

การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคในชีวมวลที่มีผลต่อโมเดลการทำนายค่าความร้อนสูง

โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

A Study of Effect on Particle Size in Biomass to High Heating Value  
Prediction Model by Near Infrared Spectroscopy



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2563

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคในชีวมวลที่มีผลต่อโมเดลการทำนายค่าความร้อนสูง  
โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

A Study of Effect on Particle Size in Biomass to High Heating Value  
Prediction Model by Near Infrared Spectroscopy



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2563

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

A STUDY OF EFFECT ON PARTICLE SIZE IN BIOMASS TO HIGH HEATING  
VALUE PREDICTION MODEL BY NEAR INFARED SPECTROSCOPY



NATCHAPOL PRUKJINDA  
DECHTHUS MUADCHEANGKA  
VARAKORN CHINMETHEEPITHAK

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

ACADEMIC YEAR 2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

.....


หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคในชีวมวลที่มีผลต่อโมเดลการทำนาย  
ค่าความร้อนสูงโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี  
A Study of Effect on Particle Size in Biomass to High Heating Value  
Prediction Model by Near Infrared Spectroscopy

นักศึกษาผู้จัดทำ นายณัฏชพล พฤษ์จินดา รหัส 60010284  
นายเดชทัศน์ หมวดเชียงคะ รหัส 60010352  
นายวรากร ชินเมธีพิทักษ์ รหัส 60010903

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

หลักสูตร วิศวกรรมเกษตร

ภาควิชา วิศวกรรมเกษตร

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. วันพุฒิ แซ่ฉั่ว	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**หัวข้อปริญญาโท** การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคในชีวมวลที่มีผลต่อโมเดลการทำนายค่าความร้อนสูงโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี  
A Study of Effect on Particle Size in Biomass to High Heating Value Prediction Model by Near Infrared Spectroscopy

**นักศึกษาผู้จัดทำ** นายณัชพล พฤกษ์จินดา รหัส 60010284  
นายเดชทัศน์ หมวดเชียงคะ รหัส 60010352  
นายวรากร ชินเมธีพิทักษ์ รหัส 60010903

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผศ.ดร. วันพุทธ แซ่ฉั่ว

**ปีการศึกษา** 2563

### บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคชีวมวลต่อโมเดลการทำนายค่าความร้อนสูงโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี กับไม้สนประดิพัทธ์ ยางนา กระจินเทพา ชนิดละ 3 ขนาด ได้แก่ 1 มม. 3 มม. 5 มม. โดยการสแกนด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและหาค่าความร้อนสูงด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์และสร้างแบบจำลองของแต่ละขนาดโดยทำการทดสอบสมการด้วยวิธี Full cross validation พบว่าค่า  $R^2$  เท่ากับ 86.69, 80.87 และ 75.83 ตามลำดับ ค่า RPD เท่ากับ 2.76, 2.29 และ 2.04 ตามลำดับ ค่า RMSECV เท่ากับ 141 J/g, 147 J/g และ 147 J/g ตามลำดับและค่า Bias เท่ากับ -17.80 J/g, -1.91 J/g และ -10.00 J/g ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคในชีวมวลมีแนวโน้มส่งผลต่อความแม่นยำของโมเดลการทำนายค่าความร้อนสูง ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงประมาณพบว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวและปริมาณไอรระเหยของสนประดิพัทธ์เท่ากับร้อยละ  $15.80 \pm 1.10$  และ  $73.91 \pm 0.62$  ยางนาเท่ากับร้อยละ  $11.45 \pm 1.08$  และ  $77.44 \pm 1.69$  กระจินเทพาเท่ากับร้อยละ  $14.30 \pm 1.45$  และ  $76.30 \pm 1.12$  ตามลำดับ คุณสมบัติเหล่านี้มีค่าค่อนข้างสูงซึ่งเหมาะสำหรับการใช้เป็นพลังงานทางเลือกและใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสในอนาคตได้

**คำสำคัญ:** ค่าความร้อนสูง, ขนาดของอนุภาคในชีวมวล, แบบจำลองการทำนายค่าความร้อน, เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

<b>Thesis Title</b>	A Study of Effect on Particle Size in Biomass to High Heating Value Prediction Model by Near Infrared Spectroscopy		
<b>Authors</b>	Natchapol	Prukjinda	60010284
	Dechthus	Muadcheangka	60010352
	Varakorn	Chinmetheepithak	60010903
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Wanphut Saechua		
<b>Year</b>	2020		

### Abstract

This thesis is a study of effect on particle sizes in biomass to high heating value prediction model by near infrared spectroscopy of 3 types of wood which were pine (*Casuarina junghuhniana*), yangna and acacia with three particle sizes such as 1 mm., 3 mm. and 5 mm. Using near infrared spectrometer for scanning spectra and determining high heating value with bomb calorimeter. The models of each particle size were created by full cross validation. It was found that  $R^2$  of models were 86.69, 80.87 and 75.83 respectively. RPD were 2.76, 2.29 and 2.04 respectively. RMSECV were 141 J/g, 147 J/g and 147 J/g respectively. Bias were -17.80 J/g, -1.91 J/g and -10.00 J/g respectively. As the results, the particle size in biomass tended to affect on the high heating value prediction model. The approximate analysis results showed that the fixed carbon and volatile matter of pine (*Casuarina junghuhniana*) were  $15.80 \pm 1.10$  and  $73.91 \pm 0.62$ , yangna were  $11.45 \pm 1.08$  and  $77.44 \pm 1.69$ , acacia were  $14.30 \pm 1.45$  and  $76.30 \pm 1.12$  respectively. These properties showed rather high value which were suitable for using as renewable energy and using in pyrolysis process in future.

**Keyword:** High Heating value, Particle Size in Biomass, High Heating Value Prediction Model, Near Infrared Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ. ดร. วันพุทธ แซ่ฉั่ว ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง ตลอดจนให้ความรู้ เอาใจใส่ ให้คำแนะนำช่วยเหลือ ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ช่วยเหลือในการทำการทดลอง และให้กำลังใจเสมอมา



นายณัชพล	พฤกษ์จินดา	รหัส 60010284
นายเดชทัศน์	หมวดเชียงคะ	รหัส 60010352
นายวรรากร	ชินเมธิพิทักษ์	รหัส 60010903

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญ

บทคัดย่อ .....	ก
Abstract .....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญรูปภาพ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ซ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ชีวมวล.....	4
2.2 การหาปริมาณความชื้น.....	6
2.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy).....	7
2.4 หลักการทำงานของเครื่อง Bomb Calorimeter.....	9
2.5 ค่าความร้อน (Heating Value).....	10
2.6 หลักการทำงานของเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA).....	11
2.7 การทำ Repeatability และ Reproducibility.....	12
2.8 ค่าสถิติที่ใช้ในการพิจารณาในการสร้างสมการ.....	13
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีการทดลอง .....	18
3.1 กระบวนการทดลอง .....	18
3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง.....	19
3.3 การดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง FT-NIR spectroscopy (MPA, Bruker, Germany).....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4 การวัดค่าความร้อนสูงด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter (C200,IKA,Germany).....	21
3.5 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA).....	22
3.6 การวัดค่าความร้อนต่ำ.....	23
3.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	26
4.1 ปริมาณความชื้น.....	26
4.2 ผลการทำ Repeatability และ Reproducibility ของเครื่อง Bomb Calorimeter.....	27
4.3 ผลการทำ Repeatability และ Reproducibility ของเครื่อง Near Infrared Spectrometer ..	28
4.4 ผลค่าความร้อนสูง.....	31
4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของพีชพลังงานโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี .....	31
4.6 ผลการทำนายค่าความร้อนด้วยวิธี Partial Least Squares Regression.....	32
4.7 ผลการสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง.....	33
4.8 วิเคราะห์ผลการสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง.....	38
4.9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงประมาณ.....	39
4.10 วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงประมาณ.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	43
5.1 สรุปผลปริมาณความชื้นของพีชพลังงาน.....	43
5.2 สรุปผลค่าความร้อนสูงของชีวมวลโดย Bomb Calorimeter.....	43
5.3 สรุปผลการวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของพีชพลังงานทั้ง 3 ชนิด โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	43
5.4 สรุปผลการทำนายค่าความร้อนสูงของพีชพลังงานทั้ง 3 ชนิดและ 3 ขนาด ด้วยวิธี Partial Least Squares Regression.....	44
5.5 สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงประมาณ.....	44
5.6 ข้อเสนอแนะ.....	44
ภาคผนวก.....	45
ภาคผนวก ก.....	46
ภาคผนวก ข.....	50
ภาคผนวก ค.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ง.....	58
ภาคผนวก จ.....	62
บรรณานุกรม.....	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 การกระทำของคลื่นแสงกับสารต่างๆ .....	7
รูปที่ 2.2 เครื่อง BOMB CALORIMETER รุ่น IKA C-200 (ก), โครงสร้างภายในของเครื่อง .....	9
รูปที่ 2.3 เครื่อง THERMOGRAVIMETRIC ANALYZER (TGA) .....	11
รูปที่ 3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง พีชตัวอย่างที่ความยาวประมาณ 30 เซนติเมตร (ก) , ...	19
รูปที่ 3.2 การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR SPECTROMETER พีชตัวอย่างในถ้วยควอทซ์ (ก) , การสแกนด้วย เครื่อง FT-NIR SPECTROMETER (MPA, BRUKER, GERMANY) (ข).....	20
รูปที่ 3.3 การวัดค่าความร้อนด้วยเครื่อง BOMB CALORIMETER ชั่งน้ำหนักชีวมวล (ก) , อัดเม็ดพีช ตัวอย่างด้วยเครื่อง (ข) , เครื่อง BOMB CALORIMETER (ค).....	21
รูปที่ 3.4 การทดสอบสมรรถภาพการแยกสลายด้วยความร้อนด้วยเครื่อง THERMOGRAVIMETRIC ANALYZER การใส่ตัวอย่างลงถ้วย CRUCIBLE (ก) , การนำถ้วย CRUCIBLE วางลงบนแท่นที่เชื่อม กับเครื่องชั่งน้ำหนักละเอียดภายในเครื่อง THERMOGRAVIMETRIC ANALYZER (ข).....	22
รูปที่ 4.1 REPEATABILITY ของเครื่อง NIRS โดยสแกนกระถินเทพาขนาด 1 มม. ....	28
รูปที่ 4.2 REPRODUCIBILITY ของเครื่อง NIRS โดยสแกนกระถินเทพาขนาด 1 มม. ....	29
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดซับคลื่นของพีชพลังงานทั้ง 3 ชนิด 54 ตัวอย่าง .....	31
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงข้อมูลระหว่างข้อมูลอ้างอิง (X) กับข้อมูลทำนาย (Y) ของค่าความร้อนสูงของพีช พลังงานขนาด 1 มม. ที่ทำการทดสอบด้วยวิธี FULL CROSS VALIDATION .....	33
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงข้อมูลระหว่างข้อมูลอ้างอิง (X) กับข้อมูลทำนาย (Y) ของค่าความร้อนสูงของพีช พลังงานขนาด 3 มม. ที่ทำการทดสอบด้วยวิธี FULL CROSS VALIDATION .....	34
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงข้อมูลระหว่างข้อมูลอ้างอิง (X) กับข้อมูลทำนาย (Y) ของค่าความร้อนสูงของพีช พลังงานขนาด 5 มม. ที่ทำการทดสอบด้วยวิธี FULL CROSS VALIDATION .....	35
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงข้อมูลระหว่างข้อมูลอ้างอิง (X) กับข้อมูลทำนาย (Y) ของค่าความร้อนสูงของพีช พลังงานทุกขนาดที่ทำการทดสอบด้วยวิธี FULL CROSS VALIDATION.....	36
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงข้อมูลระหว่างข้อมูลอ้างอิง (X) กับข้อมูลทำนาย (Y) ของค่าความร้อนสูงของพีช พลังงานทุกขนาดที่ทำการทดสอบด้วยวิธี TEST SET VALIDATION.....	37
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างกราฟแสดงองค์ประกอบเชิงประมาณของสนประดิพัทธ์ขนาด 1 มม. ....	40
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างกราฟ FIRST DERIVATIVE ของสนประดิพัทธ์ขนาด 1 มม.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
ตารางที่ 2.1 การแปลความหมายของค่า R และ R <sup>2</sup> (ดัดแปลงจาก WILLIAMS. 2007).....	13
ตารางที่ 2.2 การอธิบายผลของค่า RPD และ RER (WILLIAMS. 2007) .....	15
ตารางที่ 4.1 ปริมาณความชื้นของพืช .....	26
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า REPEATABILITY และ REPRODUCIBILITY ของเครื่อง BOMB CALORIMETER	27
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า SD <sub>REPEATABILITY</sub> และ SD <sub>REPRODUCIBILITY</sub> ของเครื่อง NEAR INFRARED SPECTROMETER .....	30
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความร้อนสูงของพืชพลังงานโดยเครื่อง BOMB CALORIMETER.....	31
ตารางที่ 4.5 สมการทำนายค่าความร้อนสูงที่สร้างโดยวิธี PARTIAL LEAST SQUARES REGRESSION (PLS) ของพืชพลังงาน .....	32
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบเชิงปริมาณของพืชพลังงาน โดยเครื่อง THERMOGRAVIMETRIC ANALYZER .....	39
ตารางที่ 4.7 อัตราการสลายตัวด้วยความร้อนของพืชพลังงานโดยเครื่อง THERMOGRAVIMETRIC ANALYZER .....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคชีวมวลที่มีขนาดแตกต่างกันมีผลต่อโมเดลการทำนายค่าความร้อนสูง

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เพื่อสร้างแบบจำลองทำนายค่าความร้อนสูงจากพืชพลังงานในประเทศไทย 3 ชนิด ได้แก่ ต้นสนประดิพัทธ์ ต้นกระถินเทพา ต้นยางนา ต้นละ 3 ขนาดการทดลอง ได้แก่ 1 มม. 3 มม. 5 มม.
- 1.3.2 หาค่าความร้อนสูง (High Heating Value) ของพืชตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด โดยการใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์
- 1.3.3 วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณ (Proximate Analysis) ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณไอระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้าของพืชตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดโดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาคชีวมวลที่แตกต่างกันมีผลต่อโมเดลการทำนายค่าความร้อนสูง
- 1.4.2 ได้ค่าองค์ประกอบเชิงปริมาณ ( Proximate Analysis ) ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณไอระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้าของพืชตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานแสดงแผนดำเนินงานดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน		ปี / เดือน									
		พุทธศักราช 2562				พุทธศักราช 2563					
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1	เตรียมวัสดุและหาค่าปริมาณความชื้นเริ่มต้น										
2	วัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง Near Infrared Spectrometer										
3	วัดค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter										
4	วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง TGA										
5	วิเคราะห์ผล										
6	สร้างแบบจำลองทำนายค่าความร้อนสูง										
7	ทำเล่มปริญญานิพนธ์										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ชีวมวล

คือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ [1] ซึ่งพลังงานที่ได้มานี้ จะได้มาจากการเจริญเติบโตของพืชโดยใช้กระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งต้องอาศัยปัจจัยสำคัญได้แก่ คลอโรฟิลล์ แสง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ทำให้ได้แป้งและน้ำตาลออกมาเก็บไว้ในพืช [2] ดังนั้นเมื่อนำชีวมวลที่ทำมาจากพืชมาเป็นเชื้อเพลิง จะทำให้ได้พลังงานออกมา

องค์ประกอบของชีวมวลจะมามีอยู่ 3 ส่วน ได้แก่

1. ความชื้น (Moisture) คือ ปริมาณน้ำที่อยู่ในชีวมวล เนื่องจากพืชมีน้ำเป็นส่วนประกอบ แต่ชีวมวลที่ถูกนำมาใช้ในการเผาไหม้ ควรมีความชื้นไม่เกิน 50%
2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible Substance) ถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1. สารระเหย (Volatiles Matter) คือส่วนที่สามารถเผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นถ้ามีสารระเหยมากก็จะสามารถติดไฟได้ง่าย 2. ถ่านคงตัว (Fixed Carbon) คือส่วนที่เป็นของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากที่ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยแล้ว
3. ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ คือ เถ้า (Ash) ส่วนใหญ่เถ้าจะอยู่ในชีวมวลประมาณ 1-3 % ยกเว้นแกลบและฟางข้าวจะมีเถ้าอยู่ประมาณ 10-20 % ซึ่งจะทำให้มีปัญหาตอนเผาไหม้และหลังใช้งานเนื่องจากการกำจัดทิ้ง [3]

องค์ประกอบทั่วไปของชีวมวลนอกจากคุณสมบัติหลักข้างต้นแล้วชีวมวลมีองค์ประกอบทางเคมีที่ส่งผลต่อค่าความร้อนของชีวมวลอีกด้วย ซึ่งได้แก่ ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ซึ่งในแต่ละชนิดประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ ที่ไม่เหมือนกัน

เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่พบมากในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส โดยพบในส่วนของผนังเซลล์ของพืช อยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ปริมาณที่พบแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดและส่วนของพืช เช่น เนื้อไม้พบประมาณร้อยละ 40-50 และเส้นใยฝ้ายพบประมาณร้อยละ 98

เซลลูโลสเป็นโฮโมโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้าน ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือ เบต้า-D-กลูโคส ไพรานอส ( $\beta$ -D-Glucopyranose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก ( $\beta$ -1,4-glycosidic bond) เกิด เป็นโพลิเมอร์กลูแคน (glucan) มีความยาวตามธรรมชาติประมาณ 10,000 หน่วย ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะ ไฮโดรเจน โดยทั่วไปในธรรมชาติพบเซลลูโลส 2 แบบ คือ crystalline cellulose และ amorphous cellulose โดยส่วนของ crystalline cellulose จะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์มากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส เป็นเฮเทอโรโพลิเมอร์ของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ หลายชนิดผสมกัน เช่น กลูโคส แมนโนส ไซโลส และอะราบิโนส ซึ่งพบอยู่ในรูปโพลิเมอร์ไซแลน แมนแนน กาแลกแตน และอะราบิแนน มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 200 หน่วย โดยในพอลิเมอร์ไวแลน ดี-ไซโลสมีปริมาณมากที่สุดคือ ร้อยละ 85-93 ส่วนองค์ประกอบอื่น เช่น กลูโคส กรดกลูควิโรนิก กรดกาแลกตุโรนิก จะพบปริมาณน้อย โดยไซโลสที่พบจะเชื่อมด้วยพันธะเบตา 1,4 ไกลโคซิดิก

### ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกที่พบในส่วนผนังเซลล์ของพืช พบในปริมาณที่แตกต่างไปตามชนิดของพืช ในธรรมชาติลิกนินเป็นส่วนป้องกันเซลลูโลสไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ลิกนินเป็นเฮเทอโรโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ 3 มิติ ไม่ตกผลึก ประกอบด้วยสารประกอบอะโรมาติก 3 ชนิด คือ tran-p-coumaryl alcohol, trans-coniferyl alcohol และ trans-p-sinapyl alcohol นอกจากนี้โมเลกุลของลิกนินยังเชื่อมต่อกับสารประกอบอะโรมาติกอื่นอีกมากมาย เช่น vanillin และ syringaldehyde



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.2 การหาปริมาณความชื้น

การหาปริมาณความชื้นสามารถหาได้โดยการนำวัตถุดิบที่ต้องการหาความชื้น มาชั่งน้ำหนักแล้วทำการจดบันทึกไว้เป็น มวลของวัตถุเริ่มต้น จากนั้นนำวัตถุดิบมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักของวัตถุดิบไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากนั้นจึงนำวัตถุดิบที่เรอบมาชั่งน้ำหนักแล้วทำการจดบันทึกไว้เป็น มวลวัตถุที่แห้ง ซึ่งสามารถหาความชื้นของวัตถุดิบได้ 3 รูปแบบ [4] คือ

2.2.1 ความชื้นฐานเปียก (wet basis) เป็นค่าความชื้นที่มักใช้ในทางการค้า เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ความชื้นโดยทั่วไปในชีวิตประจำวัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$\% \text{Wet basis} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2.1)$$

2.2.2 ความชื้นฐานแห้ง (dry basis) เป็นค่าที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง (dehydration) เพราะสามารถคำนวณได้สะดวก เนื่องจากน้ำหนักแห้งจะคงที่ สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.2

$$\% \text{Dry basis} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}} \times 100 \quad (2.2)$$

2.2.3 ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของพืชตัวอย่างสามารถหาได้จากการนำพืชตัวอย่างหลังอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงมาทำการสมดุลความชื้นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$\text{ปริมาณความชื้นเริ่มต้น}(\% \text{db}) = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังทำการสมดุล} - \text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}} \times 100 \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

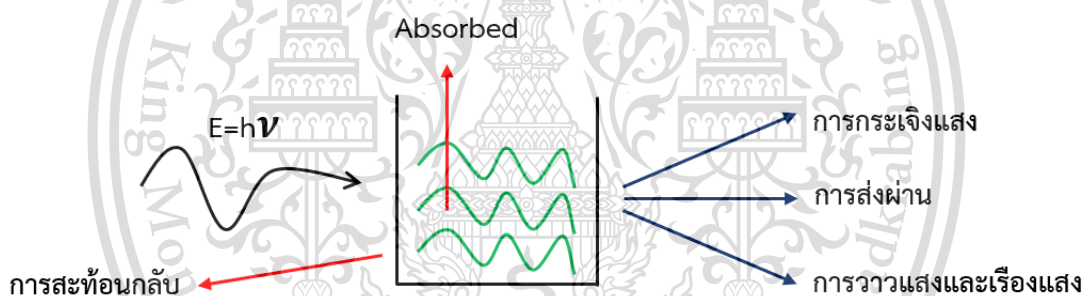
## 2.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near Infrared Spectroscopy)

### 2.3.1 ทฤษฎีของสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy)

เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจะอยู่ในช่วงรังสีอินฟราเรด โดยมีตำแหน่งติดกับรังสีซีบีลกับรังสีอินฟราเรดย่านกลาง เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR radiation) กับสสาร และมีการใช้หลักการอันตรกิริยาคือการใช้คลื่นเนียร์อินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 700-2500 nm ส่องเข้าไปในวัตถุทำให้พันธะทางเคมีภายในวัตถุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพันธะ O-H, C-H และ N-H ของวัตถุดูดซับคลื่นเข้าไปทำให้อัตุเกิดการสั่นของพันธะต่างๆ ในโมเลกุล ระดับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ของสสารที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ จะปรากฏในสเปกตรัม NIR เพื่อนำไปประมวลผลในการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพต่อไป [5]

### 2.3.2 หลักการทำงานของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

คือการใช้คลื่นแสงในช่วง NIR ส่องเข้าไปในตัวอย่างทำให้โมเลกุลของตัวอย่างดูดกลืน (absorb) พลังงานแล้วเกิดการสั่นสะเทือน (vibration) การตรวจวัดพลังงานทำได้หลายรูปแบบ เช่น แบบวัดการสะท้อน (reflectance) แบบวัดการส่องผ่าน (transmittance) ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การกระทำของคลื่นแสงกับสารต่างๆ

ซึ่งสเปกตรัมในช่วงคลื่น NIR ที่ได้จะถูกนำมาประมวลผลและหาความสัมพันธ์ทางสถิติกับข้อมูลของตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมีหรือวิธีอื่นๆ ที่ได้ค่ามาตรฐานจะได้สมการสอบเทียบมาตรฐาน (calibration equation) เพื่อใช้ทำนายค่าปัจจัยคุณภาพของของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดได้ทั้งเชิงปริมาณ (quantitative) และเชิงคุณภาพ (qualitative)

การใช้ NIR Spectroscopy สำหรับการทดสอบในเชิงปริมาณ สามารถทดสอบตัวอย่างได้ข้อมูลหลายค่าในเวลาเดียวกัน เช่น ส่วนประกอบทางเคมีโดยประมาณ (proximate analysis) เช่น ค่าไอโอดีน ค่ากรดไขมันอิสระ ค่าฟิเอช ปริมาณอะไมเลส เป็นต้น โดยมีกฎของการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กฎ [6] คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) มีใจความว่า “เมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่นเดี่ยว (Monochromatic light) ผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วน ของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้น ดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูก แต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน”
2. กฎของเบียร์ (Beer's law) มีใจความว่า “เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดี่ยวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของ ตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น”

### 2.3.3 หลักการของ Fourier Transform Infrared Spectroscopy

คือการวิเคราะห์ จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ทำให้เกิดช่วงกลาง (Middle infrared region) ช่วงความยาวคลื่น 2.5 - 50  $\mu\text{m}$ , ช่วงเลขคลื่น 4000 - 400  $\text{cm}^{-1}$  เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (nondestructive) คือไม่มีการเปลี่ยนแปลง คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ของตัวอย่างหลังการวัด นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่สะดวก ไม่ยุ่งยาก ใช้เวลาในการวัดสั้น และมีความปลอดภัยสูงสามารถวัดตัวอย่างได้ทั้งในรูปของแข็งและของเหลว [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.4 หลักการทำงานของเครื่อง Bomb Calorimeter

หลักการทำงานของ Bomb Calorimeter จะใช้หลักการของ Direct Calorimetry ซึ่งเป็นการวัดปริมาณความร้อนที่ถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อมีการเผาไหม้ชีวมวลอย่างสมบูรณ์ ชีวมวลถูกบรรจุใน Chamber และนำไปอัดด้วยก๊าซออกซิเจนภายใต้ความดันสูง (high pressure) จากนั้นให้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านฟิวส์ (fuse) ทำให้เกิดการจุดระเบิดเชื้อเพลิง ซึ่งได้แก่ชีวมวลและแก๊สออกซิเจน (biomass-oxygen mixture) เนื่องจาก Calorimeter จะถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนถ่ายเทออกไปสู่สภาวะแวดล้อม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำทำให้ทราบปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยจากชีวมวล [8]

การคำนวณหาปริมาณความร้อนโดยใช้สูตร

$$Q = mC_p\Delta t$$

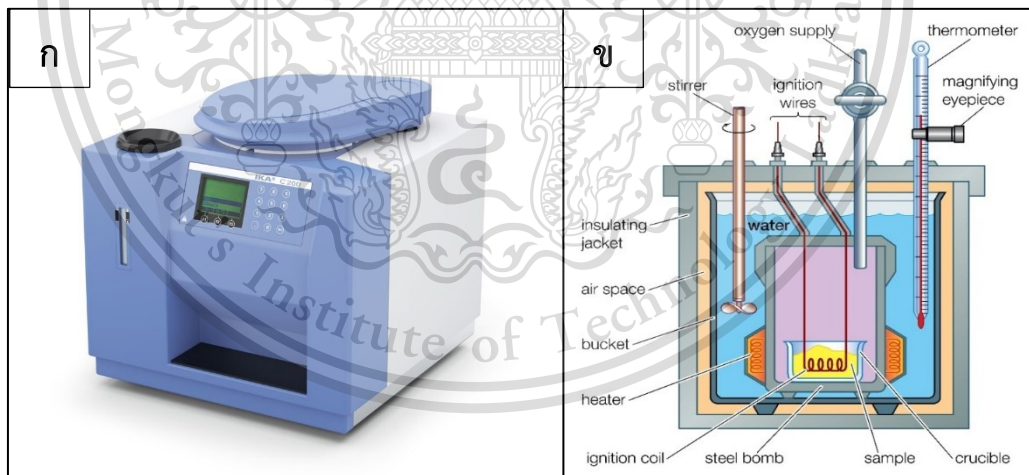
$Q$  คือ ปริมาณความร้อน (kJ)

$m$  คือ มวลของสาร (kg)

$C_p$  คือ ความร้อนจำเพาะ (kJ/kg K)

$\Delta t$  คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (K)

เนื่องจากการคำนวณปริมาณความร้อนนี้เป็นปริมาณความร้อนที่น้ำได้รับและค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่าเป็น 4.187 kJ/kg K



รูปที่ 2.2 เครื่อง BOMB CALORIMETER รุ่น IKA C-200 (ก), โครงสร้างภายในของเครื่อง BOMB CALORIMETER (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.5 ค่าความร้อน (Heating Value)

ค่าความร้อน (HV) เป็นปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของชีวมวลแต่ละชนิดอย่างสมบูรณ์โดยทั่วไปค่าความร้อนจะแสดงในรูปของปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักหรือหนึ่งหน่วยปริมาตร

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีอยู่ 2 ค่า คือ ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value, HHV) เป็นค่าความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง bomb calorimeter ที่สภาวะมาตรฐานซึ่งรวมค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอเข้าไปด้วย และค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value, LHV) เป็นค่าความร้อนของการเผาไหม้ชีวมวลไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่ได้ควบแน่นเป็นของเหลวโดยความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวลบางส่วนจะถูกใช้ไปในการระเหยน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ให้อยู่ในสถานะไอน้ำ [9]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.6 หลักการทำงานของเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA)

Thermogravimetric analyzer (TGA) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ในการวิเคราะห์หองค์ประกอบเชิงปริมาณ (proximate analysis) ของชีวมวล สามารถตั้งโปรแกรมการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างชีวมวลได้ ค่าที่สามารถวิเคราะห์ได้จะประกอบด้วย ปริมาณความชื้น (Moisture content) ปริมาณไอระเหย (Volatile matter) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ของชีวมวล [10]

1. ปริมาณความชื้น (Moisture content : M) ในชีวมวลเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากในการนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงถ้าชีวมวลมีปริมาณความชื้นมากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงเป็นอย่างมากดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในชีวมวลจึงมีความจำเป็นและสำคัญมาก
2. ปริมาณเถ้า (Ash : A) ในชีวมวลเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ถ้าชีวมวลมีปริมาณเถ้ามากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง
3. ปริมาณไอระเหย (Volatile matter : VM) ในชีวมวลเป็นน้ำหนักที่หายไปหลังจากการให้ความร้อนแก่ชีวมวลภายใต้สภาวะที่กำหนด โดยไอระเหยจะเกิดขึ้นจากการกลั่นสลายด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส (Pyrolysis)
4. ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon : FC) เป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างชีวมวลหลังจากการให้ความร้อนแก่ชีวมวล ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน ปริมาณคาร์บอนคงตัวคำนวณได้จากผลต่าง ดังสมการต่อไปนี้

$$\%FC = 100 - (\%M + \%A + \%VM)$$



รูปที่ 2.3 เครื่อง THERMOGRAVIMETRIC ANALYZER (TGA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.7 การทำ Repeatability และ Reproducibility

Repeatability (ความสามารถในการทวนซ้ำ) มีนิยามคือ ความสามารถในการทวนซ้ำของเครื่องมือวัด ซึ่งแสดงถึงระดับความถูกต้องใกล้เคียงกันของผลการวัดที่ได้จากการวัดหลาย ๆ ครั้งในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน โดยการวัดทั้งหมดต้องอยู่ภายใต้วิธีการวัด ผู้ทำการวัด และสภาวะแวดล้อมเดียวกัน หรือการแสดงถึงความเที่ยงตรง (precision) ของเครื่องมือวัด

Reproducibility (ความสามารถในการทำซ้ำ) มีนิยามคือ ระดับความใกล้เคียงของค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด (instrument) ในเวลาที่แตกต่างกัน หรือค่าความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ โดยการวัดครั้งหนึ่ง ๆ สามารถเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขต่าง ๆ ได้ เช่น วิธีการวัด ผู้วัด รวมถึงสภาวะแวดล้อม ซึ่งค่า reproducibility เกี่ยวข้องกับค่าความเที่ยงตรง (precision) ของเครื่องมือวัด และแสดงความสัมพันธ์กับคุณลักษณะการเลื่อน (drift) ของเครื่องมือวัด

ซึ่งในการวิเคราะห์ค่า Repeatability และค่า Reproducibility ของเครื่อง Bomb calorimeter เป็นการวัดเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและความถูกต้องของกระบวนการใช้เครื่องมือของผู้ทำการทดลอง

โดยสามารถวัดได้จากค่า  $R_{\max}^2$  ค่าที่ได้จะมีค่าตั้งแต่ 0 - 1 โดยค่า  $R_{\max}^2$  ที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้ 1

$$R_{\max}^2 = \frac{SD_{\text{total}}^2 - SD_{\text{difference}}^2}{SD_{\text{total}}^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $SD_{\text{total}}^2$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างทั้งหมด

$SD_{\text{difference}}^2$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่าง

การวิเคราะห์ค่า Repeatability และ Reproducibility ของเครื่อง NIRs ค่า Repeatability จะเป็นการวัดเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องแม่นยำ และค่า Reproducibility เป็นการวัดเปอร์เซ็นต์ความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ

ซึ่งสามารถแสดงได้จากค่า  $SD_{\text{Repeatability}}$  และ  $SD_{\text{Reproducibility}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.8 ค่าสถิติที่ใช้ในการพิจารณาในการสร้างสมการ

### 2.8.1 สัมประสิทธิ์การพิจารณา

แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวนในข้อมูล Y ค่าของ  $R^2$  จะเป็นบวกเสมอ เช่น ถ้า  $R = 0.97$  แล้ว  $R^2 = 0.941$  หมายความว่า 94.1% ของความแปรปรวนในข้อมูล X และ 5.9% ของความแปรปรวนในข้อมูล X เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่น เช่น การเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดลองอ้างอิง และอื่น ๆ ค่า  $R^2$  เป็นบวกเสมอโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ R ในทางปฏิบัติ  $R^2$  ให้ข้อมูลมากกว่า R และใช้กันมากกว่า R

$$R^2 = \left[ 1 - \frac{\sum_1^n (Y_i^{meas} - Y_i^{pred})^2}{\sum_1^n (Y_i^{meas} - \bar{Y})^2} \right] \times 10 \quad (2.5)$$

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

ตารางที่ 2.1 การแปลความหมายของค่า R และ  $R^2$  (ดัดแปลงจาก WILLIAMS. 2007)

R (%)	$R^2$ (%)	ความหมาย
ถึง +/-50	ถึง 25	ไม่สามารถใช้ใน NIR calibration
+/-51-70	26-49	เป็นความสัมพันธ์ที่ไม่ดี ควรหาเหตุผล
+/-71-80	50-64	เหมาะสม สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) อย่างหยาบ ๆ
+/-81-90	66-81	เหมาะสม สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบ ๆ
+/-91-95	83-90	ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย
+/-96-98	92-96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
+/-99+	98+	ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.8.2 RPD (Ratio of Prediction to Deviation)

เป็นส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) กับอัตราส่วนของค่าความผิดพลาดมาตรฐานการทำนาย (SEP) ของข้อมูลของค่าอ้างอิงของชุดทำนายมีสูตรดังสมการ 2.11 ค่า SEP ควรต่ำกว่า SD มาก ๆ ซึ่งอัตราส่วนควรเท่ากับ 5 หรือมากกว่า บางกรณีตัวอย่างมีความสม่ำเสมอมาก ค่า SD จึงไม่สูง ซึ่ง RPD อาจจะไม่สูง ดังนั้น RPD เท่ากับ 2.5-3.0 ก็อาจแสดงถึงการวิเคราะห์ที่แม่นยำถ้า SD มีค่าเพียง 0.4-0.5

$$RPD = \frac{SD_{\text{validation}}}{SEP} \quad (2.6)$$

### 2.8.3 RMSECV (Root Mean Squared Error of Cross Validation)

Cross-validation สามารถใช้ตัวอย่างชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อการทำนาย พิสูจน์แบบจำลอง (Validation) สิ่งนี้ทำโดยนำตัวอย่างออกหนึ่งตัวอย่างหรือกลุ่มของหลายตัวอย่างจากชุดสร้างแบบจำลองและสร้างแบบจำลองด้วยตัวอย่างที่เหลืออยู่ แล้วทำนายตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไปและบันทึกค่าความผิดพลาด แล้วนำตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไปนั้นกลับมาแล้วนำตัวอย่างอื่นออกไปละทำซ้ำกระบวนการจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองและทำนาย จะไม่มีตัวอย่างที่ถูกทำนายถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองซึ่งได้ใช้ในการทำนาย ถ้าเอาออกเพียงทีละ 1 ตัวอย่าง จะเรียกว่า “Full” หรือ “One-out” cross-validation ถ้านำชุดตัวอย่าง (จำนวนหลายตัวอย่าง) ออกจะเรียกว่า “Segmented” cross-validation ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าที่ถูกทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุดสร้างแบบจำลอง คือ RMSECV วิธีพิสูจน์นี้เหมาะที่จะใช้กับข้อมูลที่มีจำนวนตัวอย่างน้อย ๆ เช่น น้อยกว่า 50 ตัวอย่าง

