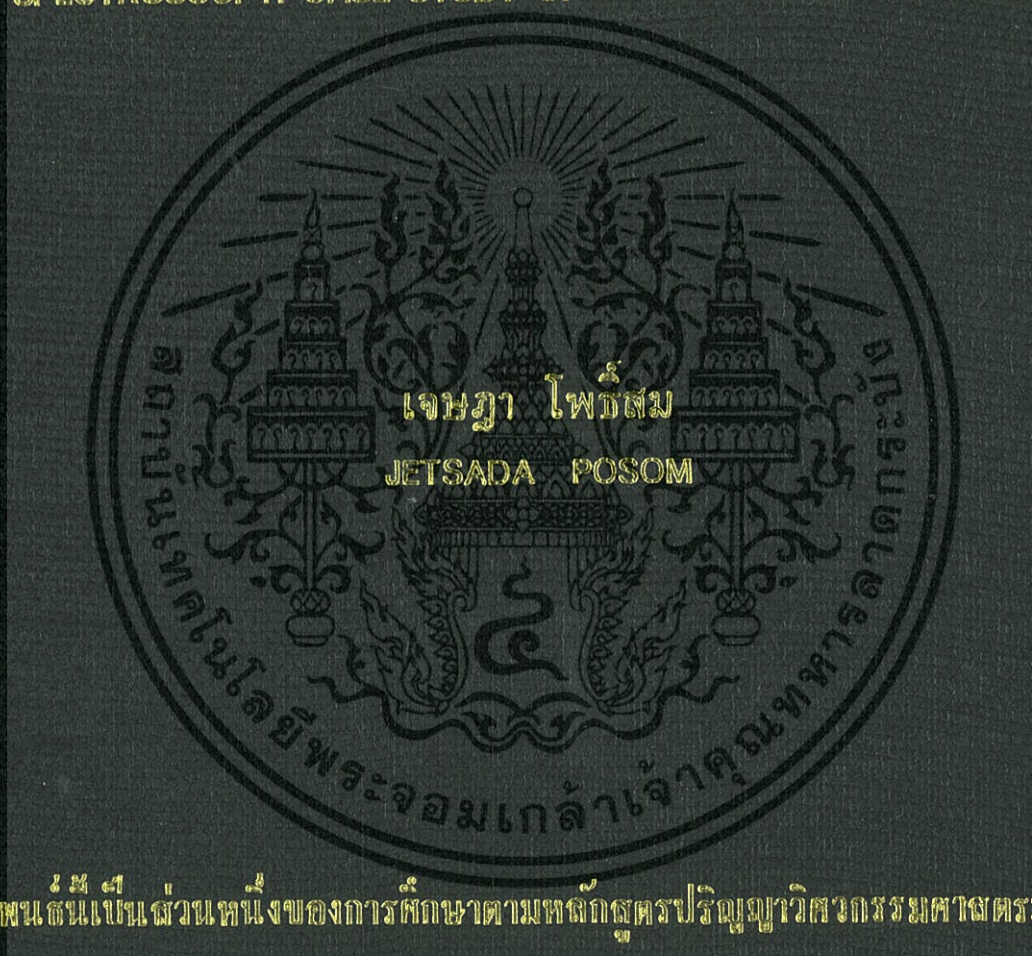


การพัฒนาเทคนิคการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่า  
ความร้อนของชีวมวลโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี:  
กรณีศึกษา เนื้อในเมล็ดตบุงดำ

DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE FOR MEASURING OF THERMAL  
PROPERTIES, MOISTURE CONTENT, OIL CONTENT AND HEATING VALUE  
OF BIOMASS BY NON-DESTRUCTIVE METHOD USING NEAR INFRARED  
SPECTROSCOPY: CASE STUDY OF *JATROPHA CURCAS* KERNELS



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-M-100-104

การพัฒนาเทคนิคการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่า  
ความร้อนของชีวมวลโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี:  
กรณีศึกษา เนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE FOR MEASURING OF THERMAL  
PROPERTIES, MOISTURE CONTENT, OIL CONTENT AND HEATING VALUE  
OF BIOMASS BY NON-DESTRUCTIVE METHOD USING NEAR INFRARED  
SPECTROSCOPY: CASE STUDY OF *JATROPHA CURCAS* KERNELS



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ KMUTL-2013-EN-M-100-104 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE FOR MEASURING OF THERMAL  
PROPERTIES, MOISTURE CONTENT, OIL CONTENT AND HEATING VALUE  
OF BIOMASS BY NON-DESTRUCTIVE METHOD USING NEAR INFRARED  
SPECTROSCOPY: CASE STUDY OF *JATROPHA CURCAS* KERNELS



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2013

KMITL-2013-EN-M-100-104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสาร KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การพัฒนาเทคนิคการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนของ  
ชีวมวลโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี : กรณีศึกษา เนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

Thesis Title      Development of the Technique for Measuring of Thermal Properties,  
Moisture Content, Oil Content and Heating Value of Biomass by  
Non-Destructive Method Using Near Infraed Spectroscopy : Case Study of  
*Jatropha Curcas* Kernels

นักศึกษา      นายเจษฎา โพธิ์สม  
รหัสประจำตัว      54612101  
ปริญญา      วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา      วิศวกรรมเกษตร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์      รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญ  
หมายเลขวิทยานิพนธ์      KMITL-2013-EN-M-100-104

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.ประสันท	ชุ่มใจหาญ	
รศ.ดร.ประกอบ	กิจไชยา	
รศ.ดร.อนุพันธ์	เทอดวงศ์วรกุล	
ผศ.ดร.สุตาภัทร	แคว้นเขาเม็ง	
รศ.ดร.ปานมนัส	ศิริสมบุญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2556 เวลา 11.00-13.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาเทคนิคการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณ  
น้ำมันและค่าความร้อนของชีวมวลโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์  
อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี: กรณีศึกษา เนื้อในเมล็ดสับุดำ

นักศึกษา

นายเจษฎา โพธิ์สม

รหัสประจำตัว

54612101

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเกษตร

พ.ศ.

2556

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์

## บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเป็น 2 การทดลองหลักคือการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับุดำและการพัฒนาเทคนิคการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับุดำโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งสรุปผลดังนี้ การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับุดำได้แก่ การแพร่ความร้อน, การนำความร้อนทำการทดลอง 3 รูปแบบได้แก่ แบบทั้งเมล็ด, แบบ ¼ เมล็ดและแบบผงและความร้อนจำเพาะทดลอง 2 รูปแบบได้แก่ แบบชั้นเล็กและแบบผง การทดลองใช้สับุดำระยะผลสุก (ผลสีเหลือง) และผลสุกเต็มที่ (ผลสีดำ) ค่าการแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับุดำรูปแบบทั้งเมล็ด, ¼ เมล็ดและแบบผงจากผลสุก (ผลสีเหลือง) มีค่า  $9.303 \times 10^{-6}$ ,  $8.370 \times 10^{-6}$ , และ  $7.456 \times 10^{-6}$   $m^2/s$ , ตามลำดับ ในขณะที่ผลสุกเต็มที่ มีค่า  $8.792 \times 10^{-6}$ ,  $7.723 \times 10^{-6}$ , และ  $6.652 \times 10^{-6}$   $m^2/s$ , ตามลำดับ ค่าการนำความร้อนของรูปแบบทั้งเมล็ด, ¼ เมล็ดและแบบผงของผลสุก (ผลสีเหลือง) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 ถึง  $100^\circ C$  จาก 0.0663 ถึง 0.1181, 0.0593 ถึง 0.1087 และ 0.0536 ถึง 0.1015  $W/m^\circ C$  ตามลำดับ และผลสุกเต็มที่ (ผลสีดำ) มีค่า 0.0608 ถึง 0.0977, 0.0527 ถึง 0.0841, และ 0.0452 ถึง 0.0740  $W/m^\circ C$  ตามลำดับ ค่าความร้อนจำเพาะพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง  $100^\circ C$  รูปแบบชั้นเล็กและแบบผงของผลสุก (ผลสีเหลือง) มีค่าในช่วง 0.7852 ถึง 1.3929, และ 1.3823 ถึง 2.4510  $kJ/kg^\circ C$  ตามลำดับและผลสุกเต็มที่ (ผลสีดำ) มีค่าในช่วง 0.6258 ถึง 0.9933, และ 0.8268 ถึง 1.7810  $kJ/kg^\circ C$  ตามลำดับ ผลการทดลองได้ค่าการนำความร้อนและความร้อนจำเพาะมีความสัมพันธ์อย่างเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิ

การพัฒนาการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้นและปริมาณน้ำมันของเนื้อในเมล็ดสับุดำและค่าความร้อนของกากเนื้อในเมล็ดสับุดำที่สกัดน้ำมันแล้วแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดใช้เนื้อในเมล็ดสับุดำ 100 ตัวอย่างโดยแบ่งเป็นผลสีเขียว, ผลสีเหลืองและผลสีดำ และแบบอบแห้งอย่างละ 25 ตัวอย่าง ทำการสแกนโดยใช้เครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วงจำนวนคลื่น (wave number) ในช่วง  $12500-4000\text{ cm}^{-1}$  โดยการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสงกับค่าสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนโดยใช้วิธี partial least squares regression และพิสูจน์สมการโดยวิธี full cross validation ผลการทำนายพบว่าการแพร่ความร้อนได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 53.4 %, ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (root mean squared error of cross

validation; RMSECV) เท่ากับ  $8.99E-7\text{ m}^2/s^2$ , bias เท่ากับ  $-2.27E-8\text{ m}^2/s^2$ , Ratio of (Standard

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

error of Prediction (Validation) to (Standard) Deviation (RPD) เท่ากับ 1.47 การนำความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 76.66 %, RMSECV เท่ากับ  $0.0157 \text{ w m}^{-1} \text{ C}^{-1}$ , bias เท่ากับ  $8.35\text{E-}6 \text{ w m}^{-1} \text{ C}^{-1}$ , RPD เท่ากับ 2.07 การนำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 82.77 %, RMSECV เท่ากับ  $0.0481 \text{ w m}^{-1} \text{ C}^{-1}$ , bias เท่ากับ  $-3.84\text{E-}5 \text{ w m}^{-1} \text{ C}^{-1}$ , RPD เท่ากับ 2.41 ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 40 °C ได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 51.75 %, RMSECV เท่ากับ  $5.06 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ C}^{-1}$ , bias เท่ากับ  $-0.0134 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ C}^{-1}$ , RPD เท่ากับ 1.44 ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 °C ได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 75.41 %, RMSECV เท่ากับ  $11.3 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ C}^{-1}$ , bias เท่ากับ  $-0.0191 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ C}^{-1}$ , RPD เท่ากับ 2.02 ผลการทำนายความชื้นได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 98.46 %, RMSECV เท่ากับ 3.16 % wb, bias เท่ากับ  $-0.000436 \text{ % wb}$ , RPD เท่ากับ 8.05 การทำนายปริมาณน้ำมันได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 11.09 %, RMSECV เท่ากับ 3.89 %, bias เท่ากับ 0.0156 %, RPD เท่ากับ 1.06 และค่าความร้อนมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 65.82 %, RMSECV เท่ากับ 508 J/g, bias เท่ากับ  $-9.22 \text{ J/g}$ , RPD เท่ากับ 1.71 งานวิจัยนี้พบว่าเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสามารถทำนายค่าความชื้นได้ดีที่สุดรองลงมาเป็นค่าการนำความร้อนที่ 100 °C การนำความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 °C ค่าความร้อน ตามลำดับและไม่สามารถทำนายปริมาณน้ำมันได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	Development of the Technique for Measuring of Thermal Properties, Moisture Content, Oil Content and Heating Value of Biomass by Non-Destructive Method Using Near Infrared Spectroscopy: Case Study of <i>Jatropha curcas</i> Kernels
<b>Student</b>	Mr. Jetsada Posom
<b>Student ID.</b>	54612101
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Agricultural Engineering
<b>Year</b>	2013
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Panmanas Sirisomboon

## ABSTRACT

This thesis is divided into two main experiments which are the study of thermal properties of *Jatropha curcas* L. kernels and the development of the technique for measuring of thermal properties, moisture content, oil content and heating value of *Jatropha curcas* L. kernels by near infrared spectroscopy. For first experiment, the thermal properties of *Jatropha curcas* L. kernels, included thermal diffusivity and thermal conductivity, in 3 different forms of kernel i.e. whole kernel, ¼ kernels and powder, and specific heat in 2 different forms i.e. small piece of kernel and powder. The experiments were investigated at 2 different harvesting period that were mature yellow ripe stage (yellow fruit) and completely (fully) ripe stage (black fruit). The thermal diffusivity was measured in the water and ice box to keep 0 °C. The thermal conductivity was measured by the transient technique using a line heat source in controlled ethylene glycol bath at 25, 40, 60, 80 and 100 °C. The specific heat was measured using differential scanning calorimeter at increased scanning rate of 10 °C/min from 25 to 100 °C. The thermal diffusivity of whole kernel, ¼ kernels and powder at yellow stage were  $9.303 \times 10^{-6}$ ,  $8.370 \times 10^{-6}$ , and  $7.456 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, respectively and at black stage were  $8.792 \times 10^{-6}$ ,  $7.723 \times 10^{-6}$ , and  $6.652 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, respectively. The thermal conductivity of whole kernel, ¼ kernels and powder were increased when the temperature increased from 25 to 100 °C which were 0.0663 to 0.1181, 0.0593 to 0.1087 and 0.0536 to 0.1015 W/m °C for yellow ripe stage and were 0.0608 to 0.0977, 0.0527 to 0.0841, and 0.0452 to 0.0740 W/m °C, respectively in black ripe stage. The specific heat increased linearly in the range of temperature of 25 to 100 °C and they were 0.7852 to 1.3929, 1.3823 to 2.4510 for yellow ripe stage and were 0.6258 to 0.9933, 0.8268 to 1.7810 kJ/kg °C for black ripe stage for small piece of kernel and powder, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

For the second experiment, the development of the technique for measuring of thermal properties, moisture content, oil content value of *Jatropha curcas* kernels and heating Value of oil extracted cake of *Jatropha curcas* L. kernels by near infrared (NIR) spectroscopy, the FT-NIR spectrometer was used for spectral scanning at the wavenumber range of 12500-4000  $\text{cm}^{-1}$  (Wavelength range of 1100-2500 nm). A total of 100 samples of *Jatropha curcas* kernels were from 25 samples of green fruit stage, 25 samples of yellow fruit stage, 25 samples of black fruit stage and 25 oven dried samples. The calibration equations for prediction were developed from partial least squares (PLS) regression. The equation performance was evaluated by full cross validation. The results of prediction were as follows: For thermal diffusivity, the coefficient of determination ( $R^2$ ) = 53.4 %, root mean squared error of cross validation (RMSECV) =  $8.99\text{E-}7 \text{ m/s}^2$ , bias =  $-2.27\text{E-}8 \text{ m/s}^2$ , Ratio of Standard error of Validation to Standard Deviation (RPD) = 1.47; for thermal conductivity at 40 °C,  $R^2$  = 76.66 %, RMSECV =  $0.0157 \text{ w m}^{-1}\text{C}^{-1}$ , bias =  $8.35\text{E-}6 \text{ w m}^{-1}\text{C}^{-1}$ , RPD = 2.07; for thermal conductivity at 100 °C,  $R^2$  = 82.77 %, RMSECV =  $0.0481 \text{ w m}^{-1}\text{C}^{-1}$ , bias =  $-3.84\text{E-}5 \text{ w m}^{-1}\text{C}^{-1}$ , RPD = 2.41; for specific heat at 40 °C,  $R^2$  = 51.75 %, RMSECV =  $5.06 \text{ kJ kg}^{-1}\text{C}^{-1}$ , bias =  $-0.0134 \text{ kJ kg}^{-1}\text{C}^{-1}$ , RPD = 1.44; for specific heat at 100 °C,  $R^2$  = 75.41 %, RMSECV =  $11.3 \text{ kJ kg}^{-1}\text{C}^{-1}$ , bias =  $-0.0191 \text{ kJ kg}^{-1}\text{C}^{-1}$ , RPD = 2.02; for moisture content,  $R^2$  = 98.46 %, RMSECV = 3.16 % wb, bias =  $-0.000436 \text{ % wb}$ , RPD = 8.05; for oil content,  $R^2$  = 11.09 %, RMSECV = 3.89 %, bias = 0.0156%, RPD = 1.06 and for heating value,  $R^2$  = 65.82 %, RMSECV = 508 J/g, bias =  $-9.22 \text{ J/g}$ , RPD = 1.71. This research showed that NIR spectroscopy could predict the moisture content best with high accuracy followed by thermal conductivity at 100 °C and could not predict the oil content of *Jatropha curcas* kernels.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในหลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ช่วยเหลือทำการทดลอง และให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบพระคุณศูนย์ฝึกทหารให้ อ.สัตหีบ และทหารทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ ในการจัดหาผลสบู่อำในการทำการทดลอง

ขอขอบคุณสำนักงานประสานงานโครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว. - อุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือ ในเรื่องต่างๆ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

