



การวัดค่าความชื้นของวัสดุชีวมวลทางการเกษตร
โดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
MOISTURE CONTENT MEASUREMENT OF AGRICULTURAL BIOMASS USING
NEAR INFRARED SPECTROSCOPIC TECHNIQUE

ชัยวัฒน์ สุพรรณ

CHAIWAT SUPHAN

บัญชา บัวพรม

BANCHA BAOPHOM

มงคลศักดิ์ อักษรสม

MONGKOLSAK AGSONSOM

ธัญพิสิทธิ์ มาสวัสดิ์

THANPISIT MASAWAT

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล และวิศวกรรมพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าความชื้นของวัสดุชีวมวลทางการเกษตร
โดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
MOISTURE CONTENT MEASUREMENT OF AGRICULTURAL BIOMASS USING
NEAR INFRARED SPECTROSCOPIC TECHNIQUE

ชัยวัฒน์ สุพรรณ

CHAIWAT SUPHAN

บัญชา บัวพรม

BANCHA BAOPHOM

มงคลศักดิ์ อักษรสม

MONGKOLSAK AGSONSOM

ธัญพิสิทธิ์ มาสวัสดิ์

THANPISIT MASAWAT

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล และวิศวกรรมพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์


สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOISTURE CONTENT MEASUREMENT OF AGRICULTURAL BIOMASS USING
NEAR INFRARED SPECTROSCOPY TECHNIQUE



CHAIWAT SUPHAN
BANCHA BAOPHOM
MONGKOLSAK AGSONSOM
THANPISIT MASAWAT

A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN
MECHANICAL ENGINEERING AND ENERGY ENGINEERING
DEPARTMENT OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
PRINCE OF CHUMPHON CAMPUS

2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

DEPARTMENT OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

PRINCE OF CHUMPHON CAMPUS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การวัดค่าความชื้นของวัสดุชีวมวลทางการเกษตรโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

PROJECT TITLE Moisture content measurement of agricultural biomass using near infrared spectroscopic technique

ชื่อนักศึกษา นายชัยวัฒน์ สุพรรณ รหัสประจำตัว 61512033
 นายบัญชา บัวพรม รหัสประจำตัว 61512051
 นายมงคลศักดิ์ อักษรสม รหัสประจำตัว 61512065
 นายธัญพิสิทธิ์ มาสวัสดิ์ รหัสประจำตัว 61514006

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล และวิศวกรรมพลังงาน

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ว่าที่ร้อยตรี.ดร.กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์


อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ศรีรัตน์ ช่วยบุญ

คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์			ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชัยวัฒน์	รัตนมีชัยสกุล	กรรมการคุมสอบ	
รศ.ดร.ธัชพล	จุงเจริญ	กรรมการคุมสอบ	
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์	รัตนเดช	กรรมการคุมสอบ	
ผศ.ดร.วารุณี	ลิ้มมัน	กรรมการคุมสอบ	
รศ.ดร.นฤปดี	ศรีสังข์	กรรมการคุมสอบ	
ผศ.ดร.ศิริวรรณ	ศรีสังข์	กรรมการคุมสอบ	
ผศ.ว่าที่ร้อยตรี ดร.กิตติศักดิ์	เพ็ชรพันธ์	อาจารย์ที่ปรึกษา	
ผศ.ดร.ศรีรัตน์	ช่วยบุญ	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2564 เวลา 14.30-15.30 น.

สถานที่สอบ ONLINE

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ กุศล)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 22 กรกฎาคม 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การวัดค่าความชื้นของวัสดุชีวมวลทางการเกษตรโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	
ชื่อนักศึกษา	นายธัญพิสิทธิ์ มาสวัสดิ์	รหัสประจำตัว 61514006
	นายชัยวัฒน์ สุพรรณ	รหัสประจำตัว 61512033
	นายบัญชา บัวพรหม	รหัสประจำตัว 61512051
	นายมงคลศักดิ์ อักษรสม	รหัสประจำตัว 61512065
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมพลังงาน และวิศวกรรมเครื่องกล	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ว่าที่ร้อยตรี ดร.กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์	
ปริญญานิพนธ์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ศรียรัตน์ ช่วยบุญ	
ปริญญานิพนธ์ร่วม		

บทคัดย่อ

เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยสามารถตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่โมเลกุลมีองค์ประกอบของพันธะ H-O H-N H-C และ C=O ซึ่งรวมไปถึงความชื้น ได้อย่างรวดเร็ว ถูกต้อง แม่นยำ และไม่ทำลายตัวอย่าง ดังนั้นโครงงานนี้จึงได้มีการศึกษา และทดลองการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีร่วมกับการใช้แบบจำลองการถดถอยน้อยที่สุดกำลังสองบางส่วน (PLSR) และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ที่ผ่านการปรับแต่งสัญญาณสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (SNV) อนุพันธ์อันดับสอง (Second Derivative) และใช้การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับอนุพันธ์อันดับสอง (SNV + Second Derivative) เพื่อหาความชื้นในชีวมวลตัวอย่าง กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม และชีวมวลแบบผสม จำนวน 100 100 และ 120 ตัวอย่างตามลำดับ จากการทดลองพบว่าแบบจำลองของชุดตัวอย่างกะลาปาล์มที่มีประสิทธิภาพที่สุดคือ แบบจำลอง PLSR ที่มีการปรับแต่งค่าสัญญาณแบบ smoothing + SNV + Second Derivative โดยมีค่า r^2 และค่า RMSEP ของชุดข้อมูล Prediction set เท่ากับ 0.714 และ 3.67%wb ตามลำดับ ค่า R^2 และค่า RMSECV ของชุดข้อมูล Training set เท่ากับ 0.793 และ 3.60%wb ตามลำดับ ชุดตัวอย่างทะลายปาล์ม ที่มีประสิทธิภาพที่สุดคือ แบบจำลอง ANN ที่มีการปรับแต่งค่าสัญญาณแบบ smoothing + Second Derivative ดีที่สุดโดยมีค่า r^2 และค่า RMSEP ของชุดข้อมูล Prediction set เท่ากับ 0.924 และ 2.47%wb ตามลำดับ ค่า R^2 และค่า RMSEC ของชุดข้อมูล Training set เท่ากับ 0.966 และ 1.54%wb ตามลำดับ ชุดตัวอย่างชีวมวลแบบผสม ที่มีประสิทธิภาพที่สุดคือ แบบจำลอง PLSR ที่มีการปรับแต่งค่าสัญญาณแบบ smoothing + SNV ดีที่สุดโดยมีค่า r^2 และค่า RMSEP ของชุดข้อมูล Prediction set เท่ากับ 0.786 และ 3.42%wb ตามลำดับ ค่า R^2 และค่า RMSECV ของชุดข้อมูล Training set เท่ากับ 0.770 และ 3.27%wb ตามลำดับ

คำสำคัญ : เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี, ชีวมวล, ความชื้น, ทะลายปาล์ม, กะลาปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	Moisture content measurement of agricultural biomass using near infrared spectroscopic technique	
Student	Mr. Thanpisit Masawat	Student ID 61514006
	Mr. Chaiwat Suphan	Student ID 61512033
	Mr. Bancha Baophom	Student ID 61512051
	Mr. Mongkolsak Agsonsom	Student ID 61512065
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Energy Engineering and Mechanical Engineering	
Project Advisor	Asst.Prof. Acting Sub Lt. Dr. Kittisak Phetpan	
Project Co-advisor	Asst.Prof. Dr. Srirat Chuayboon	

ABSTRACT

Near infrared (NIR) spectroscopy is one of the popular techniques used in the several industries. It can measure the parameters of the bonding elements of H-O, H-N, H-C and C=O, including moisture content and can measure the samples quickly accurately and non-destructively. In this study, we utilized NIR with Partial Least Square method (PLS) regression and Artificial Neuron Network (ANN) pre-treated by Standard Normal Variate (SNV), Second derivative, and SNV + second derivative to measure the moisture contents in palm shell, palm empty fruit bunch, and their mixture. The number of palm shell, palm empty fruit bunch, and the mixture of palm shell and palm empty fruit bunch samples were prepared with 100, 100, and 120 samples, respectively. As a result, the best model for palm shell was PLSR pretreated with smoothing + SNV + Second derivative (r^2 and RMSEP values of the prediction set: 0.714 and 3.67%wb and R^2 and RMSECV of the training: 0.793 and 3.60%wb). The best model for palm empty fruit bunch was ANN pretreated with smoothing + Second derivative (r^2 and RMSEP values of the prediction: 0.924 and 2.47%wb and R^2 and RMSECV values of the training set: 0.966 and 1.54%wb). The best model for palm shell and palm empty fruit bunch mixtures was PLSR pretreated with smoothing + SNV (r^2 and RMSEP values of the prediction set: 0.786 and 3.42%wb and R^2 and RMSECV values of the training set: 0.770 and 3.27%wb).

Keywords: Near infrared spectroscopy, Biomass, Moisture, Palm shell and Palm empty fruit bunch

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี ดร.กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรียัตน์ ช่วยบุญ ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือด้วยความเอาใจใส่อย่างหาที่สุดไม่ได้ ตลอดจนการปรับปรุงแก้ไขจุดผิดพลาดต่าง ๆ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ นางสาวศศิตารา เจริญสิริ นักวิทยาศาสตร์ ระดับชำนาญการพิเศษ สังกัด งานบริการห้องปฏิบัติการ ส่วนวิทยบริการ ผู้อำนวยการศูนย์มัลติมีเดียเครื่องซังทศนิยม 4 ตำแหน่ง ตลอดจนคำแนะนำที่ช่วยทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง และมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ขอขอบพระคุณบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์การทดลองภายใน อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตรเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์ไม่น้อยสำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้ที่สนใจ ศึกษาในเรื่องนี้

ธัญพิสิทธิ์ มาสวัสดิ์
ชัชวรัตน์ สุพรรณ
บัญชา บัวพรม
มงคลศักดิ์ อักษรสม
กรกฎาคม 2565

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	II
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 สมมติฐานของโครงการ	3
1.4 ขอบเขตของโครงการ	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 ขั้นตอนการดำเนินการ	4
1.7 แผนการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ปาล์มน้ำมัน	5
2.2 เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีและการประยุกต์ใช้	6
2.3 เคมีเมตริกซ์ (Chemometrics)	13
2.4 การประเมินสมรรถนะแบบจำลอง	20
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	24
3.1 อุปกรณ์	24
3.2 วิธีการ	30
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผล	36
4.1 การนำเข้า และปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้น	36
4.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี PLSR	41
4.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี ANN	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผลการทดลอง	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก	68
ภาคผนวก ก. ขั้นตอนการตรวจวัด	69
ภาคผนวก ข. ข้อมูลการทดลอง	78
ภาคผนวก ค. สัญญาณคลื่นแสง near infrared spectroscopy	100
ประวัติผู้จัดทำ	104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงาน	4
2.1	เปรียบเทียบระหว่าง r^2 และความสามารถในการทำนายของ NIR	21
3.1	อัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างชีวมวล (หน่วย: %)	32
4.1	ข้อมูลทางสถิติสำหรับค่าความชื้นจริงของตัวอย่างชีวมวล	36
4.2	ผลการสร้างและพิสูจน์แบบจำลองการทำนายความชื้นตัวอย่างกะลาปาล์มด้วยวิธี PLSR	46
4.3	ผลการสร้างและพิสูจน์แบบจำลองการทำนายความชื้นตัวอย่างทะเลาปาล์มเปล่าด้วยวิธี PLSR	48
4.4	ผลการสร้างและพิสูจน์แบบจำลองการทำนายความชื้นตัวอย่างชีวมวลแบบผสมด้วยวิธี PLSR	49
4.5	ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำนายความชื้น ตัวอย่างกะลาปาล์ม ด้วยแบบจำลอง ANN	58
4.6	ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำนายความชื้น ตัวอย่างทะเลาปาล์มเปล่า ด้วยแบบจำลอง ANN	60
4.7	ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำนายความชื้น ตัวอย่างชีวมวลแบบผสม ด้วยแบบจำลอง ANN	62
4.8	แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการทำนายความชื้นที่ดีที่สุดของแต่ละชุดข้อมูล	62
ก.1	อัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างชีวมวล (หน่วย: %)	72
ข.1	น้ำหนักของชีวมวลทะเลาปาล์มเปล่าระดับความชื้นที่ 1	79
ข.2	น้ำหนักของชีวมวลทะเลาปาล์มเปล่าระดับความชื้นที่ 2	79
ข.3	น้ำหนักของชีวมวลทะเลาปาล์มเปล่าระดับความชื้นที่ 3	80
ข.4	น้ำหนักของชีวมวลทะเลาปาล์มเปล่าระดับความชื้นที่ 4	80
ข.5	น้ำหนักของชีวมวลทะเลาปาล์มเปล่าระดับความชื้นที่ 5	81
ข.6	น้ำหนักของชีวมวลทะเลาปาล์มเปล่าระดับความชื้นที่ 6	81
ข.7	น้ำหนักของชีวมวลทะเลาปาล์มเปล่าระดับความชื้นที่ 7	82
ข.8	น้ำหนักของชีวมวลทะเลาปาล์มเปล่าระดับความชื้นที่ 8	82
ข.9	น้ำหนักของชีวมวลทะเลาปาล์มเปล่าระดับความชื้นที่ 9	83
ข.10	น้ำหนักของชีวมวลทะเลาปาล์มเปล่าระดับความชื้นที่ 10	83
ข.11	น้ำหนักของชีวมวลกะลาปาล์มระดับความชื้นที่ 1	84
ข.12	น้ำหนักของชีวมวลกะลาปาล์มระดับความชื้นที่ 2	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.13	85
ข.14	85
ข.15	86
ข.16	86
ข.17	87
ข.18	87
ข.19	88
ข.20	88
ข.21	89
(30/70) ระดับความขึ้นที่ 1	
ข.22	89
(30/70) ระดับความขึ้นที่ 2	
ข.23	89
(30/70) ระดับความขึ้นที่ 3	
ข.24	90
(30/70) ระดับความขึ้นที่ 4	
ข.25	90
(30/70) ระดับความขึ้นที่ 5	
ข.26	90
(30/70) ระดับความขึ้นที่ 6	
ข.27	91
(30/70) ระดับความขึ้นที่ 7	
ข.28	91
(30/70) ระดับความขึ้นที่ 8	
ข.29	91
(30/70) ระดับความขึ้นที่ 9	
ข.30	92
(30/70) ระดับความขึ้นที่ 10	
ข.31	92
(50/50) ระดับความขึ้นที่ 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.32	92
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (50/50) ระดับความชื้นที่ 2	
ข.33	93
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (50/50) ระดับความชื้นที่ 3	
ข.34	93
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (50/50) ระดับความชื้นที่ 4	
ข.35	93
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (50/50) ระดับความชื้นที่ 5	
ข.36	94
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (50/50) ระดับความชื้นที่ 6	
ข.37	94
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (50/50) ระดับความชื้นที่ 7	
ข.38	94
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (50/50) ระดับความชื้นที่ 8	
ข.39	95
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (50/50) ระดับความชื้นที่ 9	
ข.40	95
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (50/50) ระดับความชื้นที่ 10	
ข.41	95
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (70/30) ระดับความชื้นที่ 1	
ข.42	96
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (70/30) ระดับความชื้นที่ 2	
ข.43	96
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (70/30) ระดับความชื้นที่ 3	
ข.44	96
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (70/30) ระดับความชื้นที่ 4	
ข.45	97
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (70/30) ระดับความชื้นที่ 5	
ข.46	97
น้ำหนักรวมของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาปาล์มเปล่า (70/30) ระดับความชื้นที่ 6	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แผนผังการดำเนินงานการออกแบบและสร้าง	4
2.1	กะลาปาล์ม	5
2.2	ทะลายปาล์มเปล่า	6
2.3	สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า	7
2.4	รูปแบบการเกิดอันตรกิริยาของรังสีอินฟราเรดย่านใกล้กับสสาร	8
2.5	กราฟค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) กับความยาวคลื่น (wavelength)	8
2.6	การสะท้อนของแสงของวัตถุผิวเรียบและผิวขรุขระ	9
2.7	ตัวอย่างสสารของแข็งที่กระจายตัว	10
2.8	แบบวิธีการวัด NIR การส่องผ่าน, การส่องผ่านสะท้อน, การสะท้อนแบบแพร่ และอินเทอร์แอคแตนซ์ (interactance)	11
2.9	อุปกรณ์ใส่ตัวอย่าง เมล็ดธัญพืชเต็มเมล็ด, ตัวอย่างที่เป็นของเหลว, แป้งเปียก, ตัวอย่างผลไม้, ตัวอย่างที่เป็นผง และเมล็ดพืชเดี่ยว	12
2.10	องค์ประกอบของเครื่องมือวัดเนียร์อินฟราเรด	13
2.11	การย้ายตัวกรองเฉื่อยที่มีความกว้าง $2m+1 = 3$	15
2.12	องค์ประกอบของ Artificial Neuron Network	18
2.13	โครงสร้างการทำงานของ Artificial Neuron Network	19
3.1	ชีวมวลที่นำมาใช้ในการทดลอง	24
3.2	ถุงดำ	24
3.3	เครื่องสับชีวมวล	25
3.4	หลอดหยดวิทยาศาสตร์ (Buret)	25
3.5	น้ำเปล่า	25
3.6	ถุงซิปล็อค	26
3.7	ตู้เย็น	26
3.8	กระป๋องอลูมิเนียมเก็บความชื้น (Moisture can)	26
3.9	เครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง รุ่น Precisa Model XB 220A	27
3.10	ตู้อบ (BINDER รุ่น ED/FM)	27
3.11	ถุงมือยาง	27
3.12	เซ็นเซอร์เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (AvaSpec-Mini4096CL-UV10)	28
3.13	สายไฟเบอร์ออปติก	28
3.14	หลอดไฟความเข้มแสง (Halogen 12V 50W)	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.15	รูปกล่องไม้ขนาด (50.6 x 50.6 x 70.6 cm.)	29
3.16	ขาตั้งเหล็ก และตัวหนีบ (Stands and Clamps)	29
3.17	แผนผังขั้นตอนการทดลอง	30
3.18	ทะลายปาล์ม และกะลาปาล์ม	31
3.19	เครื่องสับชีวมวล	31
3.20	การปรับความชื้น	33
3.21	การสแกนเซ็นเซอร์เนียร์อินฟราเรด	33
3.22	การหาความชื้นด้วยวิธีมาตรฐาน	34
3.23	แผนผังขั้นตอนการส้าแบบจำลองจักรกลเรียนรู้	35
4.1	สเปกตรัมที่ยังไม่ผ่านการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นของตัวอย่างชีวมวล	38
4.2	สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นของตัวอย่างกะลาปาล์ม	39
4.3	สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นของตัวอย่างทะลายปาล์ม	39
4.4	สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นของตัวอย่างชีวมวลแบบผสม	41
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวแปรแฝง (LV) เทียบกับค่าความแปรปรวนที่อธิบายได้ ของกะลาปาล์มในการนำไปใช้สร้างแบบจำลอง PLSR	42
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวแปรแฝง (LV) เทียบกับค่าความแปรปรวนที่อธิบายได้ ของทะลายปาล์มเปล่า ในการนำไปใช้สร้างแบบจำลอง PLSR	43
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวแปรแฝง (LV) เทียบกับค่าความแปรปรวนที่อธิบายได้ ของชีวมวลแบบผสม ในการนำไปใช้สร้างแบบจำลอง PLSR	44
4.8	กราฟแสดงความชื้นจริง เทียบกับความชื้นที่ทำนาย ระหว่างชุดข้อมูล Training set และ Prediction set ของตัวอย่างกะลาปาล์ม โดยใช้แบบจำลอง PLSR	45
4.9	กราฟแสดงความชื้นจริง เทียบกับความชื้นที่ทำนาย ระหว่างชุดข้อมูล Training set และ Prediction set ของตัวอย่างทะลายปาล์มเปล่า โดยใช้แบบจำลอง PLSR	47
4.10	กราฟแสดงความชื้นจริง เทียบกับความชื้นที่ทำนาย ระหว่างชุดข้อมูล Training set และ Prediction set ของตัวอย่างชีวมวลแบบผสม โดยใช้แบบจำลอง PLSR	49
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนองค์ประกอบหลัก (PCs) และเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนของข้อมูลสเปกตรัมกะลาปาล์ม จากการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้น	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนองค์ประกอบหลัก (PCs) และเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนของข้อมูลสเปกตรัมทะเลลายปาล์มเปล่า จากการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้น	52
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนองค์ประกอบหลัก (PCs) และเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนของข้อมูลสเปกตรัมชีวมวลแบบผสม จากการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้น	53
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนหน่วยประมวลผลกับค่าความผิดพลาด ของชุดข้อมูล Calibration และ Validation ของข้อมูลสเปกตรัมทะเลลายปาล์ม ในการนำไปใช้สร้างแบบจำลอง ANN	54
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนหน่วยประมวลผลกับค่าความผิดพลาด ของชุดข้อมูล Calibration และ Validation ของข้อมูลสเปกตรัมทะเลลายปาล์มเปล่า ในการนำไปใช้สร้างแบบจำลอง ANN	55
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนหน่วยประมวลผลกับค่าความผิดพลาด ของชุดข้อมูล Calibration และ Validation ของข้อมูลสเปกตรัมชีวมวลแบบผสม ในการนำไปใช้สร้างแบบจำลอง ANN	56
4.17	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความขึ้นจริง กับความขึ้นที่ทำนายได้ ของชุดข้อมูล ตัวอย่างทะเลลายปาล์ม Training set และ Prediction set โดยใช้แบบจำลอง ANN	57
4.18	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความขึ้นจริง กับความขึ้นที่ทำนายได้ ของชุดข้อมูล ตัวอย่างทะเลลายปาล์มเปล่า Training set และ Prediction set โดยใช้แบบจำลอง ANN	59
4.19	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความขึ้นจริง กับความขึ้นที่ทำนายได้ ของชุดข้อมูล ตัวอย่างชีวมวลแบบผสม Training set และ Prediction set โดยใช้แบบจำลอง ANN	61
ก.1	ชีวมวลที่นำมาใช้ในการทดลอง	70
ก.2	การทำทะเลลายปาล์มเปล่าให้มีขนาดเล็กลง	70
ก.3	ปรับขนาดทะเลลายปาล์มเปล่าให้ใกล้เคียงกัน	71
ก.4	ซังนำหนังของชีวมวลเพื่อปรับความขึ้น	72
ก.5	การปรับความขึ้น	73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ก.6	นำตัวอย่างวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Near infrared Spectrometer (AvaSpec-Mini4096CL-UV10)	73
ก.7	เซ็นเซอร์เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (AvaSpec-Mini4096CL-UV10)	74
ก.8	ภาพวาด 3มิติ ของกล่องดำและชีวมวลขณะเก็บเคลื่อนสัญญาณ ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS	74
ก.9	ชีวมวลตัวอย่าง	75
ก.10	การหาความชื้นด้วยวิธีมาตรฐาน	75
ก.11	แผนผังขั้นตอนการสร้างแบบจำลองจักรกลเรียนรู้	76
ก.12	แผนผังขั้นตอนการทดลอง	77
ค.1	เส้นสเปกตรัมที่ได้จากการสแกนด้วยเนียร์อินฟราอินฟราเรด ชีวมวลทะเลาย ปาล์มเปล่า	101
ค.2	เส้นสเปกตรัมที่ได้จากการสแกนด้วยเนียร์อินฟราอินฟราเรด ชีวมวลกะลาปาล์ม	102
ค.3	เส้นสเปกตรัมที่ได้จากการสแกนด้วยเนียร์อินฟราอินฟราเรด ชีวมวลแบบผสม ระหว่างทะเลายปาล์มเปล่า และกะลาปาล์ม	103

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

โลกในปัจจุบันนี้กำลังประสบกับปัญหาภาวะโลกร้อน อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้นประมาณ 2 องศาเซลเซียส [1] สาเหตุหลักมาจากสภาวะเรือนกระจก ซึ่งเชื้อเพลิงฟอสซิลมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก คิดเป็น 80% ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของพลังงานทั้งหมด [2] ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปัญหาการปล่อยก๊าซเรือนกระจก จึงได้มีการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยพลังงานหมุนเวียนประกอบไปด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานชีวมวล พลังงานชีวมวลที่ได้จากวัสดุชีวมวล และวัสดุชีวมวลนั้นเราสามารถหาได้โดยง่ายตามท้องถิ่น เช่น พืช มูลสัตว์ หรือขยะจากธรรมชาติ เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลหรือวัสดุชีวมวลนั้นสามารถหาได้ง่ายมีการเกิดขึ้นมาทดแทนตามธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อมเป็นวัฏจักรไปเรื่อยๆ [3] วิธีการที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นพลังงานนั้น คือการเผาไหม้ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ชีวมวลนั้นจะต้องปรับปรุงคุณภาพของชีวมวล เพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนที่เหมาะสมก่อน สำหรับชีวมวลที่นิยมใช้ทั่วโลกได้แก่ ข้าวโพด ข้าวสาลี อ้อย ถั่วเหลือง เรพซิด และทานตะวัน โดยการนำไปใช้เป็นพลังงานสามารถเผาเพื่อให้ได้ความร้อนโดยตรง หรือปรับปรุงเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ เช่น ข้าวโพด และอ้อยที่นำมาผลิตเป็นเอทานอล ถั่วเหลือง ปาล์มน้ำมัน และเรพซิดที่นำมาผลิตไบโอดีเซล เป็นต้น [4]

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีศักยภาพด้านพลังงานชีวมวล โดยแหล่งชีวมวลในประเทศไทยได้จากผลพลอยได้จากภาคเกษตร คือ ข้าว (ฟางข้าว และแกลบ) อ้อย (ชานอ้อย, ใบและยอด) มันสำปะหลัง (ราก) ข้าวโพด (ใบ, ลำต้น และซังข้าวโพด) ปาล์ม (ลำต้น, ใบ, ทางปาล์ม และทะลายปาล์ม) ต้นยาง (ราก, ตอ, กิ่ง, เศษไม้ยางพารา และขี้เลื่อย) และยูคาลิปตัส (เปลือกไม้) โดยมีอัตราการเกิดชีวมวลปีละประมาณ 22.42, 33.12, 7.29, 4.48, 5.1 ,5 และ 1.8 ล้านตันตามลำดับ [5]

วัสดุชีวมวลจากทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม และกะลาปาล์ม เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มที่มีศักยภาพสูงในด้านพลังงาน กล่าวคือ วัสดุเหล่านี้สามารถให้ค่าความชื้น (%) ค่าความร้อน (MJ/kg) และค่าศักยภาพพลังงาน (ktoe) ในช่วง 12% - 59% , 7.24 MJ/kg – 17 MJ/kg และ 0 ktoe – 195 ktoe ตามลำดับ [5] นอกเหนือจากศักยภาพด้านพลังงานของทะลายปาล์มเปล่า เส้นใยปาล์ม และกะลาปาล์มแล้ว วัสดุชีวมวลเหล่านี้ยังมีศักยภาพเชิงความร้อนที่สูงอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักของประเทศ และสามารถป้อนวัสดุเหล่านี้เป็นชีวมวลเข้าสู่ระบบได้ประมาณปีละกว่า 9.27 ล้านตัน แบ่งเป็นทะลายปาล์มเปล่า 32% เส้นใยปาล์ม 19% และกะลาปาล์ม 4% ของชีวมวลทั้งหมด [4] ทำให้สามารถลดการนำเข้าชีวมวลจากต่างประเทศได้ ซึ่งสามารถลดปริมาณเม็ดเงินไหลออกนอกประเทศกว่าปีละ 814.5 ล้านบาท [4] อย่างไรก็ตามค่าความชื้นเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านพลังงานของวัสดุชีวมวล ด้วยเหตุนี้ภาคอุตสาหกรรมจึงมีความจำเป็นต้องบริหารจัดการความชื้นของวัสดุชีวมวลก่อนนำไปใช้ เช่น การลดความชื้นเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ หรืออาจใช้การผสมวัสดุชีวมวลหลายชนิดที่มีความชื้นต่างกันเพื่อให้ได้ช่วงความชื้นที่เหมาะสมที่สุด และจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดความชื้นได้รวดเร็ว ถูกต้อง และแม่นยำ

เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIRS) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยสามารถตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่โมเลกุลมีองค์ประกอบของพันธะ H-O, H-N, H-C และ C=O ได้รวดเร็ว ถูกต้อง แม่นยำ และไม่ทำลายตัวอย่าง [6] ความชื้น (Moisture content) เป็นค่าที่บ่งชี้ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ ซึ่งโมเลกุลน้ำประกอบด้วยพันธะ O-H จึงทำให้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIRS) สามารถตรวจวัดค่าความชื้นได้ จากการสืบค้นงานวิจัยพบว่า เทคนิค NIRS มีความสามารถในการทำนายค่าความชื้นในวัสดุต่างๆ อยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อน 0.3% – 1.57% โดยประมาณ สำหรับรูปแบบการวัดตัวอย่างชีวมวล [7] อีกทั้งเทคนิคนี้ยังสามารถใช้เพื่อตรวจสอบระดับการปลอมปนของวัสดุต่างได้อีกด้วย เช่น การตรวจจับการปลอมปนของเนื้อสัตว์อื่นๆ ที่ปนอยู่ในเนื้อวัวบด และเนื้อแกะบด เป็นต้น [8]

อย่างไรก็ตาม การพัฒนาให้เทคนิค NIRS เพื่อสร้างแบบจำลองจักรกลเรียนรู้ในการทำนายความชื้นของชีวมวล ทะลายปาล์มเปล่า กะลาปาล์ม และแบบผสม (ทะลายปาล์มเปล่า และกะลาปาล์ม) อย่างละ 70/30, 50/50 และ 30/70 ตามลำดับ) ให้มีการทำนายค่าที่แม่นยำ โดยในการทดลองได้กำหนดระยะห่างของชีวมวลถึงเซนเซอร์อยู่ที่ 6 เซนติเมตร และใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอด Halogen 12V 50W จำนวน 4 หลอด ดังนั้นโครงงานนี้จึงได้มุ่งเน้นพัฒนาเทคนิค NIRS ที่ทำงานร่วมกับอัลกอริทึมจักรกลเรียนรู้ (Machine learning algorithm) แบบ Partial Least Squares (PLS) Regression และ Artificial Neuron Network (ANN) Regression มาเปรียบเทียบเพื่อให้การตรวจวัดค่าความชื้นในวัสดุชีวมวลมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการงาน

1.2.1 เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับตรวจวัดปริมาณความชื้นในวัสดุชีวมวล

1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองจักรกลเรียนรู้ในการทำนายความชื้นของชีวมวลจากสัญญาณคลื่นแสงเนียร์อินฟราเรด

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของชนิด และความบริสุทธิ์ของชีวมวลที่มีต่อสมรรถนะของแบบจำลองทำนายความชื้น

1.3 สมมติฐานของโครงการงาน

แบบจำลองจักรกลเรียนรู้สามารถทำนายความชื้นของชีวมวลได้ถูกต้อง โดยที่ชนิด และความบริสุทธิ์ของชีวมวลไม่ส่งผลต่อสมรรถนะของแบบจำลอง

1.4 ขอบเขตของโครงการงาน

1.4.1 โครงการนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุชีวมวลทางการเกษตรจำนวน 2 ชนิดคือ กะลาปาล์ม และ ทะลายปาล์ม

1.4.2 โครงการนี้ใช้อัลกอริทึมจักรกลเรียนรู้เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 2 ประเภท คือ Partial Least Squares (PLS) Regression และ Artificial Neuron Network (ANN) Regression

1.4.3 โครงการนี้ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดสัญญาณแสงเนียร์อินฟราเรดที่ระยะความสูง 6 เซนติเมตร เหนือตัวอย่างชีวมวล