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

### 2.8.4 RMSEP (Root Mean Square Error of Prediction)

เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพในการทำนายแบบจำลองของการสร้างแบบจำลองด้วยวิธี Test set validation

$$RMSEP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (Y_i^{\text{meas}} - Y_i^{\text{pred}})^2} \quad (2.8)$$

### 2.8.5 RMSEE (Root Mean Square Error of Estimation)

เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพในการสร้างแบบจำลอง (Calibration) ของทั้งวิธี Full cross validation และวิธีแบบ Test set validation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.8.6 ความผิดพลาด (Bias)

เมื่อทำนายค่าตัวแปรที่ต้องการของข้อมูลในชุดตัวอย่างทดสอบแบบจำลอง (Validation set) ค่า Bias หมายถึงความแตกต่างระหว่างค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงและค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์ อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและเป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลอง (Calibration model) ในโลกความเป็นจริงของทางการค้าและอุตสาหกรรม Bias เป็นหนึ่งในสิ่งที่สำคัญมาก ในทางสถิติ Bias สามารถเกิดขึ้นได้แม้เมื่อค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และ SEP ที่แสดงว่าแบบจำลอง นั้นดีเยี่ยม

### 2.8.7 RER (Ratio of the SEP to the range)

อัตราส่วนของช่วงกว้างของข้อมูลอ้างอิงของชุดทำนาย ต่อ SEP ค่า RER ควรจะสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้แสดงประสิทธิภาพดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การอธิบายผลของค่า RPD และ RER (WILLIAMS. 2007)

RPD	RER	ความหมาย	การประยุกต์ใช้
0.0-2.3	ถึง 6	ไม่ดีเลย	ไม่แนะนำ
2.4-3.0	7-12	ไม่ดี	ใช้คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) แบบหยาบ ๆ
3.1-4.9	13-20	พอใช้	ใช้คัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) ได้
5.0-6.4	21-30	ดี	ใช้ควบคุมคุณภาพได้
6.5-8.0	31-40	ดีมาก	ใช้ควบคุมกระบวนการได้
8.1+	41+	ดีเยี่ยม	ได้ทุกการประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.9.1 Fast analysis of high heating value and elemental compositions of sorghum biomass using near-infrared spectroscopy

Near-infrared spectroscopy (NIR) เป็นเทคโนโลยีการตรวจจับที่มีประสิทธิภาพและต้นทุนต่ำ ซึ่งมีศักยภาพเทียบเท่ากับวิธีการศึกษาคุณลักษณะชีวมวลที่ถูกต้อง การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลอง NIR ในร่วมกับ chemometrics เพื่อกำหนดค่าความร้อนสูง (HHV) และองค์ประกอบองค์ประกอบของชีวมวลข้าวฟ่าง การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด (PLS) และการถดถอยองค์ประกอบหลักการ (PCR) คือใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการสอบเทียบที่มีพื้นที่ความยาวคลื่นเต็มและลดลงโดยทั่วไปแล้วจากพื้นที่ความยาวคลื่นที่ลดลงทำให้การสอบเทียบและการทำนายถูกต้องแม่นยำมากขึ้นแบบจำลองเพื่อทำนาย HHV ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และออกซิเจนของชีวมวลข้าวฟ่างได้รับการพัฒนาอย่างดีค่าคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และออกซิเจนถูกทำนายด้วย  $R^2$  เท่ากับ 0.96, 0.96, 0.87, 0.86, 0.84 และ 0.83 สำหรับชุดตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง ตามลำดับ HHV และแบบจำลองปริมาณคาร์บอนมีความแม่นยำในการทำนายที่ยอดเยี่ยมในขณะที่แบบจำลองไฮโดรเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และออกซิเจนสามารถทำนายได้น่าเชื่อถือ แบบจำลองเหล่านี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่ดีเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างพันธะเคมีและ HHV และองค์ประกอบของชีวมวลข้าวฟ่าง การทราบค่า HHV และองค์ประกอบธาตุทำได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำในราคาประหยัด (จาก 200 เป็น 1 USD) และลดเวลา (จาก 100 เป็น 1 นาที) [11]

### 2.9.2 Improvement of proximate data and calorific value assessment of bamboo through near infrared wood chips acquisition

ในการศึกษาก่อนหน้านี้ได้พัฒนาแบบจำลอง NIR โดยใช้สเปกตรัมของ ตัวอย่างไม้ไผ่ แม้ว่ารายงานก่อนหน้านี้เกี่ยวกับไม้ไผ่จะอธิบายถึงประสิทธิภาพที่ดี การดำเนินงานในโรงไฟฟ้าพบว่าไม้สะตอกเนื่องจากต้นทุนการเตรียมการและแรงงานที่จำเป็นสำหรับการเตรียมตัวอย่างพื้นดินที่จำเป็น ดังนั้นการศึกษานี้จึงนำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดล NIR ที่พัฒนาโดยการสแกนเศษไม้ไผ่โดยตรงเพื่อพัฒนาแบบจำลองกับรุ่นก่อนหน้านี้ สำหรับตัวอย่างภาคพื้นดิน และจะมีการเน้นเป็นพิเศษในการเปรียบเทียบสเปกตรัมความสามารถในการทำซ้ำ แบบจำลองชิปไม้ไผ่ได้รับการพัฒนาโดยอาศัยการถดถอย PLS ด้วยโดยการเลือกตัวแปรวิธีการเพื่อให้ได้รูปแบบที่ดีที่สุด ปริมาณความชื้น (MC) และปริมาณเถ้า (A) โมเดลของเศษไม้ไผ่ที่พัฒนาแล้วสามารถนำไปใช้กับการประกันคุณภาพได้ สารระเหย (VM) และแบบจำลองคาร์บอนคงที่ (FC) สามารถใช้สำหรับการคาดคะเนโดยประมาณ ค่าความร้อนรวมและค่าความร้อนสุทธิ (GCV และ NCV) สามารถใช้กับแอปพลิเคชันส่วนใหญ่ได้ ค่ากำลังสองเฉลี่ย (RMS) ของสเปกตรัมที่เตรียมไว้ล่วงหน้าที่มีขนาดอนุภาคต่างกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลการศึกษาระบุว่าสามารถใช้แบบจำลองที่พัฒนาโดยใช้โปรโตคอล NIR สเปกโทรสโกปีกับเศษไม้สเปกตรัมเป็นเครื่องมือในการจำแนกประเภทและเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการประเมินคุณภาพพลังงานเศษไม้ไผ่ ขนาดอนุภาคของเศษไม้ไผ่ที่ใหญ่ส่งผลเสียต่อรูปแบบการทำนายอย่างไรก็ตามสามารถแก้ไขได้เทคนิคไม่ว่ากรณีใดก็ตามก่อนการประมวลผลสเปกตรัมทำให้ไม่จำเป็นต้องบดตัวอย่างวัตถุดิบ [12]

### 2.9.3 Experimental measurement of particle size effects on the self-heating ignition of biomass piles: Homogeneous samples of dust and pellets

ชีวมวลสามารถกลายเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่สำคัญสำหรับการผลิตไฟฟ้าทั่วโลกในอนาคต อย่างไรก็ตามกองชีวมวลมีแนวโน้มที่จะร้อนในตัวเองและอาจทำให้เกิดไฟไหม้ได้ เมื่อจัดเก็บและขนส่งชีวมวลมักอยู่ในรูปของเม็ดซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน แต่โดยเฉลี่ยประมาณ 7 มม. อย่างไรก็ตามเม็ดมักจะแตกตัวให้เล็กลงอนุภาคและกลายเป็นฝุ่นขนาด  $\mu\text{m}$  สำหรับการทำความร้อนด้วยตัวเองขนาดของอนุภาคเป็นที่รู้กันว่ามีผลสำคัญในชั้นบาง ๆ แต่หัวข้อนี้มีการศึกษาไม่ดีสำหรับกองชีวมวล งานนี้นำเสนอการศึกษาทดลองเกี่ยวกับการทำความร้อนในตัวเองพฤติกรรมการจุดระเบิดของชีวมวลข้าวสาลีที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน เราศึกษาตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกันเป็นครั้งแรกตั้งแต่ขนาดฝุ่นจนถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดตั้งแต่เส้นผ่านศูนย์กลาง 300  $\mu\text{m}$  ถึง 6.5 มม. การทดสอบเสร็จสิ้นในเตาอบไอโซเทอร์มอลเพื่อหาอุณหภูมิจุดระเบิดต่ำสุดตามปริมาตรตัวอย่าง ผลลัพธ์คือวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎี Frank-Kamenetskii สำหรับตัวอย่างชีวมวลที่เป็นเนื้อเดียวกันที่ศึกษาเราแสดงอนุภาคนั้นความแปรผันของเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ได้ทำให้พฤติกรรมจุดระเบิดด้วยความร้อนในตัวเองเปลี่ยนแปลงไปมาก งานปัจจุบันเป็นจำนวนผลกระทบขนาดต่อการจุดระเบิดชีวมวลและช่วยแก้ไขปัญหาด้านความปลอดภัยของชีวมวล [13]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 3 วิธีการทดลอง

### 3.1 กระบวนการทดลอง

1. การศึกษาเบื้องต้น
  - ทำการคัดเลือกพืชพลังงาน 3 ชนิด ได้แก่ สนประดิพัทธ์ ยางนา กระจับปี่
  - กระบวนการวิเคราะห์ค่าความร้อน
  - การทำงานของเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) , Near Infrared Spectrometer (NIR) และ Bomb Calorimeter
2. วางแผนการทดลอง
3. หาแหล่งปลูกของพืชพลังงานทั้ง 3 ชนิด
4. เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์
  - เครื่องวัดสเปกตรัม FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany)
  - เครื่องวัดค่าความร้อนสูง Bomb calorimeter (C200, IKA, Germany)
  - เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TG209F3 Tarsus, Netzsch, Germany)
  - ตู้อบไฟฟ้า รุ่น 30-1060
  - เครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 รุ่น JS1203C, NewclassicMF
  - เครื่องอัดเม็ด (Pellet press)
5. ขั้นตอนการทดลอง
  - นำพืชมาลดขนาดให้เหลือขนาดเล็ก
  - อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและตั้งที่อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส) เพื่อทำการสมดุลความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
  - นำพืชทั้ง 3 ชนิดที่ทำการลดขนาดมาทำการคัดขนาด 3 ขนาด ได้แก่ 1 มม. , 3 มม. และ 5 มม. ตามลำดับ
  - สแกนสเปกตรัมด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany)
  - นำชีวมวลที่ผ่านการสแกนไปอัดเม็ด
  - วิเคราะห์ค่าความร้อนสูงของพืชพลังงานโดยเครื่อง Bomb calorimeter (C200, IKA, Germany)
  - วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณของพืชพลังงานด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TG209F3 Tarsus, Netzsch, Germany)
6. สรุปผลการทดลองและเขียนรายงาน

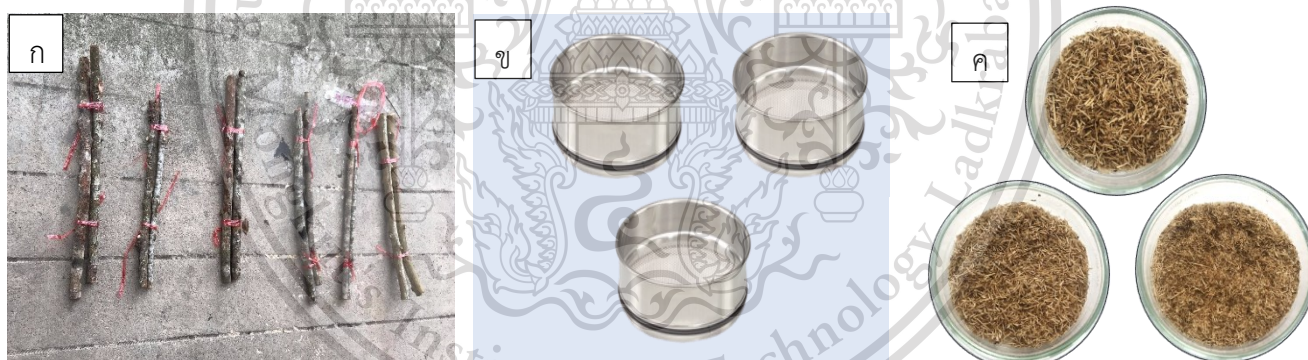
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง

ตัวอย่างพืชพลังงานทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง คือ สนประดิพัทธ์ ยางนา กระถินเทพา ซึ่งเป็นพืชพลังงานที่สามารถพบได้ในประเทศไทยทั่วทุกภูมิภาค โดยไม้สนประดิพัทธ์ ไม้ยางนา ไม้กระถินเทพาที่นำมาใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5–10 เซนติเมตร ความยาวแต่ละท่อนประมาณ 30 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.1(ก) หลังจากนั้นนำพืชตัวอย่างทั้งหมดมาลดขนาดด้วยเครื่องหั่นย่อยซากพืชปฏิฟังก์ซ์ เพื่อให้พืชตัวอย่างมีลักษณะเป็นเศษไม้แล้วนำพืชตัวอย่างที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงด้วยตู้อบไฟฟ้าและทำการสมดุลความชื้นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นของพืชตัวอย่าง หลังจากนั้นนำไปร่อนด้วยตระแกรงขนาด 40 mesh , 50 mesh และ 80 mesh ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.1(ข) จนได้พืชตัวอย่างที่มีขนาด 1 มิลลิเมตร , 3 มิลลิเมตรและ 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.1 (ค) หลังจากนั้นจะนำพืชตัวอย่างเก็บไว้ในถุงซิปปอยล์เพื่อเป็นการเก็บรักษาภาวะเริ่มต้นของตัวอย่าง และขั้นตอนการทดลองต่อไปคือการนำพืชไปสแกนด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งในการทดลองนี้ใช้พืชตัวอย่าง 3 ชนิด ชนิดละ 6 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 3 ขนาด หลังจากนั้นจะนำพืชตัวอย่างที่โดนลำแสงของคลื่นเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจากการสแกนไปอัดเม็ดชีวมวลขนาด 0.5 กรัม เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงของพืชพลังงานโดยเครื่อง Bomb Calorimeter และนำส่วนที่เหลือไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบเชิงปริมาณของพืชพลังงานด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA)



รูปที่ 3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง พืชตัวอย่างที่มีความยาวประมาณ 30 เซนติเมตร (ก) , ตระแกรงร่อน MESH NO.4 (ข) , พืชตัวอย่างที่มีขนาด 1 มิลลิเมตร 3 มิลลิเมตรและ 5 มิลลิเมตร(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

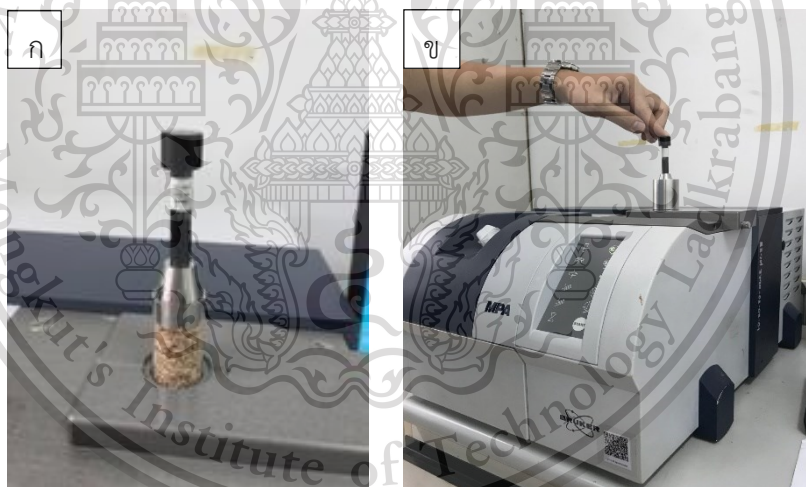
### 3.3 การดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง FT-NIR spectroscopy (MPA, Bruker, Germany)

ทำการทดลองโดยใช้พืชตัวอย่าง 3 ชนิด ชนิดละ 6 ตัวอย่างตัวอย่างละ 3 ขนาด

- อุปกรณ์
1. เครื่องวัดสเปกตรัม FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany)
  2. เครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 รุ่น JS1203C, NewclassicMF
  3. หลอดควอทซ์

วิธีการทดลอง

โดยเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลองทั้งหมด ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นการทดสอบกับไม้ยางนา ไม้กระถินเทศา และไม้สนประติพัทธ์ ซึ่งแต่ละตัวอย่างต้องทำการตวงให้ได้ปริมาตรตัวอย่างใน หลอดควอทซ์เท่ากัน โดยใช้ช้อนตวงตักพืชตัวอย่างแล้วเทลงในหลอดควอทซ์ จากนั้นนำมาสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ซึ่งเป็นการวัดแบบ Diffuse Reflectance ช่วงจำนวนคลื่นระหว่าง  $12500 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  (ความยาวคลื่น  $800 - 2500 \text{ nm}$ ) การสแกนซ้ำ 32 ครั้งต่อ 1 Spectrum จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการสแกนมาอัดให้เป็นเม็ดน้ำหนกประมาณ 0.5 กรัม และนำไปหาค่าความร้อนต่อไป



รูปที่ 3.2 การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR SPECTROMETER พืชตัวอย่างในถ้วยควอทซ์ (ก) , การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR SPECTROMETER (MPA, BRUKER, GERMANY) (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.4 การวัดค่าความร้อนสูงด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter (C200,IKA,Germany)

ทำการทดลองโดยใช้พืชตัวอย่างที่ผ่านการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ทั้ง 3 ชนิด ชนิดละ 3 ตัวอย่างตัวอย่างละ 3 ขนาด แล้วนำมาอัดเป็นเม็ดชีวมวล