เจษฎา โพธิ์สม

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ปัญหาและสมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 สบู่ดำ.....	6
2.1.1 ความเป็นมา.....	6
2.1.2 การเก็บเกี่ยว.....	6
2.1.3 การสกัดน้ำมันสบู่ดำ.....	7
2.1.4 องค์ประกอบของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ.....	7
2.2 สมบัติเชิงความร้อน.....	8
2.2.1 การนำความร้อน.....	8
2.2.2 การแพร่ความร้อน.....	10
2.2.3 ความร้อนจำเพาะ.....	12
2.3 ค่าความร้อน (heating value).....	13
2.3.1 การหาค่าความร้อน.....	13
2.3.2 หลักการทำงานของ Bomb Calorimeter.....	13
2.4 การสกัดน้ำมันในเมล็ดพืชไขมันโดยสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	14
2.5 ความชื้นในพืช.....	14
2.6 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (NIR Spectroscopy).....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 หลักการพื้นฐานของเครื่อง Near Infrared Spectroscopy.....	15
2.8 การเลือกวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น.....	17
2.9 การเลือกจำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสม (Selecting the Appropriate Number of Factors) .....	20
2.9.1 การสร้างสมการโดยวิธี partial least square regression (PLS-Regression) .....	21
2.9.2 การทำ Validation แบบ Full cross validation.....	24
2.10 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสมการ.....	24
2.10.1 สัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, $R^2$ ) .....	24
2.10.2 ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (root mean squared error of cross validation; RMSECV) .....	25
2.10.3 อัตราส่วนระหว่าง SEP กับ SD (Ratio of SEP to the SD, RPD) .....	26
2.10.4 ความผิดพลาด (Bias) .....	26
2.11 ประโยชน์ของเทคนิค NIR.....	26
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
2.12.1 งานวิจัยสมบัติเชิงความร้อน.....	27
2.12.2 งานวิจัยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	30
บทที่ 3 วิธีการทดลอง.....	34
3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง.....	34
3.1.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับุดำ.....	34
3.1.2 การเตรียมตัวอย่างการทดลองสำหรับการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับุดำโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	34
3.2 การสแกนสเปกตรัมเนื้อในเมล็ดสับุดำด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer.....	36
3.3 การวัดสมบัติเชิงความร้อน.....	37
3.3.1 การวัดค่าการแพร่ความร้อน.....	37
3.3.2 การวัดค่าการนำความร้อน.....	39
3.3.3 การวัดและการคำนวณความร้อนจำเพาะ.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การวัดความชื้น.....	41
3.5 การวัดปริมาณน้ำมัน.....	42
3.6 การวัดค่าความร้อน.....	43
3.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	44
3.7.1 การวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม.....	44
3.7.2 การสร้างสมการในการทำนาย.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	46
4.1 สมบัติเชิงความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	46
4.1.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity) .....	46
4.1.2 การนำความร้อน (Thermal conductivity) .....	47
4.1.3 ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) .....	48
4.2 การพัฒนาเทคนิคการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนของ ซีมวลโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี: กรณีศึกษา เนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	49
4.2.1 สมบัติเชิงความร้อน.....	49
4.2.1.1 ผลการหาค่าการแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	49
4.2.1.2 ผลการหาค่าการนำความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	50
4.2.1.3 ผลการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	51
4.2.2 ปริมาณความชื้น.....	52
4.2.3 ปริมาณน้ำมัน.....	52
4.2.4 ค่าความร้อน.....	53
4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัม.....	54
4.3.1 สเปกตรัมของเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับดูดำที่แตกต่างกัน.....	54
4.3.2 สเปกตรัมของกากเนื้อในเมล็ดสับดูดำเหลือจากการสกัดน้ำมันออกที่ระยะการเก็บ เกี่ยวผลสับดูดำที่แตกต่างกัน.....	55
4.4 ผลการทำนายสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมัน และค่าความร้อนของสับดูดำด้วย วิธี Partial Least Square Regression.....	55
4.4.1 ผลการสร้างสมการทำนายสมบัติเชิงความร้อน.....	57
4.4.1.1 การแพร่ความร้อน.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.1.2 การนำความร้อน.....	59
4.4.1.3 ความร้อนจำเพาะ.....	63
4.4.2 ผลการสร้างสมการทำนายค่าความชื้น.....	67
4.4.3 ผลการสร้างสมการทำนายปริมาณน้ำมัน.....	69
4.4.4 ผลการทำนายค่าความร้อน.....	69
4.5 ผลการทำนายสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมัน และค่าความร้อนของสปูดำด้วยวิธี Partial Least Square Regression ที่ตัดกลุ่มตัวอย่างแบบบอบแห้งออก.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	77
5.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อน.....	77
5.2 ผลการศึกษาการพัฒนาเทคนิคการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมัน และค่าความร้อนของชีวมวลโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี: กรณีศึกษา เนื้อในเมล็ดสปูดำ.....	77
5.2.1 สรุปผลการวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม.....	78
5.2.2 สรุปผลการสร้างสมการทำนายสมบัติของสปูดำด้วยวิธี Partial Least Square Regression.....	78
5.2.2.1 สรุปผลการสร้างสมการทำนายสมบัติเชิงความร้อน.....	78
5.2.2.2 สรุปผลการสร้างสมการทำนายค่าความชื้น.....	78
5.2.2.3 สรุปผลการสร้างสมการทำนายปริมาณน้ำมัน.....	79
5.2.2.4 สรุปผลการสร้างสมการทำนายค่าความร้อน.....	79
5.3 สรุปผลการสร้างสมการทำนายสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมัน ค่าความร้อน และของเนื้อในเมล็ดสปูดำที่ใช้สร้างสมการทำนายที่ตัดกลุ่มตัวอย่างแบบบอบแห้งออก.....	79
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	79
เอกสารอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก ตารางค่าสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมัน.....	89
ภาคผนวก ข ตารางค่าความร้อน.....	93
ภาคผนวก ค ผลงานที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่.....	98
ประวัติผู้เขียน.....	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแปลความหมายของค่า R และ R <sup>2</sup> .....	25
ตารางที่ 2.2 การอธิบายผลของค่า RPD และ RER.....	26
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน, $k$ (W/m °C) และอุณหภูมิ, $T$ °C.....	48
ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ , kJ kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ) และอุณหภูมิ ( $T$ , °C) ที่รูปแบบเมล็ดต่างกัน.....	49
ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับดูต่างกัน.....	50
ตารางที่ 4.4 ค่าการนำความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับดูและอุณหภูมิที่ต่างกัน.....	50
ตารางที่ 4.5 ความร้อนจำเพาะของเนื้อในเมล็ดสับดูที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับดูและอุณหภูมิที่ต่างกัน.....	51
ตารางที่ 4.6 ปริมาณความชื้นของเนื้อในเมล็ดสับดูที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับดูที่แตกต่างกัน.....	52
ตารางที่ 4.7 ปริมาณน้ำมันของเนื้อในเมล็ดสับดูที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับดูที่แตกต่างกัน.....	53
ตารางที่ 4.8 ค่าความร้อนของกากเนื้อในเมล็ดสับดูที่เหลือจากการสกัดน้ำมันออก.....	53
ตารางที่ 4.9 ค่าทางสถิติของความชื้น, ปริมาณน้ำมัน, ค่าความร้อนและสมบัติเชิงความร้อนของสับดูที่ใช้สร้างสมการทำนาย.....	56
ตารางที่ 4.10 ผลการสร้างสมการและการทำนายสมบัติต่างๆของสับดูโดยวิธี Partial Least Square Regression.....	56
ตารางที่ 4.11 ค่าทางสถิติของความชื้น, ปริมาณน้ำมัน, ค่าความร้อนและสมบัติเชิงความร้อนของสับดูที่ใช้สร้างสมการทำนายที่ตัดกลุ่มตัวอย่างแบบบอบแห้งออก.....	72
ตารางที่ 4.12 ผลการสร้างสมการและการทำนายสมบัติต่างๆของสับดูที่ตัดกลุ่มตัวอย่างแบบบอบแห้งออกโดยวิธี Partial Least Square Regression.....	72

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ระยะสเปกตรัมของผลสีดำและเหลืองที่สามารถเก็บเกี่ยวได้.....	8
รูปที่ 2.2	โครงสร้างของ Oleic acid.....	9
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของ Linoleic acid.....	9
รูปที่ 2.4	การกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารต่างๆ.....	18
รูปที่ 2.5	NIR สเปกตรัมของมือคน; วัตถุประสงค์ของสเปกตรัมแบบแพร่.....	21
รูปที่ 2.6	ข้อมูลสเปกตรัมและความเข้มข้นในรูปแบบเมทริกซ์ ในตัวอย่างนี้มีตัวอย่างคาลิเบรชัน M ตัวอย่างที่วัดและ - ในขั้นตอนที่สอง - N ความยาวคลื่นทั้งหมดของผลสเปกตรัมจะถูกเขียนในแถว (M, N) เมทริกซ์ เมทริกซ์นี้จะเทียบเท่ากับข้อมูลสเปกตรัมเมทริกซ์ X. ในทางเดียวกันค่าองค์ประกอบทั้งหมด L จะเขียนลงไปใน (M, L) เมทริกซ์ของข้อมูลความเข้มข้น.....	24
รูปที่ 2.7	Schematic diagram for the factorization of the spectral data matrix X.....	25
รูปที่ 3.1	รูปที่ 3.1 เนื้อในเมล็ดสับดูดาแบบเต็มเมล็ด (รูปที่ 3.1a), แบบ¼ เมล็ด (รูปที่ 3.1b) และแบบผง (รูปที่ 3.1c).....	34
รูปที่ 3.2	ผลสับดูดาที่ถูกเก็บสำหรับการทดลอง.....	35
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการทดลองเพื่อการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดาโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	36
รูปที่ 3.4	การเทเนื้อในเมล็ดสับดูดาลงในถ้วยควอทซ์.....	37
รูปที่ 3.5	การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany).....	37
รูปที่ 3.6	การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน.....	38
รูปที่ 3.7	กราฟพล็อตระหว่าง $\ln(\theta)$ และเวลา (t) เมื่อ $\theta = (T_c - T_o) / (T_o - T_e)$ .....	38
รูปที่ 3.8	การทดลองหาการนำความร้อนโดยใช้ line heat source probe.....	39
รูปที่ 3.9	การต่อวงจรการทดลองหาการนำความร้อนโดยใช้ line heat source probe.....	40
รูปที่ 3.10	ของเหลวที่ได้จากการสกัด .....	43
รูปที่ 3.11	ของแข็งที่เหลือจากการสกัดน้ำมัน.....	43
รูปที่ 3.12	ตัวอย่างที่นำมาอัดเม็ด.....	44
รูปที่ 3.13	เครื่อง pellet press.....	44
รูปที่ 3.14	เมล็ดที่ได้จากการอัด.....	44
รูปที่ 4.1	ค่าการแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดาของผลสีเหลืองและดำที่ขนาดเมล็ดต่างกัน.....	46
รูปที่ 4.2	ค่าการนำความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดา (ผลเหลืองและผลดำ) ที่รูปแบบเมล็ดอุณหภูมิต่างกัน.....	47
รูปที่ 4.3	แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนจำเพาะของเนื้อในเมล็ดสับดูดา (ผลสีเหลืองและดำ), ที่รูปแบบเมล็ดและอุณหภูมิต่างกัน.....	48
รูปที่ 4.4	สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อในเมล็ดสับดูดาที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับดูดาที่แตกต่างกัน.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมเฉลี่ยของกากเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่เหลือจากการสกัดน้ำมันออกที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับดูดำที่แตกต่างกัน.....	55
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าการแพร่ความร้อนที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	57
รูปที่ 4.7 Regression coefficient plot ของสมการการแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	58
รูปที่ 4.8 ค่า X-loading weight ของสมการการแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	59
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	60
รูปที่ 4.10 Regression coefficient ของสมการการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	60
รูปที่ 4.11 X-loading weight ของสมการการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	61
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	62
รูปที่ 4.13 Regression coefficient ของสมการการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	62
รูปที่ 4.14 X-loading weight ของสมการการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	63
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 40 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	64
รูปที่ 4.16 Regression coefficient ของสมการความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 40 °C ของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	64
รูปที่ 4.17 X-loading weight ของสมการความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 40 °C ของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	65
รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	66
รูปที่ 4.19 Regression coefficient ของสมการความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 °C ของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	66
รูปที่ 4.20 X-loading weight ของสมการความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 °C ของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	67
รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	68
รูปที่ 4.22 Regression coefficient ของสมการความชื้นของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	68
รูปที่ 4.23 X-loading weight ของสมการความชื้นของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ.....	69
รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของกากเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	70

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.25 Regression coefficient ของสมการการทำนายค่าร้อน.....	71
รูปที่ 4.26 X-loading weight plot ของสมการการทำนายค่าความร้อน.....	71
รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบค่าการแพร่ความร้อนที่ตัดตัวอย่างแบบอบแห้งออกที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	73
รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนที่ตัวอย่างแบบอบแห้งออกที่อุณหภูมิ 40 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	73
รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนที่ตัวอย่างแบบอบแห้งออกที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	74
รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะที่ตัวอย่างแบบอบแห้งออกที่อุณหภูมิ 40 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	74
รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะที่ตัวอย่างแบบอบแห้งออกที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	75
รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของเนื้อในเมล็ดสับดำที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	75
รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบค่าความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดำที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

สบูดำเป็นพืชพลังงานทางเลือกที่มีศักยภาพสูง ซึ่งขณะนี้ทั่วโลกมีการทำวิจัย (Kumar and Sharma 2008, Jingura 2011, Pandey et al. 2012, Ladawan Na Ayudhaya, and Garivait 2011, Liu et al. 2012, Chen et al. 2012, Kartika et al. 2012 ) เพื่อนำไปสู่การได้มาซึ่งพลังงานทดแทนพลังงานจากฟอสซิล ปริมาณน้ำมันและสมบัติเชิงความร้อนได้แก่ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity) และความร้อนจำเพาะ (Specific heat) และค่าความร้อน (Heating value) มีความสำคัญในด้านการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนและการออกแบบระบบทำแห้งและแปรรูป ในอนาคตการผลิตน้ำมันจากสบูดำจำเป็นต้องทำในรูปของการผลิตขนาดใหญ่ (Mass production) ต้องมีการทำแห้งเนื้อในเมล็ดสบูดำก่อนการส่งออก ต้องมีการตรวจวัดสมบัติของวัตถุดิบก่อนการผลิต ระหว่างการผลิต และก่อนการส่งมอบผลิตภัณฑ์ เพื่อเป็นค่าอ้างอิงในการซื้อขาย

สำหรับการตรวจวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันและสมบัติทางความร้อนด้วยวิธีดั้งเดิมต้องใช้เวลา สารเคมี และผู้เชี่ยวชาญและวิธีการที่ซับซ้อนในการตรวจวัด (Kara et al. 2011, Yang et al. 2003, Hobani and Tolba 1995, Cao et al. 2010, Wan and Zarins 2003, Aviara et al. 2008, Aviara and Haque 2001) ปัจจุบันมีเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Near Infrared Spectroscopy) ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ไม่สร้างมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถตรวจสอบได้อย่างรวดเร็วภายใน 2-3 นาที มีการนำเทคนิคนี้มาใช้กับเนื้อในเมล็ดสบูดำโดยวัดที่เมล็ดเดี่ยว (Single grain) (Vaknin et al. 2011) เพื่อใช้ในงานปรับปรุงพันธุ์พืช แต่ยังไม่มีการศึกษาการใช้เทคนิคนี้กับการวัดเมล็ดจำนวนมากเป็นกลุ่มธัญพืชเต็มเมล็ด (Whole grain) ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงเสนอข้อเสนอโครงการนี้เพื่อพัฒนาเทคนิคการวัดปริมาณน้ำมันและสมบัติเชิงความร้อนของชีวมวลโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี กรณีศึกษา เนื้อในเมล็ดสบูดำโดยวัดแบบ Whole grain ซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการในอนาคตของการผลิตเนื้อในเมล็ดสบูดำแห้งเพื่อการผลิตน้ำมัน ซึ่งผลการศึกษาวิจัยยังเป็นแนวทางเพื่อประยุกต์ใช้กับชีวมวลอื่นได้อีกด้วย

ในปัจจุบันจากการตรวจเอกสารยังไม่มีมีการนำเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (NIRS) มาใช้ในการวัดค่าสมบัติเชิงความร้อนพื้นฐานอาทิเช่น ค่าการแพร่ความร้อน ค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะของชีวมวล แต่มีรายงานการวิจัยว่ามีการนำ NIRS มาใช้ในการวัดสมบัติเชิงความร้อนของอาหาร อาทิเช่น แป้งมันเทศ (Lu 2006) ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่าที่ได้มีความแม่นยำโดยที่ผลทำนาย gelatinization onset temperature มีค่า standard error of prediction  $SEP=2.014$  °C, coefficient of determination  $RSQ=0.85$ , gelatinization peak temperature มีค่า  $SEP=1.371$  °C,  $RSQ=0.89$ , gelatinization temperature range มีค่า  $SEP=1.371$  °C,  $RSQ=0.89$  อย่างไรก็ตามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SEP=2.234 °C, RSQ=0.86 และ cooling resistance มีค่าSEP=0.528, RSQ=0.89, แบ่งข้าวเหนียวผสมกับแป้งข้าวหอมมะลิ (Chueamchaitrakun 2011) ผลการทดลองพบว่าสมบัติเชิงความร้อน ได้แก่ onset temperature, peak temperature, และ enthalpy produced ค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 0.82, 0.75 และ 0.73 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม มีการวิจัยซึ่งพบว่าความชื้นมีผลกับสมบัติเชิงความร้อน อาทิเช่น เมล็ดดอกคำฝอย (Kara 2011), roselle seed (Bamgboye 2010) และ Govindarajan et al. 2009 ใช้ NIR ในการวัดความชื้นในเมล็ดถั่วลิสง ผลการทดลองพบว่า วิธี PLSR  $R^2 = 0.93$  และ standard error of prediction (SEP) = 1.18 ส่วน วิธี MLR พบว่า  $R^2$  และ SEP = 0.91 และ 1.09 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการประเมินค่าที่มีความแม่นยำสูง ดังนั้น การประเมินสมบัติเชิงความร้อนของซีมวล (ในที่นี้คือเนื้อในเมล็ดสับ) ด้วย NIRS จึงมีศักยภาพสูงที่จะได้รับการพัฒนา