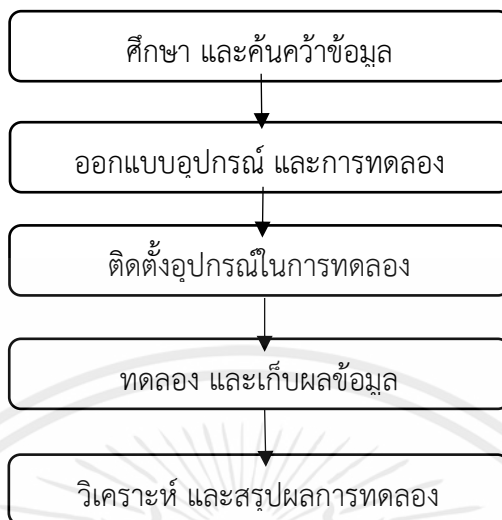
1.4.4 โครงการนี้ใช้หลอด Halogen 12V 50W จำนวน 4 หลอด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับทำนายปริมาณความชื้นของทะลายปาล์มเปล่า กะลาปาล์ม และแบบผสม ได้แม่นยำ

1.5.2 ได้ข้อมูลสมรรถนะของอัลกอริทึมจักรกลเรียนรู้ประเภทต่างๆ ในการทำนายปริมาณความชื้น ของทะลายปาล์มเปล่า กะลาปาล์ม และแบบผสม

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 แผนผังการดำเนินงานการออกแบบและสร้างการทดลอง

1.7 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน										
	2564					2565					
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	พ.ค.	มิ.ย.	
1. ศึกษาและรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้อง	←				→						
2. ออกแบบ และวางแผนการทดลอง	←				→						
3. ทดลอง และรวบรวมข้อมูล							←			→	
4. วิเคราะห์ และสรุปผล									←	→	
5. เรียบเรียงเนื้อหาเล่มปริญญานิพนธ์										←	→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปาล์มน้ำมัน

2.1.1 ความสำคัญของปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจสำหรับหลายประเทศในเขตร้อนชื้น มักถูกนำไปเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ด้วยประชากรโลกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความต้องการน้ำมันปาล์มจึงเพิ่มขึ้นด้วย ปัจจุบันปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่นิยมปลูกกันอย่างแพร่หลายทางภาคใต้ของประเทศไทย ทั้งนี้อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันจึงมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทยเป็นอย่างมาก [9] แม้อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันจะมีบทบาทที่สำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยมากแต่ก็มีผลกระทบค่อนข้างมากเช่นกัน อาทิ เศษวัสดุเหลือทิ้ง ได้แก่ กากใยปาล์ม กะลาปาล์ม ทะลายเปล่า และทางปาล์ม เป็นต้น [10]

2.1.2 กะลาปาล์ม และศักยภาพเชิงพลังงาน

กะลาปาล์มเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มมีศักยภาพสูงด้านพลังงาน ซึ่งมีค่าความชื้น (%) และค่าความร้อน (kJ/kg) คือ 12 % และ 18,267 kJ/kg ตามลำดับ [10] นอกเหนือจากศักยภาพด้านพลังงานของกะลาปาล์มแล้วยังมีศักยภาพเชิงพื้นที่อีกด้วย เนื่องจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักของประเทศ และสามารถใช้วัสดุเหล่านี้เป็นชีวมวลเข้าสู่ระบบได้ประมาณปีละกว่า 9.27 ล้านตัน แบ่งเป็น กะลาปาล์ม 4% ของชีวมวลทั้งหมด [4]



รูปที่ 2.1 กะลาปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ทะลายปาล์มเปล่า และศักยภาพเชิงพลังงาน

ทะลายปาล์มเปล่า เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มที่มีศักยภาพสูงในด้านพลังงาน ซึ่งมีค่าความชื้น (%) และค่าความร้อน (kJ/kg) คือ 58.6% และ 7,240 kJ/kg ตามลำดับ [4] นอกเหนือจากศักยภาพด้านพลังงานของทะลายปาล์มเปล่าซึ่งยังมีศักยภาพเชิงพื้นที่อีกด้วย เนื่องจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักของประเทศ และสามารถป้อนวัสดุเหล่านี้เป็นชีวมวลเข้าสู่ระบบได้ประมาณปีละกว่า 9.27 ล้านตัน แบ่งเป็น ทะลายปาล์มเปล่า 32% ของชีวมวลทั้งหมด [4]



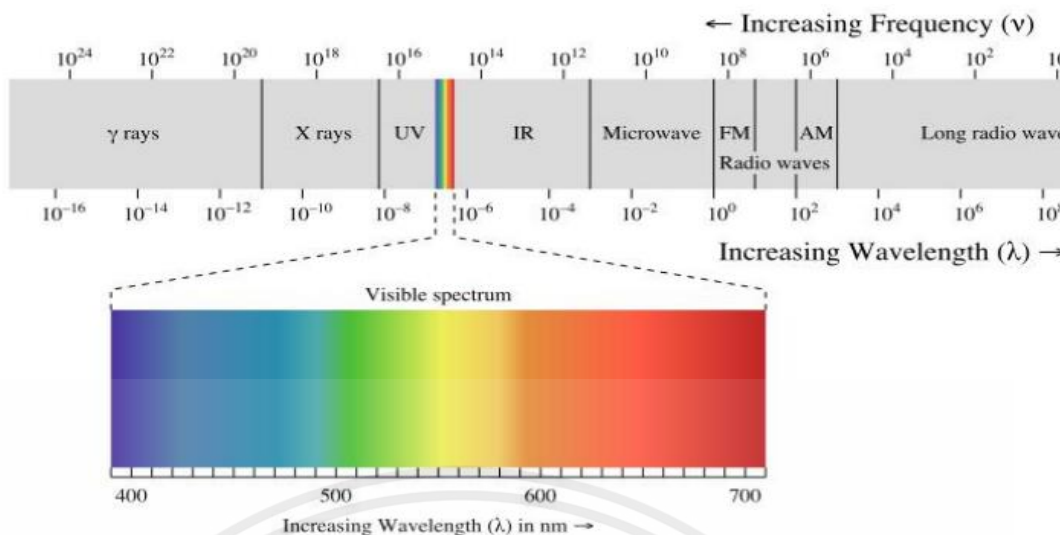
รูปที่ 2.2 ทะลายปาล์มเปล่า

2.2 เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีและการประยุกต์ใช้

2.2.1 ทฤษฎีเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Theory of near-infrared spectroscopy)

รังสีอินฟราเรดย่านใกล้ คือ รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่จัดอยู่ในรังสีอินฟราเรด โดยช่วงคลื่นอินฟราเรดสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ อินฟราเรดย่านใกล้ อินฟราเรดย่านกลาง และอินฟราเรดย่านไกล โดยอินฟราเรดย่านใกล้จะมีความยาวคลื่นอยู่ที่ 800 ถึง 2500 nm อินฟราเรดย่านกลางความยาวคลื่นจะอยู่ที่ 2,500 ถึง 20,000 nm และอินฟราเรดย่านไกลความยาวคลื่นจะอยู่ที่ 25,000 ถึง 100,000 nm อย่างไรก็ตามอินฟราเรดย่านใกล้เป็นช่วงขนาดเล็กของรังสีที่อยู่หลังจากแสงสีแดงที่ตามนุษย์เราสามารถมองเห็นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 อินฟราเรดย่านใกล้สามารถทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลที่ประกอบด้วย C-H-O-H และ S-H สั่นโดยการที่โมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้เข้าไปจะมีผลต่อการสั่นของพันธะต่างๆในโมเลกุล ระดับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของสารที่มีความยาวคลื่นต่างๆจะปรากฏในสเปกตรัม NIR โดยสรุปแล้วเทคนิค Near Infrared Spectroscopy (NIR) เป็นเทคนิคที่วัดสเปกตรัมของวัสดุที่แผ่รังสีด้วยแสงอินฟราเรดย่านใกล้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



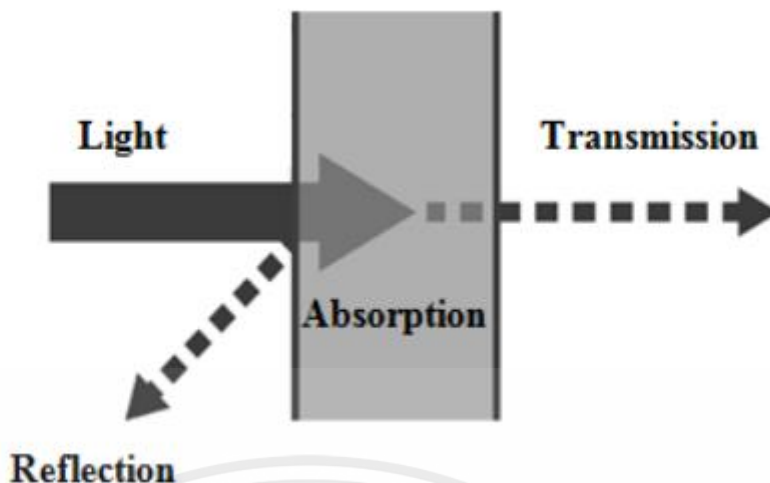
รูปที่ 2.3 สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า [11]

2.2.1.1 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอินฟราเรดย่านใกล้กับสสาร (Physics of the interaction of radiation with matter)

เมื่อรังสีอินฟราเรดย่านใกล้เดินทางผ่านเข้าไปในสสาร จะเกิดอันตรกิริยากับอะตอม และโมเลกุลของสสาร ดังนั้นรังสีบางส่วนจะถูกดูดกลืน (Absorption) บางส่วนจะผ่านออกมา (Transmission) และบางส่วนจะเกิดการสะท้อน (Reflection) โดยอธิบายได้ดังสมการที่ (2.1) ทั้งนี้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอินฟราเรดย่านใกล้กับสสาร ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น พื้นผิวของตัวอย่าง ขนาดอนุภาคของตัวอย่าง และอื่นๆ

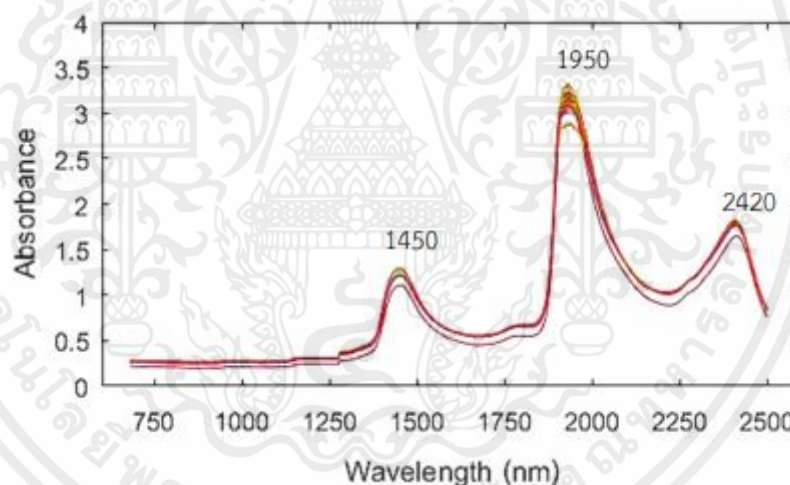
$$I_0 = I_a + I_t + I_r \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 รูปแบบการเกิดอันตรกิริยาของรังสีอินฟราเรดย่านใกล้กับสสาร [11]

2.2.1.2 การดูดกลืนคลื่นแสงเนียร์อินฟราเรด (Absorption of radiation)



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และความยาวคลื่น (Wavelength)

จากรูปที่ 2.5 สเปกตรัมจะนิยมแสดงในรูปค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ในแกน Y และความยาวคลื่น (Wavelength) ในแกน X อย่างไรก็ตามจากกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสสาร ดังสมการที่ (2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \epsilon bc = \log(1/T) = \log(I_0/I_t) \quad (2.2)$$

A คือ ค่าการดูดกลืนแสง

ϵ คือ สภาพดูดกลืนโมลาร์ (molar absorptivity) เป็นค่าคงที่ของแต่ละสาร

b คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง

c คือ ความเข้มข้นของสารที่ดูดกลืน

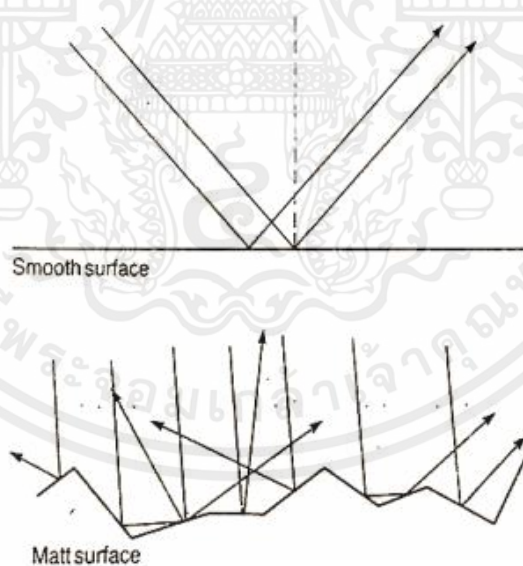
T คือ แสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่าง

I_0 คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบตัวอย่าง

I_t คือ ความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่าง

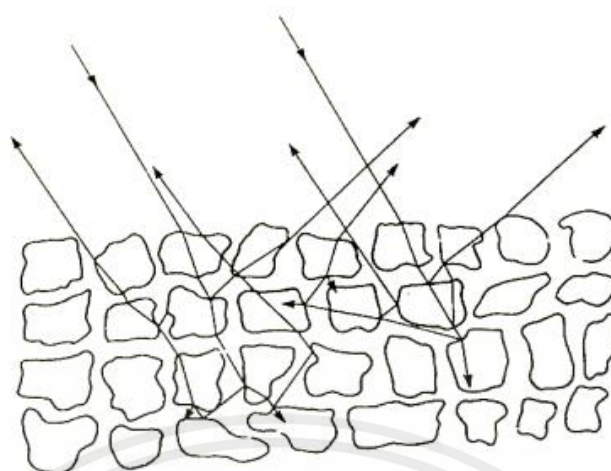
2.2.1.3 การสะท้อนคลื่นแสงเนียร์อินฟราเรด (Reflection of radiation)

การสะท้อนแสงของรังสีตกกระทบบนตัวอย่างขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่นพื้นผิวของสารและอนุภาคต่างๆ ภายในตัวอย่าง ตัวอย่างที่มีพื้นผิวเรียบจะสะท้อนแสงในลักษณะเดียวกับการสะท้อนของกระจกขณะเดียวกันพื้นผิวตัวอย่างที่มีความขรุขระแสงจะสะท้อนกระจายออกไปในทิศทางต่างกันเป็นจำนวนมาก ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การสะท้อนของแสงของวัตถุผิวเรียบและผิวขรุขระ [4]

ในบางกรณีที่รังสีสามารถส่งผ่านไปยังพื้นผิวตัวอย่างแล้วดูดกลืนตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ตได้ โดยเฉพาะสามารถพบได้ในตัวอย่างที่เป็นของแข็ง โดยการแผ่รังสีต้องเจอกับอนุภาคที่ไม่ต่อเนื่องภายในตัวอย่าง และแพร่กระจายไปในทุกทิศทางเรียกว่า “การกระเจิง” (Scattering) ดังรูปที่ 2.7 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างสสารของแข็งที่กระจายตัว [4]

อย่างไรก็ตามการดูดกลืนแสงกรณีที่วัดแสงสะท้อนเนื่องจากตัวอย่างมีความหนาหลายๆ จะขึ้นอยู่กับการกระเจิง และการดูดซับดังสมการที่ (2.3)

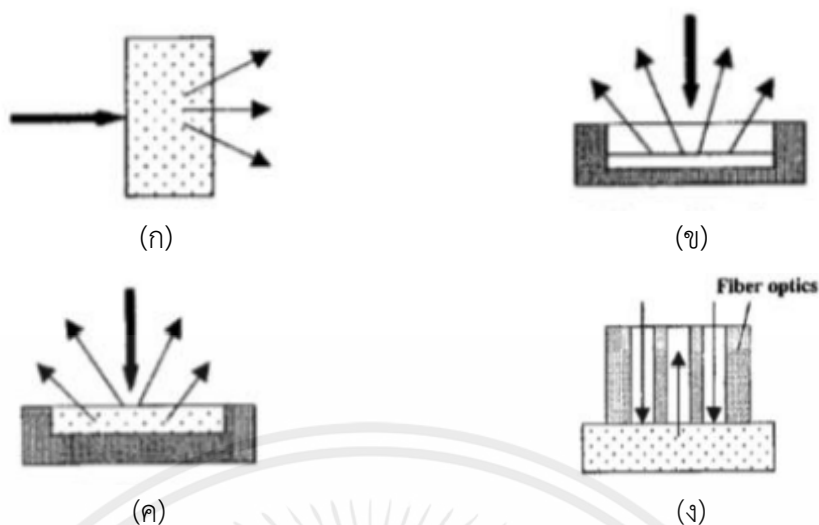
$$A = \epsilon bc = \log(1/R) = \log(I_0/I_r) \quad (2.3)$$

R คือ แสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่าง

I_r คือ ความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่าง

2.2.2 Sample presentation

แบบวิธีการวัด NIR เป็นปัจจัยสำคัญเนื่องจากมีผลต่อการตอบสนองของสเปกตรัม วิธีการวัด NIR ในปัจจุบันที่นิยมใช้กันมากที่สุดประกอบด้วย การส่องผ่าน (Transmittance) การส่องผ่านสะท้อน (Transflectance) การสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse transflectance) อินเทอร์แอคแตนซ์ (Interactance)



รูปที่ 2.8 แบบวิธีการวัด NIR (ก) การส่องผ่าน (ข) การส่องผ่านสะท้อน (ค) การสะท้อนแบบแพร่ และ (ง) อินเทอร์แอคแทนซ์ (interactance) [11]

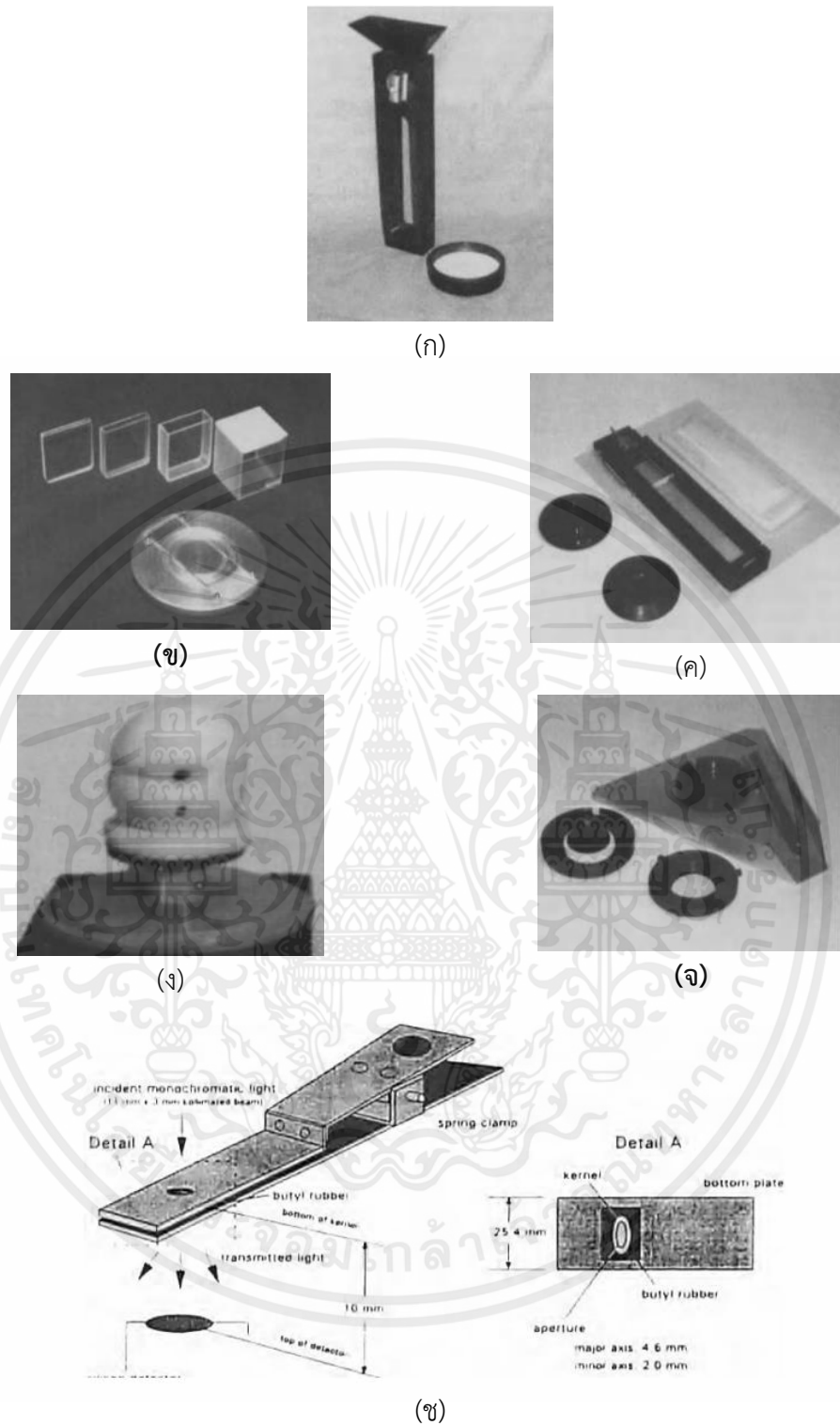
การส่องผ่าน (transmittance) ตัวอย่างจะถูกใช้แสงด้านหนึ่งและถูกตรวจวัดอีกด้านหนึ่ง เหมาะสำหรับของเหลว

การส่องผ่านสะท้อน (transflectance) เป็นการวัดแสงที่มีการสะท้อน และส่องผ่านใน ตัวอย่าง

การสะท้อนแบบแพร่ (diffuse transflectance) แหล่งกำเนิดแสง และอุปกรณ์วัดแสงจะถูก ติดตั้งเป็นมุมเฉพาะต่อกัน เช่นมุม 45 องศาเพื่อหลีกเลี่ยงการวัดแสงแบบสเปกคูลาร์

อินเทอร์แอคแทนซ์ (interactance) แหล่งกำเนิดแสง และอุปกรณ์วัดแสงติดตั้งขนานกันเพื่อ ป้องกันไม่ให้แสงแบบสเปกตร้าสามารถสอดเข้าอุปกรณ์วัดแสงได้โดยตรงมุมการวัดคือ 90 องศาทำให้ ได้แสงผ่านตัวอย่างจริงๆ แสงที่สะท้อนกลับออกมาตรงๆ บางส่วนที่ไม่ได้ผ่านเข้าไปในตัวอย่างจะไม่ ถูกวัดเลย โดยในการวัดจะต้องวางตัวอย่างสัมผัสกับปลายเซ็นเซอร์ด้วย

อุปกรณ์ใส่ตัวอย่างมีหลากหลายประเภท รูปที่ 2.9 ได้รับการพัฒนาโดยผู้ผลิต และนำมาใช้ สำหรับการวัดสเปกตรัม โดยอุปกรณ์ใส่ตัวอย่างออกแบบมาสำหรับใส่ตัวอย่างเมล็ดธัญพืชเต็มเมล็ด ตัวอย่างที่เป็นผง ตัวอย่างที่เป็นลักษณะคล้ายแป้งเปียก ตัวอย่างที่เป็นของเหลว ตัวอย่างผลไม้ ตัวอย่างที่เป็นเมล็ดพืชเดี่ยว ส่วนใหญ่แล้วใช้สำหรับสภาพแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ สำหรับการ ใช้ งานออนไลน์ และการวัดแบบไม่สัมผัส

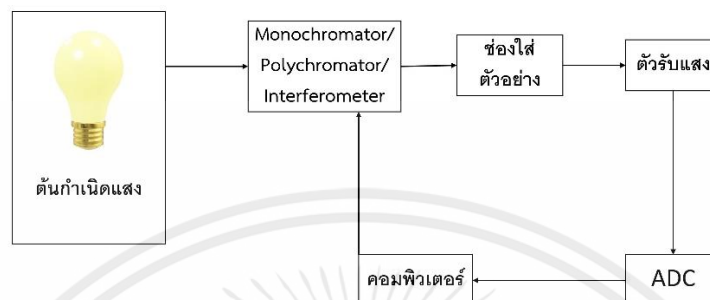


รูปที่ 2.9 อุปกรณ์ใส่ตัวอย่าง (ก) เมล็ดธัญพืชเต็มเมล็ด (ข) ตัวอย่างที่เป็นของเหลว (ค) แป้งเปียก (ง) ตัวอย่างผลไม้ (จ) ตัวอย่างที่เป็นผง และ (ช) เมล็ดพืชเดี่ยว [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 เครื่องมือวัดเนียร์อินฟราเรด (Near-infrared (NIR) instrumentation)

องค์ประกอบของเครื่องมือวัดเนียร์อินฟราเรดประกอบด้วย ต้นกำเนิดแสง (Light source) อุปกรณ์แยกแสงออกเป็นแต่ละความยาวคลื่นหรือโมนโครเมเตอร์ (Monochromator) ช่องใส่ตัวอย่าง (sample cell) ตัวรับแสง (Detector or sensor) และคอมพิวเตอร์ (Computer) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบของเครื่องมือวัดเนียร์อินฟราเรด

หลักการสร้างเครื่องวัด NIR มีหลายวิธีด้วยกันได้แก่ การใช้หลักการของเทคนิคการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform technique) หลักการเคลื่อนที่แบบตะแกรง (Moving gratings) หลักการของการกรองเชิงแสง (Optical filter) หลักการของแถวไดโอด (Diode arrays) และหลักการวงจรรองแสงเหตุคลื่นเสียงแบบปรับได้ (Acousto-optic tunable filters; AOTF)

2.2.4 การใช้เครื่องมือวัดเนียร์อินฟราเรดตรวจสอบความชื้น (Use Near-infrared to measure moisture content)

ความชื้นเป็นปัจจัยหลักของหลายๆอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องควบคุมคุณภาพในการผลิต เช่น อุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา และอื่นๆ การใช้ NIR เพื่อตรวจสอบความชื้นจึงได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยจุดประสงค์หลักคือการตรวจสอบความชื้นเพื่อควบคุมคุณภาพในการผลิต ไม่ว่าจะเป็นการใช้ NIR ตรวจสอบความชื้นของกาแฟซึ่งเป็นมาตรฐานสากล [12] การตรวจสอบความชื้นของเศษไม้ด้วย NIR เนื่องจากความชื้นส่งผลต่อการนำเศษไม้ไปใช้งาน [13] เป็นต้น

2.3 เคมีเมตริกซ์ (Chemometrics)

เคมีเมตริกซ์เป็นการใช้หลักการทางเคมีร่วมกับหลักการสถิติในการวิเคราะห์ เทคนิคนี้เป็นการใช้การวิเคราะห์ความถดถอยร่วมกับการปรับสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์ ดังนั้นก่อนการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมควรปรับข้อมูลด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์เพื่อลดความคลาดเคลื่อนให้เหลือน้อยที่สุด โดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ มี 3 วิธีได้แก่ อนุพันธ์อันดับหนึ่ง, อนุพันธ์อันดับสอง และ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน [14] ถึงแม้ว่าจะมีวิธีทางคณิตศาสตร์สำหรับเคโมเมทริกซ์จำนวนมาก แต่วิธีการทางเคโมเมทริกซ์นั้นเหมือนกันทั้งหมด ได้แก่

- 2.3.1 การตรวจวัดรวบรวมข้อมูล
- 2.3.2 การประมวลผลข้อมูลล่วงหน้า
- 2.3.3 การเลือกแบบจำลอง
- 2.3.4 การสอบเทียบ
- 2.3.5 การตรวจสอบ

2.3.1 การปรับแต่งสเปกตรัมเบื้องต้น (Spectral preprocessing)

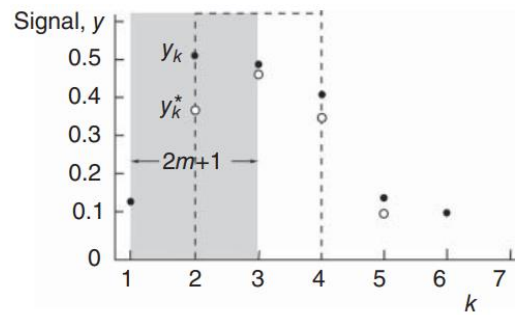
การปรับแต่งสเปกตรัมเบื้องต้นเป็นการเตรียมสเปกตรัมล่วงหน้าก่อนที่จะใช้ในการวิเคราะห์หลักใช้เพื่อจำกัดหรือลดข้อมูลที่ไม่จำเป็นในการคำนวณออก นั่นคือข้อมูลที่เกิดจากปัจจัยรบกวนภายนอก เช่น แสงรบกวนภายนอก สภาพแวดล้อม และสัญญาณรบกวนของเครื่องมือ เป็นต้น เพื่อให้เห็นย่านการดูดแสงที่ซ้อนทับกัน (Overlapping) และความแตกต่างกันของสเปกตรัมหรือ $\log(1/R)$ โดยการเตรียมสเปกตรัมล่วงหน้าในงานที่เกี่ยวข้องกับ NIR มีวิธีดังนี้ การหาค่าเฉลี่ย (Averaging) การปรับค่าศูนย์กลางข้อมูล (Centering) การทำให้เป็นมาตรฐาน (Standardization) [15]

2.3.1.1 การปรับเรียบ และวิธีอนุพันธ์ (Smoothing and Differentiation)

การปรับเรียบเป็นการทำให้สัญญาณมีความเรียบโดยการกำจัดสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม โดยทั่วไปการปรับเรียบมี 2 วิธีที่นิยมใช้กันคือ การเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Running mean smooth) และการปรับเรียบซาวิตซ์กีโกเลย์ [15] การย้ายค่าเฉลี่ยอ้างอิงบนระยะห่างของข้อมูล หรือสเปกตรัมที่กำหนดไว้ล่วงหน้า และกำหนดความกว้างของตัวกรองไว้แล้ว การคำนวณสเปกตรัมดิบสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.4)

$$y_k^* = \frac{1}{2m+1} \sum_{j=-m}^{j=m} y_{k+j} \quad (2.4)$$

เมื่อ y_k^* เป็นค่าที่กรองแล้ว k เป็นค่าดัชนีจุดข้อมูลจริง $2m+1$ เป็นตัวระบุความกว้างของตัวกรอง และ m คือจำนวนตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดความกว้าง



รูปที่ 2.11 การย้ายตัวกรองเฉลี่ยที่มีความกว้าง $2m+1 = 3$

ในกรณีของตัวกรองซาวีสกีโกแลย์ หรือการปรับเรียบโพลีโนเมียล การกรองหรือการปรับข้อมูลให้เรียบมีประสิทธิภาพเนื่องจากวิธีนี้ใช้การกรองข้อมูลดิบโดยการให้น้ำหนักต่างกันในขณะที่น้ำหนักของข้อมูลมีปัจจัยที่ส่งผลเหมือนกัน $1/2 m + 1$ ในกรณีของการย้ายตัวกรองเฉลี่ย [16] โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.5)

$$x_j^* = \frac{1}{N} \sum_{h=k}^k c_h x_{j+h} \quad (2.5)$$

เมื่อ x_j^* คือสัญญาณที่ถูกปรับให้เรียบ N คือแฟกเตอร์ที่ถูกทำให้เป็นปกติ k คือจำนวนค่าที่ติดอยู่ในแต่ละด้านของ j และ c_h คือค่าสัมประสิทธิ์การกรองแปรผันตรงกับดีกรีของโพลีโนเมียล

การทำอนุพันธ์ใช้เพื่อเพิ่มความละเอียดของสเปกตรัมและลบผลกระทบจากภายนอกที่เกิดขึ้นในสเปกตรัม

2.3.1.1.1 อนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First derivative) หรือค่าความชันของสเปกตรัมสามารถหาได้ดังสมการที่ (2.6)

$$\begin{aligned} \text{First derivative} &= \text{slope} \\ &= B - A \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของเซกเมนต์ (segment) ที่มีขนาดเท่ากันและอยู่ติดกัน

2.3.1.1.2. อนุพันธ์อันดับสอง (Second derivative) เป็นเทคนิคที่ใช้แก้ปัญหา การซ้อนทับกันของจุดยอดสเปกตรัมและการเลื่อนขึ้นของสเปกตรัมทั้งแบบสไลด์ออฟเซตและแบบไลน์ ชิฟต์เชิงเส้น [15] โดยมีหลักการคือค่าที่ได้จากผลลบของอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่อยู่ติดกัน หรือก็คือค่า การเปลี่ยนแปลงความชันสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.7)

$$\begin{aligned} \text{Second derivative} &= \text{Change} \\ &= \text{First derivative แรก} - \text{First derivative ถัดไป} \\ &= (B - A) - (C - B) \\ &= 2B - A - C \end{aligned} \quad (2.7)$$

เมื่อ A, B และ C เป็นค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของเซกเมนต์ (Segment) ที่มีช่วงเท่ากันและอยู่ติดกัน

2.3.1.2 การปรับสเปกตรัมให้เป็นมาตรฐาน (Spectral Normalization)

การปรับสเปกตรัมให้เป็นมาตรฐานเป็นการปรับปรุงกลุ่มสเปกตรัมเพื่อให้จุดที่สำคัญของสเปกตรัมเด่นชัด และยังเป็นกรกำจัดปัจจัยรบกวนที่ไม่เกี่ยวข้องออก เพื่อลดความซับซ้อนของข้อมูลในการนำไปสร้างสมการเปรียบเทียบ

วิธีการปรับสเปกตรัมให้เป็นมาตรฐานคือการนำค่า $\log(1/R)$ ของความยาวคลื่นหนึ่งในสเปกตรัม (ซึ่งเป็นความยาวคลื่นอ้างอิง หรือ $\log(1/R)$ ที่มีค่ามากที่สุด) ลบออกจากค่า $\log(1/R)$ ของสเปกตรัมเดียวกันในความยาวคลื่นอื่นทั้งหมด จะได้ค่าสเปกตรัมใหม่มีค่า $\log(1/R)$ ที่ความยาวคลื่นนั้นเป็นศูนย์ ($\lambda_i = \lambda_i - \lambda^*$) เมื่อ λ_i เป็นค่าสเปกตรัมเริ่มต้นของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น λ_i และ λ^* เป็นค่าสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นอ้างอิงในสเปกตรัม) หรือ อาจเป็นการนำค่า $\log(1/R)$ สูงสุดในสเปกตรัมหารค่า $\log(1/R)$ อื่นๆทั้งหมดก็จะได้สเปกตรัมใหม่ที่มีค่าสูงสุดเป็นหนึ่ง

2.3.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) เป็นหนึ่งในวิธีการทางสถิติในการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีหลายตัว (multivariate analysis) โดยใช้เทคนิคการลดจำนวนตัวแปรอิสระด้วยการแบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรใหม่ขึ้นมาที่เรียกว่าปัจจัย หรือองค์ประกอบ (factors of Principle Components) ยกตัวอย่างเช่น กำหนดให้มีตัวแปรใหม่เกิดขึ้น n ตัว ซึ่งเป็นผลรวมเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้น (linear combination) ของผลคูณตัวแปรอิสระเดิมจากข้อมูลสเปกตรัมทั้งหมด กำหนดให้มีตัวแปรอิสระเดิมทั้งสิ้น p ตัว หรือ p ความยาวคลื่น กับสัมประสิทธิ์ในการถ่วงน้ำหนักตัวแปร (factor loadings) ที่ให้กับตัวแปรเดิมเพื่อสร้างตัวแปรใหม่ได้แก่ $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1p}$ ดังแสดงในสมการดังนี้

$$F_1 = w_{11} \times X_1 + w_{12} \times X_2 + w_{13} \times X_3 + \dots + w_{1p} \times X_p$$

$$F_2 = w_{21} \times X_1 + w_{22} \times X_2 + w_{23} \times X_3 + \dots + w_{2p} \times X_p$$

$$F_3 = w_{31} \times X_1 + w_{32} \times X_2 + w_{33} \times X_3 + \dots + w_{3p} \times X_p$$

.....