- อุปกรณ์
1. เครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 รุ่น JS1203C, NewclassicMF
  2. เครื่องอัดเม็ด (Pellet press)
  3. เครื่องวัดค่าความร้อนสูง Bomb calorimeter (C200, IKA, Germany)

วิธีการทดลอง

นำตัวอย่างที่ผ่านการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ไปอัดให้เป็น Pellet โดยใช้เครื่องอัดเม็ดขนาด 0.5 กรัม หลังจากนั้นผูกด้วยฝ้าย (Cotton thread) ที่ตำแหน่งศูนย์กลางลวด หลังจากนั้นนำ Crucible วางบน Crucible holder แล้วนำเม็ดชีวมวลตัวอย่างวางใน Crucible โดยเม็ดชีวมวลจะต้องวางทับปลายฝ้ายทั้งสองฝั่ง ขั้นตอนนี้ควรระมัดระวังไม่ให้ฝ้ายโดนบริเวณขอบ Crucible ต่อมาวางฝาปิดให้อยู่ในตำแหน่งที่ต่ำ ๆ แล้วกดลงจนฝาแนบสนิท จากนั้นขันเกลียวให้แน่นด้วยมืออีกครั้ง เติมออกซิเจนภายใน Vessel โดยการเปิดวาล์วถังออกซิเจน ตั้ง Pressure gauge ไว้ที่ 30 bar วาง Vessel บนตำแหน่งเครื่องหมาย จากนั้นกดให้ Fill head อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของ Vessel ออกซิเจนจะทำการเติมเข้าไปภายใน Vessel ใช้เวลาประมาณ 30 วินาที แล้วทำการล็อคให้แนบสนิทด้วย Adaptor นำ Vessel วางลงในเครื่อง Bomb calorimeter โดยให้อยู่ระหว่างตำแหน่งทั้งสามของสับกเกลียวภายในเครื่อง ปิดฝาเครื่อง Bomb calorimeter หลังจากนั้นเติมน้ำคาร์เบตที่อุณหภูมิ  $22 \pm 3$  องศาเซลเซียสให้อยู่ในระดับที่กำหนด ใส่น้ำหนักตัวอย่างของเม็ดชีวมวลที่อยู่ในโหมบ Prepare แล้วกด Ok หน้าจอจะปรากฏข้อความ “Storage filled?” กด Continue (F1) จากนั้นจะปรากฏข้อความ “Close the cover” และข้อความ “Filling” จากนั้นรอประมาณ 15 นาที เครื่องจะแสดงค่าความร้อนที่ได้จากเม็ดชีวมวลในหน่วย J/g



รูปที่ 3.3 การวัดค่าความร้อนด้วยเครื่อง BOMB CALORIMETER ชั่งน้ำหนักชีวมวล (ก) , อัดเม็ดพืช  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า  
ตัวอย่างด้วยเครื่อง (ข) , เครื่อง BOMB CALORIMETER (ค)  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

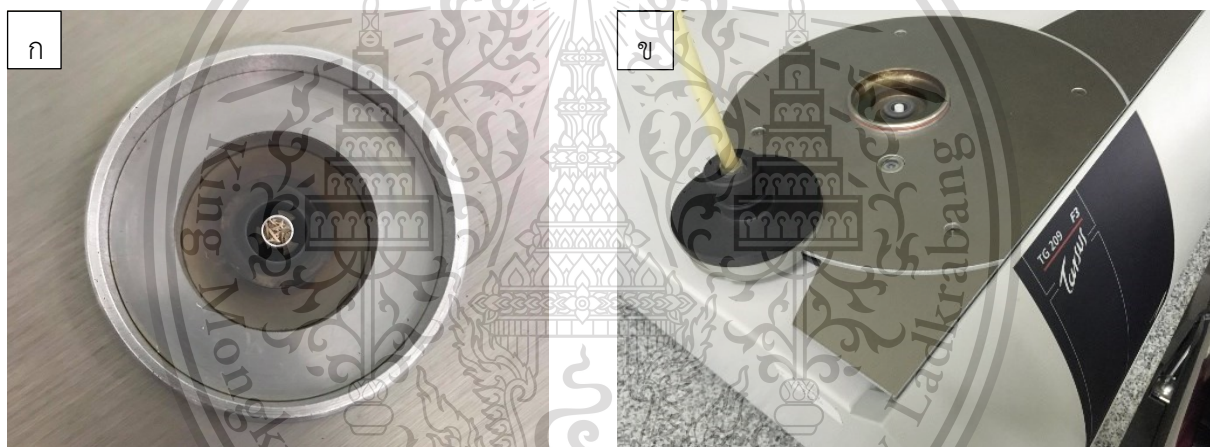
### 3.5 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA)

ทำการทดลองโดยใช้พืชตัวอย่างที่ผ่านการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ทั้ง 3 ชนิด เพื่อทำการทดลองหาค่าประกอบเชิงปริมาณของพืชพลังงาน

- อุปกรณ์
1. เครื่อง Thermogravimetric Analyzer(TG209F3 Tarsus, Netzsch, Germany)
  2. ถ้วย Crucible ชนิดอลูมินา

วิธีการทดลอง

นำตัวอย่างที่ผ่านการตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ที่ น้ำหนักรวมแล้วประมาณ 14-15 มิลลิกรัม ใส่ในถ้วย Crucible จากนั้นนำถ้วย Crucible วางลงบนแท่นเชื่อมกับเครื่องซึ่งน้ำหนักละเอียดภายในเครื่อง Thermogravimetric Analyzer แล้วทำการตั้งค่าการทำงาน จากนั้นกดเริ่มดำเนินการทดลอง



รูปที่ 3.4 การทดสอบสมรรถภาพการแยกสลายด้วยความร้อนด้วยเครื่อง THERMOGRAVIMETRIC ANALYZER การใส่ตัวอย่างลงถ้วย CRUCIBLE (ก) , การนำถ้วย CRUCIBLE วางลงบนแท่นที่เชื่อมกับเครื่องซึ่งน้ำหนักละเอียดภายในเครื่อง THERMOGRAVIMETRIC ANALYZER (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.6 การวัดค่าความร้อนต่ำ

ค่าความร้อนต่ำสามารถคำนวณได้จากการนำค่าความร้อนสูงที่ได้จากการทดลองหักลบด้วยค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{LHV} = \text{HHV} - \text{Latent} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\text{Latent} = m h_{fg}$

$m$  คือ น้ำหนักน้ำที่มีอยู่ในชีวมวล 1 g

$h_{fg}$  คือ ค่าเอนทัลปีของความดัน 30 bar มีค่าเท่ากับ 1,794.9 J/g

ตัวอย่างการคำนวณค่าความร้อนต่ำ

สมมติให้ค่าความร้อนสูง (HHV) เท่ากับ 18,000 J/g (บ่งบอกปริมาณความร้อนสูงต่อชีวมวล 1 g) และปริมาณความชื้นเริ่มต้นของพืชตัวอย่างเท่ากับ 8%db ของชีวมวลที่ใช้ทำ TGA 15 mg ต้องเปลี่ยนความชื้นฐานแห้งเป็นความชื้นฐานเปียกจะได้

$$\frac{8}{108} \times 100 = 7.4074\% \quad \text{ความชื้นฐานเปียก}$$

จากนั้นคำนวณหาน้ำในตัวอย่าง Bomb Calorimeter สมมติน้ำหนัก 0.5 g จะได้

$$0.5 \times \frac{7.4074}{100} = 0.037037$$

Latent ที่อยู่ใน Bomb Calorimeter น้ำหนัก 0.5 g จะได้

$$0.037037 \text{ g} \times 1794.9 \frac{\text{J}}{\text{g}} = 66.48 \text{ J}$$

Latent ที่อยู่ใน Bomb Calorimeter น้ำหนัก 1 g จะได้

$$1 \text{ g} \times \frac{66.48 \text{ J}}{0.5 \text{ g}} = 132.96 \text{ J}$$

ดังนั้น  $\text{HHV} = 18,000 \text{ J/g}$        $\text{Latent} = 132.96 \text{ J/g}$

$$\text{LHV} = 18,000 - 132.96 = 17867.04 \text{ J/g}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 3.7.1 การวิเคราะห์ค่า Repeatability และ Reproducibility

การวิเคราะห์ค่า Repeatability และ Reproducibility ทำเพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องและความแม่นยำ สำหรับเครื่อง Bomb calorimeter ค่า Repeatability จะเป็นการวัดเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของเครื่องมือ ค่า Reproducibility จะเป็นการวัดเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของกระบวนการใช้เครื่องมือของผู้ทำการทดลอง

ซึ่งสามารถแสดงได้จากค่า  $R_{\max}^2$  ค่าที่ได้จะมีค่าตั้งแต่ 0 - 1 โดยค่า  $R_{\max}^2$  ที่ดีควรมีค่าเข้าใกล้ 1 คำนวณได้จากสูตรดังสมการที่ 3.2

$$R_{\max}^2 = \frac{SD_{\text{total}}^2 - SD_{\text{difference}}^2}{SD_{\text{total}}^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $SD_{\text{total}}^2$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างทั้งหมด  
 $SD_{\text{difference}}^2$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่าง

การวิเคราะห์ค่า Repeatability และ Reproducibility ของเครื่อง NIRs ค่า Repeatability จะเป็นการวัดเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องแม่นยำ และค่า Reproducibility เป็นการวัดเปอร์เซ็นต์ความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ

ซึ่งสามารถแสดงได้จากค่า  $SD_{\text{Repeatability}}$  และ  $SD_{\text{Reproducibility}}$

#### 3.7.2 การวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัม

การวิเคราะห์สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) จากค่าการดูดซับคลื่นในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 800-2500 nm ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ของพีซพลังงานทั้ง 3 ชนิด 3 ขนาด ซึ่งจะวิเคราะห์จากแถบการดูดซับคลื่นปรากฏในสเปกตรัม โดยพิจารณาให้สอดคล้องกับองค์ประกอบที่มีในพีซพลังงาน

#### 3.7.3 การสร้างสมการในการทำนาย

การสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูงจากอนุภาคชีวมวลขนาด 1 มม. 3 มม. 5 มม. ทำโดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นโดยวิธี Min-max normalization / First derivative และสเปกตรัมที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นกับค่าความร้อนสูงด้วยวิธี Partial least squares regression (PLS) และโปรแกรม OPUS version 7.0.129 ทำการพิสูจน์แบบจำลองโดยวิธี Full cross validation และการสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูงจากอนุภาคชีวมวลรวมทุกขนาดทำโดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นโดยวิธี Second derivative และ Min-max normalization กับค่าความร้อนสูงด้วยวิธี Partial least squares regression (PLS) และโปรแกรม OPUS version 7.0.129 ทำการพิสูจน์แบบจำลองโดยวิธี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นใด  
 Test set validation เมื่อได้แบบจำลองจะคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่าความไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

คลาดเคลื่อนจากการทำนายของการพิสูจน์แบบไขว้ (RMSECV) และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (RMSEP) ที่ต่ำที่สุด จากนั้นจะบันทึกค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination;  $R^2$ ) ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของการพิสูจน์แบบไขว้ (Root mean squared error of cross validation; RMSECV) ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (Root mean squared error of prediction; RMSEP) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias) และอัตราส่วนระหว่างค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of prediction to deviation; RPD) และแสดงค่า Regression coefficient เพื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของช่วงความยาวคลื่นใดที่มีผลต่อโมเดล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4 ผลการทดลอง

### 4.1 ปริมาณความชื้น

ผลการหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยของพืช 3 ชนิด ได้แก่ กระจินเทพา สนประดิพัทธ์ ยางนา ดังตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความชื้นของพืช

Moisture Content (%db)		
Samples	Average	SD
กระจินเทพา	4.4875	1.4799
สนประดิพัทธ์	2.6231	0.5055
ยางนา	3.7751	0.4254

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 4.2 ผลการทำ Repeatability และ Reproducibility ของเครื่อง Bomb Calorimeter

ผลการทำ Repeatability และ Reproducibility ของเครื่อง Bomb calorimeter ของพืช พลังงานทั้ง 3 ชนิด แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า REPEATABILITY และ REPRODUCIBILITY ของเครื่อง BOMB CALORIMETER

Sample	Repeatability			Reproducibility		
	SD Total	SD difference	R <sup>2</sup> max	SD Total	SD difference	R <sup>2</sup> max
Acacia	292.23	40.08	0.9812	383.44	40.08	0.9918
Pine	95.64	26.18	0.9351	67.29	20.23	0.9096
Yang Na	164.51	43.23	0.9309	88.20	15.39	0.9384

จากตารางที่ 4.2 เป็นผลการทำ Repeatability และ Reproducibility ของเครื่อง Bomb calorimeter เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของเครื่องมือที่ใช้ทดลองและความถูกต้องของกระบวนการใช้เครื่องมือของผู้ทำการทดลอง โดยวิเคราะห์ผลได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทำการทดลองของไม้ทั้ง 3 ชนิด ซึ่งวัดความแม่นยำและความถูกต้องได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่าง จะเห็นได้ว่า Repeatability และ Reproducibility มีค่ามากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า เครื่อง Bomb calorimeter มีความแม่นยำสูงและมีความถูกต้องของกระบวนการใช้เครื่องมือ

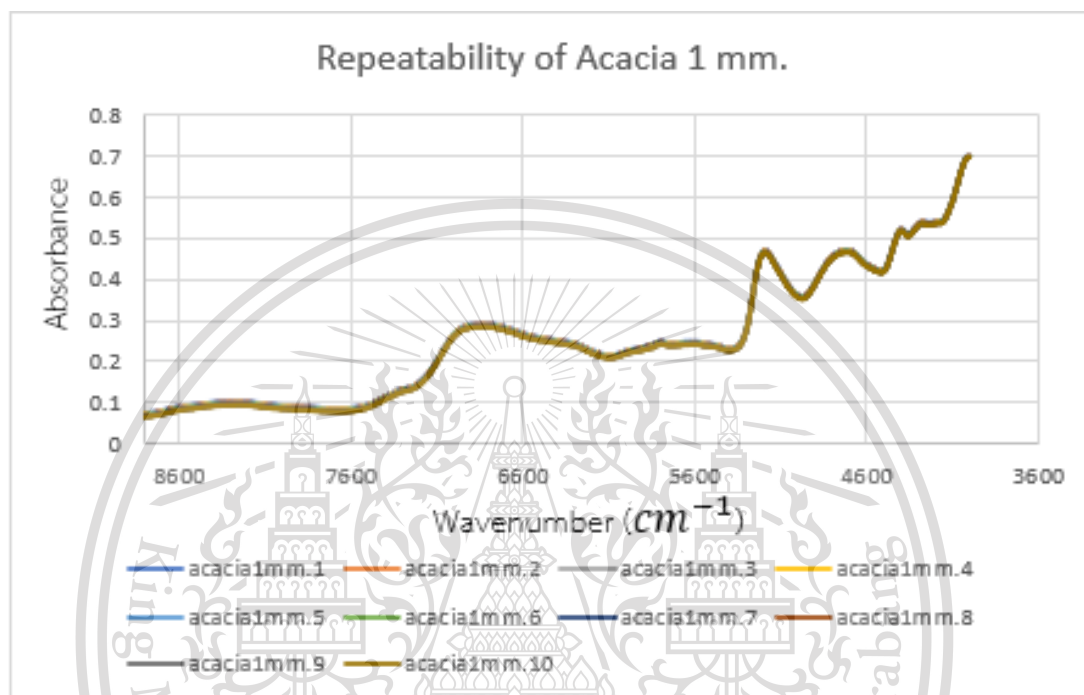
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 4.3 ผลการทำ Repeatability และ Reproducibility ของเครื่อง Near Infrared Spectrometer

#### 4.3.1 การทำ Repeatability ของเครื่อง NIRs



รูปที่ 4.1 REPEATABILITY ของเครื่อง NIRS โดยสแกนกระถินเทพาขนาด 1 มม.

