า Coefficient of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 7-8 ธันวาคม 2560

determination (R^2) สูง ค่า Root mean square error of cross validation (RMSECV) ต่ำ และค่า Bias ต่ำ เมื่อได้สมการทำนายแล้วนำสมการที่ได้ไปทำนายค่าความร้อนสูงของตัวอย่างในกลุ่มสำหรับทดสอบ (Unknown set) ซึ่งเป็นการพิสูจน์ความแม่นยำของสมการทำนายแบบพิสูจน์ภายนอกซึ่งสมการที่สามารถทำนายได้ดีจะต้องมีค่า R^2 สูง ค่า Root mean square error of prediction (RMSEP) และค่า Bias ที่ต่ำ

Table 1 Higher heating value of calibration set and unknown

Set	Minimum(Jg ⁻¹)	Maximum(Jg ⁻¹)	Mean±SD(Jg ⁻¹)
Calibration	14,036.0	15,770.0	15,206.0±420.04
Unknown	14,912.5	15,708.0	15,316.2±282.98

SD = Standard deviation

ผลการทดลองและวิจารณ์

ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของตัวอย่างฟางข้าว

ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของตัวอย่างฟางข้าวทั้ง 30 ตัวอย่าง ดังแสดงใน Figure 1 จะเห็นได้ว่า ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของตัวอย่างฟางข้าวมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือพบว่าการดูดกลืนคลื่นแสงอย่างชัดเจนที่เลขคลื่น 5,155 cm⁻¹, 4,762 cm⁻¹, 4,405 cm⁻¹ และ 4,019 cm⁻¹ โดยที่การดูดกลืนคลื่นแสงที่เลขคลื่น 5,155 cm⁻¹ เป็นการดูดกลืนคลื่นแสงของน้ำ (Workman and Weyer, 2008) ซึ่งหมายถึงความชื้นที่เป็นองค์ประกอบหลักอย่างหนึ่งของฟางข้าว และที่เลขคลื่น 4,762 cm⁻¹ เป็นการดูดกลืนคลื่นแสงของแป้ง (Workman and Weyer, 2008) นอกจากนี้คือที่เลขคลื่น 4,405 cm⁻¹ และ 4,019 cm⁻¹ (Workman and Weyer, 2008) เป็นการดูดกลืนคลื่นแสงของเซลลูโลส กล่าวคือ ทั้งแป้งและเซลลูโลสล้วนแต่เป็นองค์ประกอบชั้นต้นของสารชีวมวล ซึ่งได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง และโปรตีน

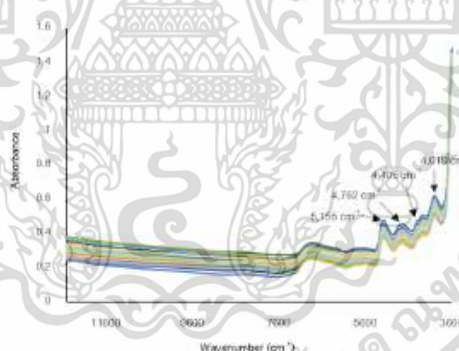


Figure 1 The original spectra of rice straw

การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง (Calibration Model)

สมการทำนายถูกสร้างขึ้นมาจากกลุ่มตัวอย่างสำหรับสร้างสมการทำนาย (Calibration set) จำนวน 30 ตัวอย่างพบว่าสมการทำนายค่าความร้อนสูงที่ดีที่สุดได้มาจากข้อมูลค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของฟางข้าวที่ผ่าน

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 7-8 ธันวาคม 2560

การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี FirstDerivative โดยใช้ช่วงเลขคลื่นที่ $7,502.2 - 4,597.7 \text{ cm}^{-1}$ ผลที่ได้ดังแสดงใน Table 2

จาก Table 2 แสดงผลการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าว พบว่า ผลการทำนายค่าความร้อนสูง มีค่า R^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.8960 ซึ่งสมการที่มีค่า R^2 ที่ 0.83- 0.90 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานและรวมถึงงานวิจัยได้ แต่ต้องระมัดระวังในการใช้งาน แนะนำโดย Williams (2007) ค่า RMSECV และค่า Bias เท่ากับ 133 Jg^{-1} และ 11.2 Jg^{-1} ตามลำดับ

Table 2 Statistic of calibration model of the rice straw

Parameter	Wavenumber (cm^{-1})	Pre- processin g	Calibration			Validation			
			PC	R^2	RMSEE	R^2	RMSECV	RPD	Bias
Higher heatingValue(Jg^{-1})	7,502.2- 4,597.7	First Derivative	6	0.9547	100	0.8960	133	3.11	11.2

R^2 = The coefficient of determination, RMSEE = Root mean square error of estimation, RMSECV = Root mean square error of Cross Validation, RPD = Residual prediction deviation, Bias = Mean value of deviation