.....

$$F_k = w_{k1} \times X_1 + w_{k2} \times X_2 + w_{k3} \times X_3 + \dots + w_{kp} \times X_p$$

หมายเหตุ: จำนวนตัวแปรใหม่ที่เรียกว่าแฟกเตอร์ (factors) หรือองค์ประกอบหลัก (Principle Component; PC) จะต้องมีจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับตัวแปรเดิม

2.3.1.4 การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard Normal Variate, SNV)

การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน คือการกำจัดความกระเจิงแสงของสเปกตรัมทั้งหมด เส้นสเปกตรัม โดยจะปรับค่าการดูดกลืนให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน (normalization) คือทำให้ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมเป็นศูนย์ โดยใช้สเปกตรัมค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่เลือก แล้วนำมาลบกับค่าสเปกตรัมอื่นในความยาวคลื่นทั้งหมด และนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่หาได้ตลอดช่วงมาหาค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละความยาวคลื่นเพื่อปรับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานให้เท่ากับหนึ่งดังสมการที่ (2.8)

$$A_{i(\text{SNV})} = \frac{(A_i - \bar{a}_i)}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^p (A_{i,j} - \bar{a}_i)^2}{(p-1)}}} \quad (2.8)$$

2.3.3 การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีจักรกลเรียนรู้ (Modeling by machine learning method)

2.3.3.1 แนะนำแบบจำลองการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน Partial Least Squares (PLS) Regression

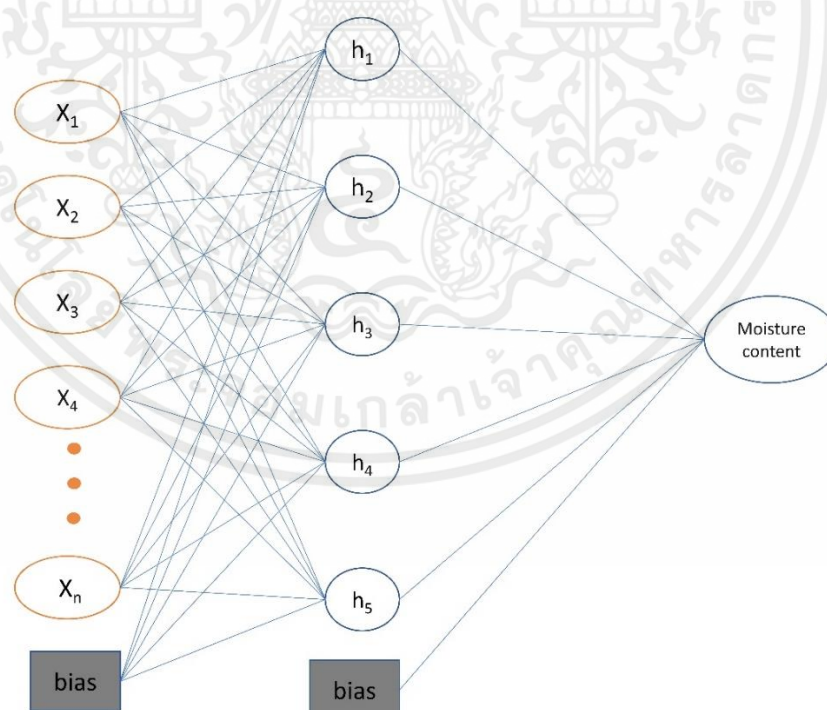
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนเป็นเทคนิคหนึ่งสำหรับการวิเคราะห์หลายตัวแปร (multivariate analysis) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัม NIR [15] ซึ่งหลักการของ PLSR คือการลดจำนวนตัวแปรในช่วงการจัดกลุ่มลดจำนวนตัวแปรจะมีการนำข้อมูลตัวแปรตาม (Y) เข้ามาสร้างเป็นตัวแปรใหม่ด้วยเรียกว่าการคาดคะเนปัจจัย (factor loading)

การนำ PLSR ไปประยุกต์ใช้สำหรับการสร้างสมการสอบเทียบนั้นสามารถทำได้ 2 วิธีได้แก่ PLS1 และ PLS2 โดย PLS1 นั้นเป็นการสร้างสมการสำหรับทำนายค่าตัวแปรตามเพียง 1 ตัว โดยใช้สมการ 1 สมการ แต่ PLS2 นั้นเป็นการสร้างสมการที่ทำนายค่าตัวแปรตามหลายตัวโดยใช้สมการเดียวกันทั้งหมด ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว PLS1 ให้ค่าความถูกต้องดีกว่า PLS2

2.3.3.2 แนะนำแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neuron Network: ANN)

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นหนึ่งในวิธีจักรการเรียนรู้ (Machine learning) แบบ Deep learning ซึ่งมีหลักการทำงานคล้ายกับการทำงานของเซลล์ประสาทในสมองมนุษย์ซึ่งประกอบไปด้วยนิวรอน (Neuron) จำนวนมากที่เชื่อมโยงอย่างซับซ้อนเพื่อวิเคราะห์ และแก้ปัญหา โดยมีองค์ประกอบดัง รูปที่ 2.12

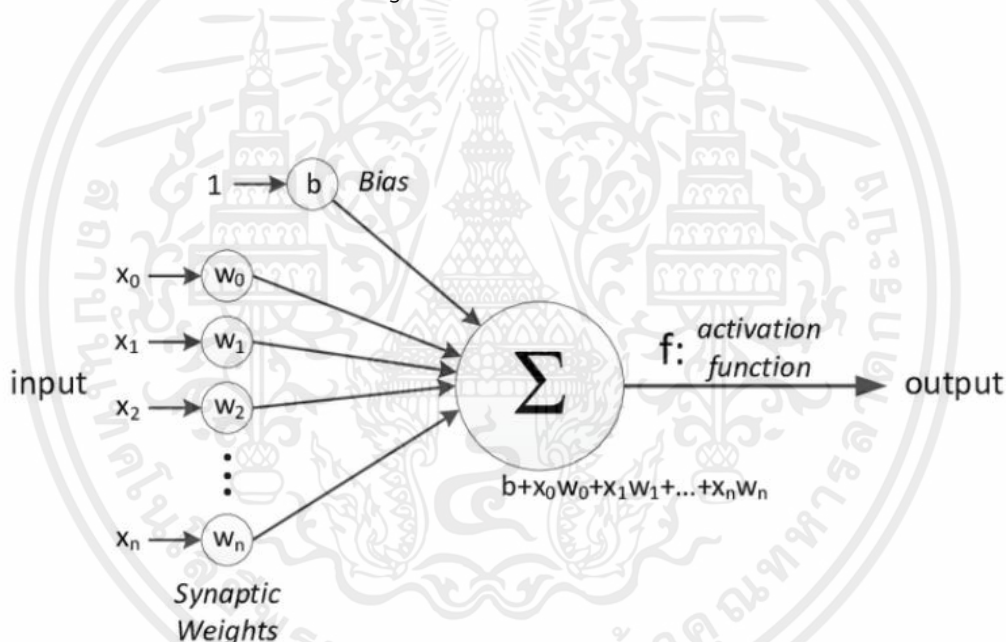


รูปที่ 2.12 องค์ประกอบของ Artificial Neuron Network

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Artificial Neuron Network นั้น ประกอบไปด้วย นิวรอน ที่บรรจุข้อมูลตัวแปรต่างๆไว้ และ Layer ที่ทำหน้าที่แบ่งนิวรอนออกเป็นชั้นต่างๆ จำนวน 3 ชั้น ได้แก่

1. ชั้นนำเข้า (Input layer) เป็นชั้นที่เก็บรวบรวมตัวแปรต้นทั้งหมด เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจำนวนของโหนดจะขึ้นอยู่กับปริมาณตัวแปรต้น
2. Hidden layer เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้น Input และชั้นของ Output มีหน้าที่คำนวณข้อมูลที่ได้จากชั้น Input เพื่อส่งออกไปยังชั้น Output โดยในทุกๆ Hidden layer จะประกอบไปด้วย Bias ที่เป็นตัวจำแนกชุดข้อมูลทั้งหมดออกจากกัน และ น้ำหนัก (Weight) ซึ่งแต่ละนิวรอนจะมีน้ำหนักที่ไม่เท่ากันทำให้ข้อมูลที่ได้นั้นสามารถแยกได้จากชั้น Output
3. ชั้นส่งออก (Output layer) เป็นชั้นที่ถูกลำข้อมูลออกไปใช้งานต่อ โดยจำนวนโหนดของชั้นส่งออกเป็นสมการการถดถอย (Regression) โหนดที่ได้ จึงมีเพียงแค่ 1 โหนด



รูปที่ 2.13 โครงสร้างการทำงานของ Artificial Neuron Network

โครงข่ายประสาทเทียมจะนำ Input และ Weight ของแต่ละนิวรอนมาคูณกัน จากนั้นจะนำค่าที่ได้จากการคูณทั้งหมดมารวมกัน หากมีค่าต่ำกว่า ค่าแบ่งที่กำหนดไว้ (Threshold :T) จะส่งค่าที่ได้ไปยังฟังก์ชันส่งต่อ (Transfer function) ซึ่งจะทำหน้าที่ตัดสินใจว่านิวรอนควรจะถูกกระตุ้นหรือไม่ โดยพิจารณาจาก ชั้นนำเข้า และ Hidden layer โดยฟังก์ชันกระตุ้นจะมีอยู่ในชั้นนำเข้า และ Hidden layer ดังสมการที่ (2.9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y=f \left[\left(b+ \sum_{i=1}^n (x_i w_i) \right) -T \right] \quad (2.9)$$

2.4 การประเมินสมรรถนะแบบจำลอง

2.4.1 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias)

ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยคือค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ตรวจวัดความชื้นด้วยวิธีมาตรฐาน และค่าที่ได้จากการทำนายผลด้วย NIR และเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการคำนวณความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลองดังสมการที่ (2.10)

$$\text{Bias} = \left(\frac{\sum x_n}{N} \right) - \left(\frac{\sum y_n}{N} \right) \quad (2.10)$$

เมื่อ $\sum x_n$ คือผลรวมของค่าที่นำมายได้จาก NIR

$\sum y_n$ คือผลรวมของค่าความชื้นที่ตรวจวัดด้วยวิธีมาตรฐาน

N คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

2.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: r^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในแบบจำลองทางสถิติที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายผลลัพธ์ในอนาคตหรือตรวจสอบสมมุติฐานบนพื้นฐานข้อมูลอื่นๆ ในด้าน NIR ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจคือ ค่าที่บอกสหสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลความชื้นที่ได้จากการวัดมาตรฐาน และค่าที่ NIR ทำนายได้ โดยพิจารณาสมรรถนะการทำนายด้วย NIR จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจได้ในตารางที่ 2.1

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (2.11)$$

เมื่อ SSR คือผลรวมของค่าความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้จากการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ และ SST คือผลรวมของค่าความแปรปรวน

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบระหว่าง r^2 และความสามารถในการทำนายของ NIR [17]

r^2	ความสามารถในการทำนาย
0 - 0.25	NIR ไม่สามารถใช้สอบเทียบได้
0.26 - 0.49	ความสัมพันธ์ของตัวแปรไม่ดีควรหาสาเหตุ
0.50 - 0.64	ยอมรับได้ในการตรวจวัด (แบบหยาบ)
0.66 - 0.81	ยอมรับได้ในการตรวจวัดและสอบเทียบ (แบบหยาบ)
0.83 - 0.90	สามารถใช้ในงานวิจัย และการใช้งานส่วนใหญ่ แต่ควรระมัดระวังสำหรับการใช้งาน
0.92 - 0.96	สามารถใช้ในการประยุกต์ส่วนใหญ่
0.98 - 1.00	ดีเยี่ยมสามารถใช้ได้ทุกการประยุกต์ใช้งาน

2.4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด (Coefficient of determination: R^2_{\max})

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุดเป็นค่าที่ได้จากค่าสหสัมพันธ์ของการประเมินสมการถดถอย ของตัวอย่างการวัดความชื้นแบบวิธีมาตรฐาน โดยสามารถคำนวณดังสมการที่ (2.12)

$$R^2_{\max} = \frac{SD_y^2 - Rep^2}{SD_y^2} \quad (2.12)$$

เมื่อ SD_y คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดความชื้นด้วยวิธีมาตรฐาน และ Rep คือค่าความสามารถในการทำซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 ความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนาย (Standard error of prediction: SEP)

ความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนายเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่างข้อมูลสเปกตรัมของ NIR และค่าตรวจวัดด้วยวิธีอ้างอิง (ความชื้นจากการวัดด้วยวิธีมาตรฐาน)

$$SEP = \sqrt{\left\{ \sum (x_n - y_n)^2 - \left[\sum (x_n - y_n) \right]^2 / N \right\} / (N-1)} \quad (2.13)$$

เมื่อ $n = 1$ ถึง N

x_n = ค่าความชื้นที่ได้จากวิธีมาตรฐานจากตัวอย่างที่ 1 ถึง N

y_n = ค่าที่ NIR ทำนายได้จากตัวอย่างที่ 1 ถึง N

2.4.4 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของการทำนาย Root mean square error of prediction (RMSEP)

ค่าเฉลี่ยกำลังสองของการทำนายเป็นค่าแสดงประสิทธิภาพของแบบจำลอง ค่าเฉลี่ยกำลังสองของการทำนายได้รวมค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias) ไว้ด้วยหากไม่มีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย RMSEP จะเท่ากับ SEP โดยทั่วไป RMSEP เป็นที่นิยมมากกว่า SEP แต่สำหรับการทำนายผลด้วย SEP และ Bias ให้ค่าการทำนายที่แม่นยำ เนื่องจาก RMSEP เกี่ยวข้องกับ Bias แต่ไม่แสดงขนาดและเครื่องหมาย [18]

$$RMSEP = \sqrt{\left\{ \sum (x_n - y_n)^2 \right\} / N} \quad (2.14)$$

เมื่อ $n =$ จำนวนตัวอย่าง

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภัทรพรพรรณ [22] วิเคราะห์ความเข้มข้นของเบต้าไฮดรอกซีบิวทีเรตในซีรัมของโคด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ซึ่งแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วนได้แก่ การวิเคราะห์โดยการทดสอบแบบมาตรฐาน (kinetic enzymatic method) และการทดสอบโดยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ซึ่งหนึ่งในสมการที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้วัดคือ PLSR โดยปรับแต่งสัญญาณสเปกตรัมเพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้วิธีการ SNV และ Second derivative ได้ผลค่า R^2 และ ค่า RPD เท่ากับ 0.98 และ 0.233 ตามลำดับ

Antonios et al. [23] ใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีประมาณค่าปริมาณไนโตรเจนรวมของดิน (TN), อินทรีย์คาร์บอน (OC) และปริมาณความชื้นรวม (MC) โดยใช้ตัวอย่างดิน 140 ตัวอย่าง ตรวจวัดด้วยโหมตการสะท้อนแสง ได้ข้อสรุปว่าแมชชีนเลิร์นนิงสามารถแก้ปัญหาไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูลได้ ซึ่ง LS-SVMs และ Cubist เป็นสองวิธีที่ได้ผลลัพธ์ดีที่สุดแต่การประมาณค่าความชื้นรวมคือ LS-SVMs ได้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองของการทำนาย (RMSEP) เท่ากับ 0.457% และ ส่วนเบี่ยงเบนการทำนายที่เหลือ (RPD) เท่ากับ 2.24

Roman et al. [24] วิเคราะห์คุณภาพของไบโอดีเซลด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี โดยมุ่งเน้นไปที่การตรวจสอบ ปริมาณความหนาแน่น ความหนืดเชิงจลน์ ปริมาณน้ำ และปริมาณเอทานอลโดยใช้เทคนิคการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ (MLR) การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (PLS) การถดถอยองค์ประกอบหลัก (PCR), Poly-PLS, Spline-PLS และโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ได้ข้อสรุปว่าเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพมากกว่าเทคนิคเชิงเส้น (MLR, PLS, PCR) และแบบไม่เชิงเส้น (Poly-PLS และ Spline-PLS)

Toktam Mohammadi et al. [25] ใช้ Vis-NIR วัดความชื้นและความแข็งของเมล็ดพืชตาชิโอที่คั่วในสถานะต่างๆ โดยใช้สเปกตรัมในช่วง 400-1000 นาโนเมตร เทคนิคการประมวลผลล่วงหน้าที่ใช้ได้แก่ อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง และสอง ตัวกรองมัชฌิมา สวิทชิ่ง โกลีย์ เวฟเลต การแก้ไขการกระจายแบบทวิคูณ (MSC) และการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (SNV) โดยนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลอง PLSR และ ANN ผลลัพธ์ที่ได้กรณีที่ไม่มีการประมวลผลล่วงหน้าให้ค่า R^2 ต่ำ และผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือ การใช้ SNV เวฟเลต และอนุพันธ์อันดับหนึ่งร่วมกับ ANN ค่า $R^2 = 0.907$ และ RMSEP = 0.179

Zhang and Wang [26] ใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีวัดความชื้นใบต้นกล้วย โดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมี ค่า R^2 และ RMSEP ของชุดทดสอบเทียบอยู่ที่ 0.9946 และ 0.1636 ตามลำดับ ชุดการทำนายมี ค่า R^2 และ RMSEP 0.9621 และ 0.4249 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 อุปกรณ์

วัตถุดิบ

3.1 กะลาปาล์ม (Palm shell) ได้จากบริษัทเจริญน้ำมันปาล์มจำกัด และทะลายปาล์ม (Palm empty fruit bunch) ส่วนมากเก็บจากบริเวณโดยรอบ ของ อำเภอพะโต๊ะ จังหวัดชุมพร



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 ซึวมวลที่นำมาใช้ในการทดลอง (ก) กะลาปาล์ม (Palm shell) ได้จากบริษัทเจริญน้ำมันปาล์มจำกัด และ (ข) ทะลายปาล์ม (Palm empty fruit bunch) ส่วนมากเก็บจากบริเวณโดยรอบของอำเภอพะโต๊ะ จังหวัดชุมพร

อุปกรณ์สำหรับเตรียม และเก็บตัวอย่าง

3.2 ถุงดำ



รูปที่ 3.2 ถุงดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เครื่องสับชีวมวล (Machine cutting)



รูปที่ 3.3 เครื่องสับชีวมวล (Machine cutting)

อุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ความชื้น

3.4 หลอดหยดวิทยาศาสตร์ (Buret)



รูปที่ 3.4 หลอดหยดวิทยาศาสตร์ (Buret)

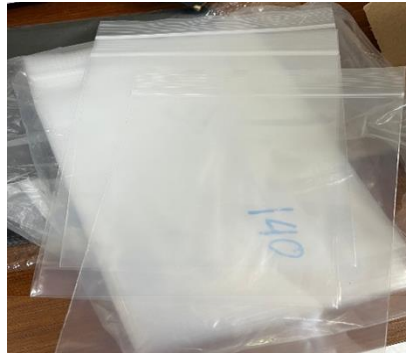
3.5 น้ำเปล่า



รูปที่ 3.5 น้ำเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ถุงซิปล็อค



รูปที่ 3.6 ถุงซิปล็อค

3.7 ตู้เย็น



รูปที่ 3.7 ตู้เย็น

3.8 ครอบป้องกันความชื้น (Moisture can)



รูปที่ 3.8 ครอบป้องกันความชื้น (Moisture can)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น Precisa Model XB 220A



รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น Precisa Model XB 220A

3.10 ตู้อบ (BINDER รุ่น ED/FM)



รูปที่ 3.10 ตู้อบ (BINDER รุ่น ED/FM)

3.11 ถุงมือยาง



รูปที่ 3.11 ถุงมือยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.12 เซ็นเซอร์เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (AvaSpec-Mini4096CL-UV10)



รูปที่ 3.12 เซ็นเซอร์เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (AvaSpec-Mini4096CL-UV10)

3.13 สายไฟเบอร์ออปติก



รูปที่ 3.13 สายไฟเบอร์ออปติก

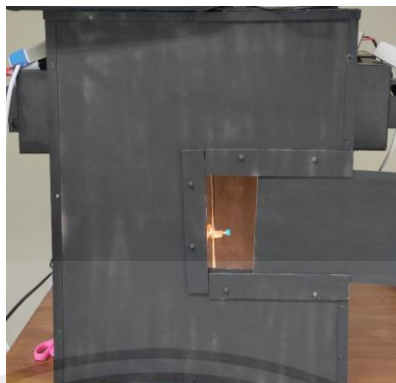
3.14 หลอดไฟความเข้มแสง (Halogen 12V 50W)



รูปที่ 3.14 หลอดไฟความเข้มแสง (Halogen 12V 50W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.15 กล่องไม้ขนาด (50.6 x 50.6 x 70.6 cm.)



รูปที่ 3.15 รูปกล่องไม้ขนาด (50.6 x 50.6 x 70.6 cm.)

3.16 ขาตั้งเหล็ก และตัวหนีบ (Stands and Clamps)



รูปที่ 3.16 ขาตั้งเหล็ก และตัวหนีบ (Stands and Clamps)

อุปกรณ์ และโปรแกรมสำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

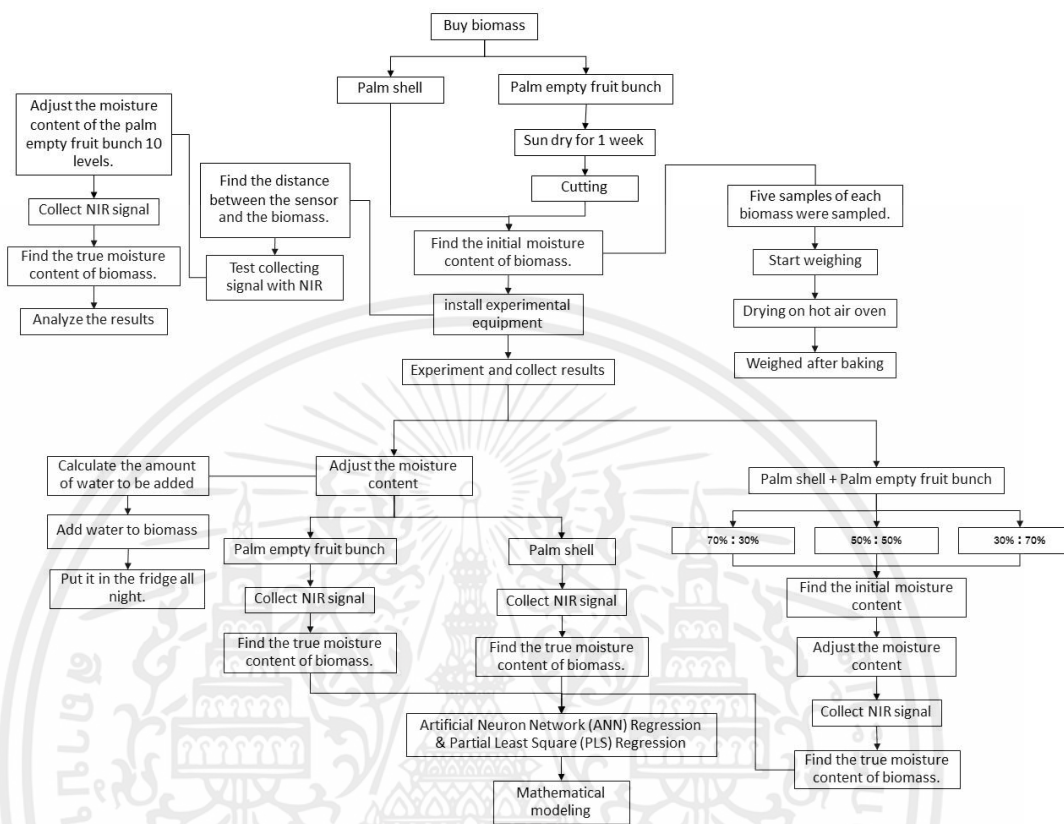
3.17 ไม้ตบุง

3.18 โปรแกรม Microsoft excel

3.19 โปรแกรม MATLAB (R2021b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการ



รูปที่ 3.17 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างชีวมวล

การเตรียมตัวอย่าง ทะลายปาล์มนั้นเนื่องจากมีความชื้นสูงจึงควรทำการลดความชื้นก่อน และทะลายปาล์มมีขนาดที่ใหญ่ควรนำไปลดขนาดด้วยเครื่องสับชีวมวลก่อนนำมาใช้ทดลอง โดยการตากแดดเพื่อให้ความชื้นของทะลายปาล์มลดลงส่วนกะลาปาล์มที่ได้มามีความชื้นที่ต่ำจึงสามารถนำมาอบเพื่อลดความชื้นได้เลย



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.18 (ก) ทะลายปาล์ม และ (ข) กะลาปาล์ม



รูปที่ 3.19 เครื่องสับชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การปรับระดับความชื้นของชีวมวล

ในการทดลองทำนายความชื้นด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีเตอร์ได้มีการใช้ตัวอย่างสำหรับการทดลอง 3 แบบ คือ กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม และกะลาปาล์มผสมทะลายปาล์ม โดยแบ่งระดับความชื้นที่ใช้ในการทำนายออกเป็น 10 ระดับดังแสดงในตารางที่ 3.1 ในการปรับระดับความชื้นของตัวอย่างจะใช้หลอดหยดวิทยาศาสตร์ (Buret) หยดน้ำลงตัวอย่างให้ได้ระดับต่าง ๆ โดยคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมในแต่ละระดับดังสมการที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างชีวมวล (หน่วย: %)

ระดับที่	กะลาปาล์ม	ทะลายปาล์ม	กะลาปาล์มผสมทะลายปาล์ม
1	11	6.6	7
2	14	9.6	10
3	17	12.6	13
4	20	15.6	16
5	23	18.6	19
6	26	21.6	22
7	29	24.6	25
8	32	27.6	28
9	35	30.6	31
10	38	33.6	34

$$\text{ปริมาณน้ำที่ต้องเติม} = \frac{A(B-C)}{100 \times B} \quad (3.1)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักตัวอย่างของชีวมวล B คือ ความชื้นของชีวมวลหลังเติมน้ำ และ C คือ ความชื้นของชีวมวลก่อนเติมน้ำ

เมื่อทำการปรับระดับความชื้นของตัวอย่างเสร็จต้องนำตัวอย่างแช่ตู้เย็น 12 ชั่วโมงเพื่อให้ความชื้นซึมเข้าสู่ชีวมวลได้ดีขึ้น



(ก)

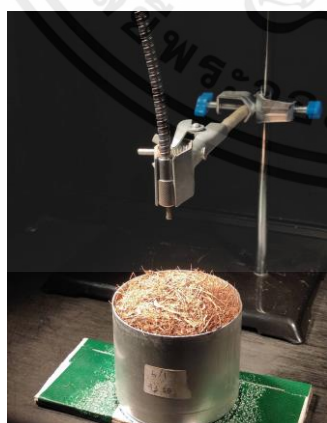


(ข)

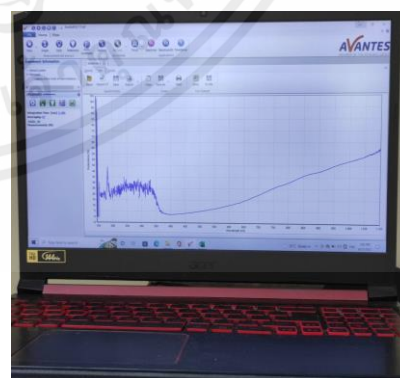
รูปที่ 3.20 การปรับความชื้น (ก) การเติมน้ำ และ (ข) นำไปแช่ตู้เย็น 12 ชั่วโมง