ในการทำนายค่าความร้อน (heating value) ของซีมวลโดยใช้ NIRS พบในรายงานการวิจัย อาทิเช่น ฟาง จากการศึกษาของ Huang et al. 2008 พบว่าค่า coefficients ของ calibration (R) เท่ากับ 0.96 ส่วน coefficients ของ validation (R) เท่ากับ 0.89 แต่ไม่พบรายงานการใช้ NIRS ในการวัดค่าความร้อนของกากเนื้อในสับที่หีบน้ำมันแล้ว

ส่วนการนำ NIRS มาใช้ในการวัดปริมาณน้ำมัน อาทิเช่น ปาล์มน้ำมัน (ฤทธิธ 2554) โดยใช้เครื่อง NIR spectrometer แบบพกพา (FQA-NIRGUN) และเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA) โดยใช้ระบบสะท้อนด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 700-1100 nm สามารถทำนายปริมาณน้ำมันอย่างแม่นยำด้วยค่า correlation (R) = 0.95 standard error of calibration (SEC) = 0.375% SEP = 3.88 % Bias = 0.008% ส่วนสมการที่ทำนายจากเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA) ที่ช่วงความยาวคลื่น 1200-2500 nm สามารถทำนายค่าปริมาณน้ำมันได้อย่างแม่นยำด้วยค่า R = 0.97 root mean square error of estimation (RMSEE) = 3.23 % root mean squares error of prediction (RMSEP) = 4.10% Bias = 0.02 โดย ratio of the SEP to the standard deviation (RPD) = 4.02, เมล็ดดอกคำฝอย (Rudolphi 2006) ผลการทดลองพบว่าการประมาณปริมาณน้ำมันในเมล็ดที่ผ่านการสีแล้วมีค่า coefficient of determination of calibration: RSQ = 0.96 coefficient of determination of cross validation: 1-VR = 0.93. ส่วนเมล็ดที่ยังไม่ได้สีมีค่า RSQ = 0.90, 1-VR = 0.82 ซึ่งมีความแม่นยำ, เมล็ดดอกทานตะวัน (2004) ผลการทดลองพบว่า  $R^2_{cal} = 0.90$  และ (SECv: 22.3)

ดังนั้น NIRS จึงมีศักยภาพสูง ช่วยให้สามารถลดระยะเวลาและวิธีการตรวจสอบให้สั้นลงได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมี เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในการนำมาใช้ประเมินสมบัติเชิงความร้อนและปริมาณน้ำมันของเมล็ดสับ จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจที่จะในการนำไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตพลังงานซีมวลจากของประเทศต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับได้แก่ การแพร่ความร้อน การนำความร้อนและความร้อนจำเพาะที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลผลิตและผลผลิตที่ความแตกต่างของเมล็ดได้แก่ เมล็ดเต็ม (full kernel) ¼ เมล็ดและแบบผง (powder)

2. เพื่อพัฒนาเทคนิคการวัดความชื้น, ค่าความร้อน, ปริมาณน้ำมันและสมบัติเชิงความร้อน ได้แก่ การแพร่ความร้อน, การนำความร้อนและความร้อนจำเพาะ: กรณีศึกษาเนื้อในเมล็ดสับดูดำโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

### 1.3 ปัญหาและสมมติฐานของการศึกษา

ในอดีตถึงปัจจุบันการวัดสมบัติเชิงความร้อนมีวิธีการที่ยุ่งยากและซับซ้อน อาทิเช่น ในการวัดค่าการแพร่ความร้อนใช้วิธีการวัดแบบ One-dimensional Fourier equation applied to a cylinder (Dickerson method) ซึ่งมีขั้นตอนการวัดโดยใช้ทองแดงทรงกระบอกบรรจุตัวอย่างการทดลอง ปิดฝาให้แน่นเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำเข้าไปด้านในท่อ เสียบสายเทอร์โมคอปเปิลเข้าแกนกลางท่อ และอีกสายติดที่ผนังท่อ จากนั้น จุ่มท่อทองแดงลงในน้ำที่ผสมกับน้ำแข็งอุณหภูมิประมาณ 0°C แล้วบันทึกค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกและด้านในทุกๆ 1 นาที รอจนกว่าอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกและด้านในท่อจะคงที่และใกล้เคียงกันซึ่งต้องให้เวลานานประมาณ 70-80 นาที (Ba'iri and Laraqi, 2003)

สำหรับวิธีการวัดค่าการนำความร้อนนั้นใช้วิธี transient technique (Kara et al. 2011) ซึ่งใช้ตัวกำเนิดความร้อนแบบเชิงเส้น (line heat source) วิธีการวัดโดยบรรจุตัวอย่างที่ต้องการวัดลงในท่อทองแดง ปิดฝาให้แน่น แล้วเสียบหัว Probe เข้าไปยังแกนกลางท่อซึ่งเป็นตัวกำเนิดความร้อนแบบเชิงเส้น จากนั้นจุ่มท่อทองแดงลงไปยังสารละลายที่ถูกควบคุมจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 25-100 °C ต้องรอจนกว่าอุณหภูมิตัวอย่างจะเท่ากับอุณหภูมิของสารละลายซึ่งต้องใช้เวลาจากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังหัว Probe รอประมาณ 10 วินาที แล้วจึงเปิดเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิและเวลาเป็นเวลาประมาณ 3 นาที แล้วจึงนำค่าที่ได้ทำการหาค่าการนำความร้อนต่อไป สำหรับวิธีการหาค่าความร้อนจำเพาะนั้นใช้เครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) โดยใช้ตัวอย่างที่มีขนาดเล็กมีลักษณะชิ้นบางๆ โดยใช้อัตราการให้ความร้อน (heat rate) ที่คงที่เช่น 10°C/min จากอุณหภูมิ 25-100°C ทั้งนี้โดยใช้ sapphire เป็นสารอ้างอิง

สำหรับวิธีการหาค่าความร้อน (heating value) หาโดยใช้ bomb calorimeter โดยการบดตัวอย่างด้วยโกร่งบดละเอียด หลังจากนั้นอัดให้เป็น pellet น้ำหนักประมาณ 0.5-1.0 g (รูปที่ 3.13) โดยใช้เครื่อง pellet press (รูปที่ 3.12) แล้วนำตัวอย่างวางลงในถ้วยแก้ว วางถ้วยแก้วเข้ากับตะขอเกี่ยวของ bomb head นำด้าย (lead wire) มัดเข้ากับ bomb head แล้วนำตัวอย่างวางทับปลายทั้งสองข้างของด้าย นำ bomb head ใส่ใน oxygen bomb ปิดฝา เติมออกซิเจนที่ความดัน 30 bar จากนั้นนำ oxygen bomb วางในเครื่อง bomb calorimeter แล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าเพื่อเผาตัวอย่าง ขณะเผาจะมีการกวนน้ำด้วยใบกวน เพื่อให้มีอุณหภูมิสม่ำเสมอแล้ววัดอุณหภูมิของน้ำที่ร้อนขึ้นจากการเผา แล้วคำนวณค่าความร้อน เป็นหน่วย J/g ซิวมวล อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องแก้ไขค่าที่ได้เนื่องจาก ลวดตัวนำถูกเผาไปด้วยทำให้ลวดมีความร้อนสูงขึ้นส่งผลให้พลังงานบางส่วนสูญเสียไปและการที่ซิวมวลมีธาตุ N และ S จะเกิด NO<sub>x</sub> และ SO<sub>x</sub> ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับ H<sub>2</sub>O จะเกิดกรด HNO<sub>3</sub> และ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ซึ่งกระบวนการเกิดกรดนี้ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic process) ดังนั้นเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเผาต้องระบายความดันในถังเผาออกและนำลวดที่เหลือมาวัด แล้วคำนวณความร้อนที่เกิดขึ้น และใช้น้ำชะล้างภาชนะ แล้วนำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์ ด้วยต่าง โดยใช้

เอกส MethyI orange เป็น indicator การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการหาปริมาณน้ำมันทำโดยนำเมล็ดสับุดำมาบดโดยครกแล้วบดให้ละเอียด จากนั้นบรรจุเมล็ดสับุดำที่บดแล้วลงในขวด vial แล้วเติมเฮกเซนปริมาณ 2 ml ลงในขวด ปิดฝาให้แน่น แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่อง rotary mixer เป็นเวลา 60 นาที จากนั้น นำไปหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อแยกชั้นของแข็งและของเหลวโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm เป็นเวลา 20 นาที เมื่อได้ของแข็งและของเหลวที่แยกชั้นกันแล้ว ทำการเทแยกของเหลวออกแล้วปล่อยให้เฮกเซนระเหยออก ส่วนของแข็งที่เหลือในขวด vial นั้น เทเฮกเซนลงไป 2 ml ปิดฝาให้แน่น นำไปเขย่าด้วยเครื่อง rotary mixer เป็นเวลา 60 นาที จากนั้น นำไปหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) เพื่อแยกชั้นของแข็งและของเหลวโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm เป็นเวลา 20 นาที แล้วเทแยกของเหลวออกแล้วปล่อยให้เฮกเซนระเหยออกแล้วคำนวณปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ทั้ง 2 รอบ

จะเห็นว่าการหาปริมาณน้ำมัน สมบัติเชิงความร้อน และค่าความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับุดำนั้น ต้องใช้อุปกรณ์ที่ยุ่ยากซับซ้อน มีหลายขั้นตอน อุปกรณ์บางชนิดมีราคาแพงและต้องใช้เวลาในการทดลอง

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับุดำได้แก่ การแพร่ความร้อนโดยวิธี Dickerson method และการนำความร้อนโดยวิธี transient technique ที่อุณหภูมิ 25 40 60 80 และ 100 °C ที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสีเหลืองและผลสีดำที่ความแตกต่างของเมล็ดได้แก่ เมล็ดเต็ม (full kernel) ¼ เมล็ดและแบบผง (powder) ตามลำดับและศึกษาความร้อนจำเพาะด้วยเครื่อง DSC ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min ของเมล็ดแบบชิ้นเล็กและแบบผง (powder) ตามลำดับ

2. ทำนายค่าความชื้น, ค่าความร้อน, ปริมาณน้ำมันและสมบัติเชิงความร้อนได้แก่ การแพร่ความร้อน, การนำความร้อนและความร้อนจำเพาะของเนื้อในเมล็ดสับุดำที่ระยะผลสีเขียว, สีเหลือง, สีดำและแบบแห้งซึ่งได้จากการอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปีโดยหาค่าความชื้นอ้างอิงโดยการอบที่อุณหภูมิ 105 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่, หาค่าปริมาณน้ำมันอ้างอิงโดยวิธีการสกัดด้วยเฮกเซน, หาค่าพลังงานโดยใช้เครื่องบอมแคลอรีมิเตอร์, หาค่าการแพร่ความร้อนโดยวิธี Dickerson method โดยใช้ร่วมกับท่อทองแดงทรงกระบอก, หาค่าการนำความร้อนโดยวิธี transient flow method โดยใช้ร่วมกับการกำเนิดความร้อนแบบเชิงเส้นและหาค่าความร้อนจำเพาะอ้างอิงโดยการคำนวณจากค่าความหนาแน่นรวม, การแพร่ความร้อนและการนำความร้อน

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ค่าสมบัติเชิงความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับุดำได้แก่ การแพร่ความร้อนโดยวิธี Dickerson method และค่าความร้อนโดยวิธี transient technique ที่อุณหภูมิ 25 40 60 80 และ 100 °C ที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสีเหลืองและผลสีดำที่ความแตกต่างของเมล็ดได้แก่ เมล็ดเต็ม (full kernel) ¼ เมล็ดและแบบผง (powder) ตามลำดับและค่าความร้อนจำเพาะด้วยเครื่อง DSC ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min ของเมล็ดแบบชิ้นเล็กและแบบผง (powder) ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปใช้

เป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบระบบอบแห้งของสับดูดำในรูปแบบเมล็ดต่างๆได้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันจากสับดูดำ

2. ได้เทคนิคและแบบจำลองในการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดำด้วยวิธีไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

3. ได้องค์ความรู้ใหม่ในการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปีเพื่อการตรวจวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ ซึ่งใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับชีวมวลอื่นๆต่อไป

## 1.6 ขั้นตอนการดำเนินการ

### วิธีการ

1. ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนโดยเตรียมตัวอย่างเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ (ผลเหลือง ผลดำ) และเตรียมเนื้อในเมล็ดสับดูดำในรูปแบบเต็มเมล็ด 1/4 เมล็ดและแบบผงและศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยวิธีโดยวิธีมาตรฐานต่อไป

2. สร้างสมการความสัมพันธ์ของสมบัติสับดูดำกับขนาดของอนุภาคและอุณหภูมิ

3. ศึกษาการทำนายค่าต่างๆด้วยวิธี NIR spectroscopy โดยเตรียมตัวอย่างเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ (ผลเขียว ผลเหลือง ผลดำ) และเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 2 hr 45 min (Sirisomboon and Kichaiya 2009) โดยเตรียมที่ระยะเวลาต่างๆ กัน โดยมีตัวอย่างระดับละ 25 ตัวอย่าง

4. ผ่านตัวอย่างเนื้อในเมล็ดสับดูดำจากข้อ 1 หลังจากเตรียมพื้นที่ เข้าสแกนด้วยเครื่อง Near infrared spectrometer

5. นำตัวอย่างไปวัดสมบัติเชิงความร้อน ได้แก่ ค่าการแพร่ความร้อน ค่าการนำความร้อน และความร้อนจำเพาะ ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนโดยวิธีดั้งเดิม

6. สร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงความร้อน ได้แก่ ค่าการแพร่ความร้อน ค่าการนำความร้อน และความร้อนจำเพาะ ความชื้น ปริมาณน้ำมัน และค่าความร้อนกับ Optical data โดยวิธีทำ Chemometric แบบ Partial least squares regression พร้อมทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สบู่ดำ

#### 2.1.1 ความเป็นมา (กรมวิชาการเกษตร. 2552)

สบู่ดำจัดเป็นพืชในวงศ์ Euphorbiaceae ซึ่งเป็นวงศ์เดียวกับมันสำปะหลัง ยางพารา สบู่ดำมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas* L. ชื่อสามัญ คือ physic nut ทั้งนี้ คำว่า *Jatropha* มีรากศัพท์มาจาก ทางกรพทย์ของภาษากรีก 2 คำ คือ *jatros* แปลว่า หมอ และ *trophe* แปลว่า อาหาร ส่วนคำว่า *curcas* เป็นชื่อเรียกของสบู่ดำ บริเวณเมือง Malabar ในประเทศอินเดีย นอกจากนี้ ยังมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไปในแต่ละประเทศอีกด้วย เช่น *purging nut* (อังกฤษ) *pourghere*, *pignon d'Inde* (ฝรั่งเศส) *purgeernoot* (เนเธอร์แลนด์) *purgueira* (โปรตุเกส) *fagiola d'India* (อิตาลี) *kadam* (เนปาล) *yu-lu-tzu* (จีน) *tubang-bakod* (ฟิลิปปินส์) *jarak budeg* (อินโดนีเซีย) *bagani* (ไอเวอรี่โคสต์) *butuje* (ไนจีเรีย) *pinoncillo* (เม็กซิโก) *tempate* (คอสตาริกา) *mundubi-assu* (บราซิล) *pinol* (เปรู) และ *pinon* (กัวเตมาลา) จึงเป็นที่น่าสังเกตได้ว่า ต้นสบู่ดำสามารถเจริญเติบโตได้เกือบทั่วโลก ทำให้มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตาม สันนิษฐานกันว่า สบู่ดำเป็นพืชพื้นเมืองแถบทวีป อเมริกากลาง อเมริกาใต้ และ แอฟริกาใต้ สำหรับในประเทศไทย คาดว่าถูกนำเข้ามาในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 18 หรือช่วงปลายสมัย กรุงศรีอยุธยาโดยพ่อค้าชาวโปรตุเกส รัชชื้อเมล็ดไปคั้นน้ำมันสำหรับทำสบู่ หลังจากนั้น ได้มีการปลูกกันแพร่หลายในทุกภาคของประเทศไทย และมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไป สาเหตุที่เรียกว่า ต้นสบู่ดำ หรือต้นสบู่ เพราะมีน้ำยางสีขาวคล้ายสบู่ บริเวณลำต้นและกิ่ง ทางภาคเหนือเรียกว่า มะหุ้งฮั่ว ไข่-ยู หรือเกงยู ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เรียกว่า มะเยา มักเย้า หรือสีหลอด ส่วนภาคใต้เรียกว่า หงส์เทศ และภาษายาวีเรียกว่า ยาเฆาะ เป็นต้น