องค์ประกอบที่สำคัญในสเปกตรัมในการทำนายค่าความร้อนสูงของฟางข้าว

ฟางข้าวเป็นสารชีวมวลที่มีองค์ประกอบขั้นต้น ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง และโปรตีน (John et al., 2001) ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของสมการทำนาย ดังนั้นจึงพิจารณาจากช่วงเลขคลื่นที่สามารถอธิบายถึงองค์ประกอบสำคัญในสเปกตรัมที่มีความสัมพันธ์กับค่าทำนาย ซึ่งจะพิจารณาจากค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Regression Coefficient) ที่มีค่าสูงจากช่วงเลขคลื่นที่นำมาสร้างสมการทำนาย คือ ช่วงเลขคลื่นที่ $7,502.2 - 4,597.7 \text{ cm}^{-1}$ ดังแสดงได้จาก Figure 2

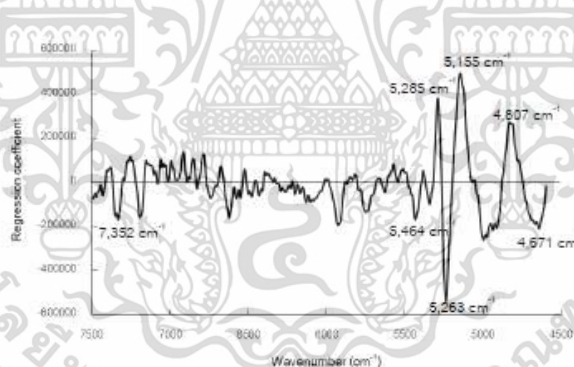


Figure 2 The regression coefficient plot of the partial least squares regression analysis model based on first derivative of absorbance spectra.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 7-8 ธันวาคม 2560

พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการในช่วงเลขคลื่นที่นำมาสร้างสมการทำนายพบว่า เลขคลื่นที่มีผลต่อการทำนายค่าความร้อนสูงนั้นได้แก่ $7,352\text{cm}^{-1}$ (1,360 nm), $5,464\text{cm}^{-1}$ (1,830 nm), $5,285\text{cm}^{-1}$ (1,892nm), $5,263\text{cm}^{-1}$ (1,909 nm), $5,155\text{cm}^{-1}$ (1,940nm), $4,807\text{cm}^{-1}$ (2,080 nm) และ $4,671\text{cm}^{-1}$ (2,140 nm) โดยที่เลขคลื่น $4,671\text{cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นแสงของโครงสร้างทางเคมีคือ HC=CH และที่ $7,352\text{cm}^{-1}$ เป็นการดูดกลืนคลื่นแสงของโครงสร้างทางเคมีคือ CH_2 ซึ่งทั้งสองนี้พบว่าเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของลิกนิน (Posom and Sirisomboon, 2017) นอกจากนี้ยังมีที่เลขคลื่น $4,807\text{cm}^{-1}$ (2,080 nm) และ $5,263\text{cm}^{-1}$ (1,909 nm) พบว่าเป็นการดูดกลืนคลื่นแสงของเบ็ง อีกทั้งยังมีที่เลขคลื่น $5,464\text{cm}^{-1}$ (1,830 nm) เป็นการดูดกลืนคลื่นแสงของเฮมิเซลลูโลส (Osborne and Fearn, 1993) และที่เลขคลื่น $5,155\text{cm}^{-1}$ (1,940nm), $5,285\text{cm}^{-1}$ (1,892nm) เป็นการดูดกลืนคลื่นแสงของน้ำซึ่งถูกรายงานโดย Workman and Weyer (2008)

การทวนสอบสมการทำนาย

จาก Table 3 แสดงค่าจริงและค่าทำนายของค่าความร้อนสูงของตัวอย่างในชุดทวนสอบจำนวน 10 ตัวอย่างพบว่า ค่าความร้อนสูงจริงและค่าความร้อนสูงที่ได้จากการทำนายด้วยเครื่อง FT – NIR Spectrometer มีค่าใกล้เคียงกันมาก และเมื่อนำค่าความร้อนสูงจริงและค่าความร้อนสูงที่ได้จากการทำนายมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนสูงเข้าใกล้เส้น Target line นั้นหมายความว่า สมการมีความแม่นยำในการทำนายสูง โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9703 ค่า RMSEP เท่ากับ 103 Jg^{-1} และค่า Bias เท่ากับ 12.4 Jg^{-1} ดังแสดงใน Figure 3

Table 3 The measured values and predicted values of higher heating value from unknown set

Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
True	14,912.5	15,183.5	15,018.0	15,090.5	15,240.0	15,229.5	15,617.0	15,548.5	15,614.5	15,708.0
Prediction	15,058.0	15,060.0	15,078.0	15,154.0	15,301.0	15,317.0	15,435.0	15,461.0	15,553.0	15,624.0