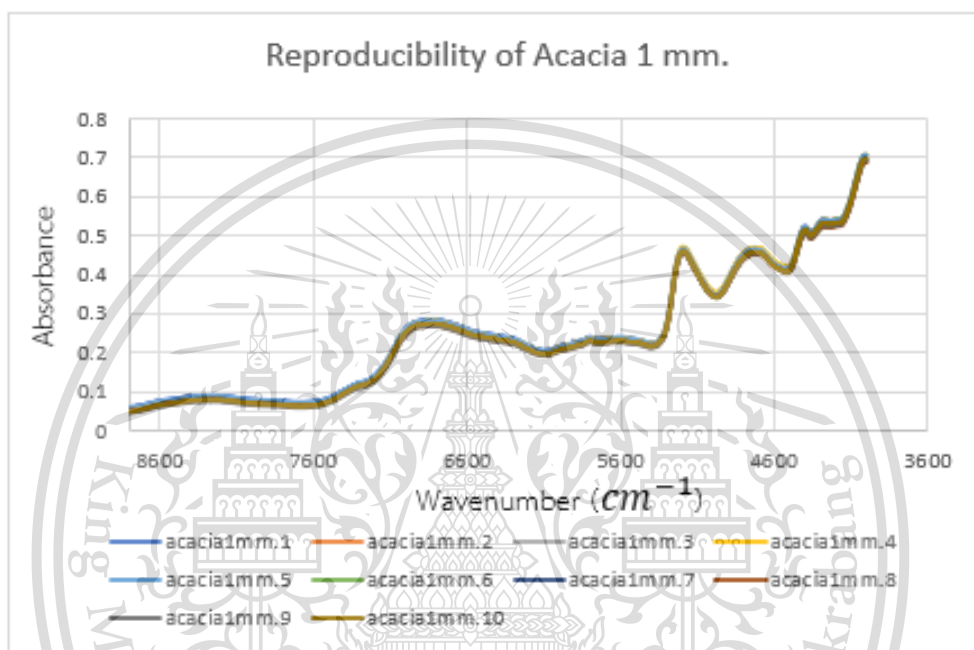
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.3.2 การทำ Reproducibility ของเครื่อง NIRs

ผลการทำ Reproducibility ของเครื่อง NIRs เพื่อตรวจวัดเปอร์เซ็นต์ความเป็นเนื้อเดียวของวัสดุ โดยวิเคราะห์ผลได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพืชแต่ละชนิดและแต่ละขนาดน้อยกว่า 3.8 % แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่นำมาทดลองค่อนข้างมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ดังตัวอย่างรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.2 REPRODUCIBILITY ของเครื่อง NIRS โดยสแกนกระถินเทพาขนาด 1 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า  $SD_{\text{Repeatability}}$  และ  $SD_{\text{Reproducibility}}$  ของเครื่อง Near Infrared Spectrometer

	$SD_{\text{Repeatability}}$					$SD_{\text{Reproducibility}}$				
Wavenumber ( $\text{cm}^{-1}$ )	6900	5180	4740	4258	4003	6904	5184	4744	4258	4007
SD Absorbance Acacia	0.0003	0.0006	0.0003	0.0003	0.0006	0.0057	0.0061	0.0064	0.0061	0.0070
% Difference	< 1 %	< 1 %	< 1 %	< 1 %	< 1 %	1.9 %	1.3 %	1.3 %	1.1 %	1 %
Wavenumber ( $\text{cm}^{-1}$ )	6847	5172	4690	4254	4015	6846	5176	4694	4258	4019
SD Absorbance Pine	0.0020	0.0019	0.0017	0.0017	0.0016	0.0066	0.0067	0.0077	0.0080	0.0108
% Difference	< 1 %	< 1 %	< 1 %	< 1 %	< 1 %	2.0 %	1.3 %	1.5 %	1.3 %	1.4 %
Wavenumber ( $\text{cm}^{-1}$ )	6858	5180	4717	4266	4026	6861	5184	4721	4269	4030
SD Absorbance Yang Na	0.0005	0.0006	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0006	0.0005
% Difference	< 1 %	< 1 %	< 1 %	< 1 %	< 1 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.1 %	0.2 %

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

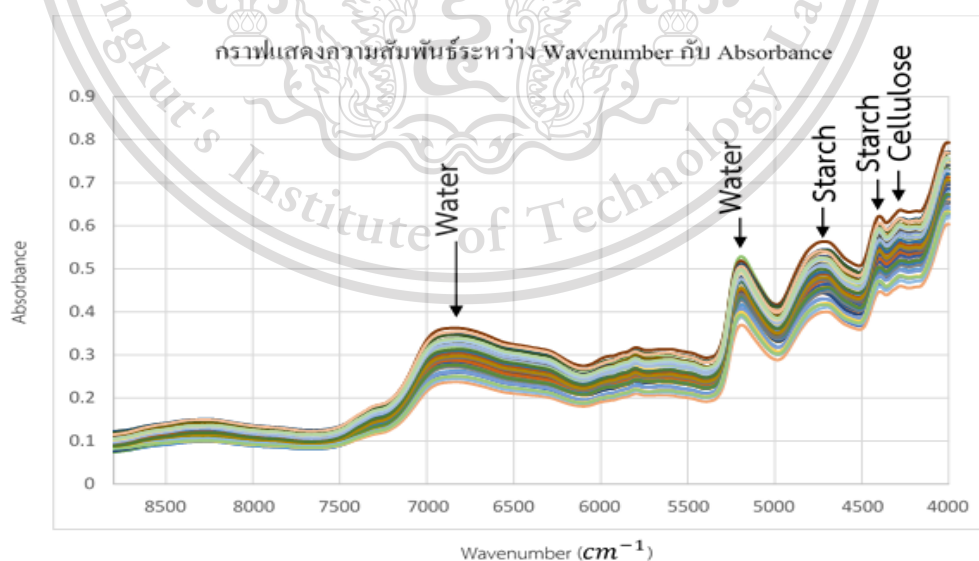
#### 4.4 ผลค่าความร้อนสูง

ผลการหาค่าความร้อนสูงเฉลี่ยของพืชพลังงานทั้ง 3 ชนิด แสดงดังตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความร้อนสูงของพืชพลังงานโดยเครื่อง BOMB CALORIMETER

ค่าความร้อนสูง (J/g)		
ชนิด	ค่าเฉลี่ย	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
กระถินเทพา	18158.7222	359.7373
สนประดิพัทธ์	17945.8611	237.0984
ยางนา	17643.7500	316.2732

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของพืชพลังงานโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของพืชพลังงานทั้ง 3 ชนิด ด้วยเครื่อง FT-NIR (MPA, Bruker, Germany) ที่ Wavenumber ระหว่าง  $8800 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  ( $1136.36 - 2500 \text{ nm}$ ) แสดงดังรูปที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดซับคลื่นของพืชพลังงานทั้ง 3 ชนิด พบว่าพืชที่  $4262 \text{ cm}^{-1}$  ( $2346 \text{ nm}$ ) มีการดูดซับคลื่นของ Cellulose, พืชที่  $4304 \text{ cm}^{-1}$  ( $2323 \text{ nm}$ ) มีการดูดซับคลื่นของ Starch, พืชที่  $4698 \text{ cm}^{-1}$  ( $2128 \text{ nm}$ ) มีการดูดซับคลื่นของ Amino Acid, พืชที่  $5191 \text{ cm}^{-1}$  ( $1926 \text{ nm}$ ) มีการดูดซับ Water, พืชที่  $6815 \text{ cm}^{-1}$  ( $1467 \text{ nm}$ ) มีการดูดซับ Water



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 4.3 สเปกตรัมการดูดซับคลื่นของพืชพลังงานทั้ง 3 ชนิด 54 ตัวอย่าง ระเบียบขั้นตอนการดำเนินงาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.6 ผลการทำนายค่าความร้อนด้วยวิธี Partial Least Squares Regression

ค่าทางสถิติของผลการสร้างสมการทำนายค่าความสัมพันธ์ค่าความร้อนสูงของพืชพลังงานจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยใช้วิธี Partial Least Squares Regression ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.4

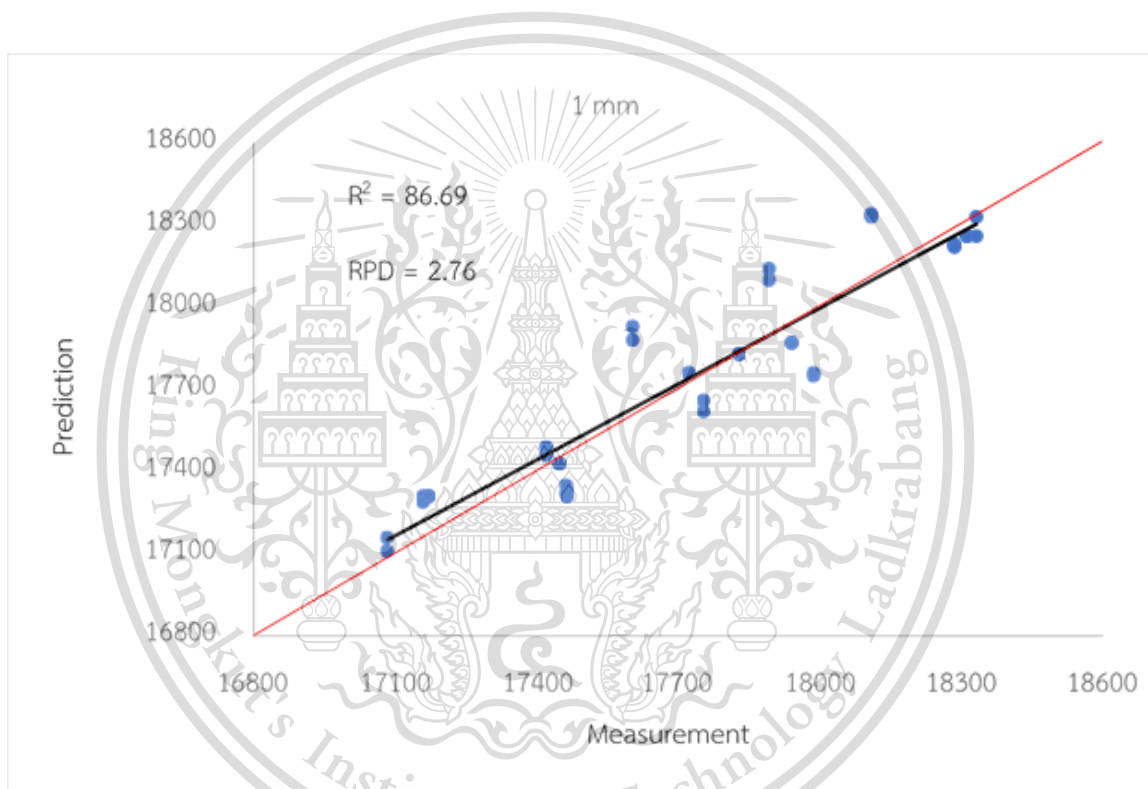
ตารางที่ 4.5 สมการทำนายค่าความร้อนสูงที่สร้างโดยวิธี PARTIAL LEAST SQUARES REGRESSION (PLS) ของพืชพลังงาน

Model	Validation	Pre-Processing	Rank	Calibration			Validation			
				R <sup>2</sup>	RMSEE	RPD	R <sup>2</sup>	RMSECV	RPD	Bias
1 mm. sample	Full Cross Validation	No spectral data preprocessing	6	96.11	85	5.07	86.69	141	2.76	-17.8
3 mm. sample	Full Cross Validation	Min-Max normalization	5	94.13	89	4.13	80.87	147	2.29	-1.91
5 mm. sample	Full Cross Validation	First derivative	9	99.61	22	15.9	75.83	147	2.04	-10
All sample	Full Cross Validation	Second derivative	9	94.97	87.9	4.46	76.27	182	2.05	1.7
All sample	Test Set Validation	Min-Max normalization	5	70.05	197	1.83	82.22	182	2.42	-35.1

R<sup>2</sup> = The coefficient of determination, RMSEE = Root mean square error of estimation, RMSECV = Root mean square error of cross validation, RMSEP = Root mean square error of prediction (test set validation), RPD = Ratio of prediction to deviation, Bias = Mean value of deviation

#### 4.7 ผลการสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4 ผลการทำนายค่าความร้อนสูงของไม้ขนาด 1 มม. โดยใช้ช่วงค่าความร้อนสูง 17,084 – 18,330 J/g เปรียบเทียบกับค่าที่วัดแบบวิธีมาตรฐานโดยทดลองสมการด้วยวิธี Full cross validation โดยไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 86.69 อยู่ในเกณฑ์ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย ซึ่งอ้างอิงจากเกณฑ์ของ Williams, 2007, ค่า RMSECV (Root Mean Squared Error of Cross Validation) เท่ากับ 141 J/g, Bias เท่ากับ -17.8 J/g และค่า RPD (Ratio of Prediction to Deviation) เท่ากับ 2.76 แสดงดังรูปที่ 4.4



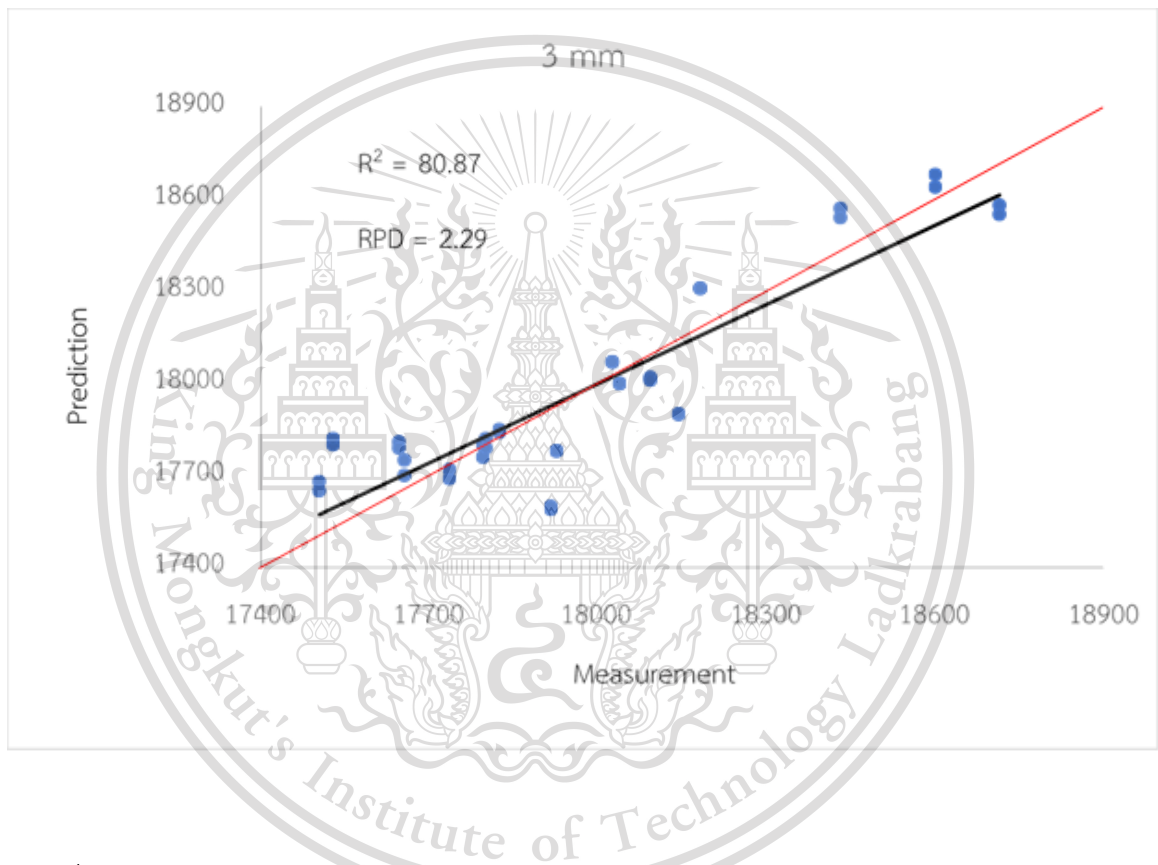
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงข้อมูลระหว่างข้อมูลอ้างอิง (X) กับข้อมูลทำนาย (Y) ของค่าความร้อนสูงของพืชพลังงานขนาด 1 มม. ที่ทำการทดสอบด้วยวิธี FULL CROSS VALIDATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลการทำนายค่าความร้อนสูงของไม้ขนาด 3 มม. โดยใช้ช่วงค่าความร้อนสูง 17,504 – 18,716 J/g เปรียบเทียบกับค่าที่วัดแบบวิธีมาตรฐานโดยทดลองสมการด้วยวิธี Full cross validation โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ Min-Max normalization มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 80.87 อยู่ในเกณฑ์เหมาะสม สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และประมาณค่าแบบหยาบๆ ซึ่งอ้างอิงจากเกณฑ์ของ Williams, 2007, ค่า RMSECV (Root Mean Squared Error of Cross Validation) เท่ากับ 147 J/g, Bias เท่ากับ -1.91 J/g และค่า RPD (Ratio of Prediction to Deviation) เท่ากับ 2.29 แสดงดังรูปที่ 4.5



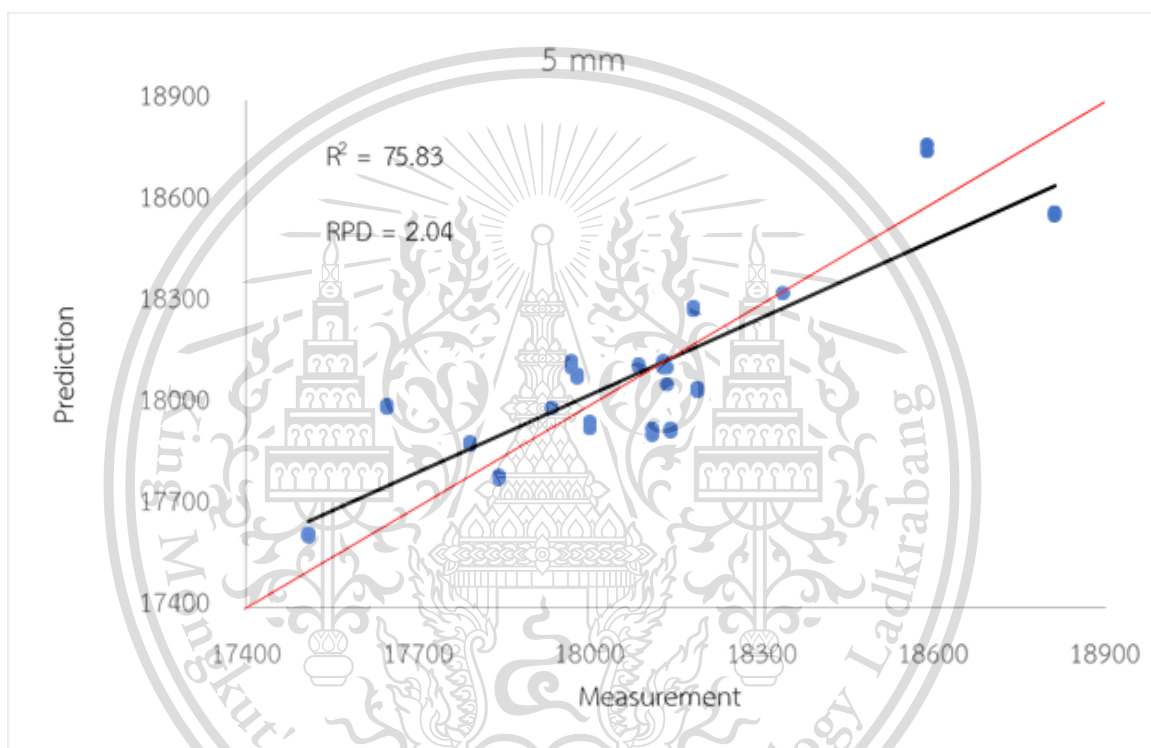
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงข้อมูลระหว่างข้อมูลอ้างอิง (X) กับข้อมูลทำนาย (Y) ของค่าความร้อนสูงของพีชพลังงานขนาด 3 มม. ที่ทำการทดสอบด้วยวิธี FULL CROSS VALIDATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลการทำนายค่าความร้อนสูงของไม้ขนาด 5 มม. โดยใช้ช่วงค่าความร้อนสูง 17,509 – 18,813 J/g เปรียบเทียบกับค่าที่วัดแบบวิธีมาตรฐานโดยทดลองสมการด้วยวิธี Full cross validation โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ First Derivative มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 75.83 อยู่ในเกณฑ์เหมาะสม สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และประมาณค่าแบบหยาบๆ ซึ่งอ้างอิงจากเกณฑ์ของ Williams, 2007, ค่า RMSECV (Root Mean Squared Error of Cross Validation) เท่ากับ 147 J/g, Bias เท่ากับ -10.00 J/g และค่า RPD (Ratio of Prediction to Deviation) เท่ากับ 2.04 แสดงดังรูปที่ 4.6