#### 2.1.2 การเก็บเกี่ยว (อภิชาติ ศรีสะอาด. 2549: 36)

สบู่ดำเป็นพืชตอนสามารถปลูกแล้วให้ผลผลิตได้ตั้งแต่ปีแรกและถ้ามีการให้น้ำและปุ๋ยก็สามารถให้ผลผลิตได้ตลอดทั้งปี การทดลองปลูกระยะ 1x2 เมตรและรดน้ำเวลาฝนไม่ตกสามารถผลิตเมล็ดได้ 800 กิโลกรัมต่อไร่ในปีแรก ถ้าปล่อยตามธรรมชาติให้ผลผลิตปีละ 1-2 ครั้งกล่าวกันว่า สบู่ดำในไทยให้ผลผลิตต่ำเพียงปีละ 1,000 กิโลกรัม แต่อินเดียให้ผลผลิตเป็นเมล็ดได้ถึง 3,000 กิโลกรัม การเก็บเกี่ยวสังเกตได้จากสีของผลสบู่ดำ หากมีสีเหลืองให้ทยอยเก็บไปเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2.1 หากปล่อยไว้จนสบู่ดำแห้งจะมีผลสีดำและจะร่วงหล่นลงดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ระยะสบูดำผลสีดำและเหลืองที่สามารถเก็บเกี่ยวได้

### 2.1.3 การสกัดน้ำมันสบูดำ (พินิจ จันทร. 2551: 106)

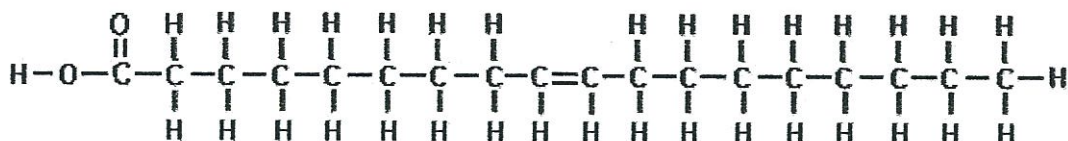
ในเมล็ดสบูดำที่เก็บผลผลิตมาประมาณ 4 กิโลกรัม จะสกัดได้น้ำมัน 1 ลิตร หรือประมาณ 25-30% การสกัดน้ำมันทำได้หลายวิธีซึ่งอาจจะได้ปริมาณน้ำมันที่แตกต่างกัน เช่น ในห้องปฏิบัติการใช้วิธีบดละเอียดแล้วสกัดด้วยตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ จะได้น้ำมัน 34.96% จากเมล็ดรวมเปลือก และ 54% จากเนื้อเมล็ด ส่วนการสกัดด้วยระบบไฮดรอลิกและระบบอัดเกลียว จะได้น้ำมันใกล้เคียงกัน ประมาณ 25-30% และมีน้ำมันตกค้างในกากประมาณ 10-15% ในการสกัดใช้ผลสบูดำแห้ง (ผลสีเหลืองถึงผลสีดำ) ที่แก่จากต้น นำมาแกะเอาเปลือกออกให้เหลือเฉพาะเมล็ดฝึ้งลมให้แห้ง ก่อนการสกัดด้วยระบบไฮดรอลิกและระบบอัดเกลียวต้องนำเมล็ดมาทุบให้แตกหรือบดหยาบแล้วนำไปเพิ่มความร้อนโดยการตากแดดหรือเข้าเครื่องอบก่อนการสกัดเพื่อให้การสกัดทำได้ง่ายขึ้น น้ำมันที่ได้จากการสกัดต้องนำเอาสิ่งสกปรกออกหรือทิ้งให้ตกตะกอนก่อนนำไปใช้งานและสามารถใช้กับเครื่องดีเซลโดยไม่ต้องผสมกับน้ำมันชนิดอื่นอีก

### 2.1.4 องค์ประกอบของเนื้อในเมล็ดสบูดำ

จาก Wikipedia (2013a) เนื้อในเมล็ดสบูดำประกอบด้วย Saturated fatty acids 20% และ unsaturated fatty acids อยู่ 80% และมีปริมาณน้ำมันประมาณ 25-40% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้เนื้อในเมล็ดยังประกอบไปด้วยสารเคมีอื่น ๆ อาทิเช่น saccharose (Sucrose), raffinose, stachyose, glucose, fructose, galactose, และ protein. ปริมาณน้ำมันส่วนใหญ่ถูกสร้างจาก oleic และ linoleic acids ซึ่งประกอบไปด้วยพันธะต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่น ๆ อีกเช่น curcasin, arachidic, linoleic, myristic, oleopalmitic, stearic acids และ curcin

จาก Wikipedia (2013b) Oleic acid คือกรดไขมันซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติเช่น เนื้อสัตว์และน้ำมันและไขมันของพืช มันเป็นน้ำมันที่ไม่มีสีไม่มีกลิ่น แม้ว่าในตัวอย่างเชิงการค้าอาจเป็นสีเหลือง มีชื่อทางเคมีว่า Octadecenoic acid เป็น กรดไขมัน (fatty acid) ประเภทกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) ที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ (double bond) 1 ตำแหน่งที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 9 จัดเป็น monounsaturated fatty acid (Food Network Solution, 2013) มีสูตรโครงสร้างเป็น  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$  (รูปที่ 2.2 )

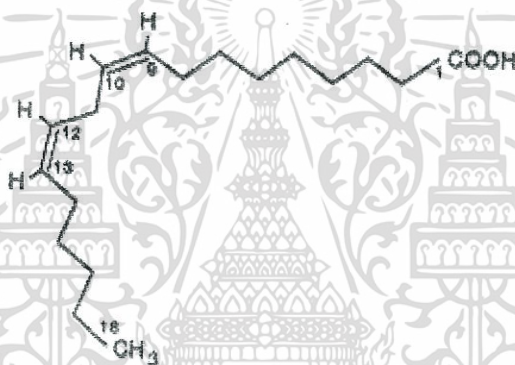
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับโครงการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### Oleic Acid- Monounsaturated Fatty Acid

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ Oleic acid (Food Network Solution. 2013a)

กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid) เป็น กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม และมีพันธะคู่ 2 อัน (C 18: 2) พันธะคู่อยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 9 และ 12 มีชื่อเคมีว่า 9,12 octadecadienoic acid จัดเป็น polyunsaturated fatty acid และเป็นกรดไขมันในกลุ่มโอเมกา-6 (omega-6 fatty acid) โครงสร้างที่พบตามธรรมชาติเป็นแอลฟา-ลิโนเลอิก (alpha-linoleic acid) (Food Network Solution, 2013b) (รูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ Linoleic acid (Food Network Solution. 2013b)

## 2.2 สมบัติเชิงความร้อน

### 2.2.1 การนำความร้อน

จากวิกิพีเดีย (2555) การนำความร้อน คือ ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ จาก Aghbashlo et al. (2008) การวัดการนำความร้อนโดยวิธี transient-state heat transfer methods ถูกใช้ในการหาค่าการนำความร้อนโดยวัดจากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิหัววัดที่เปลี่ยนแปลงกับอัตราการให้ความร้อน โดยที่มีหัววัดเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน สมมติให้เส้นกำเนิดความร้อนมีความยาวเป็นอนันต์และความร้อนกระจายตัวและอุณหภูมิหัววัดเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมี (r) ซึ่งอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเป็นดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T - T_0 = -\left(\frac{Q}{4\pi k}\right) Ei\left[-\frac{r^2}{4\alpha t}\right] \quad 2.1$$

เมื่อ

$T_0$  = อุณหภูมิเริ่มต้นของหัววัด ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T$  = อุณหภูมิสุดท้ายของหัววัด ( $^{\circ}\text{C}$ )

$Q$  = ความร้อนของแหล่งกำเนิดความร้อนแบบเส้น (W)

$k$  = การนำความร้อน ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ )

$r$  = รัศมีของหัววัด (m)

$\alpha$  = การแพร่ความร้อน ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$t$  = เวลา (s)

$Ei(-x)$  = คือ exponential integral function

สมการที่ 2.1 สามารถเปลี่ยนรูปเป็น

$$T - T_0 = \frac{Q}{4\pi k} \left[ \ln \frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma + \left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) - \frac{(-1)^2}{2 \cdot 2!} \left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)^2 \cdots \frac{(-1)^n}{n \cdot n!} \left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)^n \right] \quad 2.2$$

เมื่อ  $\gamma$  ค่าคงที่ของ Euler's constant

เมื่อ  $\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)$  มีค่าน้อยมาก term ที่ 2 จะถูกตัดทิ้งไปดังนั้นสมการจะเป็นดังนี้

$$T - T_0 = \frac{Q}{4\pi k} \left[ \ln \frac{4\alpha t}{r^2} + \ln t \right] \quad 2.3$$

สมการที่ 2.3 เมื่อพล็อตระหว่าง ( $\Delta T$ ) และ natural logarithm ของเวลา  $\ln(t)$  ดังนั้นสมการจะได้ความชัน  $S = Q/(4\pi k)$  ดังนั้นค่าการนำความร้อนคำนวณได้จากสมการ

$$k = \frac{Q\Delta \ln(t)}{4\pi\Delta T} \quad 2.4$$

$$\text{หรือ } k = \frac{Q}{4\pi S} \quad 2.5$$

เมื่อ  $Q = I^2 R$  ดังนั้นสมการที่ 2.5 จะได้

$$k = \frac{I^2 R}{4\pi S} \quad 2.6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$I$  = กระแสไฟฟ้า (A)

$R$  = ความต้านทานต่อความยาว ( $\Omega\text{m}^{-1}$ ).

## 2.2.2 การแพร่ความร้อน

จาก Mohsenin (1980) อ้างโดย Yang et al. (2002) การแพร่ความร้อน ( $\alpha$ ) คือค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ของความร้อนผ่านพื้นที่หน้าตัดหรือแพร่ผ่านวัสดุและแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad 2.7$$

เมื่อ  $\rho$  คือความหนาแน่น ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $c_p$  คือความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ( $\text{J}/\text{kg K}$ ), และ  $k$  คือค่าการนำความร้อน ( $\text{W}/\text{m K}$ ) ของวัสดุ. ในระบบ SI หน่วยของ  $\alpha$  คือ ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) การแพร่ความร้อนวัดความสามารถของวัสดุในการดำเนินการทางความร้อนซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเก็บพลังงานความร้อน เช่น เมื่อวัสดุมีขนาดชิ้นใหญ่ ค่า  $\alpha$  มีค่ามากจึงทำให้มีการแลกเปลี่ยนพลังงานและอุณหภูมิอย่างรวดเร็วกับสิ่งแวดล้อม ในขณะที่วัสดุอนุภาคขนาดเล็ก ค่า  $\alpha$  มีค่าน้อยจึงทำให้มีการแลกเปลี่ยนพลังงานและอุณหภูมิกับสิ่งแวดล้อมช้า การวัดค่าการแพร่ความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบหลักๆ คือการวัดทางตรง (direct prediction) และทางอ้อม (indirect prediction) การวัดทางตรงคือการวัดโดยการคำนวณจากค่าการนำความร้อน ความร้อนจำเพาะและความหนาแน่น การวัด Thermal diffusivity ของวัสดุที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกมีคุณสมบัติเชิงความร้อนสม่ำเสมอ มีอุณหภูมิเริ่มต้น  $T_0$  แล้วจุ่มทรงกระบอกลงในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่างไป โดยอุณหภูมินั้นคงที่  $T_e$  ซึ่งจะเกิดการนำความร้อนเกิดขึ้น การนำความร้อนถูกสมมุติว่าคงที่ตลอดกระบวนการและมีความสม่ำเสมอตลอดผิวของการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสามารถเขียนสมการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาได้ตามสมการ Fourier ของรูปทรงกระบอกดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right] \quad 2.8$$

เมื่อ  $T$  คือ อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $r$  คือ รัศมีทรงกระบอก (m),  $x$  คือ ความยาวตามแนวแกน (m),  $\alpha$  คือ Thermal diffusivity ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) และ  $t$  คือ เวลา (s) และสมมุติให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวแกนไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad 2.9$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นจะได้สมการดังนี้

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad 2.10$$

ซึ่งสามารถหาคำตอบโดยวิธีของ Bairy and Laraqi (2003) ได้

$$\theta = \frac{T_c - T_e}{T_{c_0} - T_e} = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \exp(-\xi_m^2 Fo_c) \frac{1}{\xi_m} \frac{J_1(\xi_m)}{J_0^2(\xi_m) + J_1^2(\xi_m)} J_0(\xi_m r^*) \quad 2.11$$

เมื่อ  $\theta$  คือ อัตราส่วนอุณหภูมิ (ไม่มีหน่วย),  $T_{c_0}$  คือ อุณหภูมิจุดกึ่งกลางท่อทรงกระบอกเริ่มต้น ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_c$  คือ อุณหภูมิจุดกึ่งกลางของกระบอกที่บรรจุเมล็ดที่เวลาใดๆ ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_e$  คืออุณหภูมิของน้ำและน้ำแข็งที่อยู่รอบๆ ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $Fo_c$  คือ Fourier number (ไม่มีหน่วย),  $J_0$  และ  $J_1$  คือ Bessel function ชนิดที่ 1 ลำดับที่ 0 และ 1 ตามลำดับ  $\xi_m$  คือ ค่ารากที่เป็นบวกของสมการด้านล่างนี้

$$\xi_m J_1(\xi_m) - Bi_c J_0(\xi_m) = 0 \quad 2.12$$

$$r^* = \frac{r}{R} \text{ คือ อัตราส่วนรัศมี}$$

$$Bi_c = \frac{hR}{\lambda} \text{ คือ The modified Biot number}$$

$$Fo_c = \frac{\alpha t}{R^2} \text{ คือ The modified Fourier number}$$

เนื่องจากการทดลองได้บรรจุตัวอย่างลงในกระบอกแล้วจุ่มในภาชนะที่บรรจุน้ำผสมน้ำแข็งที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันมาก ทำให้มีการนำความร้อนที่ผิวสูง ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$\theta = \left\{ 2 \left( \frac{1}{\xi_1} \frac{J_1(\xi_1)}{J_0^2(\xi_1) + J_1^2(\xi_1)} \right) J_0(\xi_1 r^*) \right\} \exp[-(\xi_1^2 Fo_c)] \quad 2.13$$

ให้ค่า  $K$  เป็นส่วนคงที่ของสมการนี้ ดังนั้น

$$\theta = K \exp[-(\xi_1^2 Fo_c)] = K \exp \left[ -\alpha \left( \frac{\xi_1}{R} \right)^2 t \right] \quad 2.14$$

$\xi_1 = 2.405$  (Bairy and Laraqi, 2003) ดังนั้นค่าคงที่ของเวลา  $\tau$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau = \left[ \alpha \left( \frac{\xi_1^2}{R^2} \right) \right]^{-1} \quad 2.15$$

$$\tau = \frac{1}{\text{slope}}$$

ดังนั้นความชันของกราฟ  $\ln \theta = f(t)$  จะสามารถหาค่า  $\tau$  ได้ ซึ่งจะนำไปสู่การหาค่าการแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity) ดังสมการต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{1}{\tau} \left( \frac{R}{2.405} \right)^2 \quad 2.16$$

### 2.2.3 ความร้อนจำเพาะ (วิกิพีเดีย. 2556)

ความร้อนจำเพาะ (อังกฤษ: Heat Capacity) เป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัตถุที่สามารถวัดได้ โดยอธิบายความสามารถในการเก็บความร้อนของวัตถุนั้น ๆ. กล่าวโดยคร่าว ๆ นิยามของความร้อนจำเพาะคือ ความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ในการที่จะเปลี่ยนอุณหภูมิของวัตถุหนึ่ง ณ สภาวะหนึ่ง ให้เพิ่มขึ้น 1 องศา. เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนคือการถ่ายเทพลังงานประเภทหนึ่ง ดังนั้นหน่วยของความร้อนจำเพาะคือ จูลส์ต่อเคลวิน จาก Mohsenin (1980) อ้างอิงโดย Yang et al. (2002) กล่าวความสัมพันธ์ของการแพร่ความร้อน ( $\alpha$ ) ความร้อนจำเพาะและการนำความร้อน เป็นดังสมการ

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad 2.17$$

เมื่อ  $\rho$  คือความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ ) กรณีวัสดุปริมาตรมวล ความหนาแน่นจะเป็นความหนาแน่นรวม (bulk density),  $c_p$  คือความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ( $\text{J/kg K}$ ), และ  $k$  คือค่าการนำความร้อน ( $\text{W/m K}$ ),  $\alpha$  คือ การแพร่ความร้อน ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) ดังนั้นความร้อนจำเพาะจึงสามารถคำนวณได้จากสมการ

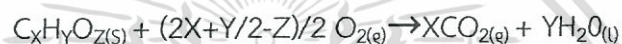
$$c_p = \frac{k}{\rho \alpha} \quad 2.18$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ค่าความร้อน (heating value) (นิรนาม. 2556d)

### 2.3.1 การหาค่าความร้อน

ชีวมวลมีพลังงานสะสมอยู่ในรูปของพลังงานเคมีซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ แต่สามารถหาค่าพลังงานในรูปของพลังงานความร้อนได้โดยนำมาเป็น เชื้อเพลิงในการต้มน้ำ พลังงานที่สะสมอยู่ในชีวมวลจะเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน แล้วถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับน้ำ น้ำจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นจึง คำนวณหาปริมาณความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นแทน พลังงานความร้อนมีหน่วยวัดเป็น จูล (J) การวัดพลังงานความร้อนนี้ทำได้โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า bomb calorimeter ซึ่งเป็นการวัดพลังงานที่สะสมอยู่ในชีวมวลภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน Bomb calorimeter เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาพลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้ (enthalpy of combustion) สมการที่ (1) เป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้สารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอน



เนื่องจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ (combustion reaction) ส่วนใหญ่จะเป็นการให้พลังงาน ดังนั้นค่าพลังงานต่อหน่วยมวลที่เกิดจากการเผาไหม้ (enthalpy of combustion) จึงมีค่าเป็นลบ