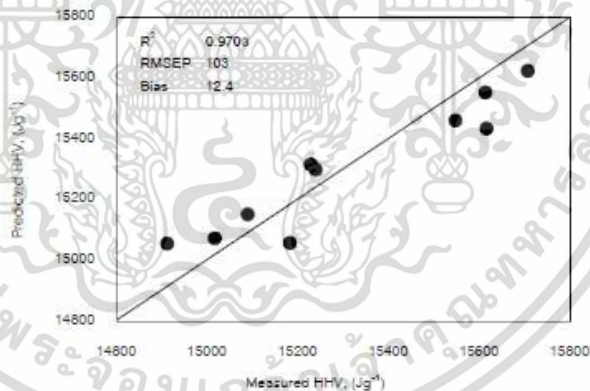


Figure 3 Scatter plot of measured versus predicted values of higher heating value from unknown set.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 7-8 ธันวาคม 2560

สรุปผลและเสนอแนะ

จากผลการทดลองการทำนายค่าความชื้นสูงของฟางข้าว ด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วงคลื่น 12,500–3,600 cm^{-1} ด้วยโหมดการวัดแบบ Diffuse Reflectance โดยสร้างสมการทำนายด้วยวิธี Partial least squares regression แบบ Cross validation พบว่า สมการที่ได้จากการวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของฟางข้าวโดยมีการปรับแต่งสเปกตรัมแบบ First Derivative มีค่า R^2 อยู่ที่เท่ากับ 0.8960 ค่า RMSECV เท่ากับ 13.3 Jg^{-1} และค่า Bias เท่ากับ 11.2 Jg^{-1} และเมื่อนำสมการที่ดีที่สุดมาใช้ในการทำนายค่าความชื้นสูงของตัวอย่างกลุ่มทดสอบ (Unknown set) พบว่า สามารถทำนายได้อย่างแม่นยำ มีค่า R^2 อยู่ที่ 0.9703 ค่า RMSEP เท่ากับ 10.3 Jg^{-1} และค่า Bias เท่ากับ 12.4 Jg^{-1} ซึ่งสรุปได้ว่าเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้สามารถนำมาใช้ในการทำนายค่าความชื้นสูงในฟางข้าวได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว อีกทั้งยังเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานจริงสำหรับโรงงานไฟฟ้าชีวมวล

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับการอนุเคราะห์เครื่องมือจากศูนย์วิจัยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร เพื่อใช้ในการทดลอง และได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากกองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สัญญาเลขที่ KREF016007) ทางคณะผู้จัดการประชุมขอขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 2560. ข้อมูลทั่วไป.
แหล่งที่มา: http://www.biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html, 5 มิถุนายน 2560
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 2560. ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย.
แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=486, 5 มิถุนายน 2560
- ASTM E870 – 82 (2006) Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels.
แหล่งที่มา: <http://www.astm.org/Standards/E870.htm>, 8 ตุลาคม 2560
- Fagan, C. Everard, C. D. and McDonnell, K., 2011. Prediction of moisture, calorific value, ash and carbon content of two dedicated bioenergy crops using near-infrared spectroscopy. *Bioresource Technology* 102, 5200 – 5206.
- Huang, C., Han, L., Yang, Z. and Liu, X. 2008. Prediction of heating value of straw by proximate data, and nearinfrared spectroscopy. *Energy Conversion and Management* 49: 3433 – 3438.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 7-8 ธันวาคม 2560

John, S. S, Workman, J. Jr and Mark, W.O. 2001. Application of NIR spectroscopy to agricultural products. In: Handbook of near-infrared analysis. Marcel Dekker, New York

Osborne, B.G., T. Fearn and P.H. Hindle. 1993. Practical NIR Spectroscopy with Applications in Food and Beverage analysis. Longman Science & Technology, New York.

Posom, J., and Sirisomboon, P. 2015. Evaluation of the moisture content of *Jatropha curcas* kernels and the heating value of the oil extracted residue using near-infrared spectroscopy. Biosystems Engineering 130: 52 – 59.

Posom, J., Shrestha, A., Saechua, W. and Sirisomboon, P. 2016. Rapid non-destructive evaluation of moisture content and higher heating value of *Leucaena leucocephala* pellets using near infrared spectroscopy. Energy 107: 464 – 472.

Posom, J., and Sirisomboon, P. 2017. Evaluation of lower heating value and elemental composition of bamboo using near infrared spectroscopy. Energy 121: 147 – 158.

Workman, J. Jr. and Weyer, L. 2008. Practical guide to interpretive near-infrared spectroscopy. CRC Press, New York.

Williams, P. 2007. Near-infrared Technology: Getting the best out of light. (5th ed.). Nanaimo: Value Added Wheat CRC.

Zhang, K., Zhou, L., Brady, M., Xu, F., Yu, J. and Wang, D. 2017. Fast analysis of higher heating value and elemental composition of sorghum biomass using near-infrared spectroscopy. Energy 118, 1353 – 1360.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายจรรูวัฒน์ แป๊ะอู๋
วัน เดือน ปีเกิด	4 กุมภาพันธ์ 2538
ที่อยู่ปัจจุบัน	45/81 ม.สวีทการ์เด้นวิลล์ ตำบลบึงคำพร้อย อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12150
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี (2556 - 2560) วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail	jaruwat.kmitl52@gmail.com



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้