3.2.3 ขั้นตอนการใช้เซนเซอร์เนียร์อินฟราเรดหาความชื้นของตัวอย่าง

นำตัวอย่างวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Near infrared Spectrometer (AvaSpec-Mini4096CL-UV10) มีช่วงความยาวคลื่นอยู่ที่ 800 ถึง 1000 นาโนเมตร โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง (light source) เป็นหลอดไฟความเข้มแสง Halogen 12V 50W จำนวน 4 หลอด รูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (reflectance mode) และ scan average เท่ากับ 10 จากการกดคำสั่ง Auto Configure เพื่อให้โปรแกรมคำนวณค่าที่เหมาะสมอัตโนมัติ โดยทำการวัดค่าอ้างอิง (Reference) จาก Spectralon bar สีขาว เส้นสัญญาณถูกบันทึกด้วยโปรแกรม AvaSoft 8 โดยเลือกการบันทึกเป็นไฟล์ Excel



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.21 การสแกนเซนเซอร์เนียร์อินฟราเรด (ก) สแกนชีวมวลตัวอย่าง และ (ข) คลื่นสัญญาณที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ขั้นตอนการหาความชื้นด้วยวิธีมาตรฐาน

นำตัวอย่างชีวมวลผ่านการสแกนมาแบ่งออกเป็น 3 ซ้ำโดยใช้บริเวณด้านบน 1 เซนติเมตร เท่านั้น ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Presica XB 220A) ก่อนนำเข้าตู้อบ (BINDER รุ่น ED/FM) โดยใช้อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาความชื้นของตัวอย่าง ในขั้นตอนนี้จะใส่ถุงมือยางเพื่อป้องกันคราบเหงื่อจากมือติดกระป๋องเก็บความชื้น โดยการหาความชื้นสามารถหาได้ดังสมการที่ 3.2

$$MC = \frac{w - d}{w} \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ w คือน้ำหนักก่อนอบ และ d คือน้ำหนักหลังอบ



(ก)



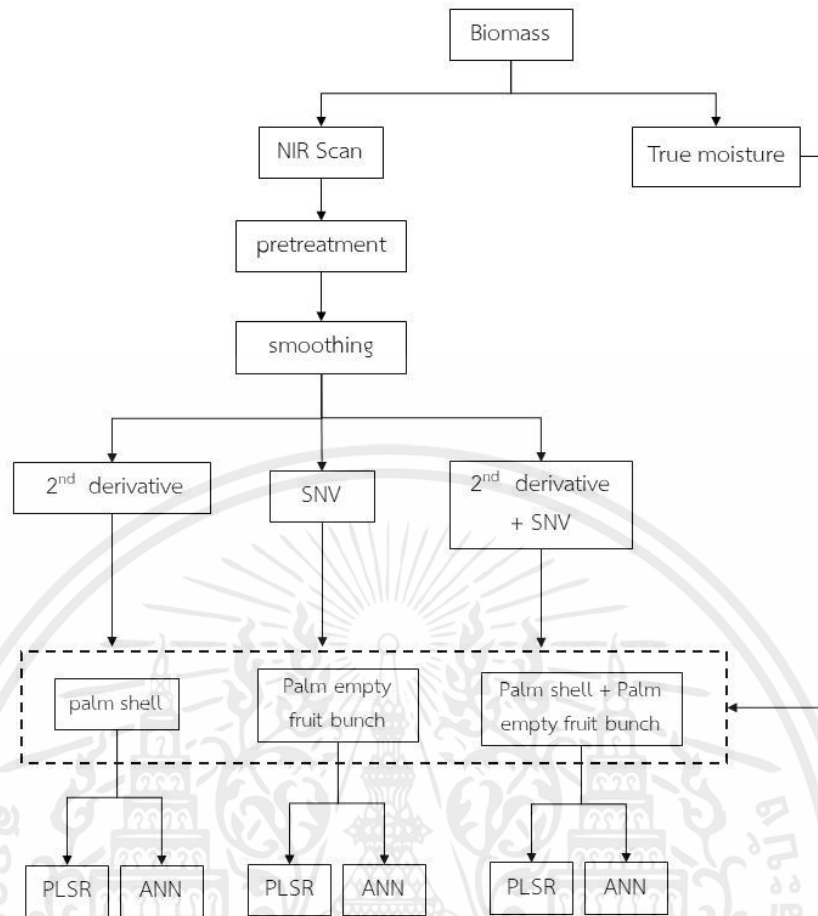
(ข)

รูปที่ 3.22 การหาความชื้นด้วยวิธีมาตรฐาน (ก) อบชีวมวลตัวอย่าง และ (ข) ชั่งน้ำหนักของชีวมวลก่อน และหลังอบ

3.2.5 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองจักรกลเรียนรู้

ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากกาสแกนด้วยเนียร์อินฟราเรดจะถูกนำมาสร้างจักรกลเรียนรู้ใช้โปรแกรม MATLAB รุ่น R2021b โดยมีกระบวนการสร้างจักรกลเรียนรู้ดังแสดงในรูปที่ 3.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 แผนผังขั้นตอนการสร้างแบบจำลองจักรกลเรียนรู้

ตัวอย่างชีวมวลจะถูกปรับแต่ง (pretreatment) และทำให้เรียบ (smoothing) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน หลังจากสัญญาณรบกวนถูกกำจัดจะทำการให้พีคของน้ำชัดเจนยิ่งขึ้นด้วยการทำอนุพันธ์อันดับสอง การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน และใช้อนุพันธ์อันดับสองร่วมกับการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน สร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และแบบจำลองการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนจากข้อมูลที่ปรับแต่งแล้ว โดยใช้ข้อมูลเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งร่วมกับความชื้นที่หาด้วยวิธีมาตรฐานในการสร้างแบบจำลองจักรกลเรียนรู้

บทที่ 4

ผลและการวิจารณ์ผล

การทดลองได้มีการปรับความชื้นของชีวมวลทั้ง 3 ชนิด คือ กะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า และชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์มกับทะลายปาล์มเปล่า ออกเป็น 10 ช่วงระดับคือ กะลาปาล์ม 11 – 38% ทะลายปาล์มเปล่า 6.6 – 33.6% และชีวมวลแบบผสม 7 – 37% โดยชีวมวลแต่ละชนิดมีจำนวน 100 100 และ 120 ตัวอย่าง ตามลำดับ และมีผลการปรับความชื้นที่คำนวณได้ของตัวอย่างชีวมวล ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ตัวอย่างชีวมวลทั้งหมดถูกทำการเก็บข้อมูลสัญญาณการสะท้อนของแสงอินฟราเรดย่านใกล้ (สเปกตรัม) จากนั้นทำการหาค่าความชื้นจริงด้วยวิธีการอบลมร้อน (Hot air oven) เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial Least Squares Regression: PLSR) และวิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks: ANN) โดยมีการใช้รูปแบบการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้น (Spectral/Signal preprocessing) 3 วิธี คือ Smoothing + SNV, Smoothing + Second Derivative และ Smoothing + SNV + Second Derivative

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางสถิติสำหรับค่าความชื้นจริงของตัวอย่างชีวมวล

sample	N	Min	Max	Avg	SD
Palm shell	100	8.4684	31.3039	19.1560	7.6829
Palm empty fruit bunch	100	1.2293	31.6930	14.1291	9.1392
Mixture	120	5.7143	34.4993	18.4112	6.7421

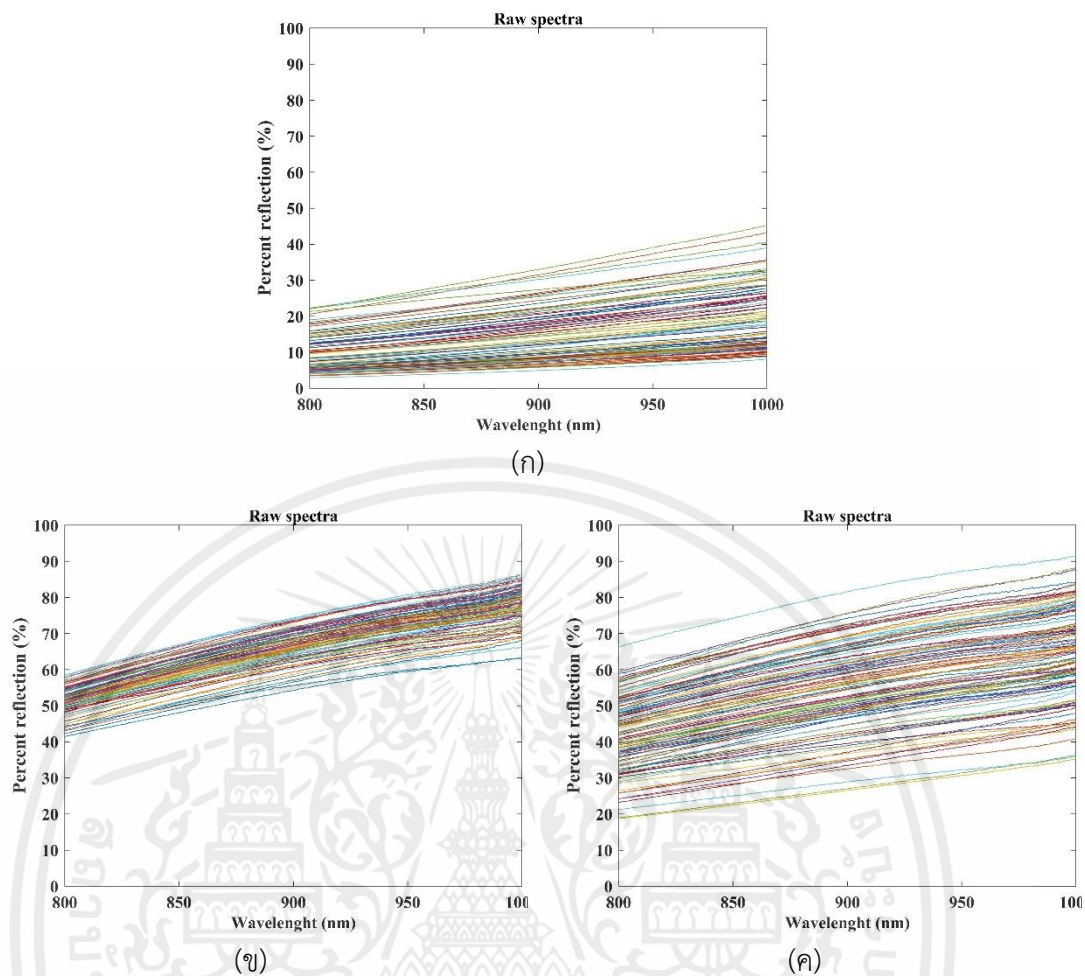
N คือ จำนวนตัวอย่างของชีวมวล Min คือ ความชื้นที่ต่ำที่สุด Max คือ ความชื้นที่สูงที่สุด Avg คือ ความชื้นเฉลี่ย และ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.1 การนำเข้า และปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้น

สเปกตรัมที่ใช้ในการนำมาเข้ากระบวนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 800-1000 nm เนื่องจากความยาวคลื่นก่อน 800 nm จะเป็นความยาวคลื่นที่เกี่ยวข้องกับแสงที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้ (visible light) [19] โดยการนำเข้าข้อมูลมาวิเคราะห์ไม่ต้องการข้อมูลที่ที่มีสีมาเกี่ยวข้อง จึงได้ค่าสัญญาณสเปกตรัมดังรูปที่ 4.1 ของตัวอย่างกะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม และ

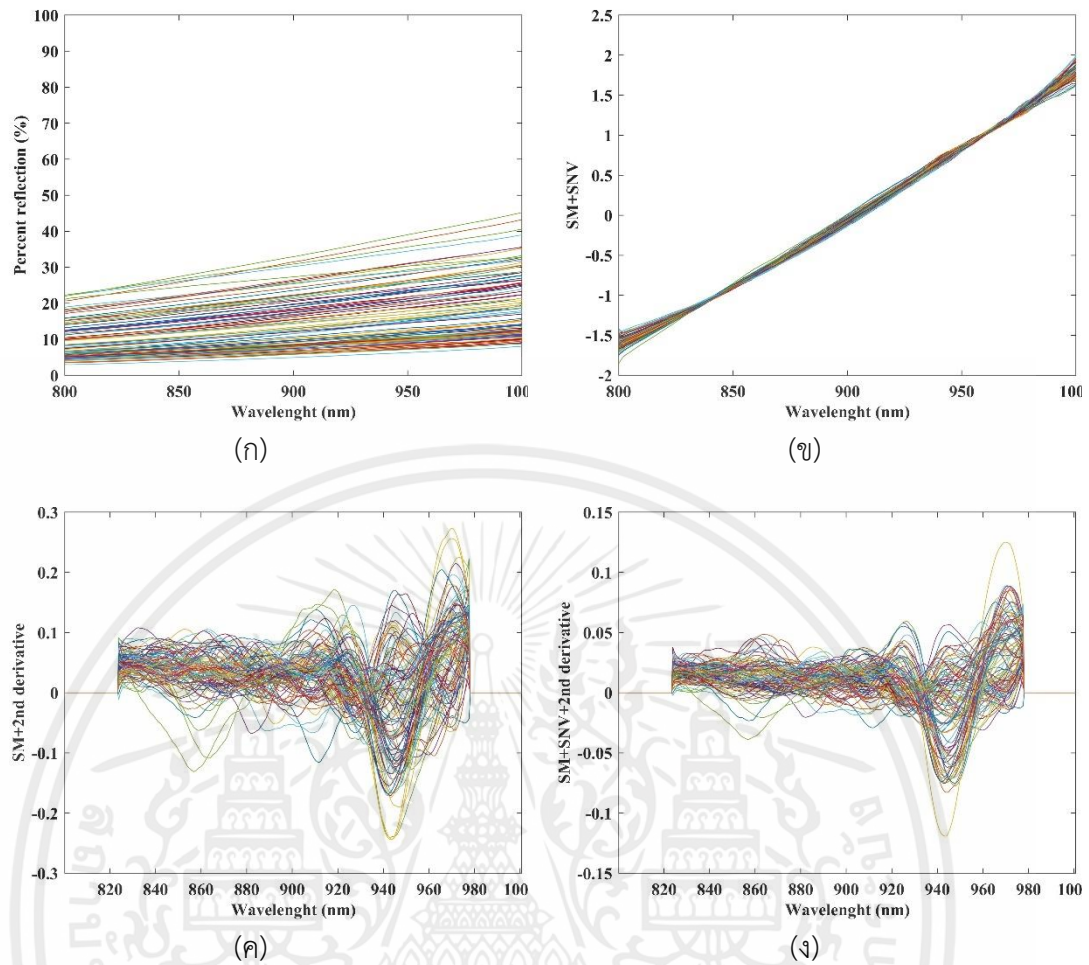
ชีวมวลแบบผสม จะเห็นได้ว่าเส้นสเปกตรัมของชุดตัวอย่างทั้ง 3 ชุดนั้นค่อนข้างที่จะไม่เรียบ และเพื่อลดอิทธิพลที่ส่งผลต่อการสร้างแบบจำลอง จึงได้มีการปรับความแปรปรวนค่าสัญญาณด้วยวิธี smoothing เพื่อให้ค่าสัญญาณที่ได้มีความเรียบของสัญญาณมากขึ้นสังเกตได้จากการเปรียบเทียบกราฟในรูปที่ 4.1 ของ 3 ชุดตัวอย่าง กับ รูปที่ 4.2 ถึง 4.4 ของชุดตัวอย่างที่ปรับค่าสัญญาณด้วยวิธี smoothing หลังจากนั้นนำค่าสัญญาณที่ผ่านการปรับเรียบด้วยวิธี smoothing มาปรับค่าสัญญาณด้วยวิธี SNV เพื่อกำจัดความกระเจิงแสงของสเปกตรัมซึ่งทำให้ค่าการดูดกลืนเป็นมาตรฐานเดียวกันด้วยวิธี Second Derivative เพื่อแยกจุดยอดที่เหลื่อมซ้อนกันในสเปกตรัมออกจากกัน และลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่น [20] และวิธี SNV + Second Derivative ตามลำดับ การปรับแต่งค่าสัญญาณเบื้องต้นของตัวอย่างกะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า และชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์มกับทะลายปาล์มเปล่าแสดงดังรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 ตามลำดับ

ค่าสัญญาณที่ได้หลังจากปรับแต่งสัญญาณด้วยวิธี smoothing + SNV smoothing + Second Derivative และ smoothing + SNV+ Second Derivative พบว่าจากการสังเกตด้วยตาเปล่ากราฟที่ปรับค่าสัญญาณด้วยวิธี smoothing + SNV ค่าสัญญาณสเปกตรัมมีความใกล้เคียงกันมาก แต่ไม่เห็นจุดพีคของคลื่นสัญญาณได้อย่างชัดเจน แตกต่างกับวิธี smoothing + Second Derivative และ smoothing + SNV + Second Derivative ที่เห็นจุดพีคของค่าสัญญาณได้อย่างชัดเจน แต่มีความกระเจิงของค่าสัญญาณสูงกว่า โดยความกระเจิงของสัญญาณที่ปรับปรุงด้วยวิธี smoothing + SNV + Second Derivative จะสูงที่สุด ดังรูปที่ 4.2 และเป็นเช่นเดียวกันในค่าสัญญาณของชุดตัวอย่างทะลายปาล์มเปล่า และชีวมวลแบบผสม ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



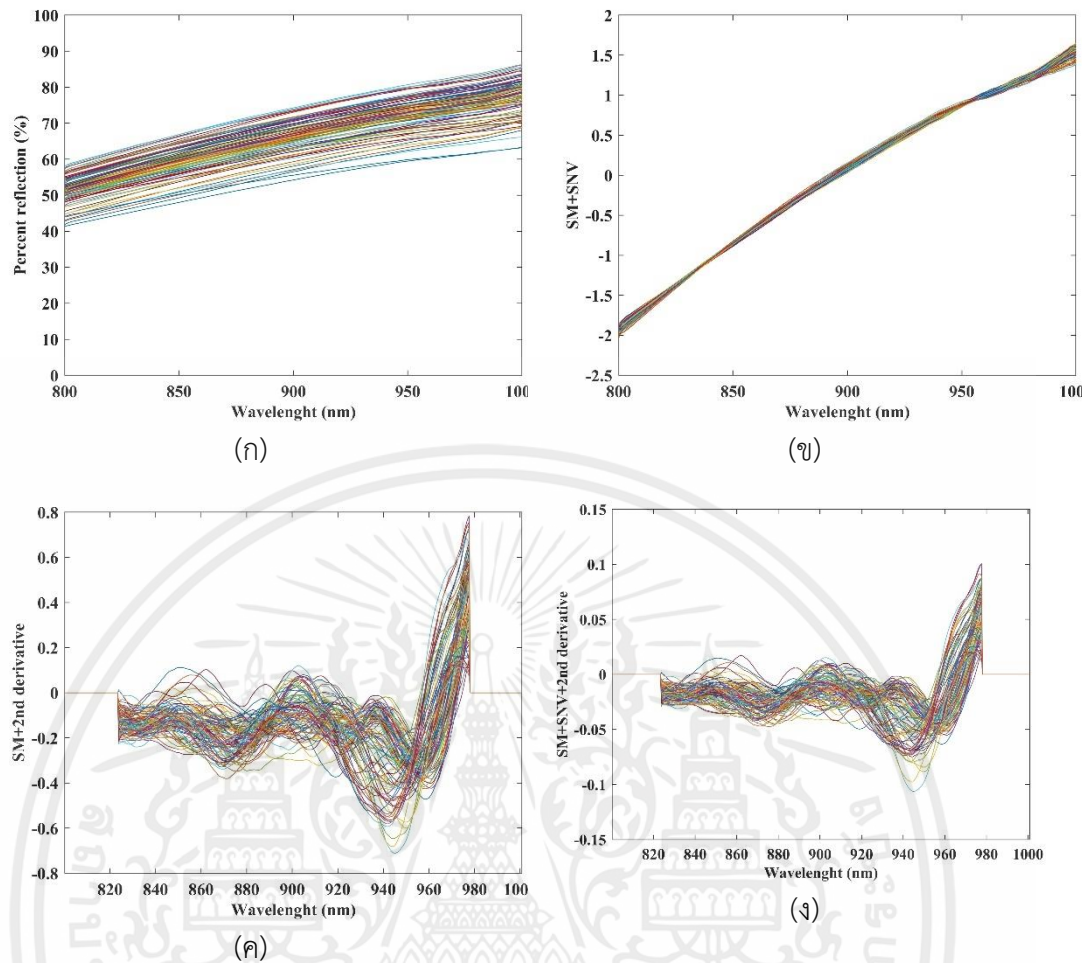
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมที่ยังไม่ผ่านการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นของตัวอย่างซีวมวล (ก) กะลาปาล์ม (ข) ทะลายปาล์มเปล่า และ (ค) ซีวมวลแบบผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



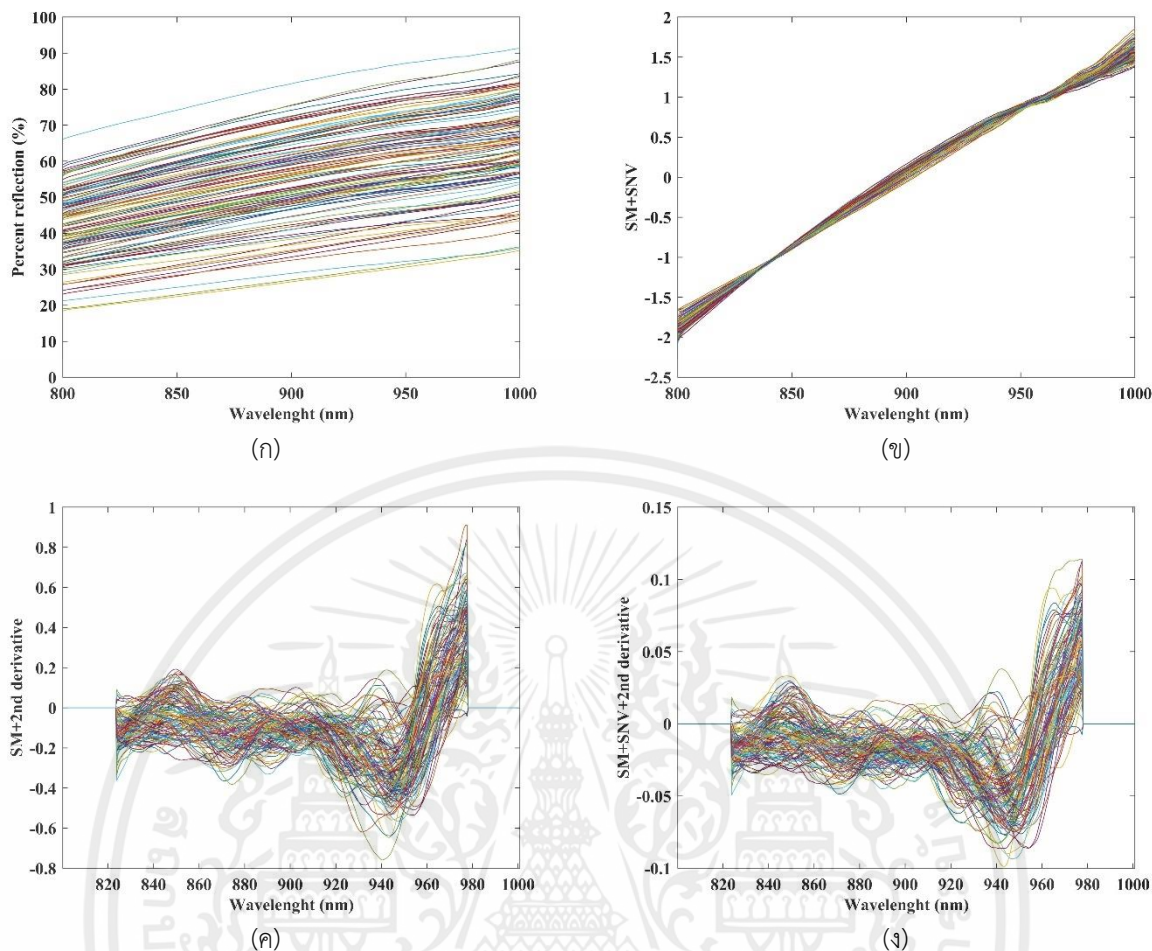
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นของตัวอย่างกะลาปาล์ม ด้วยวิธี
 (ก) Smoothing (ข) smoothing + SNV (ค) smoothing + Second Derivative
 และ (ง) smoothing + SNV + Second Derivative

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นของตัวอย่างทะเลสาบปลาด้วยวิธี (ก) Smoothing (ข) Smoothing + SNV (ค) Smoothing + Second Derivative และ (ง) Smoothing + SNV + Second Derivative

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



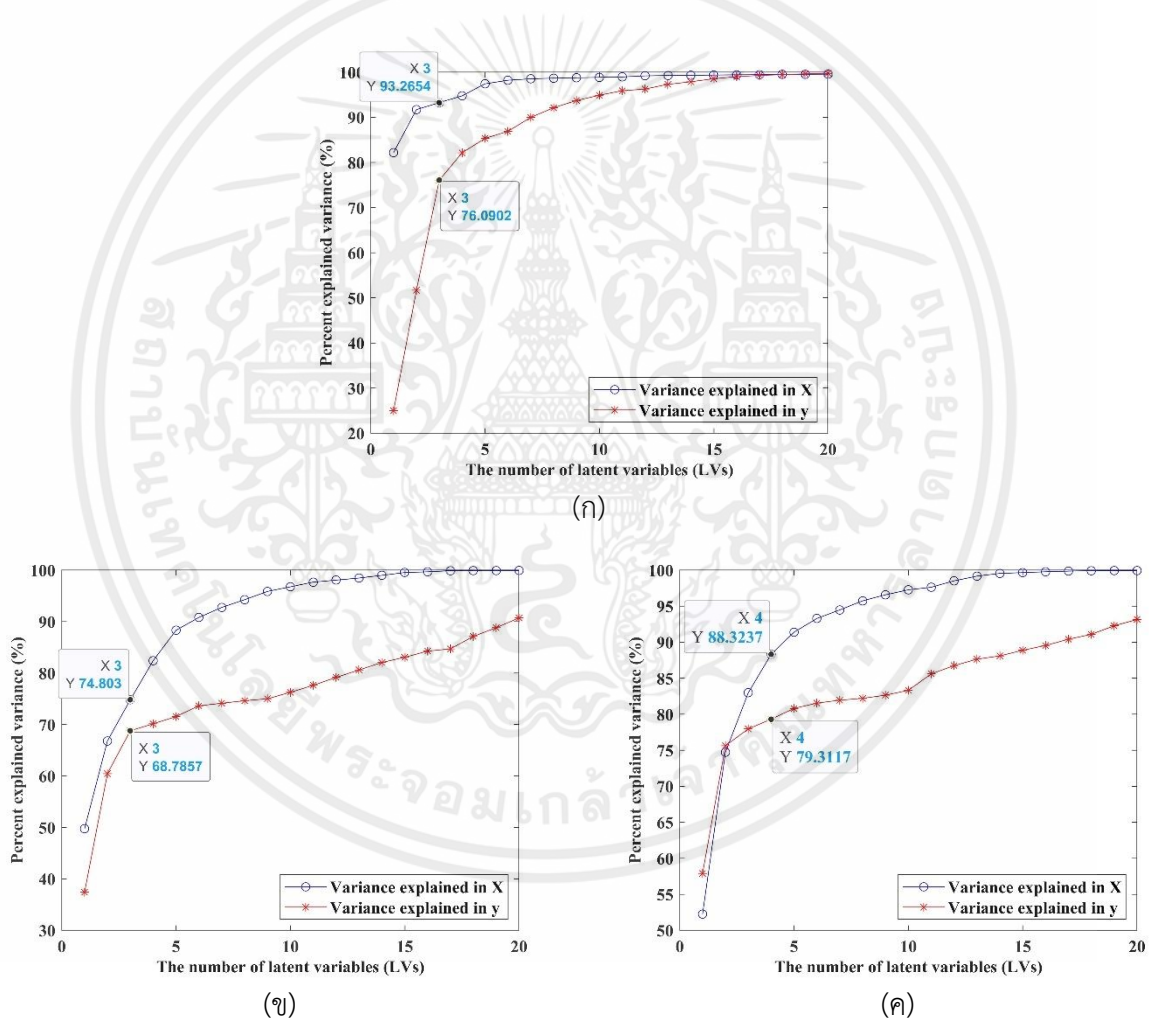
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นของตัวอย่างซีมวอลแบบผสม ด้วยวิธี (ก) Smoothing (ข) Smoothing + SNV (ค) Smoothing +Second Derivative และ (ง) Smoothing + SNV +Second Derivative

4.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี PLSR

จากการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้น ด้วยวิธี smoothing + SNV smoothing + Second Derivative และ smoothing + SNV + Second Derivative ของตัวอย่างกะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม เปล่า และซีมวอลแบบผสม ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองข้อมูลทั้งหมดถูกนำมาแบ่งออกเป็น 2 ส่วนโดยการสุ่ม คือ ชุดข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลอง (training set 70%) และสำหรับการพิสูจน์แบบจำลอง (test set 30%) จากนั้นใช้ข้อมูลจากชุด training set สำหรับการสร้างแบบจำลอง ด้วยวิธี PLSR เพื่อค้นหาตัวแปรแฝง (LVs) ที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์โดยตัวแปรแฝง (LVs) ใช้อธิบายความแปรปรวนของข้อมูลที่ถูกสกัดออกมาจากชุดข้อมูล

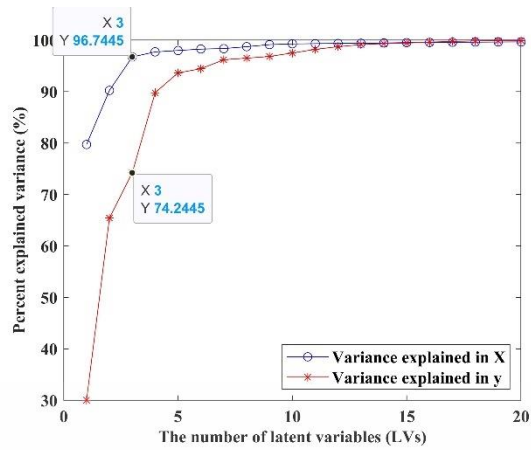
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดิม [11] นอกจากนี้ควรใช้ LVs จำนวนที่น้อยที่สุดที่เพียงพอต่อการอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรต้น และตัวแปรตาม เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหา overfitting กล่าวคือการใช้แบบจำลองที่สามารถเรียนรู้หรือทำนายข้อมูลจาก Training set ได้ดีมาก แต่ไม่สามารถนำไปใช้กับข้อมูลที่ไม่เคยพบมาก่อน (test set) ได้ดี [21] รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองกะลาปาล์มใช้เพียง 3 3 และ 4 LVs ทะลายปาล์มใช้เพียง 3 2 และ 2 LVs และชีวมวลแบบผสมใช้เพียง 2 3 และ 3 LVs เพื่ออธิบายความแปรปรวนของข้อมูลระหว่างสเปกตรัม และความชื้นจริงของตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด สำหรับการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้น ด้วยวิธี smoothing + SNV smoothing + Second Derivative และ smoothing + SNV + Second Derivative ตามลำดับ

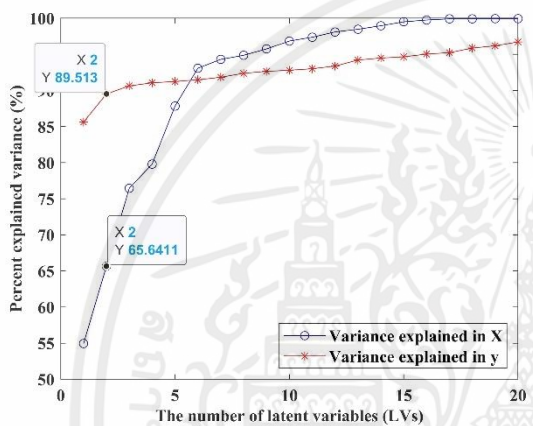


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวแปรแฝง (LV) เทียบกับค่าความแปรปรวนที่อธิบายได้ ของกะลาปาล์มในการนำไปใช้สร้างแบบจำลอง PLSR (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