### 2.3.2 หลักการทำงานของ Bomb Calorimeter

การทำงานของ bomb calorimeter จะใช้หลักการของ direct calorimetry ซึ่งเป็นการวัดปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อการเผาผลาญชีวมวลเกิดขึ้น อย่างสมบูรณ์ ชีวมวลจะถูกบรรจุใน chamber และ charged ด้วยออกซิเจนภายใต้ ความดันสูง (high pressure) จากนั้นให้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน fuse และทำให้เกิดการจุดระเบิด (ignites) เชื้อเพลิงซึ่งได้แก่ส่วนผสมของชีวมวลและออกซิเจน (biomass-oxygen mixture) เนื่องจาก calorimeter จะถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกัน ไม่ให้ความร้อนถ่ายเทออกไปสู่สภาวะแวดล้อม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำทำให้ทราบปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยจากชีวมวล

การคำนวณหาปริมาณความร้อนโดยใช้สูตร

$$Q = mC_p\Delta t \quad 2.19$$

Q = ปริมาณความร้อน (kJ)

m = มวลของสาร (kg)

$C_p$  = ความร้อนจำเพาะของสาร (J/kg K)

$\Delta t$  = อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (K)

เนื่องจากการคำนวณปริมาณความร้อนนี้เป็นปริมาณความร้อนที่น้ำได้รับและค่าความร้อนจำเพาะ

ของน้ำมีค่าเป็น 4.187 kJ / kg K ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การสกัดน้ำมันในเมล็ดพืชน้ำมันโดยสกัดด้วยตัวทำละลาย (นิรนาม. 2556a)

วิธีการที่ใช้สำหรับแยกสาร 2 ชนิด ที่มีความสามารถในการละลายต่างกัน โดยใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยปกติของเหลวที่ใช้สกัดคือตัวทำละลายอินทรีย์ น้ำเป็นตัวทำละลายที่สามารถละลายไอออนต่างๆ หรือสารประกอบอินทรีย์ในสภาพที่มีขี้ ส่วนตัวทำละลายอินทรีย์สามารถละลายสารประกอบที่เป็นกลางหรือสารประกอบอินทรีย์ชนิดไม่มีขี้โดยอาศัยหลักการ สารที่มีสมบัติคล้ายกันจะละลายเข้าด้วยกัน (like dissolves like) เช่นการแยกน้ำมันออกจากเมล็ดพืชโดยใช้เฮกเซน ซึ่งเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นตัวทำละลายโดยน้ำมันจากเมล็ดพืชจะละลายได้ดีในเฮกเซน หลังจากเขย่ากรวยแยกแล้วตั้งทิ้งไว้ จะได้ชั้นของเฮกเซนที่มีน้ำมันละลายอยู่เมื่อทำการระเหยเฮกเซนออกจะได้น้ำมันตามต้องการ

## 2.5 ความชื้นในพืช (นิรนาม. 2556b)

การหาความชื้นในวัสดุเกษตรและอาหารหาโดย American Society for Testing and Materials in publication ASTM D4442 ซึ่งแบ่งเป็น 2 ฐานคือ ฐานเปียกและแห้ง เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียกหาได้จากมวลของน้ำในอาหารต่อมวลความชื้นของอาหารคูณด้วย 100 ดังสมการที่ 2.20:

$$\%MC_{wb} = \frac{M_w}{M_w + M_s} \times 100 \quad 2.20$$

เมื่อ  $\%MC_{wb}$  คือเปอร์เซ็นต์ฐานเปียก  $M_w$  คือมวลของน้ำที่อยู่ในอาหารและ  $M_s$  คือ มวลของอาหารแห้ง และในทางกลับกันเปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง ( $\%MC_{db}$ ) สามารถหาได้จากอัตราส่วนของมวลของน้ำต่อด้วยมวลแห้งคูณด้วย 100 ของอาหารดังสมการที่ 2.21:

$$\%MC_{db} = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad 2.21$$

ในการหาค่าความชื้นสามารถหาได้จากการใช้ตู้อบและเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการหาความชื้นอาจสังเกตได้จากน้ำหนักแห้งของวัสดุที่เปลี่ยนไป หากพบว่าน้ำหนักของวัสดุที่ทำการอบยังมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อถึงระยะเวลาที่กำหนด แสดงว่าน้ำในวัสดุยังถูกกำจัดออกไปได้ไม่สมบูรณ์ดังนั้นจึงควรอบไปจนกระทั่งน้ำหนักนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง

## 2.6 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR Spectroscopy). (ปานมนัส ศิริสมบูรณ์. 2556)

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near infrared spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการอันตรกิริยา (Interaction) เมื่อคลื่นเนียร์อินฟราเรด (ความยาวคลื่นระหว่าง 700-2500

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

nm) ที่ส่องไปยังวัสดุ เช่น ผลผลิตทางเกษตรและอาหาร ทำให้พันธะทางเคมีภายในวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพันธะ O-H, C-H และ N-H ของวัสดุ ดูดซับคลื่นและทำให้เกิดอาการสั่นสะเทือนของพันธะ โดยการเปลี่ยนระดับพลังงานข้ามขึ้นมากกว่า 1 ชั้น (Overtone) หรือเกิดจากการสั่นสะเทือนข้าม 1 ชั้น (Fundamental vibration) พร้อมกันของพันธะตั้งแต่ 2 พันธะขึ้นไป ทำให้ได้ผลรวมของการสั่น (Combination vibration) เครื่องมือที่ใช้เรียกว่า สเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ซึ่งมีแหล่งแสงที่ให้ช่วงคลื่นเนียร์อินฟราเรด ปกติเป็นหลอดทั้งสแตนฮาโลเจน (Tungsten halogen) ตัวตรวจวัด (Detector) ในเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ทำจากสารต่างๆ ไม่เหมือนกันขึ้นกับช่วงคลื่นที่ต้องการตรวจวัด เช่น ช่วงคลื่น 350-1100 nm ใช้ Si (Silicon) ช่วง 1100-2500 nm ใช้ PbS (Lead sulphide) หรือ InGaAs (Indium Gallium Arsenide) ช่วงแสงที่มองเห็นได้และช่วงเนียร์อินฟราเรด (400-2600 nm) ใช้ PbS ควบคู่ (Sandwiched) กับ Silicon photodiodes วิธีการจัดวางตัวอย่างเพื่อการสแกนด้วยสเปกโตรมิเตอร์ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีสะท้อน (Reflectance) เป็นวิธีที่ง่ายต่อการจัดวางตัวอย่าง เมื่อแสงส่องไปยังวัตถุแล้วแพร่ลงไปในเนื้อวัตถุ บางส่วนแล้วสะท้อนกลับขึ้นมาสู่ตัวตรวจวัด บางทีเรียกว่า การสะท้อนแบบแพร่ (Diffused reflectance) โดยมีแหล่งแสงและตัวตรวจวัดอยู่ด้านล่าง ในปัจจุบันเนื่องจากมีความสะดวกในการใช้สายไฟเบอร์ออปติก การวัดสะท้อนจากวัตถุจึงเป็นแบบ Interactance ซึ่งมีสายไฟเบอร์ออปติกที่เป็นตัวนำคลื่นที่สะท้อนจากวัตถุกลับไปยังตัวตรวจวัด ซึ่งอยู่ใกล้กัน เรียกว่า Interactance-Reflectance ได้ วิธีส่องผ่านคลื่นไปในตัวอย่าง ก่อนที่จะรับแสงที่ผ่านออกมาไปวิเคราะห์ เรียกว่า วิธีส่องผ่าน (Transmittance) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กับของเหลว นอกจากนี้ยังสามารถใช้กับของแข็ง เช่น กรณีของผลไม้ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ FOA NIR GUN ซึ่งปกติเป็นแบบสะท้อนให้เป็นวิธีส่องผ่าน โดยใช้ Gold cup นอกจากนี้ยังมีการวัดแบบส่องผ่านสะท้อน (Transflectance) เป็นการส่งคลื่นผ่านตัวอย่าง ซึ่งโดยปกติเป็นของเหลวที่อยู่ในภาชนะที่ทำด้วยอะลูมิเนียมที่มีความลึกลึนน้อยๆ เมื่อคลื่นกระทบพื้นอะลูมิเนียมจะสะท้อนผ่านตัวอย่างขึ้นมาเข้าสู่ตัวตรวจวัด

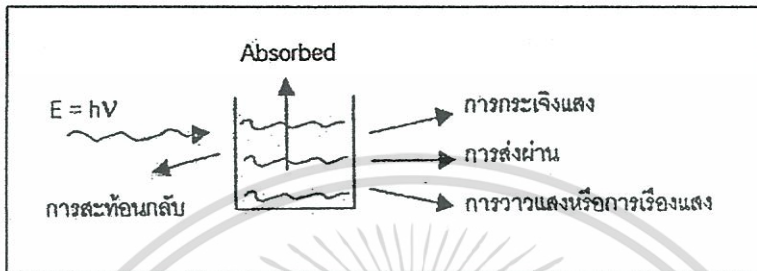
เนื่องจากเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมจะมีค่าพิค ส่วนใหญ่เป็นพิคกว้าง (Broad spectrum) บางทีมีพิคกว้างที่มีความเข้มสูง เนื่องจากการซ้อนทับกัน (Overlapping bands) บางทีอาจจะเห็นพิคที่คมชัด (แต่มีน้อย) สเปกตรัมของวัสดุเกษตรและอาหารส่วนใหญ่มีพิคของน้ำเป็นพิคใหญ่และกว้างที่บริเวณ 760, 970, 1450 และ 1940 nm ลักษณะของสเปกตรัมเช่นนี้ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุได้โดยตรง จำเป็นต้องใช้หลักทางเคมีเมตริก (Chemometric) มาใช้ โดยต้องทำสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าองค์ประกอบทางเคมีหรือสมบัติทางกายภาพหรือสมบัติอื่นที่ต้องการวิเคราะห์ (เช่น ไขมันในปลา ความหวานของผลไม้ สมบัติเนื้อสัมผัสของอาหาร ปริมาณเนื้อยางแห้งของน้ำยาง เป็นต้น) กับข้อมูลของสเปกตรัม ซึ่งเรียกว่าข้อมูลเชิงแสง (Optical data) เพื่อประมาณค่าองค์ประกอบหรือสมบัติที่ต้องการ

## 2.7 หลักการพื้นฐานของเครื่อง Near Infrared Spectroscopy (อาทิตย์ พวงสมบัติ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า 2549 อ้างโดย อภิตุลย์ แก้วกัณฑ์ทอง. 2555)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการของสเปกโทรสโคปคือ เมื่อลำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ จะมีแสงบางส่วนที่จะถูกดูดกลืน (absorbed) บางส่วนผ่านทะลุออกไป (transmitted) บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ (reflected) บางส่วนเกิดการวาวแสงหรือการเรืองแสง (fluorescence or phosphorescence) และบางส่วนอาจเกิดการกระเจิงแสง (scattered) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารต่างๆ

ที่มา: นิพนธ์ ดังคณานุรักษ์. 2545 อ้างโดย อภิดุลย์ แก้วกัณฑ์ทอง. 2555

สเปกโทรสโคปมีกฎของการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กฎ คือ

1. กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) กล่าวว่า “เมื่อแสงสีเดียว (monochromatic light) คือ แสงความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว (homogeneous) เป็นสัดส่วนของความเข้มแสงที่ถูกตัวกลางดูดกลืนไว้ โดยไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงเริ่มต้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน” (วิชัย รวีตระกูล และคณะ. 2527 อ้างโดย อภิดุลย์ แก้วกัณฑ์ทอง. 2555)

2. กฎของเบียร์ (Beer's law) กล่าวว่า “เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียวสัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางดูดกลืนไว้จะแปรโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น” (วิชัย รวีตระกูล และคณะ. 2527 อ้างโดย อภิดุลย์ แก้วกัณฑ์ทอง. 2555)

ในทางปฏิบัติปริมาณความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่แสงส่องผ่าน จึงต้องรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกันเรียกว่า กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon bc \quad 2.22$$

เนื่องจาก T (Transmittance) เท่ากับ

$$T = \frac{I}{I_0} \quad 2.23$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \varepsilon bc = \log \frac{1}{T} \quad 2.24$$

เมื่อ  $I$  = ความเข้มของแสงความยาวคลื่นเดียวที่ส่งผ่านออกมา

$\varepsilon$  = สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง ปกติเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น และอุณหภูมิ

$I_0$  = ความเข้มของแสงก่อนผ่านตัวกลางเมื่อ  $b=0$

$b$  = ความหนาของตัวกลางในหน่วยเซนติเมตร

$c$  = ความเข้มข้นของสารในหน่วย โมล/ลิตร

$A$  = ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

โมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์กับช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน เนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างของโมเลกุลต่างกัน นอกจากนี้ในแต่ละโมเลกุลจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นมากกว่า 1 ช่วง เช่นโมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) ที่มีมากในผลิตภัณฑ์อาหาร มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น 4 ช่วง คือ 760, 970, 1450 และ 1940 นาโนเมตร ดังนั้นถ้าทำการทดสอบที่ช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวจะสามารถหาความสัมพันธ์ของน้ำภายในตัวอย่างได้

## 2.8 การเลือกวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น (Selecting the Data Preprocessing Model Method) (ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ และคณะ. 2556 อ้างจาก Jörg-Peter Conzen. 2006)

วิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้นเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่สำคัญ ที่มีจุดประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองของสเปกตรัมในทางที่อัลกอริธึม PLS สามารถให้ความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างสเปกตรัมกับข้อมูลความเข้มข้น

- ไม่มีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น: ไม่มีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น
- การลบโดยค่าคงที่ (Subtraction of a Constant Offset): สเปกตรัมจะถูกปรับแบบเชิงเส้นเพื่อให้ค่า  $Y$  ที่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับศูนย์

การใช้งาน: เป็นการกำจัดปัญหาการขยับขึ้นของเบสไลน์ (Baseline Shift) เชิงเส้น สิ่งเหล่านี้เกิดจากเช่น จากค่าที่แตกต่างกันของการขยายสัญญาณของดีเทคเตอร์ (Detector Amplification)

- การลบโดยเส้นตรง (Subtraction of a Straight Line): ในแต่ละช่วงความถี่ที่เลือกไว้ เส้นตรงเส้นหนึ่งจะถูกฟิตเส้นสเปกตรัมโดยใช้วิธี partial least squares (PLS) เส้นตรง

เส้นนี้จะถูกลบออกจากสเปกตรัมดังกล่าว

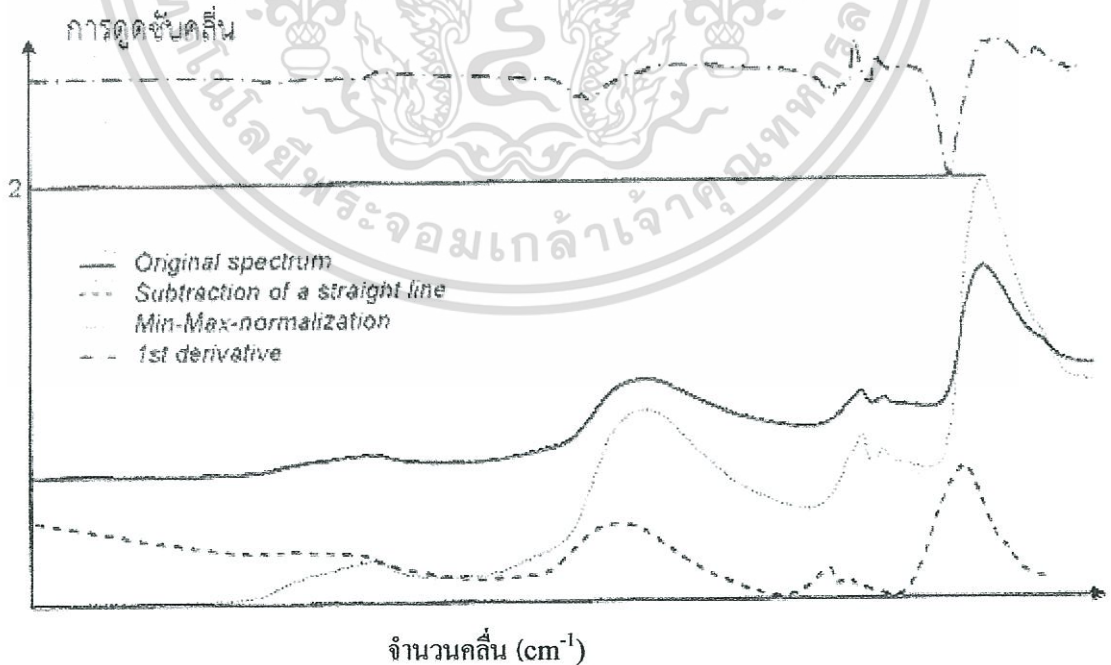
การใช้งาน: กำจัดปัญหาความเอียงเชิงเส้นของการขยับขึ้นของเบสไลน์ (ดูรูปที่ 2.5)

- **Vector Normalization:** ชั้นแรกสเปกตรัมจะถูกหาค่ากลาง จากนั้นผลรวมของค่า ยกกำลังสองของค่า Y ทั้งหมดจะถูกคำนวณ และสเปกตรัมใดๆจะถูกหารด้วยค่ารากที่สอง ของผลรวมนี้ สิ่งนี้เรียกว่า vector norm ของสเปกตรัมที่ได้จะเท่ากับ 1เสมอ