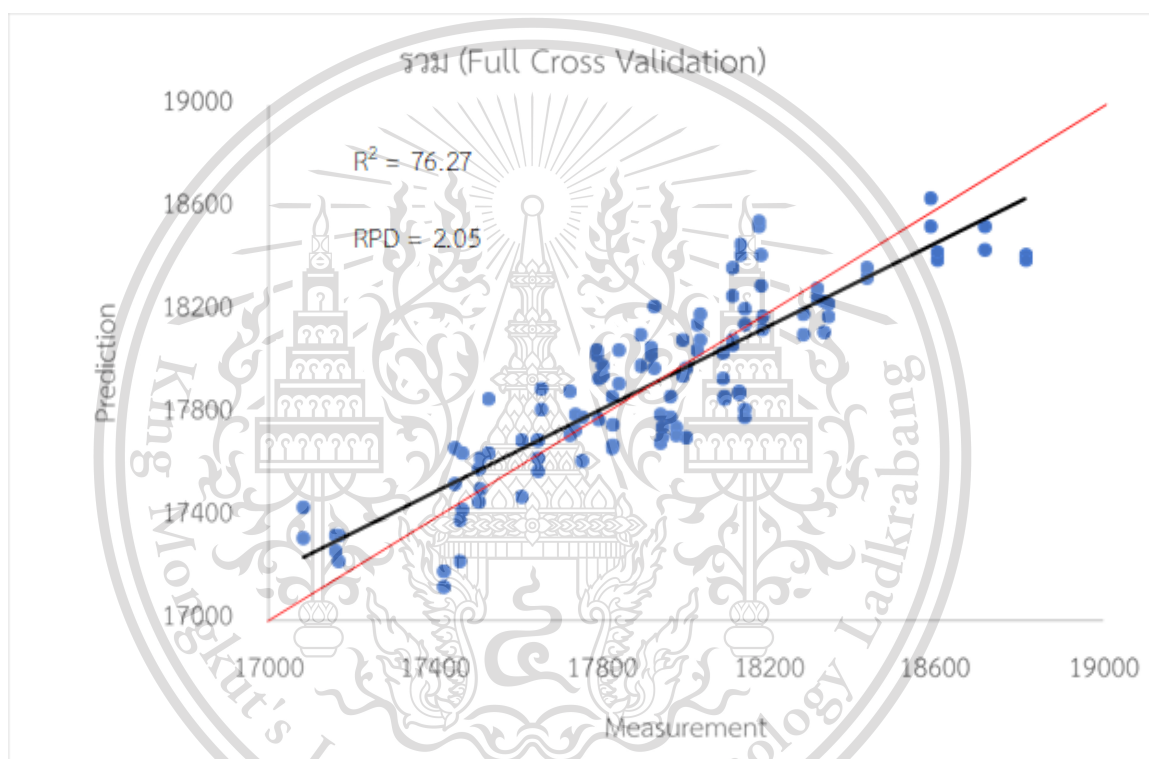
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงข้อมูลระหว่างข้อมูลอ้างอิง (X) กับข้อมูลทำนาย (Y) ของค่าความร้อนสูงของพืชพลังงานขนาด 5 มม. ที่ทำการทดสอบด้วยวิธี FULL CROSS VALIDATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลการทำนายค่าความร้อนสูงของไม้รวมทุกขนาดโดยใช้ช่วงค่าความร้อนสูง 17,084 – 18,812 J/g เปรียบเทียบกับค่าที่วัดแบบวิธีมาตรฐานโดยทดลองสมการด้วยวิธี Full cross validation โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ Second Derivative มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 76.27 อยู่ในเกณฑ์เหมาะสม สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบ ๆ ซึ่งอ้างอิงจากเกณฑ์ของ Williams, 2007, ค่า RMSECV (Root Mean Squared Error of Cross Validation) เท่ากับ 182 J/g, Bias เท่ากับ 1.7 J/g และค่า RPD (Ratio of Prediction to Deviation) เท่ากับ 2.05 แสดงดังรูปที่ 4.7



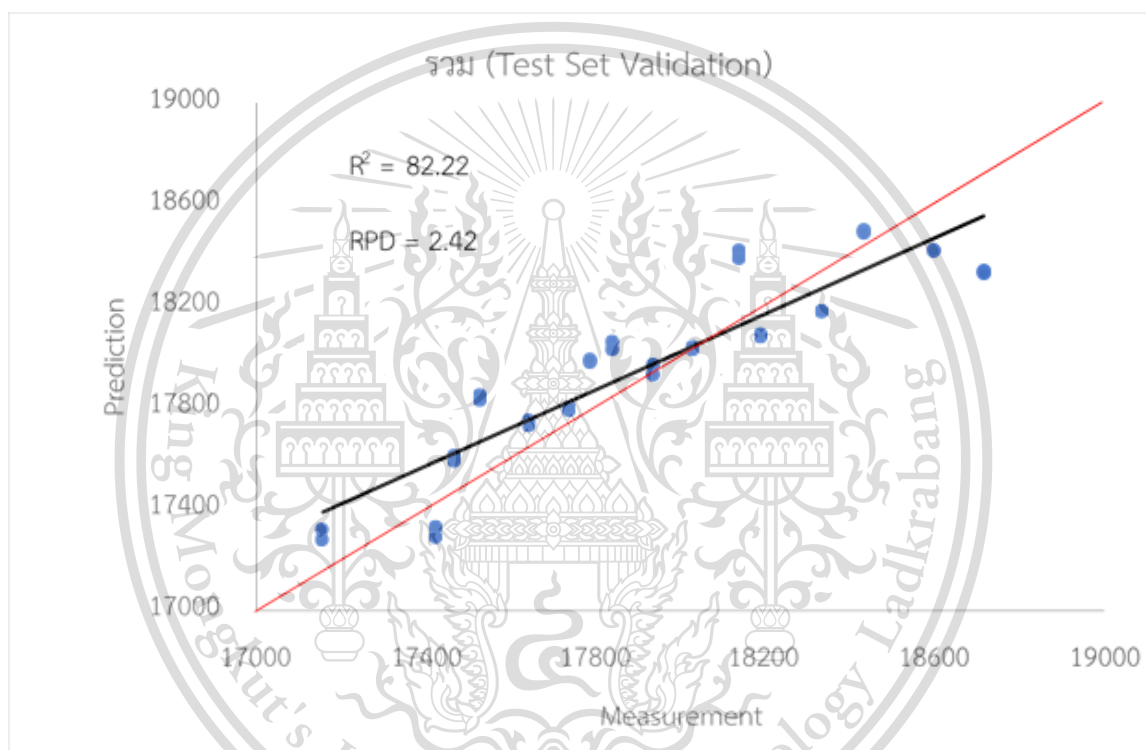
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงข้อมูลระหว่างข้อมูลอ้างอิง (X) กับข้อมูลทำนาย (Y) ของค่าความร้อนสูงของพืชพลังงานทุกขนาดที่ทำการทดสอบด้วยวิธี FULL CROSS VALIDATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลการทำนายค่าความร้อนสูงของไม้รวมทุกขนาดโดยใช้ช่วงค่าความร้อนสูง 17,157 – 18,716 J/g เปรียบเทียบกับค่าที่วัดแบบวิธีมาตรฐานโดยทดลองสมการด้วยวิธี Test Set Validation โดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ Min-Max normalization มีค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 82.22 อยู่ในเกณฑ์ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย ซึ่งอ้างอิงจากเกณฑ์ของ Williams, 2007, ค่า RMSECV (Root Mean Squared Error of Cross Validation) เท่ากับ 182 J/g, Bias เท่ากับ -35.1 J/g และค่า RPD (Ratio of Prediction to Deviation) เท่ากับ 2.05 แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงข้อมูลระหว่างข้อมูลอ้างอิง (X) กับข้อมูลทำนาย (Y) ของค่าความร้อนสูงของพืชพลังงานทุกขนาดที่ทำการทดสอบด้วยวิธี TEST SET VALIDATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.8 วิเคราะห์ผลการสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูง

ในการสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูงของพืชพลังงานทั้ง 3 ชนิด 3 ขนาดและสมการรวมของไม้ทุกขนาดพบว่าเมื่อขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กลงจะมีค่า  $R^2$  สูงขึ้นเนื่องจากยิ่งขนาดเล็กก็จะมีช่องว่างของเนื้อไม้ลดลงเมื่อมีการสแกนตัวอย่างการทดลองด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ลำแสงที่ออกไปก็จะเจอช่องว่างหรืออากาศน้อยลงทำให้มีค่า  $R^2$  สูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และในการสร้างสมการทำนายค่าความร้อนสูงของพืชพลังงานทุกชนิดและทุกขนาดการทดลองพบว่าการทดสอบสมการด้วยวิธี Test set validation มีค่า  $R^2$  ที่ดีกว่าการทดสอบสมการด้วยวิธี Full cross validation โดยการ validation แต่การ ทดสอบสมการด้วยวิธี Full cross validation ได้ค่า  $R^2$  ที่ดีกว่าการทดสอบสมการด้วยวิธี Test set validation โดยการ Calibration และก่อนการนำไปประยุกต์ใช้งานจะต้องมีการยอมรับค่าความผิดพลาด (Bias) ซึ่งค่าความผิดพลาดของการทดสอบสมการด้วยวิธี Test set validation มีค่าสูงกว่าค่าความผิดพลาดของการทดสอบสมการด้วยวิธี Full cross validation แต่ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นนับว่ามีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความร้อนเฉลี่ยของพืชพลังงานทั้ง 3 ชนิด

โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) ที่ทำการทดสอบสมการอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่

ในการสร้างแบบสมการการทำนายค่าความร้อนสูงของพืชพลังงานทั้ง 3 ชนิดพบว่าค่า RPD นั้นมีค่าไม่สูงมากนักแต่อยู่ในระดับที่พอใช้ได้เนื่องมาจากการทดลองได้มีการใช้ตัวอย่างในการทดลองไม่มากนัก ถ้าหากต้องให้ค่า RPD มีค่าสูงขึ้นควรที่จะเพิ่มจำนวนตัวอย่างการทดลองให้มากขึ้นเพื่อให้ข้อมูลมีการกระจายตัวมากขึ้นส่งผลให้มีค่า RPD ที่สูงขึ้น

จากข้อมูลข้างต้นเห็นได้ว่าแบบจำลองก็สามารถนำไปใช้งานได้ แทนวิธีมาตรฐานที่จะหาค่าความร้อนสูงโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ซึ่งใช้เวลาค่อนข้างนาน ประมาณ 20 นาที ต่อหนึ่งตัวอย่าง หากใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจะใช้เวลาเพียง 2 นาที

จากการเปรียบเทียบโครงการวิจัยก่อนหน้านี้ซึ่งได้มีการสร้างโมเดลทำนายค่าความร้อนสูงเหมือนกันพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) มีค่าใกล้เคียงกันแต่ค่า RPD โครงการวิจัยก่อนหน้านี้จะดีกว่าเพราะว่าพืชตัวอย่างที่นำมาทดลองมีความหลากหลายมากกว่า ดังนั้นควรเพิ่มจำนวนและตัวอย่างการทดลองเพื่อให้ค่า  $R^2$  และค่า RPD สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณของพืชพลังงาน แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.9 ผลการหาอัตราการสลายตัวด้วยความร้อนแสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.10

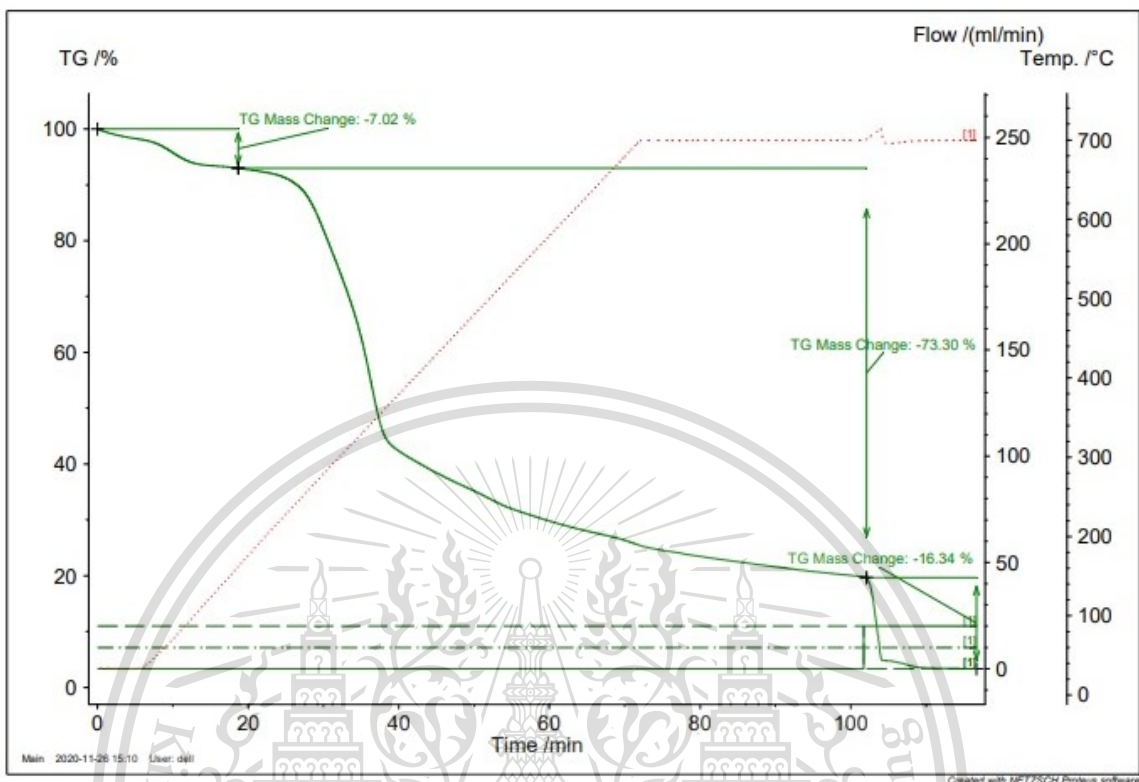
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบเชิงปริมาณของพืชพลังงาน โดยเครื่อง THERMOGRAVIMETRIC ANALYZER

Sample	Size	Proximate Analysis (%)			
		%MC	%VM	%Ash	%FC
Acacia	1 mm.	7.35	75.26	1.63	15.75
	3 mm.	6.83	76.22	2.98	13.96
	5 mm.	6.68	77.42	2.71	13.19
Pine	1 mm.	7.63	74.53	3.01	14.83
	3 mm.	7.38	73.64	3.31	15.67
	5 mm.	7.32	73.56	2.22	16.90
Yang Na	1 mm.	7.13	74.63	5.72	12.53
	3 mm.	7.22	79.13	3.32	10.33
	5 mm.	6.79	78.56	3.16	11.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างกราฟแสดงองค์ประกอบเชิงปริมาณของสนประดิษฐ์ขนาด 1 มม.

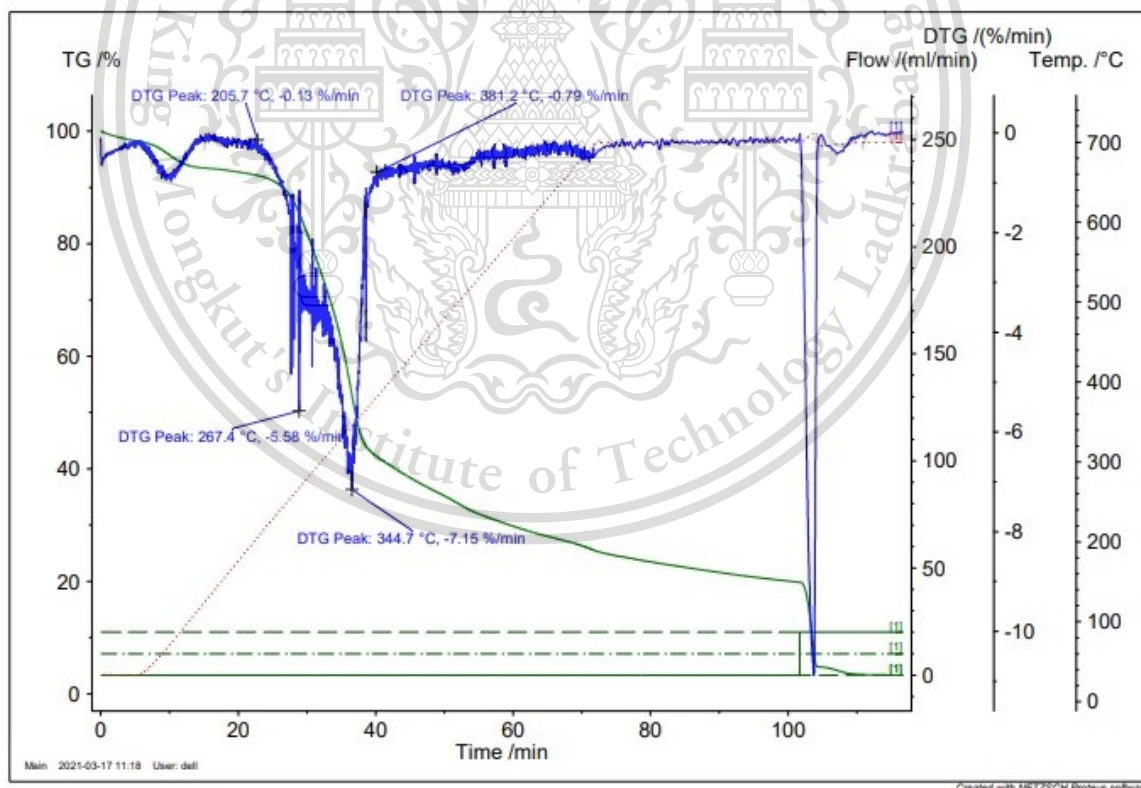
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.7 อัตราการสลายตัวด้วยความร้อนของพืชพลังงานโดยเครื่อง Thermogravimetric analyzer