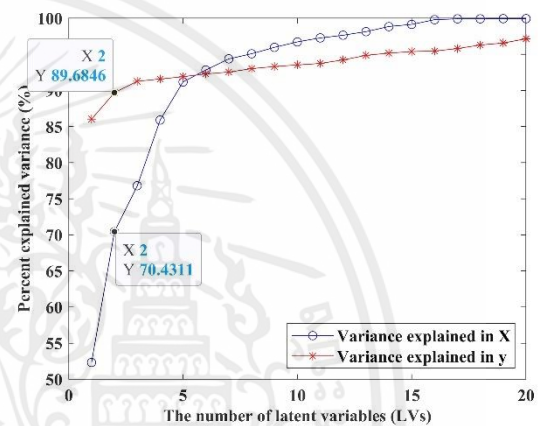
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



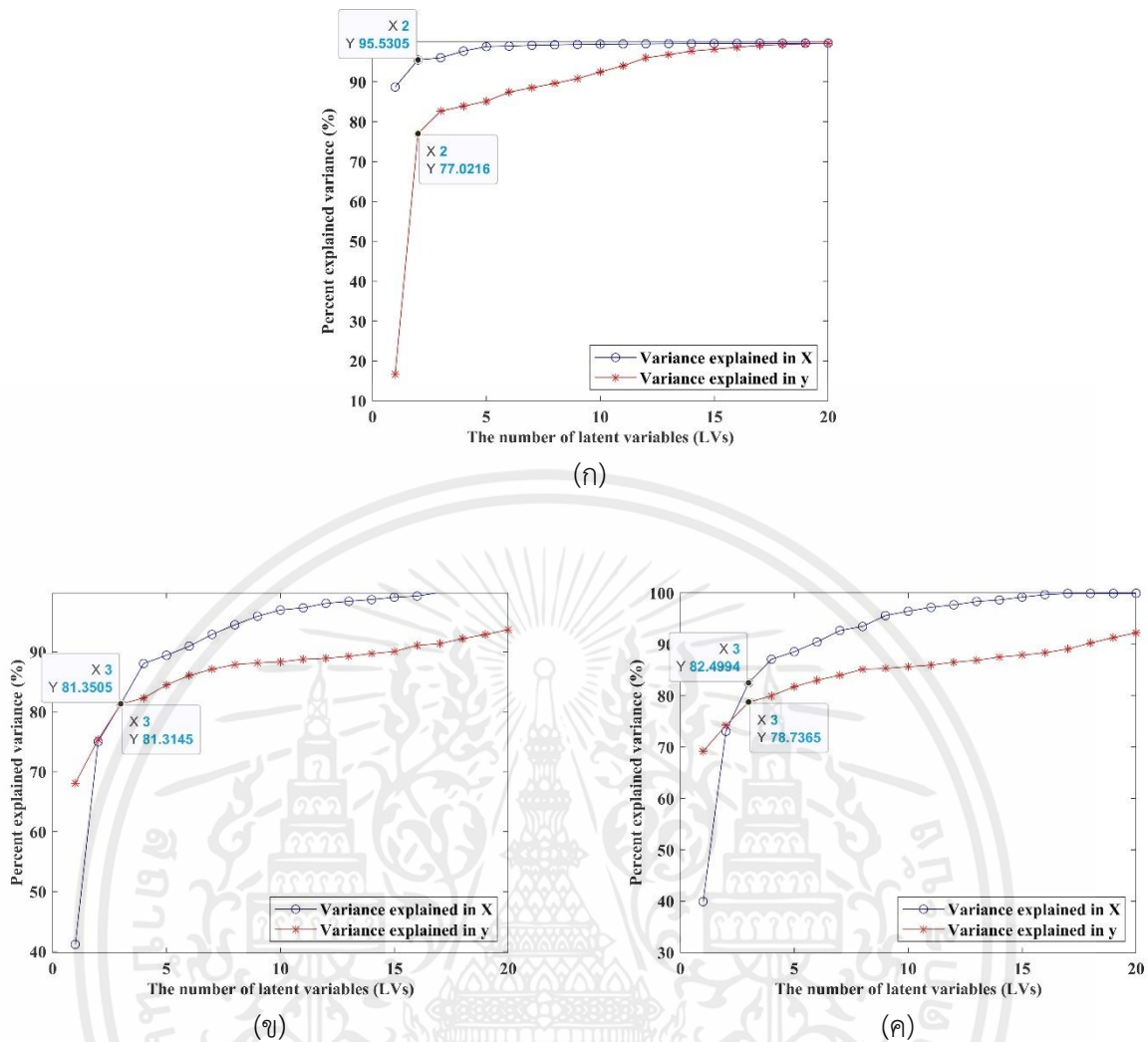
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวแปรแฝง (LV) เทียบกับค่าความแปรปรวนที่อธิบายได้ ของทะลายปาล์มในการนำไปใช้สร้างแบบจำลอง PLSR (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

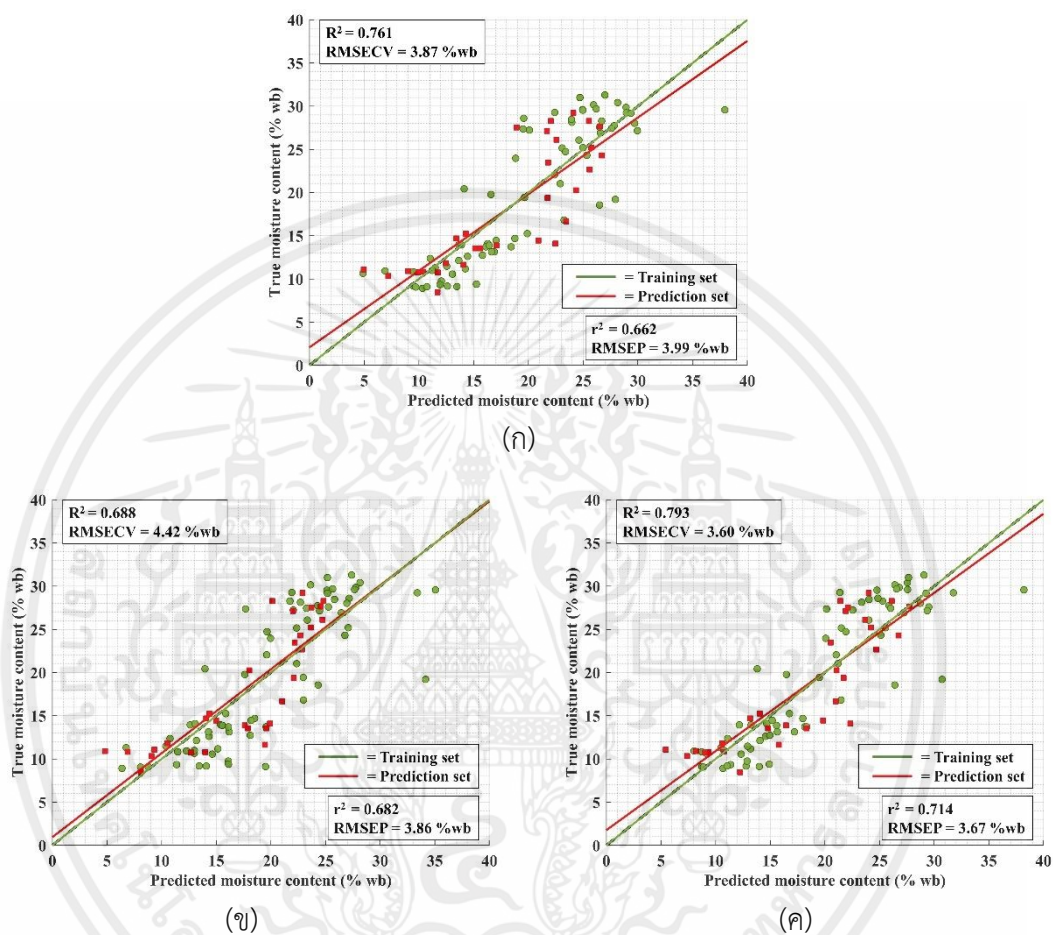


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวแปรแฝง (LV) เทียบกับค่าความแปรปรวนที่อธิบายได้ ของชีวมวลแบบผสม ในการนำไปใช้สร้างแบบจำลอง PLSR (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

สร้างแบบจำลอง PLSR ของตัวอย่างกะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า และชีวมวลแบบผสม จากค่าตัวแปรแฝงที่เลือกดังตารางที่ 4.5 ถึง 4.7

จากการสร้างแบบจำลอง PLSR จากชุดข้อมูลกะลาปาล์ม พบว่าการปรับแต่งค่าสัญญาณเบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + SNV + Second Derivative มีความสามารถในการทำนายค่าความชื้นได้ดีที่สุด เปรียบเทียบได้จากตารางที่ 4.2 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการสร้างแบบจำลอง (R^2) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการสร้างแบบจำลอง (RMSECV) เท่ากับ 0.793 และ 3.60%wb ตามลำดับ โดยแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายชุดข้อมูล test set ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทำนาย (r^2) และค่ารากที่เอกสารถีนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (RMSEP) เท่ากับ 0.714 และ 3.67%wb ตามลำดับ จากผลการสร้างและพิสูจน์แบบจำลองที่ปรากฏ ผู้วิจัยจึงตัดสินใจเลือกแบบจำลองที่ได้จากการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + SNV + Second Derivative เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายค่าความชื้นของตัวอย่าง ชีวมวลประเภทกะลาปาล์ม



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความชื้นจริง เทียบกับความชื้นที่ทำนาย ระหว่างชุดข้อมูล Training set และ Prediction set ของตัวอย่างกะลาปาล์ม โดยใช้แบบจำลอง PLS-R (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

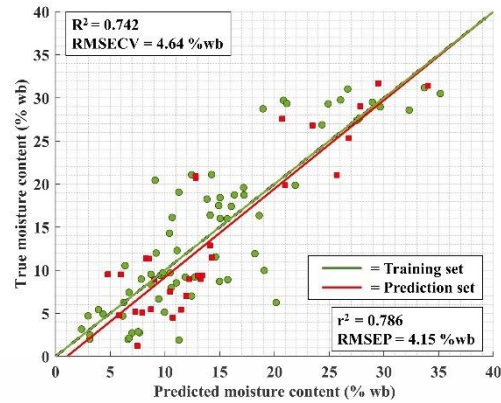
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการสร้างและพิสูจน์แบบจำลองการทำนายความชื้นตัวอย่างกะลาปาล์มด้วยวิธี PLSR

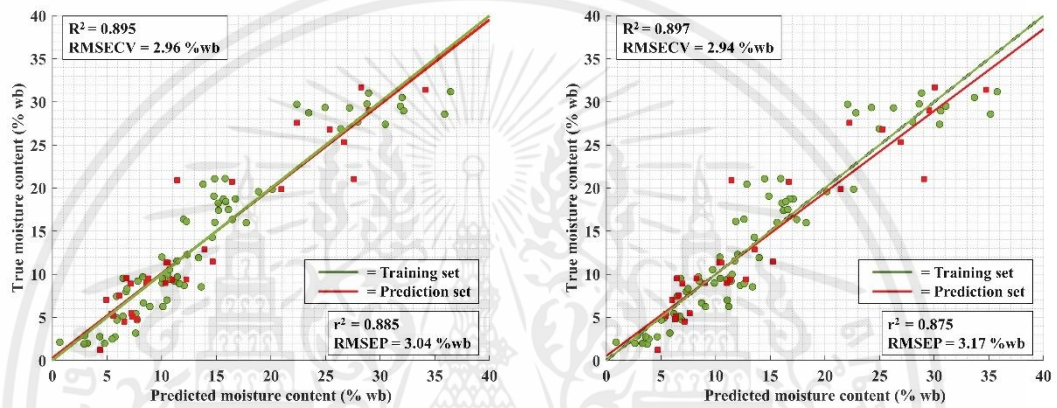
Pretreatment	LV	R ²	RMSECV	r ²	RMSEP
smoothing + SNV	3	0.761	3.87	0.662	3.99
smoothing + Second Derivative	3	0.688	4.42	0.682	3.86
smoothing + SNV + Second Derivative	4	0.793	3.60	0.714	3.67

LV คือ ตัวแปรแฝง และ SNV คือ การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

การสร้างแบบจำลอง PLSR จากชุดข้อมูลทะเลลายปาล์มเปล่า พบว่าการปรับแต่งค่าสัญญาณเบื้องต้นทั้ง 3 วิธี มีความสามารถในการทำนายความชื้นที่ไม่แตกต่างกันมากดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากผลการสร้างและพิสูจน์แบบจำลองที่ปรากฏ ผู้วิจัยจึงตัดสินใจเลือกแบบจำลองที่ได้จากการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + Secon Derivative เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายค่าความชื้นของตัวอย่างชีวมวลประเภททะเลลายปาล์มเปล่าโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการสร้างแบบจำลอง (R²) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการสร้างแบบจำลอง (RMSECV) เท่ากับ 0.895 และ 2.96%wb ตามลำดับ โดยแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายชุดข้อมูล test set ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทำนาย (r²) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (RMSEP) เท่ากับ 0.885 และ 3.04%wb ตามลำดับ และในทางปฏิบัติวิธีนี้สามารถลดเวลาในการทำงานของหน่วยประมวลผลได้ ซึ่งจะทำให้ระบบสามารถทำนายค่าความชื้นได้เร็วยิ่งขึ้น



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความขึ้นจริง เทียบกับความขึ้นที่ทำนาย ระหว่างชุดข้อมูล Training set และ Prediction set ของตัวอย่างทะเลสาบปาล์ม โดยใช้แบบจำลอง PLS-R (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

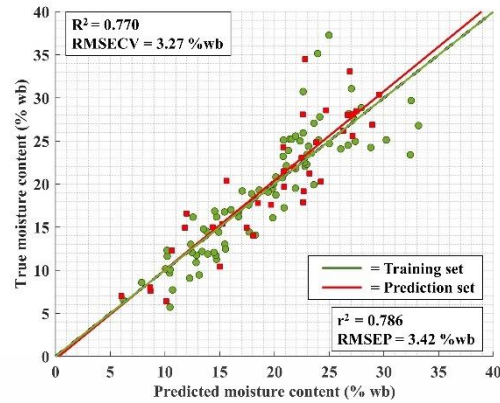
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการสร้างและพิสูจน์แบบจำลองการทำนายความชื้นตัวอย่างทะเลสาบปาล์มเปล่าด้วยวิธี PLSR

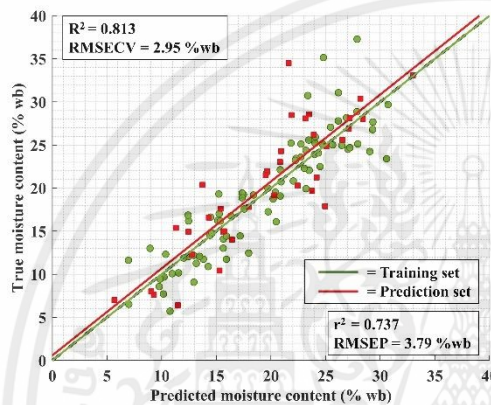
Pretreatment	LV	R ²	RMSECV	r ²	RMSEP
smoothing + SNV	3	0.742	4.64	0.786	4.15
smoothing + Second Derivative	2	0.895	2.96	0.885	3.04
smoothing + SNV + Second Derivative	2	0.897	2.94	0.875	3.17

LV คือ ตัวแปรแฝง และ SNV คือ การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

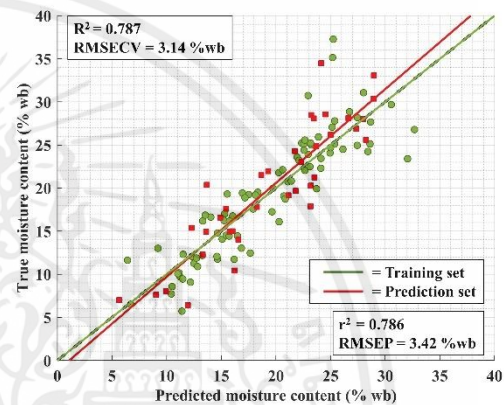
การสร้างแบบจำลอง PLSR จากชุดข้อมูลชีวมวลแบบผสม พบว่าการปรับแต่งค่าสัญญาณเบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + SNV และ smoothing + SNV + Second Derivative มีความสามารถในการทำนายค่าความชื้นได้ดีที่สุด โดยแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายชุดข้อมูล test set ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทำนาย (r^2) ที่เท่ากัน ดังตารางที่ 4.4 แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ผู้ทำการวิจัยได้ทำการเลือกการปรับแต่งสัญญาณแบบ smoothing + SNV เป็นวิธีที่เหมาะสมมากกว่าสำหรับการทำนายค่าความชื้นของตัวอย่างชีวมวลประเภทผสมเนื่องจากในทางปฏิบัติแล้ววิธีนี้จะสามารถลดเวลาในการทำงานของหน่วยประมวลผลได้ ซึ่งจะทำให้ระบบสามารถทำนายค่าความชื้นได้เร็วยิ่งขึ้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการสร้างแบบจำลอง (R^2) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการสร้างแบบจำลอง (RMSECV) เท่ากับ 0.770 และ 3.27%wb ตามลำดับ โดยแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายชุดข้อมูล test set ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทำนาย (r^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (RMSEP) เท่ากับ 0.786 และ 3.42 %wb ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความขึ้นจริง เทียบกับความขึ้นที่ทำนาย ระหว่างชุดข้อมูล Training set และ Prediction set ของตัวอย่างชีวมวลแบบผสม โดยใช้แบบจำลอง PLSR (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

ตารางที่ 4.4 ผลการสร้างและพิสูจน์แบบจำลองการทำนายความชื้นตัวอย่างชีวมวลแบบผสมด้วยวิธี

PLSR

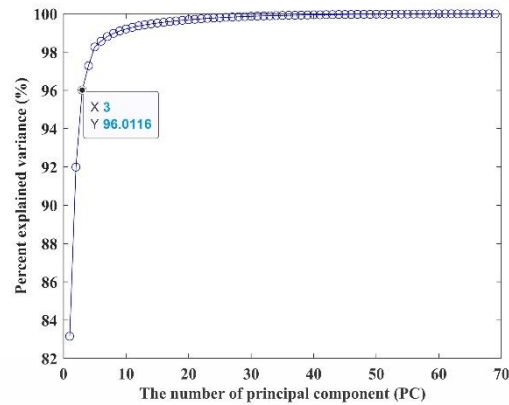
Pretreatment	LV	R ²	RMSECV	r ²	RMSEP
smoothing + SNV	2	0.770	3.27	0.786	3.42
smoothing + Second Derivative	3	0.813	2.95	0.737	3.79
smoothing + SNV + Second Derivative	3	0.787	3.14	0.786	3.42

LV คือ ตัวแปรแฝง และ SNV คือ การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

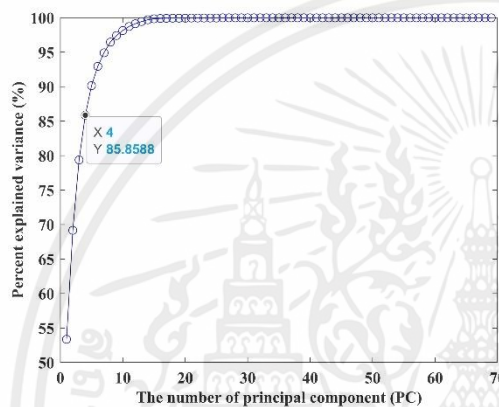
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี ANN

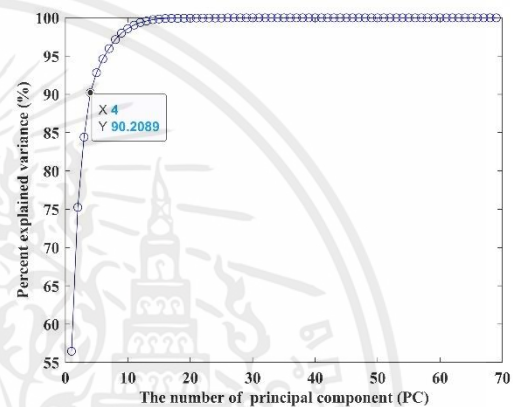
จากการปรับปรุงความแปรปรวนค่าสัญญาณ NIR แบบ smoothing + SNV, smoothing + Second Derivative และ smoothing + SNV + Second Derivative ของตัวอย่างกะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า และชีวมวลแบบผสม ดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 นำมาแบ่งชุดข้อมูลเป็น training set 70% และ test set 30% โดยการสร้างแบบจำลอง ANN จากตัวแปรที่ทำการปรับปรุงความแปรปรวนค่าสัญญาณ เนื่องจากตัวแปรต้นจากข้อมูลสเปกตรัมในช่วง (800-1000 nm) มีจำนวน 523 ตัวแปรซึ่งมีจำนวนค่อนข้างมาก ส่งผลให้การประมวลผลของแบบจำลองใช้เวลานาน และส่งผลให้หน่วยประมวลผลหรือคอมพิวเตอร์ทำงานหนัก ด้วยเหตุนี้โครงงานปริญญาโทจึงได้ทำการลดมิติของตัวแปรต้นด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคการลดจำนวนตัวแปรผ่านการสกัดตัวแปรแฝงจากชุดข้อมูลเดิม รูปที่ 4.11 ถึง 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนองค์ประกอบหลัก (PCs) หรือตัวแปรแฝงและเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนของข้อมูลสเปกตรัมชีวมวลทั้ง 3 ชนิด จากการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + SNV smoothing + Second Derivative และ smoothing + SNV + Second Derivative พบว่าชุดข้อมูลกะลาปาล์ม จำนวนองค์ประกอบหลักจำนวน 3 4 และ 4 PCs สามารถอธิบายความแปรปรวนรวมของข้อมูลทั้งหมดได้ 96.0116 85.8588 และ 90.2089 เปอร์เซ็นต์ ชุดข้อมูลทะลายปาล์มเปล่า จำนวนองค์ประกอบหลักจำนวน 3 5 และ 4 PCs สามารถอธิบายความแปรปรวนรวมของข้อมูลทั้งหมดได้ 97.0264 92.1014 และ 89.0687 เปอร์เซ็นต์ และชุดข้อมูลชีวมวลแบบผสม จำนวนองค์ประกอบหลักจำนวน 3 5 และ 5 PCs สามารถอธิบายความแปรปรวนรวมของข้อมูลทั้งหมดได้ 98.0367 91.6140 และ 91.0006 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยสามารถใช้จำนวน PC เหล่านี้เป็นตัวแปรต้นหรือตัวแปรทำนายตัวใหม่สำหรับการสร้างแบบจำลอง ANN ได้



(ก)



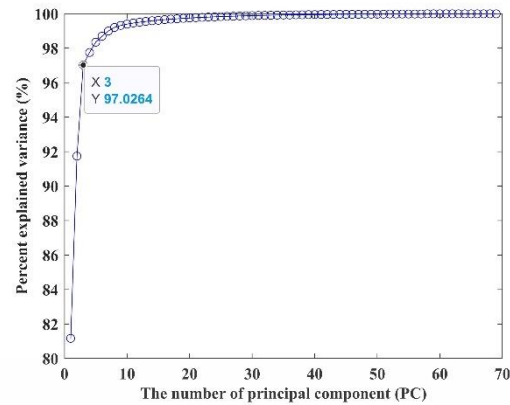
(ข)



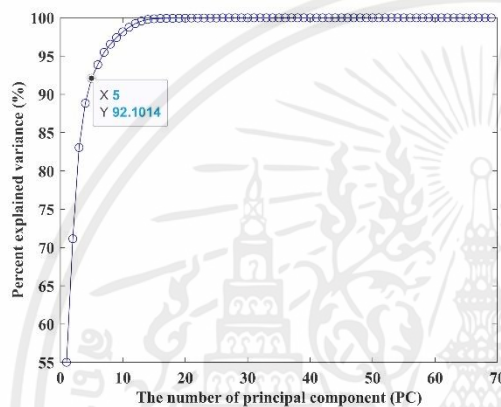
(ค)

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนองค์ประกอบหลัก (PCs) และเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนของข้อมูลสเปกตรัมกะลาปาล์ม จากการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นด้วย (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

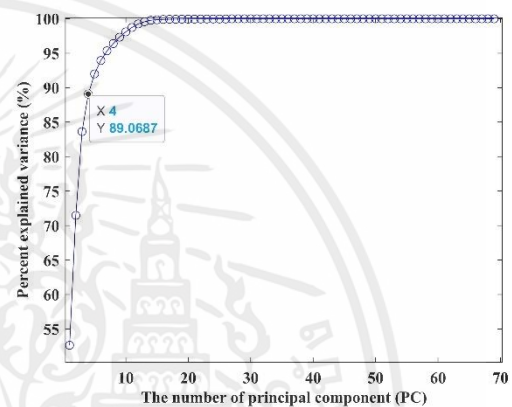
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



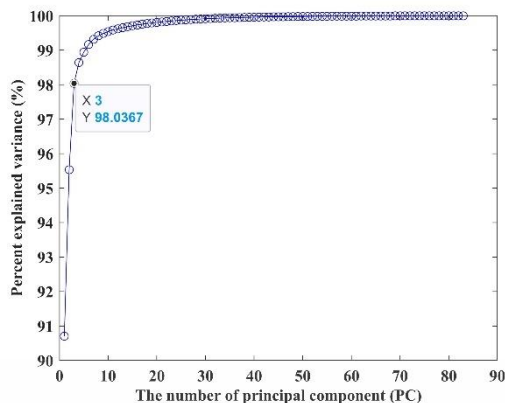
(ข)



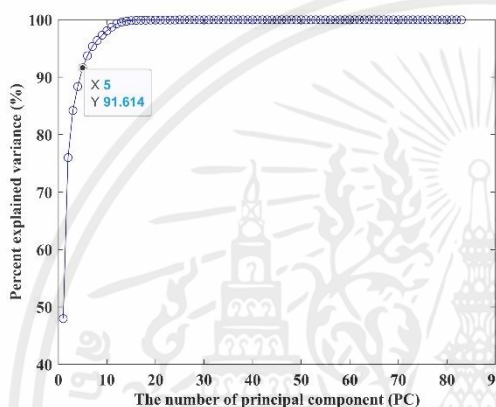
(ค)

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนองค์ประกอบหลัก (PCs) และเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนของข้อมูลสเปกตรัมทะเลสาบปาล์มเปล่า จากการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นด้วย (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

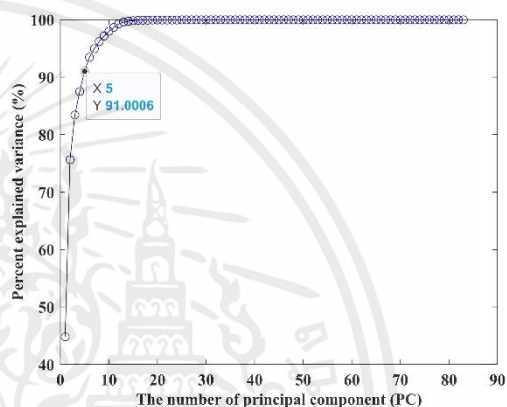
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



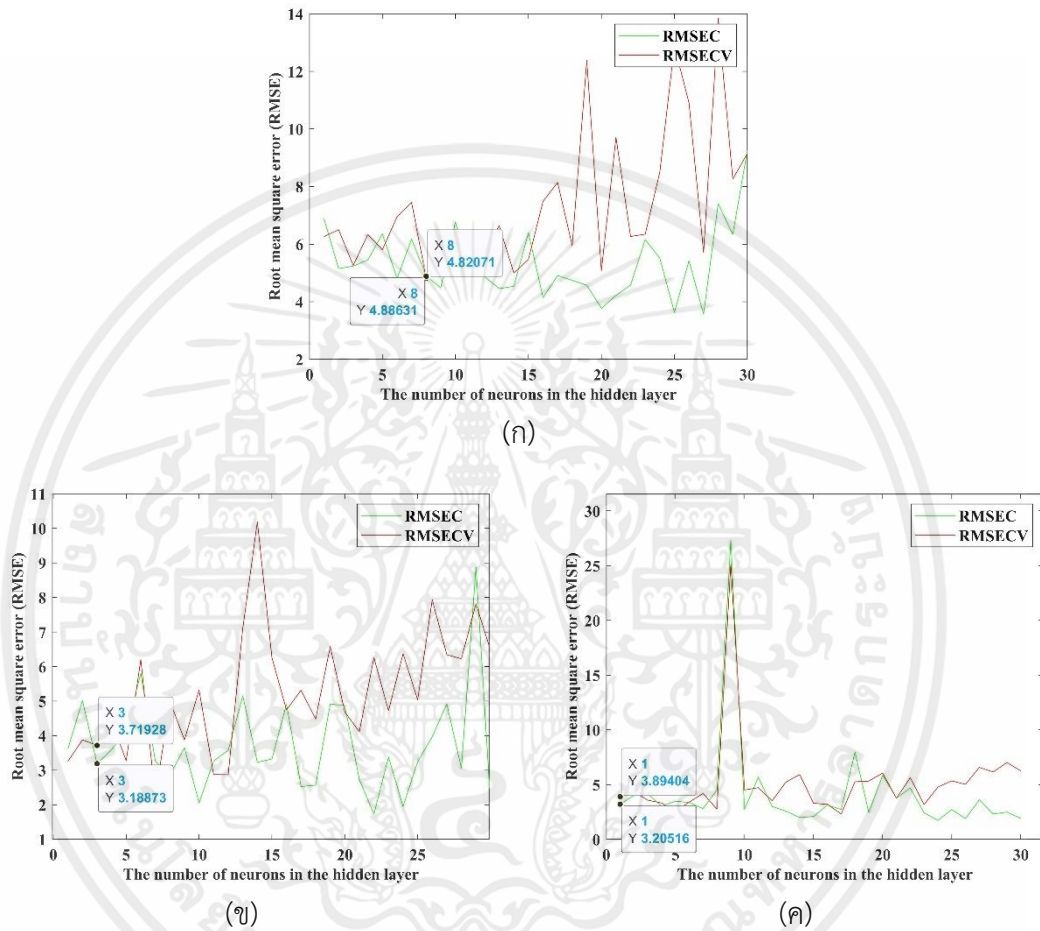
(ค)

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนองค์ประกอบหลัก (PCs) และเปอร์เซ็นต์ความแปรปรวนของข้อมูลสเปกตรัมชีวมวลแบบผสม จากการปรับแต่งสัญญาณเบื้องต้นด้วย (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองด้วยวิธี ANN นั้น มีความจำเป็นต้องค้นหาจำนวนของหน่วยประมวลผล (neuron) ที่เหมาะสม ซึ่งอยู่ในชั้นประมวลผลที่ซ่อนอยู่ (hidden layer) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 กล่าวคือ หากแบบจำลอง ANN ที่ถูกสร้างขึ้นมีจำนวน neuron มากเกินไป นอกจากจะทำให้คอมพิวเตอร์ทำงานหนักขึ้น และใช้เวลาในการประมวลผลนานแล้ว ยังอาจจะทำให้แบบจำลองที่มีปัญหา overfitting อีกด้วย ในขั้นตอนนี้ต้องใช้ชุดข้อมูล training set มาดำเนินการสร้างและพิสูจน์แบบจำลองภายในเพื่อพิจารณาค่า RMSEC และ RMSECV ที่ได้จากการใช้จำนวน neuron ที่แตกต่างกัน ดังแสดงผลในรูปที่ 4.14 ถึง 4.16 จากการพิจารณาแนวโน้มของกราฟพบว่า จำนวน neuron ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลอง ANN เพื่อวิเคราะห์ค่าความชื้นของชีวมวลชนิดกะลาปาล์ม คือ 8 3 และ 1 ชนิดทะเลสาปาล์มเปล้า คือ 2 2 และ 3 ชุดท้ายชนิดชีวมวล