การใช้งาน: ในหลักการ สเปกตรัมจะประกอบด้วยสองส่วนของข้อมูล คือความสูงของแถบ การดูดซับและโครงสร้าง หลังจากการนอร์มัลไลเซชัน (Normalization) ข้อมูลความสูงจะ หายไป; มีเพียงโครงสร้างข้อมูลยังคงอยู่ การนอร์มัลไลเซชัน (Normalization) ถูกใช้เพื่อ เช่นการกำจัดผลกระทบของเส้นทางผ่านเชิงแสง (Optical Path Length) ที่แตกต่างกัน ในกรณีของการวัดแบบส่องผ่าน ความยาวของเส้นทางผ่านเชิงแสงทำให้ความสูงของ สัญญาณเปลี่ยนแปลง แต่โครงสร้างยังเหมือนเดิม ในทำนองเดียวกันการวัดแบบสะท้อน แบบแพร่จะมีผลกระทบของการรบกวนเนื่องจากความหนาแน่นของวัสดุแตกต่างกันหรือ ขนาดอนุภาคแตกต่างกัน สิ่งเหล่านี้ก็จะลดลง

- **Min-Max-Normalization** (สำหรับสเปกตรัมการดูดซับคลื่น): สเปกตรัมจะถูกขยับ เชิงเส้นเพื่อให้ค่า Y ที่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับศูนย์ แล้วสเปกตรัมจะถูกขยายเพื่อให้ค่า Y สูงสุด เท่ากับสองหน่วยของการดูดซับคลื่น (รูปที่ 2.5)

การใช้งาน: เทียบได้กับ Vector Normalization



รูปที่ 2.5 NIR สเปกตรัมของมือคน; วัดแบบการสะท้อนแบบแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **Multiplicative Scatter Correction:** ขั้นตอนแรก, สเปกตรัมเฉลี่ยคำนวณจากทุกสเปกตรัมของชุดข้อมูลคาลิเบรชัน แล้วแต่ละสเปกตรัม  $X(i)$  จะถูกแปรเปลี่ยนไปตาม

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

ค่าสัมประสิทธิ์  $u$  และ  $v$  จะถูกเลือกเพื่อให้ความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงแล้ว  $X(i)'$  กับสเปกตรัมเฉลี่ยน้อยที่สุด

การใช้งาน: วิธีการนี้มักจะใช้สำหรับการวัดแบบการสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse reflection)

- **อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (First Derivative):** จำนวนอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของสเปกตรัม (รูปที่ 2.5)

การใช้งาน: โดยการคำนวณอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่ง สัญญาณที่มีความชันจะถูกเน้นมากกว่าสัญญาณที่ค่อนข้างแบนราบ วิธีนี้จะถูกใช้เน้นลักษณะที่ชัดเจน แต่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่มีแถบการดูดซับคลื่นที่กว้าง การประยุกต์ใช้ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ การประเมินแถบการดูดซับคลื่นที่กว้างนี้มักจะทำในเทคโนโลยี NIR โดยการคำนวณอนุพันธ์ โครงสร้างเหล่านี้จะมีรูปร่างที่สูงชันขึ้น ซึ่งสามารถได้รับการประเมินได้ง่ายขึ้น

เมื่อใช้อนุพันธ์เป็นการจัดการข้อมูลเบื้องต้น จะต้องคำนึงถึงว่าสัญญาณรบกวนจะถูกจัดการเช่นกัน สิ่งนี้จะซ้อนทับบนสเปกตรัมเป็นสิ่งรบกวนเพิ่มเติม และสามารถทำให้สัญญาณของตัวอย่างเลวลง

- **อนุพันธ์ที่สอง (Second Derivative):** จำนวนอนุพันธ์อันดับสองของสเปกตรัมนั้น

การใช้งาน: เมื่อเทียบกับอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง แม้โครงสร้างที่ราบเรียบมากๆ สามารถประเมินได้ ผลการรบกวนของสัญญาณรบกวน ซึ่งโดยทั่วไปมีมากจนทำให้สเปกตรัมถูกวิเคราะห์ในช่วงสเปกตรัมที่จำกัดมากๆ

รูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นอิทธิพลของวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้นแบบต่างๆต่อลักษณะของ NIR-สเปกตรัม (การวัดมือคนด้วยหัววัดไฟเบอร์ออปติก) สเปกตรัมเดิมแสดงให้เห็นการขจัด (Offset) เล็กน้อยของเบสไลน์ เช่นเดียวกับการขยับขึ้น (Drift) การขยับขึ้นนี้สามารถถูกกำจัดโดยการลบออกจากเส้นตรง (Subtraction of a Straight Line) (เส้นประ) และการขจัดถูกกำจัดโดยการ Min-Max Normalization (เส้นจุด) อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของเส้นสเปกตรัมเดิม (เส้นประ-จุด) ถูกขยายเพื่อแสดงให้เห็นขยับขึ้นสู่ตำแหน่งที่ค่าการดูดซับคลื่นสูง สามารถสังเกตเห็นโครงสร้างที่แหลมขึ้นมาได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมเดิม

วิธีที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับระบบที่จะวิเคราะห์ จากประสบการณ์แสดงให้เห็นว่าในหลาย

กรณีการลบด้วยเส้นตรง การนอมนัลโรเซชันสเปกตรัม หรือการทำอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งได้ผลที่ดีที่สุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ที่สุดในการ คาลิเบรชัน ในบางกรณีการใช้วิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น 2 วิธีรวมกันก็ได้ผลดีที่สุด ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

เช่นกัน บ่อยครั้งที่แบบจำลองแบบต่างๆ ให้ผลได้ดีเท่าเทียมกันซึ่งโดยทั่วไปควรทดสอบดูหลายๆ วิธีเปรียบเทียบกัน

## 2.9 การเลือกจำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสม (Selecting the Appropriate Number of Factors) (ปานมนัส ศิริสมบุรณ์ และคณะ. 2556 อ้างจาก Jörg-Peter Conzen. 2006)

ใน PLS regression ข้อมูลสเปกตรัมและข้อมูลความเข้มข้นจะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นรูปแบบของเมทริกซ์และลดลงเป็นแฟคเตอร์จำนวนไม่มาก จำนวนแฟคเตอร์ ในแบบจำลองเคมเมตริกจะถูกเรียกว่า “rank” การหาจำนวน rank มีความสำคัญกับคุณภาพในการวิเคราะห์

การเลือกจำนวนแฟคเตอร์ที่น้อยเกินไปจะนำไปสู่การอธิบายที่ไม่เพียงพอเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงในข้อมูลสเปกตรัมและความเข้มข้น (“under fitting”) มีเพียงความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อย ระหว่างสองชุดข้อมูลและผลจากการวิเคราะห์จากแบบจำลองนี้จะไม่เพียงพอ ถ้าเลือกแฟคเตอร์จำนวนมากเกินไปแบบจำลองจะพยายามที่จะคิดรวมแม้การเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดในชุดข้อมูลเช่นสัญญาณรบกวนในสเปกตรัม (“over fitting”) วิธีนี้ข้อมูลสเปกตรัมที่ไม่เกี่ยวข้องกัน ตัวอย่างจะถูกรวมอยู่ในแบบจำลอง แบบจำลองเหล่านี้จะมีความผิดพลาดของผลการวิเคราะห์ ดังนั้นทุกๆ แบบจำลอง PLS มีจำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งรับประกันว่ามีความผิดพลาดน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ในการวิเคราะห์

มีแนวทางหลายอย่างนำไปสู่การหาจำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลอง บางอย่างเป็นค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของการทำนาย (RMSECV ของการพิสูจน์แบบไขว้หรือ RMSEP ของการพิสูจน์แบบชุดทดสอบ) ต้องมีค่าต่ำสุดจึงจะได้จำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสม ในทางตรงข้ามค่าของสัมประสิทธิ์ของการพิจารณา  $R^2$  มีค่าสูงสุด ดังนั้นจำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองสามารถหาได้อย่างง่ายดาย: ขั้นที่ 1 คำนวณค่า  $R^2$  และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการทำนาย จากนั้นพล็อตค่าเหล่านี้โดยให้แกนนอนเป็นจำนวนแฟคเตอร์ จำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อมีค่าตามที่กล่าวมามีค่าที่เหมาะสม (น้อยสุด) และ / หรือจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีจำนวนแฟคเตอร์สูงขึ้น ถ้ามีจำนวนแฟคเตอร์ที่มากและได้ผลการทำนายที่ดีเหมือนกับที่มีจำนวนแฟคเตอร์น้อย จะแนะนำให้เลือกแบบจำลองที่มีจำนวนแฟคเตอร์น้อยสุด

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

### 2.9.1 การสร้างสมการโดยวิธี partial least square regression (PLS-Regression) (ปานมนัส ศิริสมบุญ และคณะ. 2556 อ้างจาก Jörg-Peter Conzen. 2006)

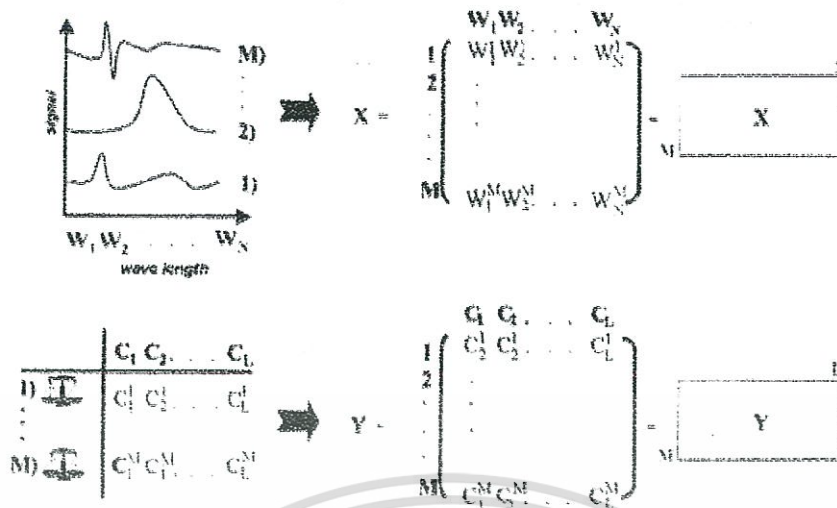
การเปรียบเทียบวิธีการทางเคโมเมทริกซ์ที่ใช้ในเคมิวเคราระห์สามารถพบได้ในอัลกอริธึมของ PLS ถูกสร้างขึ้นเป็นวิธีหนึ่งที่น่าิยมใช้มากที่สุด ดังนั้นจะอธิบายวิธีนี้เท่านั้น เนื่องจากขอบเขตและความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ของคำอธิบายทั้งหมดจะไม่ได้แสดงไว้

เพื่อที่จะทำ PLS-Regression ของระบบใดๆ ข้อมูลของสเปกตรัมของสารต้องถูกเปรียบเทียบกับข้อมูลความเข้มข้นของสารนั้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งในโครงสร้างข้อมูลทั้งสองต้องได้รับการยอมรับและมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

สำหรับวัตถุประสงค์นี้จำเป็นต้องวัดตัวอย่างจำนวนมาก สำหรับการแสดงผลทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงทั้งในชุดข้อมูลทั้งสองจะต้องเขียนเมทริกซ์ของข้อมูล (ดูรูป 2.6) และ ไอเกนเวกเตอร์ ของข้อมูลเหล่านั้นจะถูกสร้างขึ้น ไอเกนเวกเตอร์เหล่านี้เรียกว่าแฟกเตอร์หรือองค์ประกอบเบื้องต้น ซึ่งสามารถใช้สำหรับการทำนายความเข้มข้นแทนสเปกตรัมดั้งเดิมเนื่องจากมันมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมดของระบบที่ศึกษา

การลดตัวแปรนี้มีประโยชน์อย่างชัดเจน ข้อมูลที่เกี่ยวข้องเชิงการวิเคราะห์จากชุดข้อมูลขนาดใหญ่ได้ถูกบีบอัดเป็นแฟกเตอร์ซึ่งจะถูกใช้สำหรับการคาลิเบรชัน

ในกรณีของคาลิเบรชัน PLS ไอเกนเวกเตอร์จะถูกเก็บโดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย แฟกเตอร์ แรกบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงหลักของสเปกตรัม มีความสำคัญที่มากที่สุดสำหรับแบบจำลองคาลิเบรชัน และเมื่อจำนวนแฟกเตอร์เพิ่มขึ้นแม้แต่การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในโครงสร้างข้อมูลก็ถูกบ่งชี้ ซึ่งมีผลสำคัญที่ตามมาของการประเมินสเปกตรัม นั่นคือจำนวนแฟกเตอร์ที่น้อยลงส่วนใหญ่จะบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของโครงสร้างของสเปกตรัม ขณะที่จำนวนแฟกเตอร์ที่สูงขึ้นส่วนใหญ่จะแสดงถึงส่วนที่เป็นสัญญาณรบกวนของสเปกตรัม



รูปที่ 2.6 ข้อมูลสเปกตรัมและความเข้มข้นในรูปแบบเมทริกซ์ ในตัวอย่างนี้มีตัวอย่าง คาลิเบรชัน  $M$  ตัวอย่างที่วัดและ - ในขั้นตอนที่สอง -  $N$  ความยาวคลื่นทั้งหมดของผลสเปกตรัม จะถูกเขียนในแถว ( $M$ ,  $N$ ) เมทริกซ์ เมทริกซ์นี้จะเทียบเท่ากับข้อมูลสเปกตรัมเมทริกซ์  $X$ . ในทางเดียวกันค่าองค์ประกอบทั้งหมด  $L$  จะเขียนลงไปใน ( $M$ ,  $L$ ) เมทริกซ์ของข้อมูลความเข้มข้น (Jörg-Peter Conzen, 2006)

การเลือกจำนวนแฟคเตอร์ที่เหมาะสมเป็นความสำคัญกลางสำหรับคุณภาพของแบบจำลอง PLS ถ้ามีจำนวนแฟคเตอร์น้อยเกินไปโครงสร้างสเปกตรัมจะไม่ถูกรับรู้เพียงพอ regression ที่เกี่ยวข้องจึงไม่สามารถนำไปสู่การผลการวิเคราะห์ที่น่าพอใจ นั่นคือแบบจำลอง “underfitting” ถ้าจำนวนแฟคเตอร์มีมาก การวิเคราะห์ก็จะมีปัญหา เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนเชิงสเปกตรัมหลายส่วนมากเกินไป (Overfitting)

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

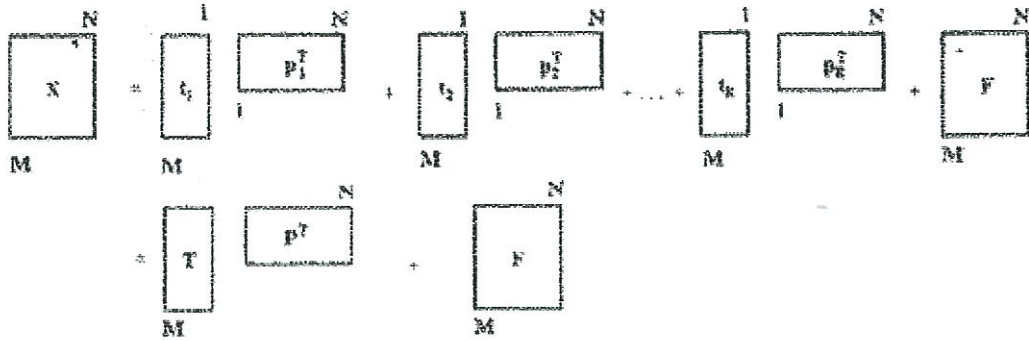
ข้อมูลสเปกตรัม:

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

ข้อมูลความเข้มข้น:

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

ในทุกกรณี score และ loading จะแสดงเป็น vector ดูจากรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 Schematic diagram for the factorization of the spectral data matrix X

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

โดยทั่วไป จำนวนสำหรับค่าการดูดซับที่ได้จากการวัดจะมากเกินไปกว่าตัวเลขขององค์ประกอบที่แสดงให้เห็น ดังนั้นระบบนี้คือ “over-determined” และจึงสามารถไม่เพียงแต่จะสร้างความสัมพันธ์กับจุดของข้อมูลสเปกตรัมจุดเดียว (เช่น จุดสูงสุดของการคาบิลเบรชันแบบตัวแปรเดียว) แต่ยังมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างข้อมูลสเปกตรัมทั้งหมด ข้อมูลชุดคาบิลเบรชันด้วยวิธีนี้จะมีความข้อมูลที่มากกว่าการคาบิลเบรชันด้วยวิธีตัวแปรเดียวมาก นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ที่จะหาตัวแปรที่ผิดปกติ ในระหว่างการวิเคราะห์และสามารถตัดสินใจได้ว่าองค์ประกอบของสิ่งรบกวนที่ไม่รู้ค่า ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กับชุดของข้อมูล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมตรงข้ามกับการคาบิลเบรชันแบบตัวแปรเดียว เป็นไปได้ที่จะใช้ข้อมูลเชิงสเปกตรัมของด้านข้างของพีค ซึ่งสามารถวิเคราะห์สเปกตรัมได้โดยโครงสร้างของสเปกตรัมเอง ด้วยเหตุนี้แถบการดูดซับที่ซ้อนทับกัน (overlapping bands) สามารถที่จะแยกออกจากกันได้ ในสเปกตรัม トラบใดที่มีความแปรปรวนในรูปร่างของสเปกตรัมน้อย ในทำนองเดียวกันสามารถรับรู้ถึงโครงสร้างของสเปกตรัมบริเวณที่มีสัญญาณรบกวนมากได้ ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงการทำนายความเข้มข้นสารให้แม่นยำ

ใน PLS regression เบื้องต้นข้อมูลจะถูกทำให้เป็นองค์ประกอบหลัก (Principal Components) แล้วจะคำนวณหา scores vectors จากข้อมูลสเปกตรัมและข้อมูลความเข้มข้น ซึ่งวิธีการจะครอบคลุม (Robust) ต่อความไม่ถูกต้องของค่าการวัดค่าอ้างอิงและการวัดค่าตัวอย่าง