Sample	Size	T onset (°C)	T inflection (°C)	T peak (°C)	T offset (°C)
Acacia	1 mm.	194.60	257.20	345.32	389.74
	3 mm.	202.98	257.36	346.60	386.52
	5 mm.	204.12	259.10	351.17	389.17
Pine	1 mm.	204.20	258.53	345.85	381.13
	3 mm.	213.05	257.50	344.85	383.18
	5 mm.	213.33	258.20	347.80	380.50
Yang Na	1 mm.	205.78	260.43	353.38	385.02
	3 mm.	204.20	262.25	351.23	384.75
	5 mm.	200.22	263.15	354.43	388.28



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รูปที่ 4.10 ตัวอย่างกราฟ FIRST DERIVATIVE ของสนประดิพัทธ์ขนาด 1 มม. ที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.10 วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณของพืชพลังงานทั้ง 3 ชนิดพบว่ามีความชื้นเฉลี่ย (moisture content) ร้อยละ  $7.15 \pm 0.48$  มีปริมาณคาร์บอนคงตัวเฉลี่ย (fixed carbon) ร้อยละ  $13.61 \pm 3.29$  มีปริมาณไอระเหยเฉลี่ย (volatile matter) ร้อยละ  $76.39 \pm 2.75$  และมีปริมาณเถ้าเฉลี่ย (ash) ร้อยละ  $3.68 \pm 2.05$

จากนั้นได้มีการวิเคราะห์อุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวจากกราฟ DTG โดยพบว่าอุณหภูมิที่เฮมิเซลลูโลสเริ่มมีการสลายตัวอยู่ที่  $203.97 \pm 9.37$  องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เฮมิเซลลูโลสมีการสลายตัวสูงสุดอยู่ที่  $260.18 \pm 2.98$  องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เซลลูโลสมีการสลายตัวสูงสุดอยู่ที่  $349.88 \pm 4.56$  องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่เซลลูโลสมีการสลายตัวหมดอยู่ที่  $385.44 \pm 4.31$  องศาเซลเซียส

จากการสรุปผลการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบเชิงปริมาณพบว่าปริมาณไอระเหยและปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งเหมาะสมสำหรับพืชที่จะใช้เป็นพืชพลังงานได้ดีเพราะว่า ปริมาณคาร์บอนคงตัวจะทำให้เผาไหม้จุดติดได้นานให้พลังงานความร้อนสูง ส่วนค่า ปริมาณไอระเหยสูงทำให้พืชพลังงานเหล่านี้เหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการไพโรไลซิสต่อไปในอนาคตได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคในชีวมวลที่มีผลต่อโมเดลการทำนายค่าความร้อนสูงโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในพีช 3 ชนิด ได้แก่ต้นสนประดิพัทธ์ ต้นกระถินเทพา ต้นยางนา ชนิดละ 6 ต้น ต้นละ 3 ขนาดการทดลอง ได้แก่ 1 มม. 3 มม. 5 มม. โดยเริ่มจากการศึกษาจากปัจจัยทางด้านความชื้น ค่าความร้อนสูง องค์ประกอบเชิงประมาณ ลักษณะของสเปกตรัม และการทำนายค่าความร้อนของพีชพลังงานทั้ง 3 ชนิด โดยการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคในชีวมวลของพีชตัวอย่างสามารถเห็นแนวโน้มได้ว่าขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันจะมีค่าต่างๆ ที่แตกต่างกันด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งผลการศึกษสามารถสรุปผลได้ดังนี้

### 5.1 สรุปผลปริมาณความชื้นของพีชพลังงาน

สรุปผลปริมาณความชื้นของพีชพลังงานทั้ง 3 ชนิด ได้ค่าความชื้นเฉลี่ยของพีชพลังงานแตกต่างกันสองกลุ่มคือ กระถินเทพาจะมีความชื้นมากกว่าสนประดิพัทธ์และยางนาที่มีความชื้นใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณความชื้นที่ได้เป็นเพียงเป็นลักษณะเริ่มต้นของชีวมวล และระดับความชื้นค่อนข้างต่ำ มีผลต่อค่าความร้อนไม่ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ของค่าความร้อนในชีวมวลของชีวมวล จึงไม่มีผลต่อตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

### 5.2 สรุปผลค่าความร้อนสูงของชีวมวลโดย Bomb Calorimeter

สรุปผลค่าความร้อนสูงของพีชพลังงานทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่าความร้อนสูงเฉลี่ยของพีชพลังงานทั้ง 3 ชนิดอยู่ในช่วง 17082 J/g ถึง 18799 J/g เมื่อนำไปเทียบกับชีวมวลชนิดอื่น ๆ แล้ว พบว่าช่วงของค่าความร้อนที่ได้ค่อนข้างครอบคลุมพีชอื่นหลายชนิด และเป็นช่วงของค่าความร้อนที่ค่อนข้างสูง อีกทั้งยังมีการสนับสนุนให้ปลูกเนื่องจากเป็นพืชเศรษฐกิจและให้พลังงานสูง ดังนั้นพีชพลังงานทั้ง 3 ชนิดจึงเหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นพลังงานทดแทนในการเผาไหม้ (combustion) ได้เนื่องจากมีค่าความร้อนที่สูง

### 5.3 สรุปผลการวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัมของพีชพลังงานทั้ง 3 ชนิด โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมดั้งเดิม (raw spectrum) ที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของพีชพลังงานทั้ง 3 ชนิด ในช่วงจำนวนคลื่น 12500 - 4000  $\text{cm}^{-1}$  ความยาวคลื่น 800 - 2500 nm ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany) พบว่าสเปกตรัมดั้งเดิมของค่าความร้อนมีพีคที่ 6868  $\text{cm}^{-1}$  (1456 nm) เกิดการดูดซับคลื่นของ water พีคที่ 5767  $\text{cm}^{-1}$  (1734 nm) เกิดการดูดซับคลื่นของ starch พีคที่ 1931  $\text{cm}^{-1}$  (2130 nm) เกิดการดูดซับคลื่นของ water พีคที่ 4716  $\text{cm}^{-1}$  (2120 nm) เกิดการดูดซับคลื่นของ starch พีคที่ 4385  $\text{cm}^{-1}$  (2281 nm) เกิดการดูดซับคลื่นของ starch และ พีคที่ 4259  $\text{cm}^{-1}$  (2348 nm) เกิดการดูดซับคลื่นของ cellulose

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 5.4 สรุปผลการทำนายค่าความร้อนสูงของพีชพลังงานทั้ง 3 ชนิดและ 3 ขนาด ด้วยวิธี Partial Least Squares Regression

การทำนายค่าความร้อนสูงของพีชพลังงานทั้ง 3 ชนิดและ 3 ขนาด โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีด้วยวิธีมาตรฐานที่ทำการทดสอบสมการด้วยวิธี Full cross validation โดยการ Validation พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination;  $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 86.69 80.87 และ 75.83 ตามลำดับ โดยขนาด 1 มม. มีค่าค่อนข้างดีที่สุดและ 3 มม. 5 มม. ลดลงตามลำดับ ค่าอัตราส่วนระหว่าง SD กับ SEP (Ratio of Prediction to Deviation; RPD) มีค่าเท่ากับ 2.76 2.29 และ 2.04 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่สูงมาก เนื่องจากต้องการศึกษาแนวโน้มความเป็นไปได้เบื้องต้นจึงใช้จำนวนชนิดของพีชค่อนข้างน้อย แต่ถือว่าค่า RPD ที่ได้มีความเหมาะสมกับจำนวนชนิดของพีช ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (RMSECV) และค่าความผิดพลาด (Bias) ของทั้ง 3 ชนิดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของพีชแต่ละชนิด

จากข้อมูลข้างต้นทำให้ทราบถึงขนาดอนุภาคในชีวมวลมีแนวโน้มส่งผลต่อโมเดลการทำนายค่าความร้อนสูงโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

## 5.5 สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงประมาณ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงประมาณของพีชพลังงานทั้ง 3 ชนิดพบว่า มีปริมาณความชื้นเฉลี่ย (moisture content) ร้อยละ  $7.15 \pm 0.48$  มีปริมาณคาร์บอนคงตัวเฉลี่ย (fixed carbon) ร้อยละ  $13.61 \pm 3.29$  มีปริมาณไอระเหยเฉลี่ย (volatile matter) ร้อยละ  $76.39 \pm 2.75$  และมีปริมาณเถ้าเฉลี่ย (ash) ร้อยละ  $3.68 \pm 2.05$

จากข้อมูลข้างต้นทำให้ทราบถึงปริมาณคาร์บอนคงตัวและปริมาณไอระเหยมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งเหมาะสมสำหรับพีชที่จะใช้เป็นพีชพลังงานได้ดี เนื่องจากปริมาณคาร์บอนคงตัวจะทำให้เผาไหม้จุดติดได้นานให้พลังงานความร้อนสูงและค่าปริมาณไอระเหยสูงทำให้พีชพลังงานเหล่านี้เหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการไพโรไลซิสต่อไปในอนาคตได้

## 5.6 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองสร้างโมเดลการทำนายค่าความร้อนสูงพบว่าขนาดมีแนวโน้มที่ส่งผลต่อโมเดลการทำนายค่าความร้อนสูง ควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างในการทำการทดลอง และสร้างโมเดลด้วยวิธีการแบบ Test Set Validation เนื่องจากวิธีการนี้มีการแบ่งตัวอย่างเป็น 2 ส่วน คือ การสร้างแบบจำลอง 70% และ การทดสอบแบบจำลอง 30% จึงมีความน่าเชื่อถือมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ก - 1 แสดงผลค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำของต้นกระถินเทพา

Sample	Size	Sample No.	1st			2nd		
			Weight (g)	HHV (J/g)	LHV (J/g)	Weight (g)	HHV (J/g)	LHV (J/g)
Acacia	1 mm.	1	0.5264	17884	17767	0.5037	17907	17790
		2	0.5090	18277	18160	0.5095	18387	18270
		3	0.5066	18120	18003	0.5021	18097	17980
		4	0.5047	18454	18337	0.5012	18172	18055
		5	0.5061	18366	18249	0.5000	18203	18086
		6	0.5051	17491	17374	0.5044	17403	17286
	3 mm.	1	0.5063	18125	18008	0.508	18158	18041
		2	0.5062	18443	18326	0.5037	18757	18640
		3	0.5026	18366	18249	0.5044	18500	18383
		4	0.5015	18029	17912	0.5077	18335	18218
		5	0.5081	18711	18594	0.5039	18721	18604
		6	0.5023	17536	17419	0.5059	17515	17398
	5 mm.	1	0.5042	18182	18065	0.5016	18194	18077
		2	0.5046	18185	18068	0.4920	18084	17967
		3	0.5058	18694	18577	0.4977	18486	18369
		4	0.5075	17917	17800	0.4975	18365	18248
		5	0.5058	18367	18250	0.5056	17990	17873
		6	0.4992	17652	17535	0.5055	17641	17524

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ก - 2 แสดงผลค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำของต้นสนประดิพัทธ์

Sample	Size	Sample No.	1st			2nd		
			Weight (g)	HHV (J/g)	LHV (J/g)	Weight (g)	HHV (J/g)	LHV (J/g)
Pine	1 mm.	1	0.4964	17598	17474	0.5221	17612	17488
		2	0.5246	18023	17899	0.5240	17955	17831
		3	0.5059	17818	17694	0.5081	17832	17708
		4	0.4977	17759	17635	0.5057	17745	17621
		5	0.4999	17958	17834	0.5036	17924	17800
		6	0.4997	17667	17543	0.5032	17773	17649
	3 mm.	1	0.5124	17801	17677	0.5027	17800	17676
		2	0.5152	17873	17749	0.4990	17976	17852
		3	0.5078	18012	17888	0.5026	18040	17916
		4	0.4988	18058	17934	0.5066	18014	17890
		5	0.5060	18098	17974	0.4985	18088	17964
		6	0.5054	17749	17625	0.5051	17718	17594
	5 mm.	1	0.5049	17704	17580	0.5115	17978	17854
		2	0.5058	18075	17951	0.5066	18182	18058
		3	0.5019	18274	18150	0.5020	18404	18280
		4	0.4988	17992	17868	0.5026	18799	18675
		5	0.4947	17958	17834	0.4968	18217	18093
		6	0.5013	17772	17648	0.5063	17805	17681

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ก - 3 แสดงผลค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำของต้นยางนา

Sample	Size	Sample No.	1st			2nd		
			Weight (g)	HHV (J/g)	LHV (J/g)	Weight (g)	HHV (J/g)	LHV (J/g)
Yang Na	1 mm.	1	0.5039	17086	16968	0.4984	17082	16964
		2	0.5037	17410	17292	0.5004	17514	17396
		3	0.4969	17129	17011	0.5051	17207	17089
		4	0.4979	17190	17072	0.5022	17124	17006
		5	0.5047	17426	17308	0.5016	17414	17296
		6	0.5064	17439	17321	0.508	17489	17371
	3 mm.	1	0.4989	17575	17457	0.5117	17434	17316
		2	0.5034	17789	17671	0.5029	17796	17678
		3	0.506	17691	17573	0.4915	17620	17502
		4	0.5031	17720	17602	0.5079	17571	17453
		5	0.5038	17845	17727	0.5000	17800	17682
		6	0.5068	17944	17826	0.5111	17886	17768
	5 mm.	1	0.5012	17653	17535	0.5092	17366	17248
		2	0.5024	17950	17832	0.5029	17922	17804
		3	0.5059	17984	17866	0.5193	17948	17830
		4	0.5073	17966	17848	0.5005	18031	17913
		5	0.5063	18172	18054	0.5004	18045	17927
		6	0.5025	17909	17791	0.5002	18048	17930

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ภาคผนวก ข  
ผลการวัดค่าความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ข - 1 แสดงผลค่าความชื้นของต้นกระถินเทพา

Sample	Sample No.	Weight of moisture can (g)	Weight of wood chips (Before drying) (g)	Weight of moisture can + wood chips (After drying) (g)	Weight of wood chips (After drying) (g)	Weight balance of moisture can + wood chips (g)	Weight balance of wood chips (g)	Moisture Content (% dry basis)	Moisture Balance %
Acacia	a1.1	16.0069	7.1901	21.8137	5.8068	22.3136	6.3067	23.8221	8.6089
	a1.2	16.3827	6.1805	21.3677	4.9850	21.8209	5.4382	23.9819	9.0913
	a1.3	17.9051	10.2027	26.2056	8.3005	26.8613	8.9562	22.9167	7.8995
	a1.4	17.6334	7.7295	23.8774	6.2440	24.4097	6.7763	23.7908	8.5250
	a1.5	17.2843	7.9460	24.1897	6.9054	24.8500	7.5657	15.0694	9.5621
	a1.6	16.5477	6.1249	21.6033	5.0556	22.0594	5.5117	21.1508	9.0217
	a1.7	16.5208	9.1067	23.9480	7.4272	24.5400	8.0192	22.6128	7.9707
	a1.8	17.6968	9.0683	25.1055	7.4087	25.7037	8.0069	22.4007	8.0743
	a1.9	17.2302	5.9209	22.0557	4.8255	22.4872	5.2570	22.7002	8.9421
	a1.10	16.2089	6.6718	21.6611	5.4522	22.1503	5.9414	22.3690	8.9725
	a1.11	17.5788	5.5063	22.0641	4.4853	22.4716	4.8928	22.7632	9.0852
	a1.12	19.1429	5.6021	23.7237	4.5808	24.1389	4.9960	22.2952	9.0639
	a1.13	16.4391	8.8766	23.6576	7.2185	24.2450	7.8059	22.9701	8.1374
	a1 Avg.	17.1214	7.3943	23.1749	6.0535	23.6963	6.5749	22.1498	8.6136

ตารางที่ ข - 2 แสดงผลค่าความชื้นของต้นกระถินเทพา (ต่อ) และต้นยาง

Sample	Sample No.	Weight of moisture can (g)	Weight of wood chips (Before drying) (g)	Weight of moisture can + wood chips (After drying) (g)	Weight of wood chips (After drying) (g)	Weight balance of moisture can + wood chips (g)	Weight balance of wood chips (g)	Moisture Content (% dry basis)	Moisture Balance %
Acacia	a2	5.1200	162.6100	135.1900	130.0700	139.6100	134.4900	25.0173	3.3982
	a3	4.5600	271.8100	223.2800	218.7200	230.5200	225.9600	24.2730	3.3102
	a4	4.4300	187.1600	150.7200	146.2900	157.4500	153.0200	27.9377	4.6005
	a5	5.0200	132.7500	105.5200	100.5000	108.9300	103.9100	32.0896	3.3930
	a6	4.7000	132.9200	100.0000	95.3000	103.4400	98.7400	39.4753	3.6097
Yang Na	b1	5.8000	213.9600	149.0400	143.2400	154.5700	148.7700	49.3717	3.8607
	b2	4.4500	209.2200	142.2500	137.8000	146.9100	142.4600	51.8287	3.3817
	b3	6.0100	178.6800	117.0800	111.0700	120.5500	114.5400	60.8715	3.1242
	b4	4.4800	200.3400	135.1000	130.6200	140.5600	136.0800	53.3762	4.1801
	b5	5.6700	175.6900	122.2900	116.6200	127.5200	121.8500	50.6517	4.4847
	b6	5.5300	295.9800	180.4300	174.9000	186.7600	181.2300	69.2281	3.6192
	c5	7.3000	373.8400	258.5900	251.2900	265.9600	258.6600	48.7684	2.9329
	c6	5.5400	275.6200	191.0300	185.4900	195.6900	190.1500	48.5902	2.5123

ตารางที่ ข - 3 แสดงผลค่าความชื้นของต้นสนประดิพัทธ์

Sample	Sample No.	Weight of moisture can (g)	Weight of wood chips (Before drying) (g)	Weight of moisture can + wood chips (After drying) (g)	Weight of wood chips (After drying) (g)	Weight balance of moisture can + wood chips (g)	Weight balance of wood chips (g)	Moisture Content (% dry basis)	Moisture Balance %
Pine	c1	5.6600	271.1900	187.9800	182.3200	191.5000	185.8400	48.7440	1.9307
	c2	7.2400	280.4100	212.9000	205.6600	218.2200	210.9800	36.3464	2.5868
	c3	4.3800	249.5100	167.6000	163.2200	171.8300	167.4500	52.8673	2.5916
	c4	7.3500	353.4800	233.4500	226.1000	240.6500	233.3000	56.3379	3.1844
	c5	7.3000	373.8400	258.5900	251.2900	265.9600	258.6600	48.7684	2.9329
	c6	5.5400	275.6200	191.0300	185.4900	195.6900	190.1500	48.5902	2.5123