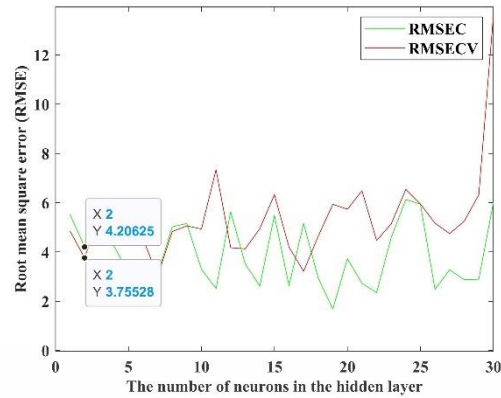
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบผสม คือ 1 2 และ 2 สำหรับสัญญาณที่ผ่านการจัดการเบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + SNV smoothing + Second Derivative และ smoothing + SNV + Second Derivative ตามลำดับ จากนั้นได้ทำการสร้างแบบจำลอง ANN โดยใช้จำนวน neuron ที่เลือกเพื่อทำนายค่าความชื้นจากชุดข้อมูล test set ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ถึง 4.19

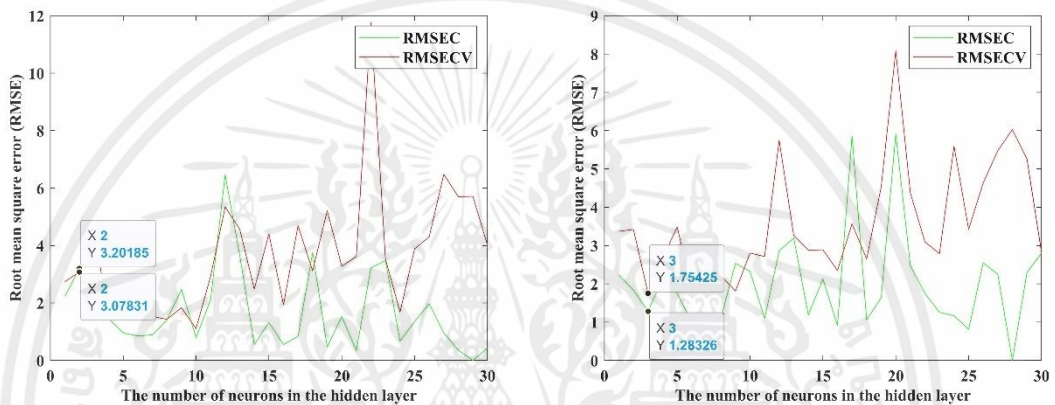


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนหน่วยประมวลผลกับค่าความผิดพลาด ของชุดข้อมูล Calibration และ Validation ของข้อมูลสเปกตรัมกะลาปาล์ม ในการนำไปใช้สร้างแบบจำลอง ANN (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

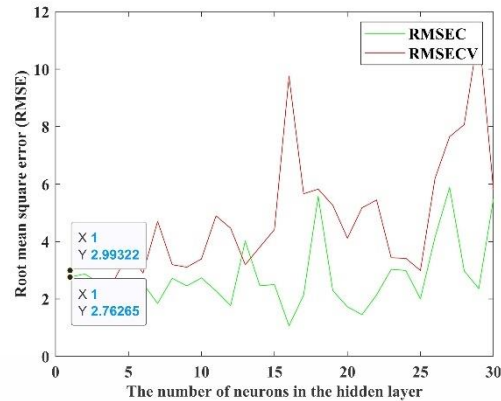


(ข)

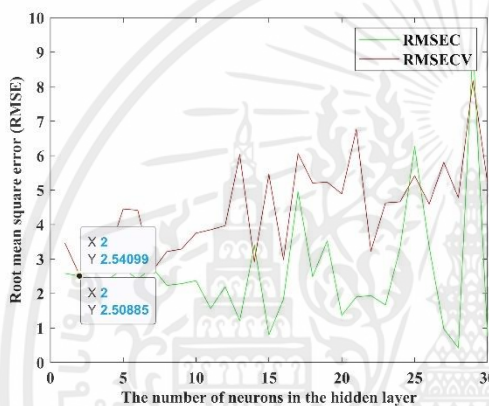
(ค)

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนหน่วยประมวลผลกับค่าความผิดพลาด ของชุดข้อมูล Calibration และ Validation ของข้อมูลสเปกตรัมทะเลลายป่าส้มเปลา่ ในการนำไปใช้สร้างแบบจำลอง ANN (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

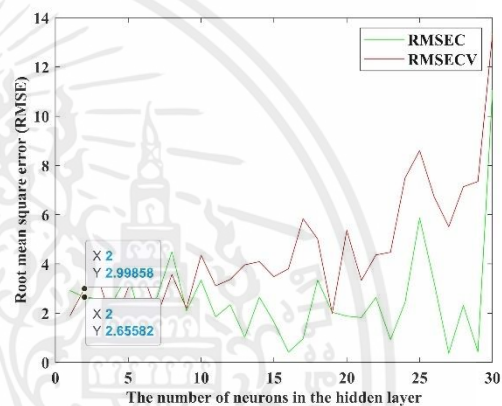
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

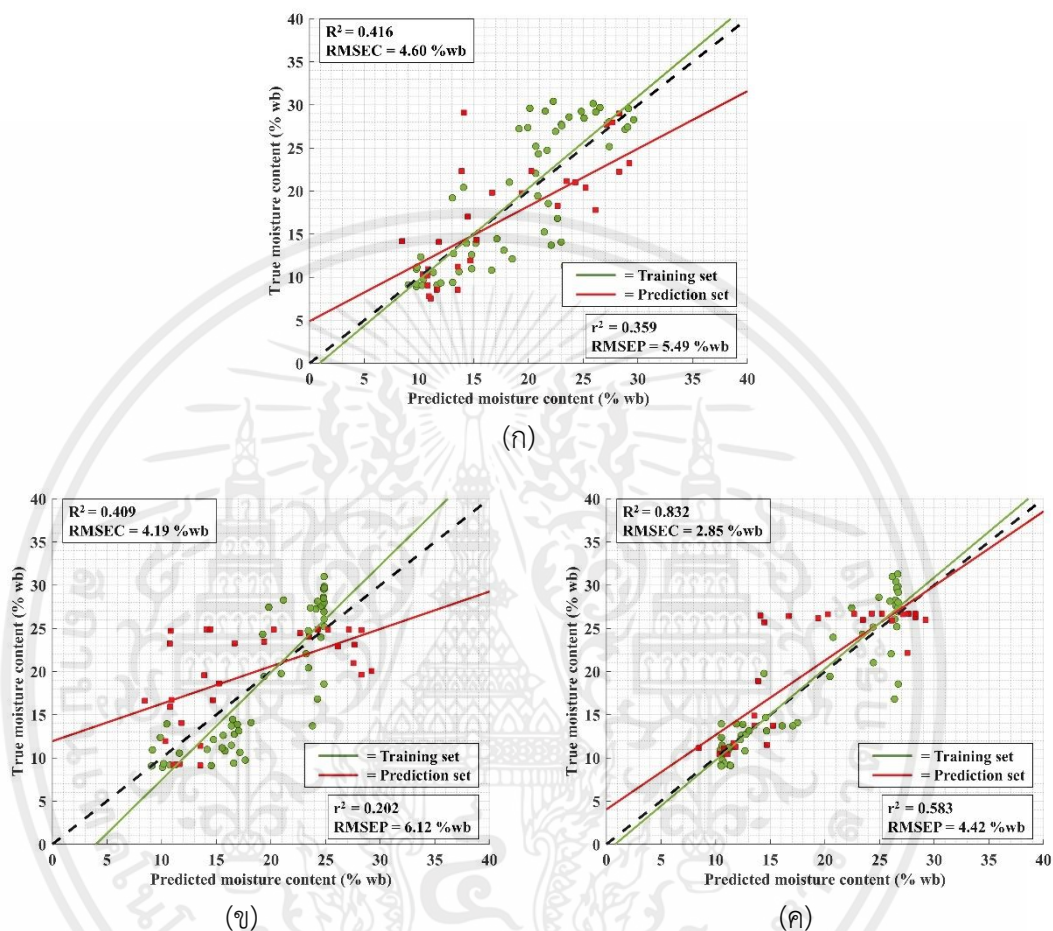


(ค)

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนหน่วยประมวลผลกับค่าความผิดพลาด ของชุดข้อมูล Calibration และ Validation ของข้อมูลสเปกตรัมชีวมวลแบบผสม ในการนำไปใช้สร้างแบบจำลอง ANN (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

จากการสร้างแบบจำลอง ANN จากชุดข้อมูลทะเลสาบปาล์ม พบว่าการปรับแต่งค่าสัญญาณเบื้องต้นทั้ง 3 วิธี มีความสามารถในการทำนายค่าความชื้นได้ค่อนข้างแตกต่างกันมาก โดยสังเกตได้ว่าการปรับแต่งค่าสัญญาณเบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + SNV + Second Derivative มีความสามารถในการทำนายค่าความชื้นได้ดีที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการสร้างแบบจำลอง (R^2) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการสร้างแบบจำลอง (RMSECV) เท่ากับ 0.832 และ 2.85%wb ตามลำดับ โดยแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายชุดข้อมูล test set ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทำนาย (r^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (RMSEP) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 0.583 และ 4.42%wb ตามลำดับ ผู้วิจัยจึงตัดสินใจเลือกแบบจำลองที่ได้จากการปรับแต่ง สัญญาณเบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + SNV + Second derivative เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายค่าความชื้นของตัวอย่างชีวมวลประเภทกะลาปาล์ม



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความชื้นจริงกับความชื้นที่ทำนายได้ของชุดข้อมูล ตัวอย่างกะลาปาล์ม Training set และ Prediction set โดยใช้แบบจำลอง ANN (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

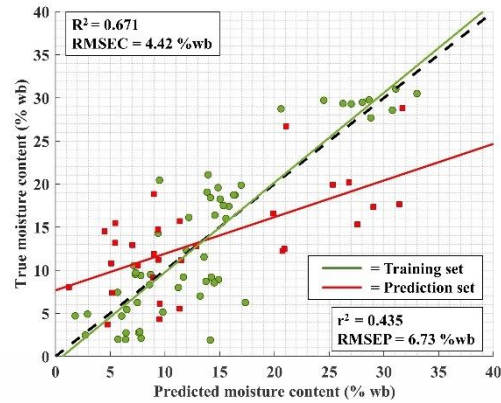
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำนายความชื้น ตัวอย่างกะลาปาล์ม ด้วย
แบบจำลอง ANN

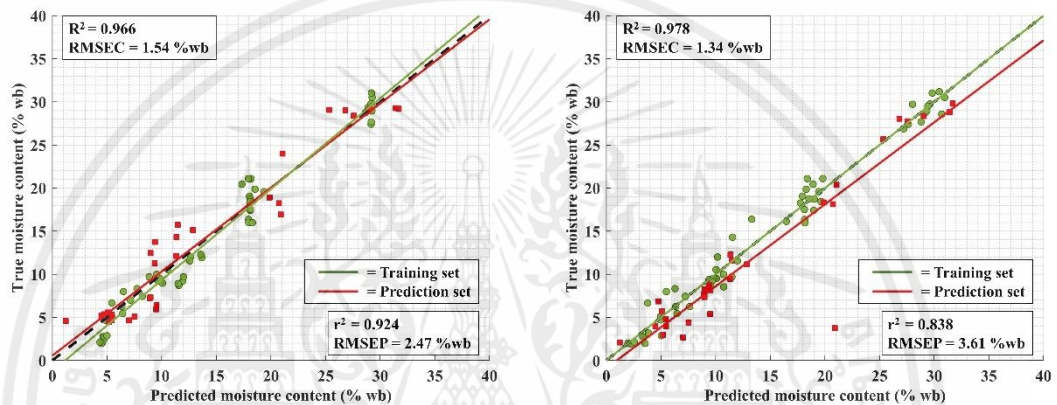
Pretreatment	PC	neuron	R ²	RMSEC	r ²	RMSEP
smoothing + SNV	3	8	0.416	4.60	0.359	5.49
smoothing + Second Derivative	4	3	0.409	4.19	0.202	6.12
smoothing + SNV + Second Derivative	4	1	0.832	2.85	0.583	4.42

PC คือ principal component, neuron คือ จำนวนหน่วยประมวลผล และ SNV คือ การปรับ
ความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

การสร้างแบบจำลอง ANN จากชุดข้อมูลทะเลลายปาล์มเปล่า พบว่าการปรับแต่งค่าสัญญาณ
เบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + Second Derivative มีความสามารถในการทำนายค่าความชื้นได้ดี
ที่สุดเนื่องจากแบบจำลองที่ ปรับแต่งค่าสัญญาณเบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + SNV และ
smoothing + SNV + Second Derivative มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทำนาย (r²) ที่
ต่ำกว่าอย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.18 ผู้วิจัยจึงตัดสินใจเลือกแบบจำลองที่ได้จากการปรับแต่งสัญญาณ
เบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + Second derivative เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายค่า
ความชื้นของตัวอย่างชีวมวลประเภททะเลลายปาล์มเปล่าโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการ
สร้างแบบจำลอง (R²) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการสร้างแบบจำลอง
(RMSECV) เท่ากับ 0.966 และ 1.54%wb ตามลำดับ โดยแบบจำลองมีความสามารถในการทำนาย
ชุดข้อมูล test set ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทำนาย (r²) และค่ารากที่
สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (RMSEP) เท่ากับ 0.924 และ 2.47%wb
ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.6



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความชื้นจริงกับความชื้นที่ทำนายได้ของชุดข้อมูลตัวอย่างทะเลาะปาล์มเปล่า Training set และ Prediction set โดยใช้แบบจำลอง ANN (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

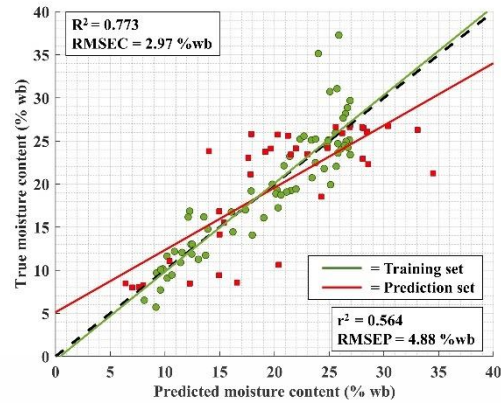
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำนายความชื้น ตัวอย่างทะเลสาบปาล์มเปล่า ด้วยแบบจำลอง ANN

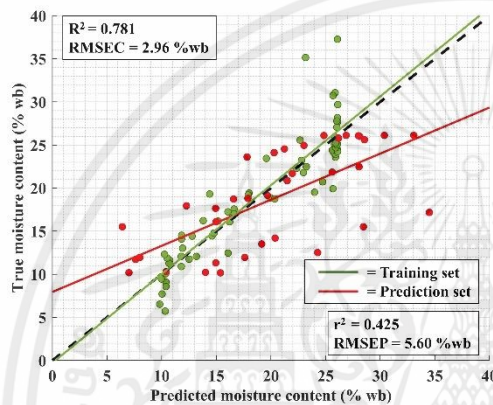
Pretreatment	PC	neuron	R ²	RMSEC	r ²	RMSEP
smoothing + SNV	3	2	0.671	4.42	0.435	6.73
smoothing + Second Derivative	5	2	0.966	1.54	0.924	2.47
smoothing + SNV + Second Derivative	4	3	0.978	1.34	0.838	3.61

PC คือ principal component, neuron คือ จำนวนหน่วยประมวลผล และ SNV คือ การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

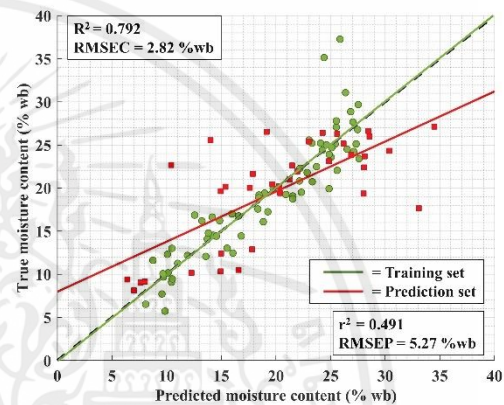
การสร้างแบบจำลอง ANN จากชุดข้อมูลชีวมวลแบบผสม พบว่าเนื่องจากแบบจำลองที่ปรับแต่งค่าสัญญาณเบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + Second Derivative และ smoothing + SNV + Second Derivative มีความสามารถในการทำนายชุดข้อมูล test set ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทำนาย (r^2) ต่ำกว่าการปรับแต่งค่าสัญญาณเบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + SNV ดังนั้นการปรับแต่งค่าสัญญาณเบื้องต้นด้วยวิธี smoothing + SNV จึงมีความสามารถในการทำนายค่าความชื้นได้ดีที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการสร้างแบบจำลอง (R^2) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการสร้างแบบจำลอง (RMSECV) เท่ากับ 0.773 และ 2.93%wb ตามลำดับ โดยแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายชุดข้อมูล test set ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทำนาย (r^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (RMSEP) เท่ากับ 0.564 และ 4.88 %wb ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4.7



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความชื้นจริงกับความชื้นที่ทำนายได้ของชุดข้อมูล ตัวอย่างชีวมวลแบบผสม Training set และ Prediction set โดยใช้แบบจำลอง ANN (ก) smoothing + SNV (ข) smoothing + Second Derivative และ (ค) smoothing + SNV + Second Derivative

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำนายความชื้น ตัวอย่างชีวมวลแบบผสม ด้วยแบบจำลอง ANN

Pretreatment	PC	neuron	R ²	RMSEC	r ²	RMSEP
smoothing + SNV	3	1	0.773	2.97	0.564	4.88
smoothing + Second Derivative	5	2	0.781	2.96	0.425	5.60
smoothing + SNV + Second Derivative	5	2	0.792	2.82	0.491	5.27

PC คือ principal component, neuron คือ จำนวนหน่วยประมวลผล และ SNV คือ การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

ตารางที่ 4.8 แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการทำนายความชื้นที่ดีที่สุดของแต่ละชุดข้อมูลตัวอย่าง

sample	model	Pretreatment	R ²	RMSECV / RMSEC	r ²	RMSEP
Palm shell	PLSR	Smoothing + SNV + Second Derivative	0.793	3.60	0.714	3.67
Palm empty fruit bunch	ANN	Smoothing + Second Derivative	0.966	1.54	0.924	2.47
Mixture	PLSR	Smoothing + SNV	0.770	3.27	0.786	3.42

Pretreatment คือ การปรับแต่งค่าสัญญาณเบื้องต้น

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการตรวจวัดความชื้นชีวมวลตัวอย่างกะลาปาล์ม ทะลายปาล์มเปล่า และชีวมวลที่ผสมกัน ระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า ด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีที่มีความยาวคลื่นช่วง 800 -1000 nm ร่วมกับแบบจำลองการถดถอยน้อยที่สุดกำลังสองบางส่วน (PLSR) และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ที่ผ่านการปรับแต่งสัญญาณสเปกตรัมด้วยวิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (SNV) วิธีอนุพันธ์อันดับสอง (Second Derivative) และใช้การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐานร่วมกับวิธีอนุพันธ์อันดับสอง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการตรวจวัดความชื้นชีวมวลตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด โดยการสร้างแบบจำลอง PLSR และ ANN พบว่าแบบจำลอง PLSR ที่ปรับแต่งค่าสัญญาณแบบ Smoothing + SNV + Second Derivative เหมาะสำหรับการตรวจสอบความชื้นในชุดตัวอย่างกะลาปาล์ม การปรับแต่งค่าสัญญาณแบบ Smoothing + SNV เหมาะสำหรับการตรวจสอบความชื้นในชุดตัวอย่างชีวมวลแบบผสม และแบบจำลอง ANN ที่ปรับแต่งค่าสัญญาณแบบ Smoothing + Second Derivative เหมาะสำหรับการตรวจสอบความชื้นในชุดตัวอย่างทะลายปาล์มเปล่า ดังตารางที่ 4.8

2. แบบจำลอง PLSR มีประสิทธิภาพในการใช้เพื่อทำนายค่าความชื้นมากกว่าแบบจำลอง ANN แต่ชุดข้อมูลตัวอย่างทะลายปาล์มเปล่า แบบจำลอง ANN มีประสิทธิภาพในการทำนายความชื้นที่สูงกว่า

3. การทำนายความชื้นของแต่ละชุดข้อมูลนั้น มีประสิทธิภาพในการทำนายที่แตกต่างกันไป จึงทำให้ทราบได้ว่าชนิด และความบริสุทธิ์ของชีวมวลนั้นมีผลต่อการทำนายความชื้นของแบบจำลองทั้ง 2 ประเภท

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการใช้งานเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีควรพิจารณาปัจจัยต่างๆ เช่น ช่วงความยาวคลื่นสำหรับเก็บค่าการสะท้อนแสง วิธีการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการปรับแต่งข้อมูล และ Chemometrics ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อความแม่นยำในการทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้างแบบจำลองจักรกลเรียนรู้ควรมีชนิด และจำนวนตัวอย่างสำหรับการสร้างแบบจำลองที่มากขึ้นเพื่อความหลากหลาย และแม่นยำในการทำนายความขึ้น

ในอนาคตอาจจะมีการพัฒนาการตรวจสอบความขึ้นด้วยเนียร์อินฟราเรดแบบเรียลไทม์ในขณะที่ชีวมวลมีการเคลื่อนที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] มนนภา เทพสุด. (2562). **อยู่รอดอย่างไร ในยุคโลกร้อน**. เข้าถึงเมื่อ 21 เมษายน 2565. เข้าถึงได้จาก [อยู่รอดอย่างไร ในยุคโลกร้อน.pdf \(spu.ac.th\)](#)
- [2] กรุงเทพธุรกิจ. (2565). **เชื้อเพลิงฟอสซิล คืออะไร เป็นตัวการวิกฤติ ภาวะโลกร้อน จริงหรือ?**. เข้าถึงเมื่อ 21 เมษายน 2565. เข้าถึงได้จาก <https://www.bangkokbiznews.com/social/999459>
- [3] ienergyguru. (2558). **ชีวมวล (Biomass)**. เข้าถึงเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2565. เข้าถึงได้จาก <https://ienergyguru.com>
- [4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2564). **คู่มือการพัฒนา และการลงทุน และผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 4, พิมพ์ครั้งที่ 1**. กรุงเทพมหานคร: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- [5] กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2557). **ชีวมวล**. เข้าถึงเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2565. เข้าถึงได้จาก http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html
- [6] ปาริชาติ เทียนจุมพล และคณะ. (2549). “การหาปริมาณความชื้นอย่างแม่นยำสูงในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี” **วารสารการเกษตร** 22, 22: 213.
- [7] Jaya Sundaram et al. (2012). “Sensing of Moisture Content of In-Shell Peanuts by NIR Reflectance Spectroscopy.” **Journal of Sensor Technology** 2, 1: 1-2.
- [8] Imran Arra'd Sofianto et al. (2017). “Stiffness and moisture content prediction model of wooden veneer using fast online near-infrared (NIR) spectroscopic system.” **Forestry Research and Engineering: International Journal** 1, 2: 40.
- [9] Orathai Chavalparit et al. (2006). “Options for environmental sustainability of the crude palm oil industry in thailand through enhancement of industrial ecosystems.” **Environment, Development and Sustainability**. 8, 1: 272.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล. (2559). **ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย** เข้าถึงเมื่อ 30 มีนาคม 2565 เข้าถึงได้จาก ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย – Center of Fuels and Energy from Biomass (chula.ac.th)
- [11] กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์. (2562). “เทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้ในการพัฒนาระบบติดตามความหวานของอ้อยแบบออนไลน์สายพานลำเลียง” วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [12] Alessio Tugnolo et al. (2021). “A reliable tool based on near-infrared spectroscopy for the monitoring of moisture content in roasted and ground coffee: A comparative study with thermogravimetric analysis.” *Food Control* doi: 10.1016/j.foodcont.2021.108312
- [13] Evelize Aparecida Amaral et al. (2020). “Estimation of moisture in wood chips by Near Infrared Spectroscopy.” *MADERAS: CIENCIA Y TECNOLOGÍA* 22, 3: 291-302.
- [14] สุจิตา เรืองชยาปณ. (2563). “การพัฒนาและทดสอบสมการทำนายความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แบบพกพา.” วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [15] อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. (2558). **การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์** กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [16] Matthias Otto (2017). **Chemometrics: Statistics and Computer Application in Analytical Chemistry.** (Third Edition ed.). Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- [17] Phil Williams, John Antoniszyn and Marena Manley. (2019). **Near infrared technology: getting the best out of light.** Cape Town: SUN PRess.
- [18] food network solution. (2556). **เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตเกษตรและอาหาร (ตอนที่ 3).** เข้าถึงเมื่อ 20 มิถุนายน 2565. เข้าถึงได้จาก เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตเกษตรและอาหาร (ตอนที่ 3) - News and Articles | Food Network Solution

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] Dana Bolles. (2022). **Visible Light?**. เข้าถึงเมื่อ 5 กรกฎาคม 2565. เข้าถึงได้จาก https://science.nasa.gov/ems/09_visiblelight
- [20] ธราธิป นวมยากุล. (2561). “การวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี” วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [21] Alexandra Twin. (2021). **Overfitting**. เข้าถึงเมื่อ 5 กรกฎาคม 2565. เข้าถึงได้จาก <https://www.investopedia.com/terms/o/overfitting.asp#:~:text=Overfitting%20is%20a%20modeling%20error,to%20any%20other%20data%20sets.>
- [22] ภัทราพรรณ สุคนธ์รัตน์ และอดิสร ยะวงศา. (2563). “การวิเคราะห์ความเข้มข้นของเบต้าไฮดรอกซีบิวทิเรตในซีรัมของโคนมด้วยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.” **วารสารสัตวแพทย์** 30, 2: 61-78.
- [23] Antonios Morellos et al. (2016). “Machine learning based prediction of soil total nitrogen, organic carbon and moisture content by using VIS-NIR spectroscopy.” **Biosystems Engineering** 152 , Special: 104-116.
- [24] Roman M.Balabin et al. (2011). “Near-infrared (NIR) spectroscopy for motor oil classification: From discriminant analysis to support vector machines.” **Microchemical Journal** 98, 1: 121-128.
- [25] Toktam Mohammadi-Moghaddam et al. (2015). “Vis-NIR hyperspectral imaging and multivariate analysis for prediction of the moisture content and hardness of Pistachio kernels roasted in different conditions.” **Journal of Agricultural Machinery** 5, 2: 281-291.
- [26] Chao Ni, Yun Zhang, and Dongyi Wang. (2016). “Moisture Content Quantization of Masson Pine Seedling Leaf Based on Stacked Autoencoder with Near-Infrared Spectroscopy.” **Journal of Electrical and Computer Engineering**. doi: 10.1155/2018/8696202



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปการเตรียมตัวอย่างชีวมวล

(ก) ชีวมวลกะลาปาล์ม (Palm shell) ได้จากบริษัทเจริญน้ำมันปาล์ม จำกัด และ (ข) ทะลายปาล์ม (Palm empty fruit bunch) ส่วนมากเก็บจากบริเวณโดยรอบ ของอำเภอพะโต๊ะ จังหวัดชุมพร



(ก)



(ข)

รูปที่ ก.1 ชีวมวลที่นำมาใช้ในการทดลอง (ก) กะลาปาล์ม (Palm shell) ได้จากบริษัทเจริญน้ำมันปาล์ม จำกัด และ (ข) ทะลายปาล์ม (Palm empty fruit bunch) ส่วนมากเก็บจากบริเวณโดยรอบ ของอำเภอพะโต๊ะ จังหวัดชุมพร



(ก)



(ข)

รูปที่ ก.2 การทำทะลายปาล์มเปล่าให้มีขนาดเล็กลง (ก) การนำทะลายปาล์มเปล่าเข้าเครื่องสับชีวมวล (ข) เครื่องสับชีวมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

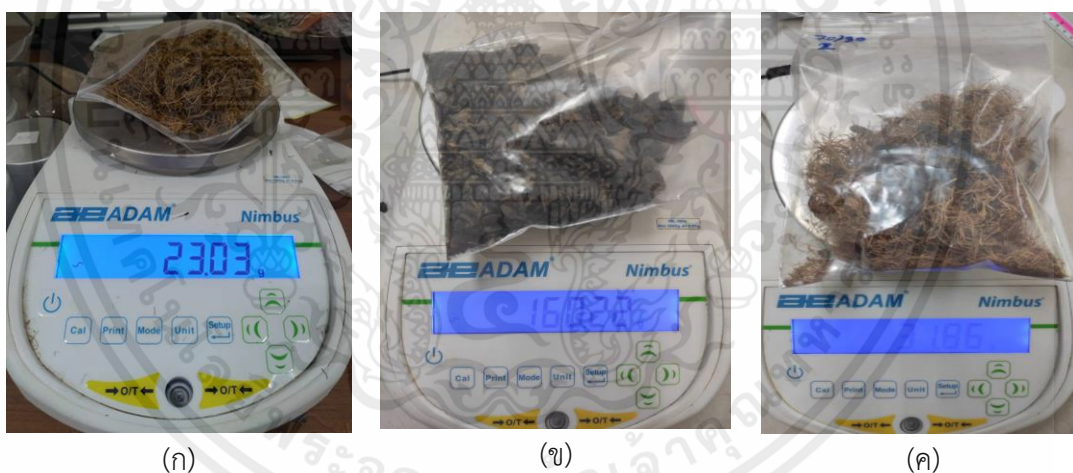
รูปที่ ก.3 ปรับขนาดทะเลยปาล์มเปล่าให้ใกล้เคียงกัน (ก) ทะเลยปาล์มเปล่าก่อนปรับ (ข) การปรับทะเลยปาล์มเปล่า และ (ค) ทะเลยปาล์มเปล่าหลังปรับขนาด

รูปการปรับความชื้นของชีวมวล

ในการทดลองทำนายความชื้นด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีเตอร์ได้มีการใช้ตัวอย่างสำหรับการทดลอง 3 แบบ คือ กะลาปาล์ม ทะเลยปาล์ม และกะลาปาล์มผสมทะเลยปาล์ม โดยแบ่งระดับความชื้นที่ใช้ในการทำนายออกเป็น 10 ระดับดังแสดงในตารางที่ ก.1 ในการปรับระดับความชื้นของตัวอย่างจะใช้หลอดหยดวิทยาศาสตร์ (Buret) หยดน้ำลงตัวอย่างให้ได้ระดับต่างๆ โดยคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมในแต่ละระดับ

ตารางที่ ก.1 อัตราส่วนความชื้นของตัวอย่างชีวมวล (หน่วย: %)

ระดับที่	กะลาปาล์ม	ทะเลยปาล์ม	กะลาปาล์มผสมทะเลยปาล์ม
1	11	6.6	7
2	14	9.6	10
3	17	12.6	13
4	20	15.6	16
5	23	18.6	19
6	26	21.6	22
7	29	24.6	25
8	32	27.6	28
9	35	30.6	31
10	38	33.6	34



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ ก.4 ชั่งน้ำหนักของชีวมวลเพื่อปรับความชื้น (ก) ชีวมวลทะเลยปาล์มเปล่า (ข) ชีวมวลกะลาปาล์ม และ (ค) ชีวมวลแบบผสมระหว่างปาล์มเปล่าและกะลาปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

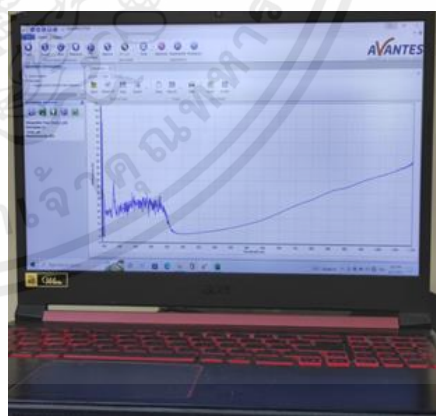
รูปที่ ก.5 การปรับความชื้น (ก) การเติมน้ำ และ (ข) นำไปแช่ตู้เย็น 12 ชั่วโมง