ความสำคัญพิเศษของ PLS regression สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี เกิดจากการสร้างแฟคเตอร์ (Factorization) ของข้อมูล X และ Y โดยไม่เป็นอิสระต่อกันและเกิดขึ้นพร้อมกัน เมื่อประเมินสเปกตรัมของการดูดซับสามารถที่จะประมาณว่าการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล

สเปกตรัมมีต้นกำเนิดจากความแปรปรวนของความเข้มข้นที่สอดคล้องกัน นั่นหมายความว่า การไม่ทราบค่าใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงของข้อมูลสเปกตรัมควรจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกันของสเปกตรัม เพราะฉะนั้น scores vectors ของเมทริกซ์ของข้อมูลความเข้มข้นและข้อมูลสเปกตรัมควรจะเหมือนกัน อย่างไรก็ตามในกรณีของตัวอย่างจริง ถ้าเมทริกซ์นั้นถูกลดขนาดลงโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์อย่างบริสุทธิ์ (นั่นคือเป็นอิสระ) ค่าความผิดพลาดในการเตรียมตัวอย่างและในวิธีอ้างอิงที่ใช้ในการวัดค่าความเข้มข้นและการเกิดดริฟท์ (Drift) ของเครื่องวัดและสัญญาณรบกวนในสเปกตรัมจะก่อให้เกิดความแตกต่างของ scores vectors ดังนั้นในวิธี PLS จะสมมุติว่า scores vectors ที่เหมือนกัน (Identical) สำหรับชุดข้อมูลทั้งสองที่จำนวนแพคเตอร์ใดๆ ซึ่งจะถูกเลือกเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าเริ่มต้นมีค่าน้อยที่สุด เป็นการประนีประนอมระหว่างความเหมาะสมของแพคเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายตัวอย่างและความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นในระหว่างชุดข้อมูล

อัลกอริธึมที่มีชื่อว่า PLS1 เพียงแค่นำ ค่าความเข้มข้นของเพียงหนึ่งองค์ประกอบทางเคมีมาพิจารณา ข้อมูลอื่นๆ ทั้งหมดจะถูกตีความว่าเป็นสิ่งรบกวน นั่นคือ Y-เมทริกซ์ของข้อมูลความเข้มข้นเป็นเวกเตอร์เดียว ส่วนในอัลกอริธึม PLS2 ความเข้มข้นขององค์ประกอบทุกอย่างในระบบจะถูกนำมาพิจารณาในการคาลิเบรชัน สำหรับการทำนายตัวอย่างใหม่แบบจำลองนี้นำไปสู่การวิเคราะห์องค์ประกอบทุกอย่างในเวลาเดียวกัน ตรงกันข้ามการคาลิเบรชันแบบ PLS1 ข้อมูลทั้งหมดของเมทริกซ์ความเข้มข้นจะถูกนำสัมพันธ์กันกับข้อมูลสเปกตรัมเมทริกซ์ โดยทั่วไปแล้ว การทำนายแบบ PLS2 จะให้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีกว่าการทำนายแบบ PLS1 จากเหตุผลดังกล่าวโดยทั่วไปจึงแนะนำให้ใช้อัลกอริธึม PLS1 ในการวิเคราะห์ระบบที่มีหลายองค์ประกอบ อัลกอริธึมแบบนี้ก็สามารถถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างประสบความสำเร็จในทุกองค์ประกอบ ดังนั้นแบบจำลองที่สำหรับทุกองค์ประกอบที่ต้องการจะถูกสร้างขึ้นเช่นเดียวกับแบบอัลกอริธึม PLS2

## 2.9.2 การทำ Validation แบบ Full cross validation

Full cross validation เป็นการทดสอบภายในในกลุ่มตัวอย่าง (internal validation) โดยตัวอย่างที่นำมาทดสอบสมการ คือ ตัวอย่างชุดเดียวกับที่ใช้สร้างสมการทำนายค่าทางเคมี โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ตัดตัวอย่างที่ 1 ออกจากชุดตัวอย่างที่ใช้สร้างสมการทำนายค่าทางเคมีจากนั้นใช้ตัวอย่างที่เหลือทำการคำนวณหาสมการ เมื่อได้สมการแล้ว จึงนำตัวอย่างที่ 1 มาทดสอบสมการ ขึ้นต่อไปใส่ตัวอย่างที่ 1 กลับคืน และตัดตัวอย่างที่ 2 ออกจากชุดตัวอย่าง แล้วจึงสร้างสมการทำนายค่าทางเคมี นำสมการที่ได้จากการทำนายของตัวอย่างที่ 2 ทำขั้นตอนข้างต้นซ้ำ จนกระทั่งหาค่าทางเคมีของตัวอย่างครบทั้งชุด ดังนั้นตัวอย่างแต่ละความเข้มข้นจะถูกตัดออกจาก ชุดตัวอย่าง 1 ครั้งเท่ากัน ทำการหาค่า RMSECV (root square error of cross validation)

## 2.10 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสมการ

### 2.10.1 สัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, $R^2$ )

แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวนในข้อมูล Y ค่าของ  $R^2$  จะเป็นบวกเสมอ เช่น ถ้า  $R = 0.97$  แล้ว  $R^2 = 0.941$  หมายความว่า 94.1% ของไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแปรปรวนในข้อมูล X และ 5.9% ของความแปรปรวนในข้อมูล X เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่น เช่น การเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดลองอ้างอิง และอื่นๆ ค่า  $R^2$  เป็นบวกเสมอโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ R ในทางปฏิบัติ  $R^2$  ให้ข้อมูลมากกว่า R และใช้กันมากกว่า R การแปลความหมายของค่า R และ  $R^2$  แสดงดังตารางที่ 1  $R^2$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.25

$$R^2 = \left[ 1 - \frac{\sum_1^n (Y_i^{\text{meas}} - Y_i^{\text{pred}})^2}{\sum_1^n (Y_i^{\text{meas}} - \bar{Y})^2} \right] \times 100 \quad 2.25$$

เมื่อ  $Y^{\text{meas}}$  คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี

$Y^{\text{pred}}$  คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIR

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	OK สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) อย่างหยาบๆ
+/-81-90	66-81	OK สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบๆ
+/-91-95	83-90	ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการวิจัย
+/-96-98	92-96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
+/-99+	98+	ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้

### 2.10.2 ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (root mean squared error of cross validation; RMSECV)

Cross-validation สามารถใช้ตัวอย่างชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อการทำการพิสูจน์แบบจำลอง (Validation) สิ่งนี้ทำโดยชักตัวอย่างออกหนึ่งตัวอย่างหรือกลุ่มของหลายตัวอย่างจากชุดสร้างแบบจำลองและสร้างแบบจำลองด้วยตัวอย่างที่เหลืออยู่ แล้วทำนายตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไปและบันทึกค่าความผิดพลาด แล้วนำตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไปนั้นกลับมาแล้วชักตัวอย่างอื่นออกไปและทำซ้ำกระบวนการจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองและทำนาย จะไม่มีตัวอย่างที่ถูกทำนายถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองซึ่งได้ใช้ในการทำนาย ถ้าเอาออกเพียงทีละ 1 ตัวอย่างจะเรียกว่า “Full” หรือ “One-out” cross-validation ถ้านำชุดตัวอย่าง (จำนวนหลายตัวอย่าง) ออกจะเรียกว่า “Segmented” cross-validation ส่วนเขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าที่ถูกทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุดสร้างแบบจำลอง คือ RMSECV วิธีพิสูจน์นี้เหมาะที่จะใช้กับข้อมูลที่มีจำนวนตัวอย่างน้อยๆ เช่น น้อยกว่า 100 ตัวอย่าง ค่า RMSECV คำนวณได้จากสมการ 2.26

$$RMSECV = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{meas}} - Y_i^{\text{pred}})^2} \quad 2.26$$

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

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

ตารางที่ 2.2 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) แบบหยาบๆ
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

### 2.10.4 ความผิดพลาด (Bias)

เมื่อทำนายค่าตัวแปรที่ต้องการของข้อมูลในชุดตัวอย่างทดสอบแบบจำลอง (Validation set) ค่า Bias หมายถึงความแตกต่างระหว่างค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงและค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและเป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลอง (Calibration model) ในโลกความเป็นจริงของทางการค้าและอุตสาหกรรม Bias เป็นหนึ่งในสิ่งที่สำคัญมากในทางสถิติ Bias สามารถเกิดขึ้นได้แม้เมื่อค่าสถิติสัมพันธ์กับความสัมพันธ์และ SEP ที่แสดงว่าแบบจำลอง นั้นดีเยี่ยม

## 2.11 ประโยชน์ของเทคนิค NIR

Osborne et al. (1993) อ้างโดย อภิดุลย์ แก้วกับทอง (2555) ได้กล่าวว่าเครื่องมือแต่ละประเภทต่างก็มีข้อจำกัดในการใช้งาน แต่เครื่อง NIR มีประโยชน์ และข้อดีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ทางเคมี หรือการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น สำหรับการนำเครื่อง NIR ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

เอกสารอาหารมีประโยชน์มากมาย เช่นการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.ง่ายต่อการเตรียมตัวอย่าง ไม่จำเป็นต้องซั่งตัวอย่างก่อนนำมาวัดค่า
- 2.ใช้เวลารวดเร็วในการวัด
- 3.การตรวจสอบเป็นแบบไม่ทำลาย ทำให้ตัวอย่างที่นำมาตรวจสอบสามารถจำหน่ายส่งออก หรือบริโภคต่อได้ เป็นการประหยัดต้นทุนของผลิตภัณฑ์อีกทางหนึ่ง
- 4.ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ลดต้นทุนในการดูแลรักษา สภาพแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี
- 5.สะดวกต่อการใช้งาน เนื่องจากในการปฏิบัติไม่จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีประสบการณ์ หรือต้องได้รับการฝึกฝนโดยเฉพาะ สามารถปฏิบัติตามคู่มือการใช้งานได้ทันที
- 6.ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี และเครื่องแก้ว ทำให้สามารถลดต้นทุนในเรื่องสารเคมี และอุปกรณ์เครื่องแก้ว
- 7.เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับนำไปควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นประโยชน์เช่นเดียวกับอุตสาหกรรมอื่นที่สามารถประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ได้

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.12.1 งานวิจัยสมบัติทางความร้อน

Kara et al. (2011) หาค่าการนำความร้อนของเมล็ดดอกคำฝอยเมื่อมีความชื้น ความหนาแน่น และสายพันธุ์ที่แตกต่างกัน 2 สายพันธุ์คือ cv. Remzibey-05 และ cv. Dinçer โดยใช้วิธี transient heat flow method โดยใช้ thermal conductivity probe เป็นตัวกระจายความร้อนแบบ line-heat source ผลการทดลองพบว่าในช่วงความชื้น 5.79 ถึง 20.38% db สายพันธุ์ cv. Remzibey-05 มีค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 0.105 ถึง 0.132  $W m^{-1} K^{-1}$  และจาก 0.108 ถึง 0.137  $W m^{-1} K^{-1}$  ที่ความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูงตามลำดับ สำหรับสายพันธุ์ cv. Dinçer ที่ช่วงความชื้น 5.07 ถึง 20.30% db มีค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 0.106 ถึง 0.137  $W m^{-1} K^{-1}$  และจาก 0.110 ถึง 0.140  $W m^{-1} K^{-1}$  ที่ความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูงตามลำดับ ผลที่แสดงข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าการนำความร้อนมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับความหนาแน่น คือเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ค่าการนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความชื้น คือเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความแตกต่างของสายพันธุ์มีผลให้ค่าการนำความร้อนแตกต่างกันเล็กน้อย

Uengkimbuan et al. (2011) ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์เชิงความร้อนของพริกไทยที่ช่วงความชื้น 0-

1.93 มาตรฐานแห้ง ได้แก่ ความหนาแน่นปรากฏ ความร้อนจำเพาะซึ่งหาโดยใช้แคลอริมิเตอร์ และเอนทัลปีของน้ำที่อุณหภูมิแห้ง การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นประโยชน์ของการนำค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละช่องว่างของอากาศที่ความชื้นของพริกไทยค่าต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความชื้นของพริกไทยมีค่าลดลงทำให้ความหนาแน่นปรากฏ ความร้อนจำเพาะ และร้อยละช่องว่างของอากาศของพริกไทยมีค่าลดลง โดยความหนาแน่นปรากฏ ความร้อนจำเพาะ และร้อยละช่องว่างของอากาศของพริกไทยแห้ง มีค่าเท่ากับ  $439.44 \pm 9.75$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร  $1902.75 \pm 125.53$  จูลต่อกิโลกรัม องศาเซลเซียส และร้อยละ  $32.17 \pm 0.29$  ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นปรากฏ ความร้อนจำเพาะ และร้อยละช่องว่างของอากาศมีความสัมพันธ์กัน โดยสมบัติทางฟิสิกส์เชิงความร้อนของพริกไทยทั้งหมดที่ได้ทำการศึกษามีค่าลดลงเมื่อความชื้นของพริกไทยลดลง

Cao et. al. (2010) ทหาความร้อนจำเพาะของ wheat ที่ช่วงความชื้น 19.90% ถึง 6.23% db โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ที่ช่วงอุณหภูมิ -10 ถึง 110°C ผลการทดลองพบว่าความร้อนจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 85-90°C แต่ที่ช่วงอุณหภูมิ 90-110°C ความร้อนจำเพาะมีค่าลดลงเล็กน้อยและความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้น

Bamgboye and Adejumo (2010) ทหาสมบัติทางความร้อนของเมล็ด roselle ในช่วงความชื้น 8.8 ถึง 19% (d.b.) อาทิเช่น ความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และค่าการแพร่ความร้อน ซึ่งหาโดยวิธี method of mixture, steady state heat of vaporization method และวิธีการคำนวณ ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าความร้อนจำเพาะมีค่าเท่ากับ  $-4.04$  ถึง  $-5.63 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , ค่าการนำความร้อน มีค่าเท่ากับ  $-1.22$  ถึง  $-1.56 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  และค่าการแพร่ความร้อน  $-4.274$  ถึง  $4.877 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความชื้นมีผลกับสมบัติทางความร้อนอย่างเห็นได้ชัด คือเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อนมีค่าลดลง แต่ค่าการแพร่ความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

Aviara (2008) ทหาความร้อนจำเพาะ การนำความร้อน และการแพร่ความร้อนของ guna seed ที่รูปแบบทั้งเมล็ดและแบบบดละเอียด ที่ช่วงความชื้นที่แตกต่างกันซึ่งความร้อนจำเพาะหาโดยวิธี method of mixtures, ค่าการนำความร้อนหาโดยวิธี steady state heat flow method และค่าการแพร่ความร้อนหาโดยวิธีการคำนวณจากค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อน ผลการทดลองพบว่าความจำเพาะของรูปแบบทั้งเมล็ดและแบบเมล็ดบดละเอียด ที่ช่วงความชื้น 4.7 ถึง 25.35% (d.b.) และอุณหภูมิ 307.12 ถึง 368 K มีค่าเท่ากับ 1391.1 ถึง 3020.13 , 1459.14 ถึง 3058.15  $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  ตามลำดับ, รูปแบบทั้งเมล็ดและแบบเมล็ดในละเอียด ที่ช่วงความชื้น 5.6 ถึง 19.13% (d.b.) และอุณหภูมิ 308.00 ถึง 368 K มีค่าเท่ากับ 2135.15 ถึง 4275.56, 2173.4 ถึง 4340.06  $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , ตามลำดับ ค่าการนำความร้อนรูปแบบทั้งเมล็ดและเมล็ดในเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.0711 ถึง 0.1282 และ 0.087 ถึง 0.126  $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  ตามลำดับ, รูปแบบเมล็ดบดละเอียดและเมล็ดในมีค่า 0.1 25 ถึง 0.223 และ 0.107 ถึง 0.191  $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  ตามลำดับ, ค่าการแพร่ความร้อนของรูปแบบทั้งเมล็ดและเมล็ดในมีค่าลดลงเมื่อความชื้นและค่า

เอกสารที่นำมาใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ  $8.5 \times 10^{-8}$  ถึง  $9.311 \times 10^{-8}$  และ  $3.42 \times 10^{-8}$  ถึง  $4.397 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับ, ค่าการแพร่ความร้อนของรูปแบบเมล็ดในและเมล็ดในมีค่าลดลงเมื่อความชื้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^{-7}$  ถึง  $8.468 \times 10^{-8}$  และ  $1.768 \times 10^{-7}$  ถึง  $4.214 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับ

Kocabiyik et al. (2009) ศึกษาค่าสมบัติทางความร้อนของเมล็ดฟักทองเมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 5.32 ถึง 24.00 % (d.b.) ซึ่งได้แก่ ความร้อนจำเพาะ การนำความร้อนและการแพร่ความร้อน ผลการทดลองพบมีในช่วง 2.53 ถึง 3.13  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , 0.113 ถึง 0.135  $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  และ  $9.954 \times 10^{-8}$  ถึง  $1.289 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมบัติทางความร้อนเปลี่ยนแปลงตามค่าความชื้นโดยค่าความร้อนจะเพาะและค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นแต่ค่าการแพร่ความร้อนมีค่าลดลงเมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้น