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ค - 1 แสดงค่า REPEATABILITY และ REPRODUCIBILITY ของเครื่อง NIRS

Sample	Size	Wavenumber ( $cm^{-1}$ )	Repeatability		Reproducibility	
			Average Absorbance	SD	Average Absorbance	SD
Acacia	1 mm.	4362.4452	0.5065	0.0021	0.5002	0.0062
		4617.0176	0.4399	0.0022	0.4309	0.0052
		5137.7339	0.4399	0.0025	0.4328	0.0055
		5681.5931	0.2427	0.0025	0.2303	0.0043
		6734.5972	0.2825	0.0028	0.2700	0.0054
	3 mm.	4362.4452	0.5255	0.0007	0.5214	0.0047
		4617.0176	0.4463	0.0007	0.4479	0.0047
		5137.7339	0.4426	0.0011	0.4436	0.0048
		5681.5931	0.2429	0.0007	0.2432	0.0033
		6734.5972	0.2872	0.0008	0.2825	0.0037
	5 mm.	4362.4452	0.5480	0.0003	0.5386	0.0059
		4617.0176	0.4761	0.0003	0.4631	0.0067
		5137.7339	0.4676	0.0006	0.4552	0.0059
		5681.5931	0.2706	0.0003	0.2600	0.0040
		6734.5972	0.3005	0.0003	0.2963	0.0054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ค - 2 แสดงค่า Repeatability และ Reproducibility ของเครื่อง NIRs (ต่อ)

Sample	Size	Wavenumber ( $cm^{-1}$ )	Repeatability		Reproducibility	
			Average Absorbance	SD	Average Absorbance	SD
Pine	1 mm.	4354.7309	0.4596	0.0003	0.4677	0.0045
		4597.7318	0.3980	0.0003	0.4004	0.0036
		5110.7338	0.3769	0.0005	0.3818	0.0038
		5735.5933	0.2153	0.0003	0.2128	0.0023
		6653.5968	0.2317	0.0004	0.2324	0.0029
	3 mm.	4354.7309	0.5324	0.0005	0.5327	0.0025
		4597.7318	0.4572	0.0006	0.4577	0.0035
		5110.7338	0.4386	0.0009	0.2580	0.0039
		5735.5933	0.2574	0.0006	0.2580	0.0040
		6653.5968	0.2838	0.0007	0.2811	0.0033
	5 mm.	4354.7309	0.5735	0.0017	0.5705	0.0075
		4597.7318	0.4964	0.0018	0.4902	0.0068
		5110.7338	0.4717	0.0020	0.4686	0.0060
		5735.5933	0.2928	0.0019	0.2836	0.0058
		6653.5968	0.3251	0.0020	0.3190	0.0068

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ค - 3 แสดงค่า Repeatability และ Reproducibility ของเครื่อง NIRs (ต่อ)

Sample	Size	Wavenumber ( $cm^{-1}$ )	Repeatability		Reproducibility	
			Average Absorbance	SD	Average Absorbance	SD
Yang Na	1 mm.	4362.4452	0.4203	0.0001	0.4276	0.0070
		4609.3033	0.3517	0.0002	0.3573	0.0058
		5083.7337	0.3131	0.0003	0.3193	0.0058
		5681.5931	0.1796	0.0002	0.1824	0.0036
		7031.5983	0.1723	0.0002	0.1753	0.0043
	3 mm.	4362.4452	0.4774	0.0004	0.4713	0.0094
		4609.3033	0.4017	0.0004	0.3948	0.0075
		5083.7337	0.3585	0.0005	0.3533	0.0066
		5681.5931	0.2183	0.0004	0.2111	0.0050
		7031.5983	0.2134	0.0003	0.2065	0.0054
	5 mm.	4362.4452	0.5238	0.0004	0.5076	0.0132
		4609.3033	0.4402	0.0005	0.4263	0.0113
		5083.7337	0.3903	0.0007	0.3827	0.0099
		5681.5931	0.2468	0.0005	0.2371	0.0081
		7031.5983	0.2457	0.0004	0.2368	0.0088

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ภาคผนวก ง  
ผลการดูดซับคลื่นของพืชพลังงานโดยเครื่อง Near Infrared Spectrometer



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ง - 1 แสดงผลการดูดซับคลื่นของพืชพลังงานโดยเครื่อง Near Infrared Spectrometer

Spectrums				
Sample	Size	Wavenumber ( $cm^{-1}$ )	Average Absorbance	SD
Acacia	1mm	4362.4451	0.4834	0.0201
		4617.0172	0.4189	0.0205
		5137.7339	0.4062	0.0171
		5681.5931	0.2336	0.0096
		6734.5971	0.2680	0.0107
	3mm	4362.4451	0.5151	0.0282
		4617.0172	0.4433	0.0275
		5137.7339	0.4329	0.0254
		5681.5931	0.2561	0.0150
		6734.5971	0.2945	0.0173
	5mm	4362.4451	0.5354	0.0275
		4617.0172	0.4619	0.0279
		5137.7339	0.4493	0.0279
		5681.5931	0.2767	0.0152
		6734.5971	0.3141	0.0203

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ง - 2 แสดงผลการดูดซับคลื่นของพืชพลังงานโดยเครื่อง Near Infrared Spectrometer (ต่อ)

Spectrums				
Sample	Size	Wavenumber ( $cm^{-1}$ )	Average Absorbance	SD
Pine	1mm	4354.7309	0.4959	0.0102
		4597.7318	0.4281	0.0070
		5110.7338	0.3961	0.0057
		5735.5933	0.2405	0.0032
		6653.5968	0.2628	0.0052
	3mm	4354.7309	0.5528	0.0164
		4597.7318	0.4754	0.0139
		5110.7338	0.4386	0.0133
		5735.5933	0.2757	0.0078
		6653.5968	0.3009	0.0098
	5mm	4354.7309	0.5829	0.0151
		4597.7318	0.5010	0.0156
		5110.7338	0.4539	0.0155
		5735.5933	0.2970	0.0103
		6653.5968	0.3257	0.0123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

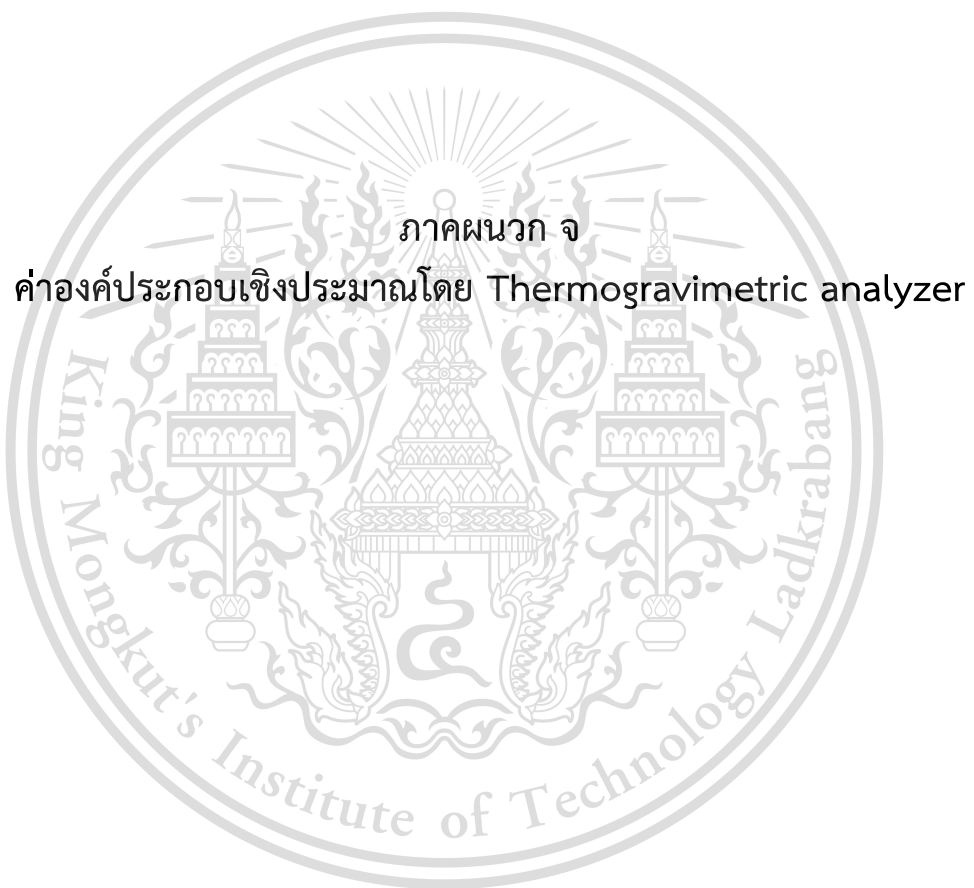
ตารางที่ ง - 3 แสดงผลการดูดซับคลื่นของพืชพลังงานโดยเครื่อง Near Infrared Spectrometer (ต่อ)

Spectrums				
Sample	Size	Wavenumber ( $cm^{-1}$ )	Average Absorbance	SD
Yang Na	1mm	4362.4452	0.4565	0.0116
		4609.3033	0.3887	0.0087
		5083.7337	0.3374	0.0110
		5681.5931	0.2152	0.0060
		7031.5983	0.2128	0.0065
	3mm	4362.4452	0.5318	0.0105
		4609.3033	0.4489	0.0089
		5083.7337	0.3917	0.0097
		5681.5931	0.2572	0.0054
		7031.5983	0.2608	0.0074
	5mm	4362.4452	0.5713	0.0122
		4609.3033	0.4847	0.0104
		5083.7337	0.4248	0.0086
		5681.5931	0.2862	0.0087
		7031.5983	0.2920	0.0090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ จ - 1 แสดงค่าองค์ประกอบเชิงปริมาณของต้นกระถินเทพา

ชนิด	ขนาด	ตัวอย่างที่	Proximate Analysis (%)			
			%MC	%VM	%Ash	%FC
acacia	1 mm.	1	7.06	79.28	1.24	12.42
		2	7.15	75.87	1.96	15.02
		3	7.68	72.47	2.74	17.11
		4	7.43	71.9	1.57	19.1
		5	7.43	76.8	0.67	15.1
	3 mm.	1	6.22	79.72	3.00	11.06
		2	6.9	73.8	3.36	15.94
		3	7.04	76.18	2.63	14.15
		4	6.57	75.95	3.09	14.39
		5	7.43	75.49	2.82	14.26
	5 mm.	1	6.59	78.56	2.23	12.62
		2	6.89	77.09	2.84	13.18
		3	6.17	76.32	2.79	14.72
		4	6.55	77.19	2.59	13.67
		5	6.66	79.38	2.57	11.39
		6	7.24	75.96	3.26	13.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ จ - 2 แสดงค่าองค์ประกอบเชิงปริมาณของต้นสนประดิพัทธ์

ชนิด	ขนาด	ตัวอย่างที่	Proximate Analysis (%)			
			%MC	%VM	%Ash	%FC
pine	1 mm.	1	8.6	79.81	2.5	9.09
		2	7.35	70.4	2.62	19.63
		3	7.72	72.35	3.53	16.4
		4	7.75	76.07	3.02	13.16
		5	7.33	74.53	3.06	15.08
		6	7.02	74.01	3.34	15.63
	3 mm.	1	7.75	73.02	2.95	16.28
		2	7.12	79.28	3.02	10.58
		3	7.41	72.13	3.17	17.29
		4	7.36	73.4	2.95	16.29
		5	7.56	72.46	3.31	16.67
		6	7.08	71.53	4.47	16.92
	5 mm.	1	6.66	74.05	3.05	16.24
		2	7.29	75.35	2.58	14.78
		3	7.7	71.62	2.06	18.62
		4	7.61	73.22	1.2	17.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ จ - 3 แสดงค่าองค์ประกอบเชิงปริมาณของต้นยางนา

ชนิด	ขนาด	ตัวอย่างที่	Proximate Analysis (%)			
			%MC	%VM	%Ash	%FC
rubber	1 mm.	1	7.2	75.48	5.67	11.65
		2	7.21	75.74	4.79	12.26
		3	7.21	74.67	5.3	12.82
		4	7.36	70.57	6.57	15.5
		5	7.52	70.91	7.37	14.2
		6	6.26	80.43	4.59	8.72
	3 mm.	1	7.69	79.03	2.89	10.39
		2	7.13	77.9	3.65	11.32
		3	6.89	82.24	3.18	7.69
		4	7.18	77.36	3.55	11.91
	5 mm.	1	7.31	81.29	2.16	9.24
		2	5.18	76.07	5.52	13.23
		3	6.96	77.66	3.79	11.59
		4	7.25	78.05	2.64	12.06
		5	6.76	79.4	2.93	10.91
		6	7.29	78.88	1.91	11.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ จ - 4 แสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวของต้นกระถินเทพา

Sample	Size	Sample No.	Temperature (°C)			
			T onset (°C)	T inflection (°C)	T peak (°C)	T offset (°C)
Acacia	1 mm.	1	193.50	257.10	348.20	395.20
		2	199.20	257.00	341.30	392.80
		3	189.50	255.30	346.00	389.90
		4	195.90	258.10	344.40	382.80
		5	194.90	258.50	346.70	388.00
	3 mm.	1	195.30	255.90	346.30	386.50
		2	212.10	257.40	348.40	390.60
		3	207.80	256.50	347.70	391.50
		4	194.90	259.30	341.90	373.00
		5	204.80	257.70	348.70	391.00
	5 mm.	1	216.00	263.80	358.70	394.40
		2	198.90	257.80	348.30	390.50
		3	209.70	259.80	355.10	390.50
		4	194.20	257.00	344.60	388.80
		5	202.30	257.10	349.30	390.60
		6	203.60	259.10	351.00	380.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ จ - 5 แสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวของต้นสนประดิพัทธ์

Sample	Size	Sample No.	Temperature (°C)			
			T onset (°C)	T inflection (°C)	T peak (°C)	T offset (°C)
Pine	1 mm.	1	201.20	255.20	343.20	377.30
		2	201.20	254.40	349.50	377.60
		3	206.60	257.80	343.10	387.30
		4	200.60	259.40	348.00	378.80
		5	209.90	257.00	346.60	384.60
		6	205.70	267.40	344.70	381.20
	3 mm.	1	210.70	256.80	346.10	381.90
		2	213.60	260.20	345.40	384.50
		3	212.10	255.70	341.20	377.30
		4	214.20	258.00	346.70	384.60
		5	217.50	256.50	345.40	383.90
		6	210.20	257.80	344.30	386.90
	5 mm.	1	209.10	256.50	346.30	372.80
		2	219.80	259.00	348.50	384.80
		3	213.90	258.70	346.50	379.80
		4	210.50	258.60	349.90	384.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ จ - 6 แสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวของต้นยางนา

Sample	Size	Sample No.	Temperature (°C)			
			T onset (°C)	T inflection (°C)	T peak (°C)	T offset (°C)
Yang Na	1 mm.	1	215.40	263.00	347.60	383.50
		2	217.00	260.50	356.90	380.20
		3	202.30	258.90	349.90	387.10
		4	199.70	258.00	354.30	385.60
		5	202.30	259.10	358.40	383.00
		6	198.00	263.10	353.20	390.70
	3 mm.	1	203.20	265.30	350.40	390.50
		2	204.60	260.10	351.90	382.80
		3	204.80	261.30	352.30	379.80
		4	204.20	262.30	350.30	385.90
	5 mm.	1	198.70	265.50	353.80	389.40
		2	202.40	262.40	354.80	389.90
		3	202.20	263.00	355.70	385.90
		4	193.30	262.20	350.80	385.80
		5	202.20	263.00	355.70	385.90
		6	202.50	262.80	355.80	392.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บรรณานุกรม

1. Vision, E. พลังงานชีวมวล. 2019; Available from: [www.energyvision.co.th/14424507/พลังงานชีวมวล](http://www.energyvision.co.th/14424507/พลังงานชีวมวล).
2. University, M. การสังเคราะห์ด้วยแสง. 2005; Available from: <https://il.mahidol.ac.th/e-media/science4/plant/teacher.htm>.
3. Technology, M.o.S.a. เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด. 2017; Available from: <https://www.mhesi.go.th/main/th/165-knowledge/practical-rad/7497-wood-pellets>.
4. engineerthailand. การหาปริมาณความชื้น. 2020; Available from: <http://www.engineerthailand.com/moisture.html>.
5. Instrument, i.l.a. NIR Spectrometer. 2008; Available from: <http://nirapplication.blogspot.com/2008/03/nir-spectrometer.html>.
6. มหาวิทยาลัยมหิดล, ส. กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law). Available from: [https://il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page2\\_2.html](https://il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page2_2.html).
7. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ส.อ. Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Available from: <https://www.slri.or.th/bdd/th/22-บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์/66-ftir-micro-spectrometer.html>.
8. Helmenstine, A.M. Coffee Cup and Bomb Calorimetry. 2019; Available from: <https://www.thoughtco.com/coffee-cup-and-bomb-calorimetry-609255>.
9. ienergyguru. PROPERTIES OF BIOMASS SOURCES. 2002; Available from: <https://ienergyguru.com/2015/09/properties-of-biomass-sources/>.
10. (NANOTEC), ศ. Thermogravimetric Analysis (TGA). 2020; Available from: [https://www.nanotec.or.th/th/?page\\_id=569](https://www.nanotec.or.th/th/?page_id=569).
11. Zhang, K., et al., Fast analysis of high heating value and elemental compositions of sorghum biomass using near-infrared spectroscopy. Energy, 2017. 118: p. 1353-1360.
12. Sirisomboon, P., A. Funke, and J. Posom, Improvement of proximate data and calorific value assessment of bamboo through near infrared wood chips acquisition. Renewable Energy, 2020. 147: p. 1921-1931.
13. Restuccia, F., N. Fernandez-Anez, and G. Rein, Experimental measurement of particle size effects on the self-heating ignition of biomass piles: Homogeneous samples of dust and pellets. Fuel, 2019. 256: p. 115838.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.