รูปขั้นตอนการใช้เซ็นเซอร์เนียร์อินฟราเรดหาความชื้นของตัวอย่าง

นำตัวอย่างวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Near infrared Spectrometer (AvaSpec-Mini4096CL-UV10) มีช่วงความยาวคลื่นอยู่ที่ 800 ถึง 1000 นาโนเมตร โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง (light source) เป็นหลอดไฟความเข้มแสง Halogen 12V 50W จำนวน 4 หลอด รูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (reflectance mode) โดยมีระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ถึงชีวมวลอยู่ที่ 6 เซนติเมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ ก.6 นำตัวอย่างวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Near infrared Spectrometer (AvaSpec-Mini4096CL-UV10) (ก) สแกนชีวมวลตัวอย่าง และ (ข) คลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 เซ็นเซอร์เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (AvaSpec-Mini4096CL-UV10)



รูปที่ ก.8 ภาพวาด 3 มิติ ของกล่องดำและขีวมวลขณะเก็บคลื่นสัญญาณ ด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS

ขั้นตอนการหาความชื้นเบื้องต้น

นำตัวอย่างขีวมวลทะเลลายปาล์มเปล่า และกะลาปาล์ม อย่างละ 5 ตัวอย่าง และแบบผสม 3 ตัวอย่าง นำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Presica XB 220A) ก่อนที่จะนำเข้าอบด้วยตู้อบลมร้อน (BINDER รุ่น ED/FM) โดยใช้อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาความชื้นของตัวอย่าง ในขั้นตอนนี้จะใส่ถุงมือยางเพื่อป้องกันคราบเหงื่อจากมือติดกระป๋องเก็บความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ ก.9 ซึ่มวลตัวอย่าง (ก) ซึ่มวลละลายปาล์มเปล่า (ข) ซึ่มวลกะลาปาล์ม และ (ค) ซึ่มวลแบบผสมระหว่างละลายปาล์มเปล่าและกะลาปาล์ม



(ก)



(ข)

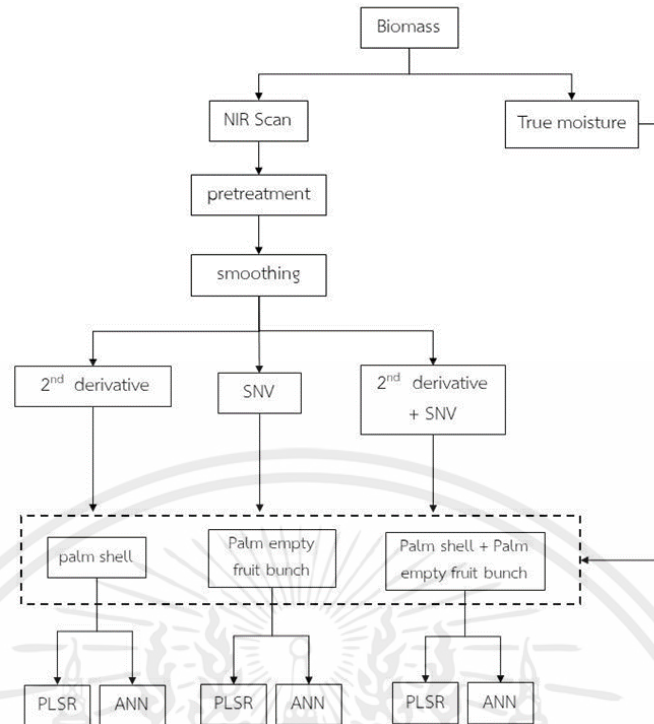
รูปที่ ก.10 การหาความชื้นด้วยวิธีมาตรฐาน (ก) ชั่งน้ำหนักของซึ่มวลก่อน และหลังอบ (ข) อบซึ่มวล

วิธีการทำนายด้วยจักรกลเรียนรู้

ข้อมูลสปกตรัมที่ได้จากกาสแกนด้วยเนียร์อินฟราเรดจะถูกนำมาสร้างจักรกลเรียนรู้ใช้

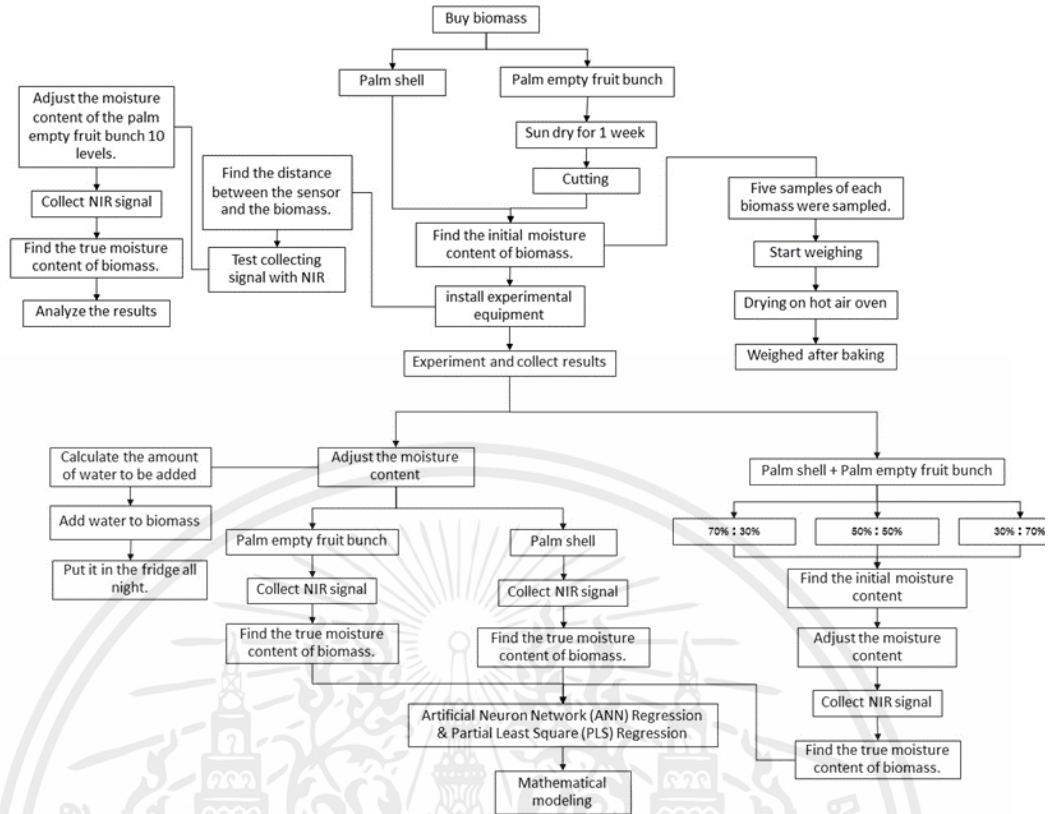
โปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.11 แผนผังขั้นตอนการสร้างแบบจำลองจักรกลเรียนรู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.12 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 น้ำหนักของชีวมวลทะเลสาบปลาสดแปรระดับความชื้นที่ 1

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.4402	1.4110	1.2020	1.1786	1.5144	1.4756	2.0275	1.9468	2.5621
2	2.4601	2.4316	1.1302	1.1125	1.1307	1.1160	1.1585	1.5661	1.3001
3	1.2335	1.2079	1.5807	1.5535	1.1289	1.1135	2.0754	1.7208	1.3642
4	1.3252	1.2990	1.3470	1.3204	1.4251	1.3914	1.9771	1.9748	2.3647
5	1.2964	1.2642	1.8108	1.7568	1.3546	1.3303	2.4838	2.9821	1.7939
6	1.6457	1.6048	1.3670	1.3346	1.3512	1.3180	2.4853	2.3702	2.4571
7	1.4362	1.4078	1.4049	1.3730	1.7532	1.7074	1.9774	2.2706	2.6124
8	2.0095	1.9529	2.1508	2.0866	1.7888	1.7406	2.8166	2.9849	2.6945
9	1.3962	1.3522	1.4773	1.4406	1.4605	1.4141	3.1514	2.4843	3.1770
10	1.3558	1.3181	1.1958	1.1681	1.2967	1.2585	2.7806	2.3164	2.9459
เฉลี่ย							2.2934	2.2617	2.3272

ตารางที่ ข.2 น้ำหนักของชีวมวลทะเลสาบปลาสดแปรระดับความชื้นที่ 2

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.6074	1.5242	1.0673	1.0087	1.0671	1.0116	5.1761	5.4905	5.2010
2	0.9947	0.9474	0.9040	0.8640	0.9942	0.9489	4.7552	4.4248	4.5564
3	1.2927	1.2313	1.2079	1.1466	1.1169	1.0550	4.7497	5.0749	5.5421
4	1.1823	1.1182	0.9957	0.9467	0.9652	0.9127	5.4216	4.9212	5.4393
5	0.9438	0.9027	0.9756	0.9305	1.0279	0.9786	4.3547	4.6228	4.7962
6	0.8743	0.8285	0.8878	0.8480	0.9824	0.9331	5.2385	4.4830	5.0183
7	1.1158	1.0632	1.0845	1.0292	1.0519	0.9983	4.7141	5.0991	5.0955
8	0.9026	0.8530	0.8427	0.7973	0.9818	0.9097	5.4952	5.3874	7.3437
9	0.9892	0.9410	1.2384	1.1724	1.2888	1.2289	4.8726	5.3295	4.6477
10	0.8474	0.8074	1.1743	1.1195	1.1768	1.1264	4.7203	4.6666	4.2828
เฉลี่ย							4.9498	4.9500	5.1923

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 น้ำหนักของชีวมวลทะเลสาบปาล์มเปล้าระดับความชื้นที่ 3

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.6530	1.5429	1.6061	1.4989	2.0950	1.9537	6.6606	6.6746	6.7446
2	1.4760	1.3853	1.8935	1.7583	1.6791	1.5639	6.1450	7.1402	6.8608
3	1.5207	1.4148	1.6570	1.5396	1.8366	1.7160	6.9639	7.0851	6.5665
4	1.2875	1.2064	1.4668	1.3757	1.1376	1.0777	6.2990	6.2108	5.2655
5	1.2879	1.2141	1.4482	1.3536	1.2745	1.2083	5.7303	6.5322	5.1942
6	2.3700	2.1882	1.8296	1.6980	1.6299	1.5215	7.6709	7.1928	6.6507
7	1.9777	1.8270	1.2087	1.1331	1.8898	1.7491	7.6200	6.2547	7.4452
8	2.3906	2.2046	2.5252	2.3176	1.8139	1.6816	7.7805	8.2211	7.2937
9	1.2971	1.1907	1.5387	1.4104	1.5504	1.4211	8.2029	8.3382	8.3398
10	1.3414	1.2503	1.3197	1.2382	1.1788	1.1040	6.7914	6.1756	6.3454
เฉลี่ย							6.9864	6.9825	6.6706

ตารางที่ ข.4 น้ำหนักของชีวมวลทะเลสาบปาล์มเปล้าระดับความชื้นที่ 4

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.7604	1.5934	1.8183	1.6453	1.5052	1.3670	9.4865	9.5144	9.1815
2	1.5636	1.4149	1.5177	1.3729	1.7799	1.6070	9.5101	9.5408	9.7140
3	1.3344	1.2259	1.2589	1.1401	1.3581	1.2310	8.1310	9.4368	9.3587
4	1.3982	1.2704	1.8098	1.6325	1.6413	1.4893	9.1403	9.7967	9.2610
5	1.6305	1.4733	1.6388	1.4793	1.6798	1.5202	9.6412	9.7327	9.5011
6	1.6819	1.5332	1.4149	1.2935	1.6060	1.4601	8.8412	8.5801	9.0847
7	1.6719	1.5160	1.2660	1.1532	1.2715	1.1580	9.3247	8.9100	8.9265
8	1.3848	1.2562	1.4552	1.3237	1.4640	1.3333	9.2865	9.0366	8.9276
9	1.1551	1.0466	1.3424	1.2227	1.3719	1.2435	9.4865	9.5144	9.1815
10	1.2318	1.1293	1.4425	1.3196	1.3908	1.2720	9.5101	9.5408	9.7140
เฉลี่ย							9.2358	9.3603	9.2851

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 น้ำหนักของชีวมวลทะเลสาบปาล์มเปล้าระดับความชื้นที่ 5

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.6821	1.4813	2.1355	1.8782	1.4784	1.3078	8.1310	9.4368	9.3587
2	2.0442	1.8176	1.4185	1.2787	1.5512	1.3944	9.1403	9.7967	9.2610
3	1.4773	1.3196	1.6647	1.4686	1.6904	1.4868	9.6412	9.7327	9.5011
4	1.0121	0.9143	1.2612	1.1317	1.2007	1.0711	8.8412	8.5801	9.0847
5	1.5401	1.3651	1.7172	1.5152	1.5306	1.3568	9.3247	8.9100	8.9265
6	0.8121	0.7335	1.3558	1.1968	1.2210	1.0840	9.2865	9.0366	8.9276
7	1.3058	1.1575	1.4624	1.2917	1.4335	1.2710	9.3931	8.9169	9.3593
8	1.7536	1.5500	1.4768	1.3071	1.8843	1.6483	8.3212	8.5199	8.5418
9	1.6741	1.4684	1.5406	1.3509	1.4886	1.3079	11.9375	12.0487	11.5395
10	1.9085	1.6652	1.6140	1.4165	1.9642	1.7091	11.0850	9.8555	10.1083
เฉลี่ย							9.5102	9.4834	9.4608

ตารางที่ ข.6 น้ำหนักของชีวมวลทะเลสาบปาล์มเปล้าระดับความชื้นที่ 6

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2.0545	1.7351	1.4239	1.2216	2.5871	2.2147	10.6749	11.7799	12.0445
2	2.2075	1.8482	2.4088	2.0108	2.4057	2.0214	9.6631	10.2680	10.7937
3	1.9081	1.6241	1.7574	1.5316	1.5616	1.3327	11.3629	11.7633	11.3550
4	1.6615	1.4135	2.7257	2.2709	2.0140	1.6744	9.6786	11.7274	11.2203
5	2.0155	1.6925	1.9651	1.6569	2.1043	1.7656	11.3570	11.6726	11.3359
6	1.8097	1.5295	2.2854	1.9210	2.4006	2.0079	11.6104	11.4911	12.5245
7	1.4839	1.2940	1.6001	1.3968	1.8896	1.6414	12.2872	12.3134	12.1389
8	2.0596	1.7424	2.7982	2.3354	2.6783	2.2974	12.7482	12.2367	12.9875
9	1.5687	1.3360	2.9964	2.5481	2.0320	1.7603	15.5464	14.2075	14.3945
10	2.0074	1.6758	1.7552	1.4843	1.9879	1.7095	16.2763	16.5227	15.9746
เฉลี่ย							12.120	12.3983	12.4769

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 น้ำหนักของชีวมวลทะเลสาบปาล์มเปล้าระดับความชื้นที่ 7

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.3135	1.1003	1.2286	1.0261	1.2345	1.0503	16.2314	16.4822	14.9210
2	1.5796	1.3343	1.4566	1.2160	1.6276	1.3351	15.5292	16.5179	17.9712
3	1.3170	1.1037	1.0406	0.8735	1.4131	1.1654	16.1959	16.0580	17.5288
4	1.6768	1.3846	1.5226	1.2633	1.6260	1.3430	17.4260	17.0301	17.4047
5	1.5324	1.2578	1.7478	1.4230	1.3945	1.1311	17.9196	18.5834	18.8885
6	2.3802	1.9405	2.6715	2.1818	2.2741	1.8604	18.4732	18.3305	18.1918
7	1.5092	1.2717	1.5745	1.3190	1.7393	1.4462	15.7368	16.2274	16.8516
8	1.5682	1.2809	1.4522	1.2008	1.6881	1.3891	18.3204	17.3117	17.7122
9	1.5032	1.2066	1.3389	1.0789	1.7944	1.4356	19.7312	19.4189	19.9955
10	2.2814	1.8520	2.1011	1.7006	2.6115	2.1138	18.8218	19.0614	19.0580
เฉลี่ย							17.4386	17.5022	17.8523

ตารางที่ ข.8 น้ำหนักของชีวมวลทะเลสาบปาล์มเปล้าระดับความชื้นที่ 8

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.1780	0.9589	1.3527	1.0626	1.8757	1.4863	18.5993	21.4460	20.7602
2	1.4374	1.1412	1.7822	1.4077	1.6990	1.3393	20.6067	21.0134	21.1713
3	1.0223	0.8504	1.3597	1.1036	1.1111	0.8851	16.8150	18.8350	20.3402
4	0.8396	0.6836	1.1721	0.9323	1.4000	1.1059	18.5803	20.4590	21.0071
5	1.0122	0.8136	0.9532	0.7546	0.9646	0.7620	19.6206	20.8351	21.0035
6	1.3870	1.1022	1.3606	1.0833	1.5422	1.2134	20.5335	20.3807	21.3202
7	1.0193	0.8275	0.8793	0.7197	1.0012	0.8141	18.8168	18.1508	18.6876
8	0.9345	0.7698	1.2357	0.9982	1.1724	0.9031	17.6244	19.2199	22.9700
9	1.3530	1.0784	1.6623	1.3389	1.5324	1.1449	20.2956	19.4550	25.2871
10	1.2502	0.9972	1.7290	1.3649	1.3864	1.0945	20.2368	21.0584	21.0545
เฉลี่ย							19.1729	20.0853	21.3602

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 น้ำหนักของชีวมวลทะเลสาบปาล์มเปล้าระดับความชื้นที่ 9

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.2030	0.8983	1.2989	0.9627	1.1304	0.8440	25.3283	25.8834	25.3362
2	1.2354	0.8920	1.2441	0.9038	1.3646	0.9494	27.7967	27.3531	30.4265
3	1.2077	0.8929	1.0317	0.7364	1.2509	0.8825	26.0661	28.6227	29.4508
4	0.8880	0.6560	1.1982	0.8688	1.1636	0.7803	26.1261	27.4912	32.9409
5	1.3804	0.9711	1.5938	1.0896	1.1283	0.7921	29.6508	31.6351	29.7970
6	1.3848	0.9914	1.0810	0.7825	1.1130	0.8102	28.4084	27.6133	27.2058
7	1.1655	0.8429	1.2119	0.8484	0.8581	0.6205	27.6791	29.9942	27.6891
8	1.0228	0.7490	1.2974	0.9470	1.1634	0.8412	26.7697	27.0079	27.6947
9	1.3185	0.9411	1.5147	1.0692	1.3925	0.9847	28.6234	29.4118	29.2855
10	0.9665	0.6895	1.1371	0.8094	1.2851	0.9315	28.6601	28.8189	27.5154
เฉลี่ย							27.5109	28.3832	28.7342

ตารางที่ ข.10 น้ำหนักของชีวมวลทะเลสาบปาล์มเปล้าระดับความชื้นที่ 10

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.0748	0.7869	1.2170	0.8396	1.1077	0.7752	26.7864	31.0107	30.0172
2	1.4502	1.0209	1.4534	0.9983	1.2286	0.8718	29.6028	31.3128	29.0412
3	1.3539	0.9805	1.3857	0.9694	1.0324	0.7279	27.5796	30.0426	29.4944
4	1.1945	0.7809	1.1746	0.8048	1.2538	0.8538	34.6254	31.4831	31.9030
5	1.1921	0.8186	1.0984	0.7525	1.4218	0.9508	31.3313	31.4913	33.1270
6	1.2728	0.8823	1.3952	0.9572	1.2609	0.8531	30.6804	31.3933	32.3420
7	1.1663	0.8031	1.2667	0.8711	1.1119	0.7685	31.1412	31.2308	30.8841
8	1.2718	0.9016	1.0650	0.7466	1.3150	0.9437	29.1084	29.8967	28.2357
9	1.0182	0.7262	1.2357	0.8744	1.2914	0.9284	28.6781	29.2385	28.1090
10	1.1562	0.8288	1.4742	1.0295	1.3977	0.9944	28.3169	30.1655	28.8545
เฉลี่ย							29.7850	30.7265	30.2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 น้ำหนักของชีวมวลทะเลสาบปาล์มเปล้าระดับความชื้นที่ 1

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	8.9898	8.2220	8.2730	7.5486	8.7840	8.0465	8.5408	8.7562	8.3959
2	8.5525	7.7921	9.5429	8.6438	7.2398	6.5945	8.8910	9.4217	8.9132
3	6.6948	6.0816	8.7600	7.9689	13.6879	12.4291	9.1593	9.0308	9.1964
4	8.4225	7.6524	9.8755	8.9794	9.4995	8.6118	9.1434	9.0740	9.3447
5	9.1521	8.2946	7.5064	6.8229	9.5293	8.6646	9.3694	9.1056	9.0741
6	8.1711	7.3573	10.6916	9.6469	8.5319	7.7027	9.9595	9.7712	9.7188
7	5.8693	5.3153	10.6666	9.6701	11.0575	10.0640	9.4389	9.3422	8.9849
8	8.8332	8.0133	12.4735	11.3403	9.5257	8.6314	9.2820	9.0849	9.3883
9	7.4648	6.7967	9.6586	8.7775	11.5770	10.5070	8.9500	9.1224	9.2425
10	7.6541	6.9278	10.1177	9.2016	6.8855	6.2623	9.4890	9.0544	9.0509
เฉลี่ย							9.2223	9.1763	9.1310

ตารางที่ ข.12 น้ำหนักของชีวมวลทะเลสาบปาล์มระดับความชื้นที่ 2

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	10.1198	9.0023	11.9753	10.6416	9.5198	8.4706	11.0427	11.1371	11.0212
2	10.8752	9.7385	9.7935	8.7298	10.4718	9.3507	10.4522	10.8613	10.7059
3	10.1354	9.0435	8.5950	7.6945	9.4526	8.4382	10.7731	10.4770	10.7314
4	11.6447	10.4368	10.8630	9.7647	11.1446	9.9960	10.3730	10.1105	10.3063
5	11.4061	10.2026	9.9110	8.8441	8.9693	7.9780	10.5514	10.7648	11.0521
6	11.6001	10.3219	9.0588	8.0713	10.2991	9.1746	11.0189	10.9010	10.9184
7	12.0109	10.6562	11.3330	10.0526	10.4809	9.2952	11.2789	11.2980	11.3130
8	9.5116	8.4880	11.5398	10.2315	8.8035	7.8451	10.7616	11.3373	10.8866
9	11.3180	10.0824	8.4240	7.4947	9.6233	8.5717	10.9171	11.0316	10.9276
10	9.5626	8.5325	9.9517	8.8718	8.4762	7.5432	10.7722	10.8514	11.0073
เฉลี่ย							10.7941	10.8770	10.8870

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 น้ำหนักของชีวมวลกะลาปาล์มระดับความชื้นที่ 3

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	7.4669	6.6446	6.8735	6.1193	9.5235	8.4922	11.0126	10.9726	10.8290
2	11.1248	9.9519	9.9131	8.8050	8.8613	7.8722	10.5431	11.1781	11.1620
3	9.4908	8.4082	7.8181	6.9924	8.3796	7.4959	11.4068	10.5614	10.5458
4	7.2328	6.3096	9.6990	8.5384	8.6951	7.4817	12.7641	11.9662	13.9550
5	9.0014	7.9518	10.6771	9.4535	10.4880	9.2697	11.6604	11.4600	11.6161
6	10.4469	9.2903	6.0096	5.3176	8.7967	7.7917	11.0712	11.5149	11.4247
7	8.9841	7.8524	10.5265	9.1952	11.5842	10.1739	12.5967	12.6471	12.1743
8	9.5794	8.3481	9.9530	8.7749	10.1876	8.8989	12.8536	11.8366	12.6497
9	8.7882	7.7153	10.3281	9.1489	10.9424	9.6251	12.2084	11.4174	12.0385
10	7.1216	6.2769	9.3808	8.2407	9.0689	8.0004	11.8611	12.1535	11.7820
เฉลี่ย							11.7978	11.5708	11.8177

ตารางที่ ข.14 น้ำหนักของชีวมวลกะลาปาล์มระดับความชื้นที่ 4

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	6.9470	5.8712	11.1993	9.5725	10.2438	8.7066	15.4858	14.5259	15.0062
2	10.0032	8.5041	8.8450	7.6124	10.7350	9.2362	14.9862	13.9356	13.9618
3	7.7286	6.6500	11.3257	9.7595	9.3541	8.1496	13.9560	13.8287	12.8767
4	8.3566	7.1419	6.5665	5.6864	12.1262	10.5669	14.5358	13.4029	12.8589
5	8.4939	7.0976	9.5829	8.2201	11.0906	9.5408	16.4389	14.2212	13.9740
6	8.9354	7.7068	9.4257	8.1346	10.4220	8.8718	13.7498	13.6977	14.8743
7	8.9556	7.4348	11.7010	10.0189	10.4505	8.8833	16.9816	14.3757	14.9964
8	8.7368	7.4392	11.6054	10.0355	9.8115	8.4805	14.8521	13.5273	13.5657
9	7.1533	5.9475	14.6352	12.5209	10.7744	9.2122	15.4858	14.5259	15.0062
10	8.8979	7.5716	8.7648	7.3612	10.1192	8.7023	14.9862	13.9356	13.9618
เฉลี่ย							15.1458	13.9976	14.1082

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 น้ำหนักของชีวมวลกะลาปาล์มระดับความชื้นที่ 5

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	9.0990	7.2340	12.9316	10.6704	12.2457	9.9113	13.9560	13.8287	12.8767
2	8.9935	7.1356	9.6204	7.8607	13.4893	10.7644	14.5358	13.4029	12.8589
3	9.8739	7.8509	9.3955	7.5123	10.8799	8.8646	16.4389	14.2212	13.9740
4	7.5667	5.8972	11.6676	9.4533	7.4460	5.9990	13.7498	13.6977	14.8743
5	7.8871	6.2233	14.2168	11.4693	11.4948	9.0845	16.9816	14.3757	14.9964
6	7.2266	5.6743	12.5749	10.1054	8.0646	6.5220	14.8521	13.5273	13.5657
7	7.6325	6.1129	10.8697	8.9359	8.2193	6.6596	16.8566	14.4467	14.4992
8	8.5993	6.8752	11.1338	9.0666	11.1922	9.1160	14.9058	16.0141	14.0021
9	8.3645	6.8654	14.9851	12.5056	12.3956	10.3124	20.4968	17.4858	19.0630
10	8.9458	7.3142	10.4903	8.7268	9.3400	7.7692	20.6583	18.2913	20.2005
เฉลี่ย							16.3431	14.9291	15.0911

ตารางที่ ข.16 น้ำหนักของชีวมวลกะลาปาล์มระดับความชื้นที่ 6

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	8.1743	6.3940	11.1740	8.6774	12.7458	9.7458	20.4884	20.0436	18.5231
2	9.8796	7.6409	11.7940	9.3288	10.6496	8.0611	22.0638	18.9782	19.4333
3	9.4988	7.2792	9.5341	7.5212	9.5213	7.2560	21.0952	19.3257	20.9686
4	8.3672	6.4357	12.1901	9.5919	9.6570	7.3964	21.4804	19.6383	19.1280
5	9.5532	7.5184	11.3049	8.7875	9.3101	7.2293	19.9096	17.7907	18.9761
6	11.2857	8.4174	13.2351	10.0896	11.6819	8.6818	20.0493	18.5669	18.5504
7	11.9035	9.2297	8.1946	6.4244	12.9526	10.1740	17.9222	16.5464	16.8060
8	10.1973	7.9195	9.5944	7.3254	13.1760	10.3096	18.2387	16.8108	16.8180
9	9.8593	7.7592	8.9084	6.9547	10.6486	8.3215	21.7792	22.3429	23.5372
10	9.5599	7.3988	11.5095	9.0939	10.0772	7.6741	22.6598	20.9022	24.3061
เฉลี่ย							20.5687	19.0946	19.7047

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.17 น้ำหนักของชีวมวลกะลาปาล์มระดับความชื้นที่ 7

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	10.6685	7.8408	11.2129	8.3461	12.2925	9.2501	26.5051	25.5670	24.7501
2	8.9622	6.5230	9.5587	6.8512	10.0312	7.3594	27.2165	28.3250	26.6349
3	13.0203	10.1251	8.0110	6.0094	11.3442	8.7233	22.2360	24.9856	23.1034
4	11.8149	8.8880	12.8492	10.0863	11.1793	8.5107	24.7730	21.5025	23.8709
5	12.0838	9.2346	9.9998	7.4790	11.8028	8.8233	23.5787	25.2085	25.2440
6	14.2283	10.5449	10.5923	7.7023	9.4783	7.1556	25.8878	27.2840	24.5054
7	12.0929	9.1565	12.9216	9.8702	11.8332	8.9574	24.2820	23.6147	24.3028
8	11.7629	8.9884	8.9688	6.7869	13.7001	10.2271	23.5869	24.3277	25.3502
9	8.8304	6.6767	10.7896	8.2502	12.8903	9.6570	24.3896	23.5356	25.0832
10	12.9023	9.4004	9.9236	7.2973	12.2207	8.9064	27.1417	26.4652	27.1204
เฉลี่ย							24.9597	25.0816	24.9965

ตารางที่ ข.18 น้ำหนักของชีวมวลกะลาปาล์มระดับความชื้นที่ 8

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	12.4917	8.9944	11.0877	7.9207	11.1319	7.8879	27.9970	28.5632	29.1415
2	9.6690	6.9612	10.9676	7.7489	11.3494	8.2327	28.0050	29.3474	27.4614
3	13.0863	9.4560	11.1611	7.8328	8.8889	6.2834	27.7412	29.8205	29.3118
4	10.7688	7.5123	13.3287	9.6940	11.2741	7.9533	30.2401	27.2697	29.4551
5	12.6592	9.1514	10.8807	7.8797	13.1631	9.4833	27.7095	27.5809	27.9554
6	11.6828	8.4531	9.9851	7.2345	9.5914	6.7614	27.6449	27.5470	29.5056
7	9.9331	6.9585	12.6905	9.2831	11.3340	8.0147	29.9463	26.8500	29.2862
8	12.7526	9.2947	11.6208	8.1947	12.3941	8.8022	27.1153	29.4825	28.9807
9	11.9285	8.2733	10.8115	7.6725	10.9934	7.9644	30.6426	29.0339	27.5529
10	11.5625	8.1243	13.8370	9.8672	12.2929	8.7878	29.7358	28.6897	28.5132
เฉลี่ย							28.6778	28.4185	28.7164

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.19 น้ำหนักของชีวมวลกะลาปาล์มระดับความชื้นที่ 9

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	12.7948	9.2771	11.0280	7.6667	9.1695	6.6940	27.4932	30.4797	26.9971
2	11.3414	8.0484	11.5160	7.9071	11.1516	7.8005	29.0352	31.3381	30.0504
3	13.1495	9.1330	13.5668	9.4600	10.2003	7.1633	30.5449	30.2710	29.7736
4	12.9872	9.0900	12.6581	8.8233	15.2798	10.7953	30.0080	30.2952	29.3492
5	11.7567	8.2956	12.1671	8.5235	14.3783	9.8561	29.4394	29.9463	31.4516
6	10.8527	7.5446	15.0204	10.2878	18.1388	13.0520	30.4818	31.5078	28.0438
7	12.8221	8.9921	15.7838	11.2882	12.9668	8.9125	29.8703	28.4824	31.2668
8	11.5277	7.9324	12.5674	8.6188	13.3928	9.5580	31.1884	31.4194	28.6333
9	8.6183	6.2170	13.6292	9.7582	14.7020	10.2682	27.8628	28.4023	30.1578
10	12.8288	8.8782	9.7451	7.1683	13.5514	9.7744	30.7948	26.4420	27.8717
เฉลี่ย							29.6719	29.8584	29.3595

ตารางที่ ข.20 น้ำหนักของชีวมวลกะลาปาล์มระดับความชื้นที่ 10

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	12.0386	8.7123	11.4963	8.3973	9.5702	6.9425	27.6303	26.9565	27.4571
2	12.2801	9.1152	11.5361	8.1563	12.1001	8.8967	25.7726	29.2976	26.4742
3	16.2734	11.8602	12.5578	9.0152	9.1111	6.5277	27.1191	28.2104	28.3544
4	12.0041	8.7239	11.8265	8.5854	11.4401	8.0497	27.3257	27.4054	29.6361
5	12.1774	8.5928	9.8238	6.9761	11.4374	8.3279	29.4365	28.9878	27.1871
6	12.9628	9.5917	10.5263	7.4529	9.2341	6.5234	26.0060	29.1973	29.3553
7	11.7095	7.9394	10.2196	7.3873	13.5921	9.8990	32.1969	27.7144	27.1709
8	10.9136	7.9990	10.0508	7.2330	10.5096	7.5654	26.7061	28.0356	28.0144
9	10.4582	7.6485	13.4118	9.9407	11.6877	8.6171	26.8660	25.8809	26.2721
10	11.8157	8.4366	12.3996	8.8845	11.5847	8.1881	28.5984	28.3485	29.3197
เฉลี่ย							27.7658	28.0034	27.9241

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.21 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาะปาล์มเปล่า(30/70)

ระดับความชื้นที่ 1

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2.0718	1.9245	2.2650	2.1212	3.1963	2.9828	7.1098	6.3488	6.6796
3	2.9149	2.6965	2.3239	2.1889	1.6906	1.5956	7.4925	5.8092	5.6193
2	3.9999	3.6911	1.6892	1.5588	2.4081	2.2293	7.7202	7.7196	7.4249
4	1.9941	1.8568	2.0837	1.9350	1.6797	1.5801	6.8853	7.1363	5.9296
เฉลี่ย							7.3020	6.7535	6.4134

ตารางที่ ข.22 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาะปาล์มเปล่า(30/70)

ระดับความชื้นที่ 2

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2.5448	2.3488	3.4272	3.1858	1.7375	1.6067	7.7020	7.0437	7.5281
3	2.7725	2.5453	3.0802	2.8394	2.9803	2.7707	8.1948	7.8177	7.0328
2	2.0613	1.8898	2.6603	2.3868	2.5789	2.3511	8.3200	10.2808	8.8332
4	1.7344	1.5875	1.6368	1.5299	2.3539	2.2060	8.4698	6.5310	6.2832
เฉลี่ย							8.1716	7.9183	7.4193

ตารางที่ ข.23 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาะปาล์มเปล่า(30/70)

ระดับความชื้นที่ 3

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2.2081	1.9966	3.2277	2.8345	2.8693	2.5606	9.5784	12.1820	10.7587
3	1.8777	1.6515	2.4248	2.1673	2.0608	1.8013	12.0467	10.6194	12.5922
2	3.9840	3.5883	3.1347	2.7920	3.2628	2.9087	9.9322	10.9325	10.8526
4	2.3104	2.0382	2.0502	1.8390	3.4409	3.1020	11.7815	10.3014	9.8492
เฉลี่ย							10.8347	11.0088	11.0132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.24 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(30/70)
ระดับความชื้นที่ 4

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	3.1585	2.5999	3.8415	3.2975	3.4243	2.8863	17.6856	14.1611	15.7112
3	3.2871	2.8756	2.6058	2.2747	3.8462	3.3691	12.5186	12.7063	12.4045
2	2.2249	1.8765	3.9357	3.3500	4.1627	3.5340	15.6591	14.8817	15.1032
4	3.6237	3.1936	3.2834	2.8673	3.2007	2.7545	11.8691	12.6728	13.9407
เฉลี่ย							14.4331	13.6055	14.2899

ตารางที่ ข.25 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(30/70)
ระดับความชื้นที่ 5

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	3.2460	2.7153	4.1062	3.4923	2.5288	2.0817	16.3494	14.9506	17.6803
3	2.9761	2.5421	3.0423	2.5442	3.6081	3.0675	14.5828	16.3725	14.9830
2	2.3144	1.9381	3.0604	2.6082	3.2369	2.7164	16.2591	14.7758	16.0802
4	2.5022	2.0884	2.5707	2.1495	2.4749	2.0639	16.5374	16.3846	16.6067
เฉลี่ย							15.9322	15.6209	16.3376

ตารางที่ ข.26 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(30/70)
ระดับความชื้นที่ 6

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2.7093	2.2527	2.1132	1.6825	2.8647	2.321	16.8531	20.3814	18.9793
3	2.6266	2.1915	2.0648	1.6564	2.9019	2.449	16.5651	19.7792	15.6070
2	3.3858	2.8462	2.3557	1.8163	2.4176	1.9689	15.9371	22.8977	18.5597
4	2.3312	1.91	1.4831	1.1972	1.9422	1.598	18.0679	19.2772	17.7222
เฉลี่ย							16.8558	20.5839	17.7171

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.27 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาะปาล์มเปล่า(30/70)
ระดับความชื้นที่ 7

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.8356	1.3824	2.7162	2.1234	2.4444	1.9597	24.6895	21.8246	19.8290
3	1.981	1.4996	2.1499	1.6602	2.2895	1.7814	24.3009	22.7778	22.1926
2	2.4427	1.9117	2.4788	1.9492	1.9405	1.531	21.7382	21.3652	21.1028
4	1.9178	1.4707	1.9702	1.5144	1.807	1.3784	23.3132	23.1347	23.7189
เฉลี่ย							23.5104	22.2756	21.7108

ตารางที่ ข.28 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาะปาล์มเปล่า(30/70)
ระดับความชื้นที่ 8

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.9978	1.4898	2.4106	1.8784	1.8277	1.3901	25.4280	22.0775	23.9427
3	1.1432	0.8546	1.421	1.0202	0.8609	0.6477	25.2449	28.2055	24.7648
2	1.0932	0.7813	1.5714	1.1645	2.6028	1.9641	28.5309	25.8941	24.5390
4	1.9119	1.4093	2.7141	2.1481	1.7557	1.3192	26.2880	20.8541	24.8619
เฉลี่ย							26.3730	24.2578	24.5271

ตารางที่ ข.29 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาะปาล์มเปล่า(30/70)
ระดับความชื้นที่ 9

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.0867	0.6644	1.8854	1.3719	1.5703	1.0099	38.8608	27.2356	35.6874
3	4.0527	2.8095	1.5645	1.0374	1.1179	0.755	30.6758	33.6913	32.4627
2	2.4364	1.821	2.3656	1.7519	3.5867	2.8392	25.2586	25.9427	20.8409
4	2.2551	1.6774	1.8367	1.2652	2.017	1.4048	25.6175	31.1156	30.3520
เฉลี่ย							30.1032	29.4963	29.8357

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.30 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาะปาล์มเปล่า(30/70)
ระดับความชื้นที่ 10

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2.5868	1.8844	2.4621	1.7976	2.8204	2.1883	27.1532	26.9892	22.4117
3	1.8686	1.2191	2.1606	1.5641	1.7491	1.1277	34.7586	27.6081	35.5268
2	2.1547	1.4758	2.3262	1.6862	2.6093	1.8652	31.5079	27.5127	28.5172
4	2.4051	1.7455	2.8373	2.038	3.1869	2.4008	27.4251	28.1711	24.6666
เฉลี่ย							30.2112	27.5703	27.7806

ตารางที่ ข.31 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาะปาล์มเปล่า(50/50)
ระดับความชื้นที่ 1

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	3.6921	3.3570	4.2595	3.8730	2.8602	2.5989	9.0761	9.0738	9.1357
3	4.1056	3.6888	3.1661	2.8575	2.9611	2.6768	10.1520	9.7470	9.6012
2	4.4919	4.0677	3.3539	3.0367	3.8497	3.4896	9.4437	9.4576	9.3540
4	4.7026	4.2207	3.5985	3.2171	4.6918	4.2312	10.2475	10.5989	9.8171
เฉลี่ย							9.7298	9.7193	9.4770

ตารางที่ ข.32 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะเลาะปาล์มเปล่า(50/50)
ระดับความชื้นที่ 2

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	5.1735	4.5676	3.6710	3.2390	4.8344	4.2620	11.7116	11.7679	11.8401
3	4.4135	3.8760	4.4449	3.9026	2.4388	2.1487	12.1785	12.2005	11.8952
2	3.1806	2.8075	2.9695	2.6008	4.4234	3.9390	11.7305	12.4162	10.9509
4	3.1205	2.7592	5.1131	4.5071	3.2925	2.9000	11.5783	11.8519	11.9210
เฉลี่ย							11.7997	12.0591	11.6518

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.33 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(50/50)

ระดับความชื้นที่ 3

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	3.2800	2.8046	4.4161	3.7740	3.8550	3.3366	14.4939	14.5400	13.4475
3	3.7608	3.1898	3.6445	3.1074	4.0597	3.4899	15.1829	14.7373	14.0355
2	2.8257	2.4213	2.4727	2.1125	1.8365	1.5550	14.3115	14.5671	15.3281
4	2.8523	2.4655	2.7817	2.3879	3.2140	2.7411	13.5610	14.1568	14.7138
เฉลี่ย							14.3873	14.5003	14.3812

ตารางที่ ข.34 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(50/50)

ระดับความชื้นที่ 4

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2.7788	2.3203	3.2549	2.7004	2.9664	2.4941	16.4999	17.0359	15.9217
3	3.0254	2.5216	4.4698	3.8135	2.2588	1.8414	16.6523	14.6830	18.4788
2	4.4924	3.7355	4.2972	3.5914	3.8838	3.2619	16.8485	16.4246	16.0127
4	4.4522	3.6569	4.6121	3.8100	4.1675	3.4270	17.8631	17.3912	17.7684
เฉลี่ย							16.9660	16.3837	17.0454

ตารางที่ ข.35 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(50/50)

ระดับความชื้นที่ 5

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2.6425	2.1121	3.7809	3.0294	4.4349	3.6008	20.0719	19.8762	18.8076
3	4.6151	3.8143	3.2933	2.6594	3.5634	2.8893	17.3517	19.2482	18.9173
2	3.8895	3.0805	5.3921	4.3621	5.1565	4.1621	20.7996	19.1020	19.2844
4	3.4879	2.8675	4.4285	3.5826	5.1025	4.1499	17.7872	19.1013	18.6693
เฉลี่ย							19.0026	19.3319	18.9197

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.36 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(50/50)
ระดับความชื้นที่ 6

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.9875	1.5044	4.0615	3.3187	2.2327	1.7290	24.3069	18.2888	22.5601
3	3.0383	2.4547	3.8279	3.1273	2.3669	1.8460	19.2081	18.3025	22.0077
2	2.9329	2.3189	2.5189	1.9148	2.7906	2.2425	20.9349	23.9827	19.6409
4	2.4850	1.8804	2.3830	1.8406	3.0320	2.3803	24.3300	22.7612	21.4941
เฉลี่ย							22.1950	20.8338	21.4257

ตารางที่ ข.37 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(50/50)
ระดับความชื้นที่ 7

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1.7682	1.2440	3.6554	2.7017	2.7910	2.1115	29.6460	26.0902	24.3461
3	2.5707	1.9883	2.9593	2.3960	3.2040	2.5367	22.6553	19.0349	20.8271
2	2.2554	1.6854	2.4924	1.8712	3.0379	2.4222	25.2727	24.9238	20.2673
4	2.9826	2.2629	2.0401	1.4401	3.2345	2.4683	24.1300	29.4103	23.6884
เฉลี่ย							25.4260	24.8648	22.2822

ตารางที่ ข.38 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(50/50)
ระดับความชื้นที่ 8

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	3.9805	3.1100	2.6429	1.9062	2.6364	1.8912	21.8691	27.8747	28.2658
3	4.4627	3.4564	5.2947	4.1281	3.5683	2.6379	22.5491	22.0334	26.0740
2	2.3250	1.7484	2.7496	2.1074	5.3396	4.2181	24.8000	23.3561	21.0034
4	3.6817	2.7753	4.1494	3.1461	2.3993	1.7104	24.6191	24.1794	28.7125
เฉลี่ย							23.4593	24.3609	26.0140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.39 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(50/50)

ระดับความชื้นที่ 9

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	3.6169	2.7320	3.5751	2.5653	4.6873	3.4797	24.4657	28.2454	25.7632
3	2.7504	2.0027	4.6230	3.5004	1.8329	1.3635	27.1851	24.2829	25.6097
2	2.9980	2.2834	3.1027	2.2567	3.1494	2.2649	23.8359	27.2666	28.0847
4	3.6495	2.8485	3.0730	2.0485	3.9338	2.8689	21.9482	33.3388	27.0705
เฉลี่ย							24.3587	28.2834	26.6320

ตารางที่ ข.40 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(50/50)

ระดับความชื้นที่ 10

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2.8485	2.0835	3.4849	2.4606	2.5041	1.6881	26.8562	29.3925	32.5866
3	2.2655	1.4878	3.8908	2.8525	5.3122	3.9752	34.3280	26.6860	25.1685
2	2.3969	1.6576	3.9154	2.6903	3.4688	2.4437	30.8440	31.2893	29.5520
4	2.8625	2.2029	2.9665	2.0317	4.6292	3.4520	23.0428	31.5119	25.4299
เฉลี่ย							28.7678	29.7199	28.1842

ตารางที่ ข.41 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(70/30)

ระดับความชื้นที่ 1

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	4.8913	4.2943	8.2636	7.2999	5.4937	4.8420	12.2053	11.6620	11.8627
3	6.4918	5.7409	6.4224	5.6726	3.6206	3.2078	11.5669	11.6748	11.4014
2	6.1701	5.4750	6.2660	5.5468	5.9590	5.2880	11.2656	11.4778	11.2603
4	5.2320	4.5962	7.2153	6.3501	6.2691	5.5290	12.1521	11.9912	11.8055
เฉลี่ย							11.7975	11.7014	11.5825

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.42 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(70/30)

ระดับความชื้นที่ 2

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	7.2937	6.2612	7.4518	6.3429	7.1567	6.1634	14.1561	14.8810	13.8793
3	5.9627	5.1285	6.7280	5.8670	7.3766	6.4031	13.9903	12.7973	13.1971
2	7.5223	6.5251	7.7059	6.7066	6.3986	5.5620	13.2566	12.9680	13.0747
4	6.7453	5.7848	9.3677	8.0628	4.5907	3.9182	14.2395	13.9298	14.6492
เฉลี่ย							13.9106	13.6440	13.7001

ตารางที่ ข.43 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(70/30)

ระดับความชื้นที่ 3

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	6.8774	5.7249	8.2119	6.8552	4.8012	3.9139	16.7578	16.5211	18.4808
3	5.8023	4.8178	9.2376	7.8404	6.3837	5.3853	16.9674	15.1251	15.6398
2	6.9245	5.8176	5.0991	4.1943	5.6290	4.7057	15.9853	17.7443	16.4026
4	5.9175	4.9395	6.9918	5.8136	6.5382	5.4360	16.5272	16.8512	16.8579
เฉลี่ย							16.5594	16.5604	16.8453

ตารางที่ ข.44 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(70/30)

ระดับความชื้นที่ 4

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
13	4.0544	3.2234	4.4016	3.4851	4.3877	3.4987	20.4963	20.8220	20.2612
14	7.3792	6.0534	6.4318	5.1885	5.6946	4.6031	17.9667	19.3305	19.1673
15	7.1293	5.8452	6.8866	5.5827	5.4507	4.5129	18.0116	18.9339	17.2051
16	5.6330	4.5295	5.9010	4.7792	4.5713	3.6316	19.5899	19.0103	20.5565
							19.0161	19.5242	19.2975

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.45 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(70/30)
ระดับความชื้นที่ 5

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	7.7969	6.2242	6.4171	5.0460	5.0866	3.9396	20.1708	21.3663	22.5494
3	5.8397	4.5940	6.0441	4.7358	7.0919	5.6466	21.3316	21.6459	20.3796
2	6.4431	5.2269	5.4253	4.3618	7.4849	6.0315	18.8760	19.6026	19.4178
4	5.2951	4.0933	5.4275	4.3293	6.9903	5.6899	22.6965	20.2340	18.6029
เฉลี่ย							20.7687	20.7122	20.2374

ตารางที่ ข.46 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(70/30)
ระดับความชื้นที่ 6

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	4.3613	3.2898	5.5694	4.3491	7.4348	5.6515	24.5684	21.9108	23.9859
3	8.7207	7.0812	8.5346	6.8697	6.8710	5.4067	18.8001	19.5077	21.3113
2	5.0002	3.7711	6.4991	5.1856	5.9915	4.7177	24.5810	20.2105	21.2601
4	5.7250	4.3178	6.8372	5.2880	6.1761	4.8829	24.5799	22.6584	20.9388
เฉลี่ย							23.1323	21.0718	21.8740

ตารางที่ ข.47 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(70/30)
ระดับความชื้นที่ 7

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	7.6418	5.9113	6.6110	4.9680	7.0271	5.3828	22.6452	24.8525	23.3994
3	5.5387	4.0930	5.9102	4.4411	6.4909	4.8785	26.1018	24.8570	24.8409
2	6.4110	4.8958	5.9390	4.4781	5.3854	4.1180	23.6344	24.5984	23.5340
4	6.6230	4.9748	9.5189	7.4436	5.4102	3.9219	24.8860	21.8019	27.5091
เฉลี่ย							24.3168	24.0275	24.8209

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.48 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(70/30)
ระดับความชื้นที่ 8

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	5.6165	3.9618	5.0351	3.4597	5.6769	4.1530	29.4614	31.2884	26.8439
3	9.1741	7.1635	8.6945	6.7659	5.2409	3.5944	21.9160	22.1818	31.4164
2	5.0289	3.3466	5.6501	4.0225	5.3753	3.4646	33.4526	28.8066	35.5459
4	6.9189	4.9609	6.4730	4.6572	5.1106	3.5120	28.2993	28.0519	31.2801
เฉลี่ย							28.2823	27.5822	31.2716

ตารางที่ ข.49 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(70/30)
ระดับความชื้นที่ 9

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	5.5083	3.4907	7.6767	5.5393	6.0085	4.2124	36.6284	27.8427	29.8927
3	6.2589	4.4772	5.7973	4.1469	7.2520	5.2782	28.4667	28.4684	27.2173
2	7.2526	5.4356	8.0175	5.9963	6.5777	4.8494	25.0531	25.2099	26.2751
4	6.0665	4.4600	7.3461	5.3420	8.3918	6.2388	26.4815	27.2811	25.6560
เฉลี่ย							29.1574	27.2005	27.2603

ตารางที่ ข.50 น้ำหนักของชีวมวลแบบผสมระหว่างกะลาปาล์ม และทะลายปาล์มเปล่า(70/30)
ระดับความชื้นที่ 10

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)			น้ำหนักหลังอบ (g)			ความชื้นจริง (%)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	4.8649	3.4915	5.7576	4.1955	6.6382	4.8817	28.2308	27.1311	26.4605
3	6.5656	4.9395	5.3699	3.7724	5.8803	4.1376	24.7670	29.7492	29.6362
2	4.4288	3.1093	4.8932	3.2989	6.4255	4.6691	29.7936	32.5820	27.3348
4	5.5317	4.2401	3.7409	2.5260	6.5394	5.0062	23.3491	32.4761	23.4456
เฉลี่ย							26.5351	30.4846	26.7193

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.51 ค่าความแม่นยำของการตรวจสอบความชื้นด้วยวิธีมาตรฐาน

ชนิดตัวอย่าง	SD_y	Rep	R^2 max
กะลาปาล์ม	7.6829	0.3947	0.9974
ทะลายปาล์มเปล่า	9.1392	0.3167	0.9988
ชีวมวลแบบผสม	7.0408	0.8109	0.9867

SD_y คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดความชื้นด้วยวิธีมาตรฐาน, Rep คือค่าความสามารถในการทำซ้ำ และ R^2 max คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

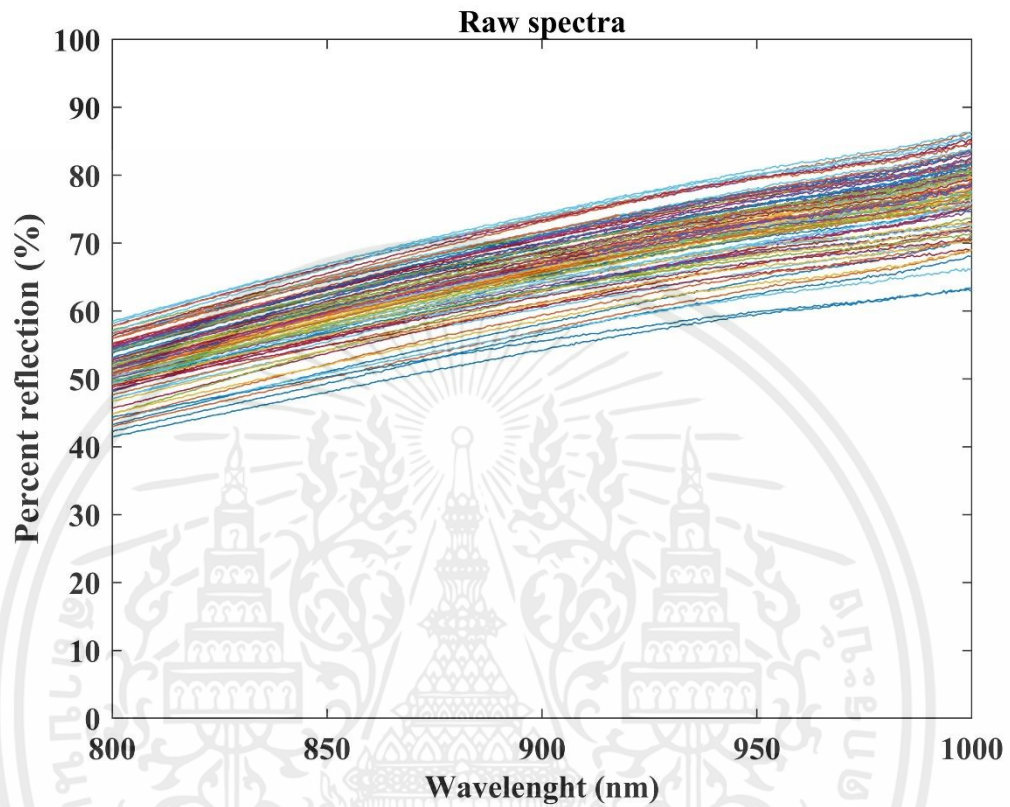


ภาคผนวก ค

สัญญาณคลื่นแสง near infrared spectroscopy

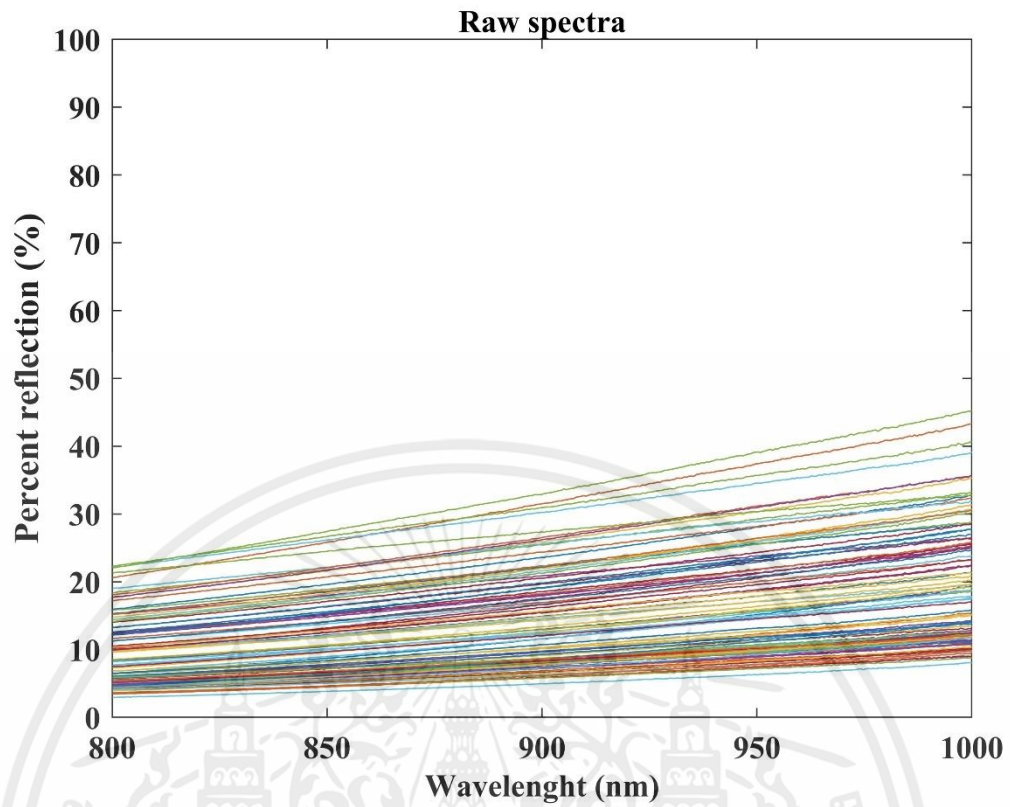
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากกาสแกนด้วยเนียร์อินฟราเรด โดยสแกนตัวอย่างซีวมวล ทะลายปาล์มเปล่า กะลาปาล์ม และแบบผสมระหว่างทะลายปาล์มเปล่า กะลาปาล์ม สัดส่วน 30/70, 50/50 และ 70/30ตามลำดับ



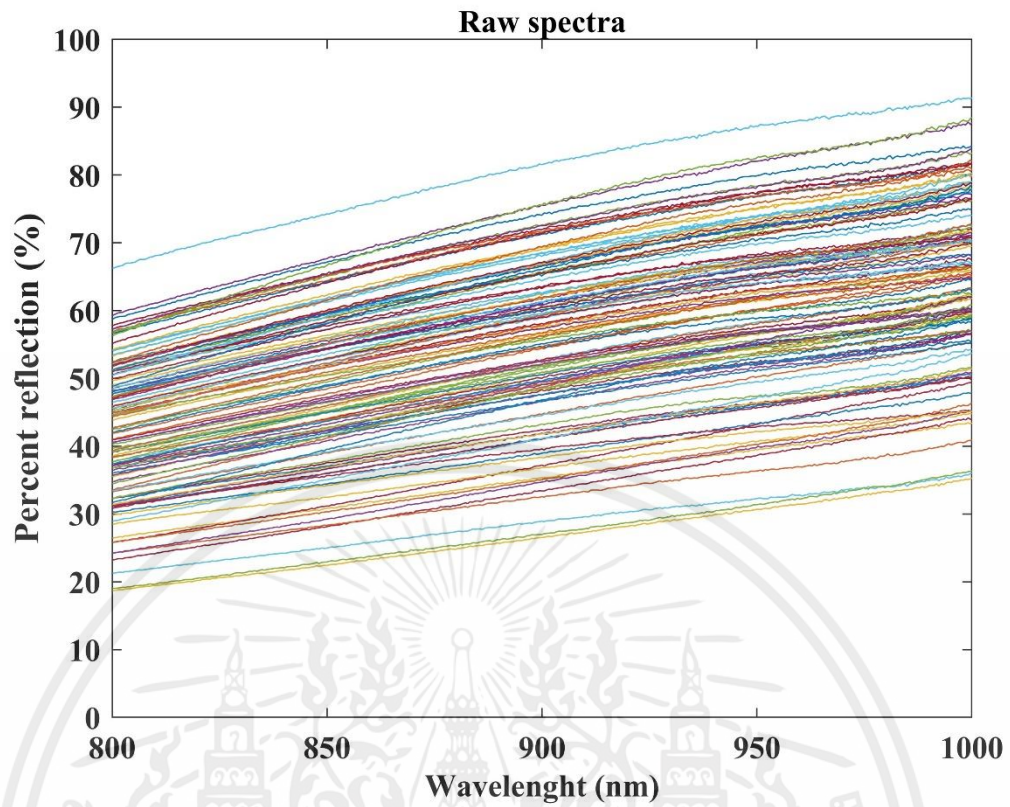
รูปที่ ค.1 เส้นสเปกตรัมที่ได้จากการสแกนด้วยเนียร์อินฟราอินฟราเรด ซีวมวลทะลายปาล์มเปล่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.2 เส้นสเปกตรัมที่ได้จากการสแกนด้วยเนียร์อินฟราอินฟราเรด ซีมวลกะลาปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.3 เส้นสเปกตรัมที่ได้จากการสแกนด้วยเนียร์อินฟราอินฟราเรด ซีมวลแบบผสมระหว่าง ทะลายปาล์มเปล่า และกะลาปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายธัญพิสิทธิ์ มาสวัสดิ์
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2541
 ภูมิลำเนา จังหวัดเพชรบุรี
 ที่อยู่ บ้านเลขที่ 42 หมู่ 7 ตำบล ช่องสะแก
 อำเภอ เมืองเพชรบุรี จังหวัด เพชรบุรี 76000
 E-mail 61514006@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย (วิทย์-คณิต) ปีการศึกษา 2559 จากโรงเรียนวัดจันทราวาส(ศุขประสารราษฎร์)
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมพลังงาน) ปีการศึกษา 2564 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ผลงานและกิจกรรม

- ผ่านการฝึกงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 1 ภาคใต้ จังหวัดเพชรบุรี
- เข้าร่วมการประกวดโครงงานภาคบรรยายในหัวข้อเรื่อง “การพัฒนาแอปพลิเคชันมือถือสำหรับการวิเคราะห์ระดับธาตุอาหารในใบปาล์มน้ำมัน” ในการประชุมวิชาการโครงงานวิศวกรรมเกษตรแห่งชาติ โดยได้รับรางวัลรองชนะเลิศอันดับ 2 ด้านความคิดสร้างสรรค์ รางวัลชมเชย ด้านการนำเสนอ และด้านการนำไปใช้ประโยชน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล ชัยวัฒน์ สุพรรณ
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 2542
 ภูมิลำเนา จังหวัดชุมพร
 ที่อยู่ บ้านเลขที่ 119/1 หมู่ 7 ตำบล ปังหวาน
 อำเภอ พะโต๊ะ จังหวัด ชุมพร 86180
 E-mail 61512033@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย (วิทย์-คณิต) ปีการศึกษา 2561 จากโรงเรียนเมืองหลังสวน
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2564 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ผลงานและกิจกรรม

- ผ่านการฝึกงานจากบริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน)
- เข้าร่วมการประกวดโครงงานภาคบรรยายในหัวข้อเรื่อง “การพัฒนาแอปพลิเคชันมือถือสำหรับการวิเคราะห์ระดับธาตุอาหารในใบปาล์มน้ำมัน” ในการประชุมวิชาการโครงงานวิศวกรรมเกษตรแห่งชาติ โดยได้รางวัลรองชนะเลิศอันดับ 2 ด้านความคิดสร้างสรรค์ รางวัลชมเชย ด้านการนำเสนอ และด้านการนำไปใช้ประโยชน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล บัญชา บัวพรหม
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ. 2542
 ภูมิลำเนา จังหวัดชุมพร
 ที่อยู่ บ้านเลขที่ 5/4 หมู่ 4 ตำบล พระรักษ์
 อำเภอ พะโต๊ะ จังหวัด ชุมพร 86180
 E-mail 61512051@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย (วิทย์-คณิต) ปีการศึกษา 2561 จากโรงเรียนเมืองหลังสวน
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2564 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ผลงานและกิจกรรม

- ผ่านการฝึกงานจากบริษัท ริชฟิลด์ ออยล์ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายมงคลศักดิ์ อักษรสม
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2542
 ภูมิลำเนา จังหวัดชุมพร
 ที่อยู่ บ้านเลขที่ 53 หมู่ 4 ตำบล ปังหวาน อำเภอ พะ
 โตะจังหวัด ชุมพร 86180
 E-mail 61512065@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย (วิทย์-คณิต) ปีการศึกษา 2561 จากโรงเรียนเมืองหลังสวน
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2564 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ผลงานและกิจกรรม

- ผ่านการฝึกงานจากบริษัท เอส.วี. อินเทอร์เน็ตลาสจำกัด (สาขากำแพงแสน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้