Mortaza et al. (2008) หาค่าการความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อนของ Berberis Fruit ที่เปลี่ยนแปลงตามระดับอุณหภูมิ 50, 60 และ  $70^\circ\text{C}$  และที่ระดับความชื้น 19.3%, 38.5%, 55.4% and 74.3% (w.b) โดยวิธี method of mixtures และ hot wire as a heating source ใช้ในการหาค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อน ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าความร้อนจำเพาะและการนำความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงจาก 1.9653 ถึง 3.2811  $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$  และ 0.1324 ถึง 0.4898  $\text{W/m}^\circ\text{C}$ , ตามลำดับ อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลของความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อนมากกว่าอุณหภูมิ

Hacikuru and Kocabiyik (2008) ได้ศึกษาสมบัติความร้อนของเมล็ด Coriander และ Anise อาทิเช่น ความร้อนจำเพาะ, การนำความร้อนและการแพร่ความร้อนเมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลง โดยใช้วิธี method of mixtures, transient technique using the line heat source method โดยใช้ thermal conductivity probe และวิธีการคำนวณ ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าช่วงความชื้น 8.25–37.60% (d. b.) ความร้อนจำเพาะ การนำความร้อนและการแพร่ความร้อนของเมล็ด coriander มีค่าอยู่ระหว่าง 1.84 และ 3.26  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , 0.107 และ 0.142  $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $1.692 \times 10^{-7}$  และ  $1.310 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับ และเมล็ด anise ที่ช่วงความชื้น 10.40–56.00% (d.b.) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.84 และ 3.26  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , 0.135 และ 0.162  $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $1.872 \times 10^{-7}$  และ  $1.200 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับ ผลการทดลองสรุปผลได้ว่าความร้อนจำเพาะและการนำความร้อนของเมล็ด coriander และ anise เพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่การแพร่ความร้อนของเมล็ด coriander และ anise มีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น

Hobani and Al-Askar (2000) ศึกษาค่าการนำความร้อน, การแพร่ความร้อนและความร้อนจำเพาะของผล Dates สองสายพันธุ์คือ Khudary และ Sufri โดยใช้วิธี line source method,

เอกส Dickerson method และ method of mixtures ตามลำดับ ทดลองที่อุณหภูมิ 50 และ  $70^\circ\text{C}$  คร่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของทั้งสองสายพันธุ์ และที่ความชื้นในช่วง 18.31 ถึง 62.52% และ 16.72 ถึง 71.70% (wb) สำหรับสายพันธุ์ Khudary และ Sufri ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า การนำความร้อนของสายพันธุ์ Khudary มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 422 ถึง 622 mW/m.K ที่อุณหภูมิ 50°C และ 462 ถึง 676 mW/m.K ที่อุณหภูมิ 70°C ในขณะที่สายพันธุ์ Sufri มีค่าการนำความร้อนเปลี่ยนแปลงจาก 446 ถึง 638 mW/m.K ที่อุณหภูมิ 50°C และ 449 ถึง 793 mW/m.K ที่อุณหภูมิ 70°C , การแพร่ความร้อนของสายพันธุ์ Khudary มีค่าเปลี่ยนแปลงจาก  $1.26 \times 10^{-7}$  ถึง  $1.55 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s และ  $1.47 \times 10^{-7}$  ถึง  $1.84 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s ที่อุณหภูมิ 50 และ 70°C ตามลำดับ ในขณะที่สายพันธุ์ Sufri มีค่าการแพร่ความร้อนเปลี่ยนแปลงจาก  $1.30 \times 10^{-7}$  ถึง  $1.93 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s และ  $1.47 \times 10^{-7}$  ถึง  $2.27 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s ที่อุณหภูมิ 50 และ 70°C ตามลำดับ, ความร้อนจำเพาะของสายพันธุ์ Khudary เปลี่ยนแปลงจาก 2.48 ถึง 4.41 kJ/kg.K และ 2.42 ถึง 3.99 kJ/kg.K ที่อุณหภูมิ 50 และ 70°C ตามลำดับ ในขณะที่สายพันธุ์ Sufri มีค่าความร้อนจำเพาะเปลี่ยนแปลงจาก 2.69 ถึง 3.22 kJ/kg.K และ 2.40 ถึง 3.41 kJ/kg.K ที่อุณหภูมิ 50 และ 70°C ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงผลว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น การนำความร้อน การแพร่ความร้อนและความร้อนจำเพาะของผล Date ทั้งสองสายพันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง

### 2.12.2 งานวิจัยการใช้ เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

รีนฤดี แก้วชื่นชัย และคณะ (2010) ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIRS) ร่วมกับวิธี PLSR เพื่อสร้างสมการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดสำหรับนำไปใช้ในขั้นตอนการคัดเลือกพันธุ์ประชากรทดแทนวิธีสกัดด้วยสารเคมี โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 1200–2400 nm วัดค่าแสงทีละ 2 nm แล้วหาปริมาณน้ำมันด้วยวิธีทางเคมี การทดลองพบว่า ลักษณะรูปแบบของ spectrums มีการดูดกลืนแสงมากขึ้นเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นจาก 1200–2400 nm ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Norris and William (1984) และ Gaines and Windnam (1998) ที่รายงานว่าถ้าความยาวคลื่นมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงมากขึ้นและตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่จะมีค่าการดูดกลืนแสงมากกว่าตัวอย่างขนาดเล็กเนื่องจากตัวอย่างที่มีขนาดเล็กจะอัดแน่นจึงมีช่องว่างระหว่างตัวอย่างน้อยเป็นผลให้แสงส่องผ่านเข้าไปได้ ค่าการดูดกลืนแสงจึงน้อยกว่าตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับกฎของ Beer-lambert

รณฤทธิ ฤทธิธรรณ และคณะ (2554) ใช้วิธี NIRS ในการทำนายปริมาณน้ำมันของผลปาล์มน้ำมัน สำหรับการปรับปรุงพันธุ์แทนวิธีการสกัดด้วยสารเคมี โดยใช้เครื่อง NIR spectrometer แบบพกพา (FQA-NIRGUN) และเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA) โดยใช้ระบบสะท้อนด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 700–1100 nm สามารถทำนายปริมาณน้ำมันอย่างแม่นยำด้วยค่า R=0.95 SEC=0.375% SEP=3.88 % Bias=0.008% ส่วนสมการที่ทำนายจากเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA) ที่ช่วงความยาวคลื่น 1200–2500 nm สามารถทำนายค่าปริมาณน้ำมันได้อย่างแม่นยำด้วยค่า R=0.97

RMSEE=3.23 % RMSE=4.10% Bias=0.02 โดย RPD=4.02 มอนูญาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fassio and Cozzolino (2004) ได้ทำการทำนายสารที่มีอยู่ในเมล็ดดอกทานตะวันอาทิเช่น ความชื้น ปริมาณน้ำมัน โปรตีน โดยใช้เทคนิค NIRS โดยทำการศึกษารังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น 400-2500 nm การทดลองโดยนำตัวอย่างเมล็ดดอกทานตะวันจำนวน 300 ตัวอย่างสแกนด้วยเครื่อง(NIRSystem, Silver Spring, MD, USA) หา reference ที่ความชื้น ปริมาณน้ำมันและโปรตีน ด้วยวิธี อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมงจนกว่าน้ำหนักจะคงที่, Soxhlet extraction โดยใช้ petroleum ether เป็นตัวทำละลายเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และวิธี a semi-micro automated Kjeldhal method หา Nitrogen แล้ว convert หา ปริมาณโปรตีน ตามลำดับ การสร้างสมการ calibration ใช้ 250 ตัวอย่างและที่เหลือ 50 ตัวอย่างสำหรับ Validation ผลการทดลองพบว่าค่า  $R^2_{cal}=0.95$  และ (SECV:3.3) สำหรับ ค่าความชื้น,  $R^2_{cal}=0.96$  และ (SECV:13.1) สำหรับค่าโปรตีน และ  $R^2_{cal}=0.90$  และ (SECV:22.3) สำหรับค่าปริมาณน้ำมัน g/kg บนความชื้นฐานเปียก อย่างไรก็ตาม การใช้วิธี NIRS สามารถใช้ในการปรับปรุงพันธุ์

Kwan et al (2007) ใช้ NIRS ในการทำนายกรดไขมันในเมล็ด Rapeseed ตัวอย่างการทดลองทั้งหมด 349 ตัวอย่าง ทำการสแกนโดยการสะท้อน และหาปริมาณกรดโดยวิธีการ gas-liquid chromatography สำหรับ Calibration equations ของกรดไขมันพัฒนาโดยวิธี partial least-squares และ cross validation ( $n = 249$ ) สำหรับการทำนายใช้ validation set ( $n = 100$ ) นั้น แสดงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญโดยค่า SEP (standard error of prediction),  $r^2$  (coefficient of determination in prediction), และค่า SD/SEP ผลการทดลองพบว่า  $SD/SEP(C) > 3.0$ ,  $r^2=0.9$  สำหรับกรด oleic, linoleic, และ erucic ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธี NIRS เป็นวิธีการที่มีความรวดเร็วในการทำปริมาณกรดไขมันในเมล็ด rapeseed สำหรับโปรแกรมการขยายพันธุ์

Rudolphi (2006) ใช้ NIRS ใช้ในการประมาณปริมาณน้ำมันจากเมล็ดดอกคำฝอย โดยตัวอย่างรวม 203 เมล็ดทำการสแกนด้วยเครื่อง NIR spectrometer และหาปริมาณน้ำมัน ด้วยวิธี Soxhlet extraction technique โดยใช้ petrol ether เป็นตัวทำละลายเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งสามารถสกัดได้โดยได้ปริมาณน้ำมัน 10% ถึง 29.6% ผลการทดลองโดยการสแกนด้วย NIRS เปรียบเทียบกับ วิธีสกัดด้วย Soxhlet extraction technique ได้ coefficient of determination of calibration:  $R^2=0.96$ . coefficient of determination of cross validation:  $1-VR=0.93$  สำหรับเมล็ดที่ผ่านการสี  $R^2=0.90$ ,  $1-VR=0.82$  สำหรับเมล็ดที่ยังไม่ได้สี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการหาปริมาณน้ำมันในเมล็ดดอกคำฝอยด้วยวิธี NIRS เป็นวิธีที่รวดเร็วและแม่นยำ

Jiang (2007) ทำนายปริมาณโปรตีน แป้ง และน้ำมันในข้าวโพดได้ถูกพัฒนาเป็นวิธีการที่รวดเร็วและไม่ทำลายโดยตัวอย่างเมล็ดข้าวโพด 309 ตัวอย่าง จากแหล่งปลูกข้าวโพดหลายๆแห่ง ทำการสแกนด้วยเครื่อง Near Infrared Reflectance Spectrometer หาปริมาณน้ำมันโดยวิธี Soxhlet method และสร้างสมการ Calibration equations สำหรับ single kernels ถูกสร้างโดยวิธี

เอกสารนี้... ค่าความน่าเชื่อถือในการทำนายปริมาณโปรตีนและแป้ง... ค่า...  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้ embryo upwards ในขณะที่ปริมาณน้ำมันใช้ embryo downwards ผลการทดลองพบว่า cross validation และ external validation coefficients ของ protein มีค่าเท่ากับ 0.91 และ 0.94, สำหรับแป้งเท่ากับ 0.90 และ 0.89 และปริมาณน้ำมันเท่ากับ 0.94 และ 0.95 ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการหาปริมาณโปรตีน แป้งและปริมาณน้ำมันในเมล็ดข้าวโพดโดยวิธีการ NIRS เป็นวิธีการที่มีความรวดเร็วแม่นยำในโปรแกรมการขยายพันธุ์

Pérez-Vich et al. (1998) การหาค่าปริมาณน้ำมันและกรดไขมันในเมล็ดทานตะวันสำหรับการปรับปรุงพันธุ์และขยายพันธุ์ โดยการวิเคราะห์ เมล็ดที่ยังไม่สี เมล็ดที่สีแล้ว และน้ำมัน โดยใช้ NIRS โดยทดลองในช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 nm ใช้วิธี NMR และ methyl etherification ในการหาปริมาณน้ำมันและกรดไขมัน ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าวิธีการ NIRS มีความน่าเชื่อถือและมีความแม่นยำในการทำนายปริมาณน้ำมันเมล็ดทานตะวันเมล็ดที่ยังไม่สี (Validation  $r^2$  range from 0.97 ถึง 0.9 และ เมล็ดที่สีแล้ว ( $r^2$  range 0.90 ถึง 0.97)

Govindarajan et al. (2009) ใช้ NIR ในการวัดความชื้นใน เมล็ดถั่วลิสง ทำการทดลองหา ความชื้นเมื่อเมล็ดมีความชื้น 8 % ถึง 26 % โดยวัดในช่วงความยาวคลื่น 1000 ถึง 1800 nm หาความชื้นอ้างอิงโดยวิธี standard air-oven method การวัดด้วย NIR โดยเพิ่มความยาวคลื่นทีละ 1 nm สร้างแบบจำลองโดยใช้วิธี PLSR และ MLR ผลการทดลองพบว่า วิธี PLSR ได้  $R^2 = 0.93$  และ standard error of prediction (SEP) =1.18 ส่วน วิธีMLRพบว่า  $R^2$  และ SEP =0.91 และ1.09 ตามลำดับ จากผลการทดลองทั้งสองวิธีมีความแน่นอน ถูกต้อง และรวดเร็ว สามารถใช้ในการวัดความชื้นตลอดสายการผลิตในการอบแห้งได้เป็นอย่างดี

Elfadl et al. (2010) ใช้ NIR ในการประมาณปริมาณน้ำมันในเมล็ดดอกคำฝอยซึ่งมีภูมิอากาศแตกต่างกัน ใช้ความยาวคลื่น 4596-9996 nm โดยวัดปริมาณน้ำมันอ้างอิงโดยตัวอย่างทั้งหมด 328 ตัวอย่างในปี 2004 (165 ตัวอย่าง) และ 2005 (163 ตัวอย่าง) ตัวอย่างในการทำนายด้วย NIR 1740 ตัวอย่างโดย 2 ใน 3 ของตัวอย่างทั้งหมดใช้ในการ calibrations และ 1 ใน 3 ของตัวอย่างทั้งหมดใช้ในการ validations ผลการทดลองพบว่า  $R^2 = 0.90$ , ค่า SEE =1.40 และ SEP=1.43 และ RPD =3.2 จากผลการวิเคราะห์ calibration model สามารถใช้ในการทำนายปริมาณน้ำมันในเมล็ดดอกคำฝอยได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

Leonardo et al. (2006) ใช้ NIR ในการวิเคราะห์ น้ำหนักเมล็ด, ปริมาณน้ำมันและกรดไขมันในเมล็ด rapeseed เมล็ด 530 ตัวอย่างใช้ในการทำ calibration และวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันโดยวิธี gas-liquid chromatography (GLC) ส่วนการทำ validation ใช้เมล็ด 75 ตัวอย่าง พบว่าความสัมพันธ์ของวิธี NIR และ GLC สำหรับกรด oleic ได้  $r = 0.92$  และกรด erucic acid ได้  $r = 0.94$ , แต่กรด linoleic ได้  $r = 0.75$  และกรด linolenic acid ได้  $r = 0.73$  สำหรับ Calibration equations ของ น้ำหนักเมล็ดและปริมาณน้ำมันใช้ calibration set เท่ากับ 125 เมล็ด วิธี gravimetric ใช้การหาปริมาณน้ำมัน ได้  $r=0.92$  ดังนั้นวิธี NIR เป็นวิธีที่สามารถใช้ในการทำนาย

น้ำหนักเมล็ด, ปริมาณน้ำมันและกรดไขมันของเมล็ดของ rapeseed ได้

Vaknin et al. (2011) ได้ทำนายปริมาณน้ำมัน กรดไขมัน ปริมาณโปรตีน ในเมล็ดสบู่ดำแบบ Single kernel ซึ่งใช้ช่วงความยาวคลื่นที่ 1100-2500 nm โดยทำ validation โดยวิธี cross validation ผลการทำนายพบว่าเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสามารถทำนายปริมาณน้ำมันสูงสุดที่  $R^2 > 0.95$  และผลออกมาดีกว่าโปรตีนและดีกว่ากรดไขมัน

Preece et al. (2012) ใช้ near-infrared spectral ในการทำนายค่าความร้อนของ solid manure ได้แก่ higher heating value (HHV) และแบบ dry ash free higher heating value ( $HHV_{daf}$ ) หาค่ามาตรฐานของแบบ HHV โดยใช้ isoperibol bomb calorimetry และหาค่ามาตรฐานของแบบ  $HHV_{daf}$  โดยใช้การคำนวณจากค่า HHV ผลการทำนายพบว่า near-infrared spectral ทำนายค่า HHV ได้  $RMSD = 60.19 \text{ cal g}^{-1}$ ,  $RPD = 2.29$  (excellent), และ bias =  $-15.29 \text{ cal g}^{-1}$  ทำนายค่าของแบบ  $HHV_{daf}$  ได้  $RMSD = 96.17 \text{ cal g}^{-1}$ ,  $RPD = 1.17$  (acceptable), และ bias =  $-19.83 \text{ cal g}^{-1}$  ผลการทำนายสรุปว่า near-infrared spectral สามารถทำนายค่า HHV ของ solid manure ได้ค่าที่ดีกว่า  $HHV_{daf}$



## บทที่ 3

# วิธีการทดลอง

### 3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง

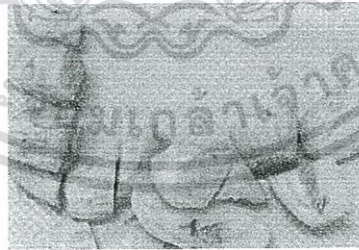
งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 การทดลองคือ การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำและการพัฒนาเทคนิคการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนของชีวมวลโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี: กรณีศึกษา เนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

#### 3.1.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

เมล็ดสบู่ดำสายพันธุ์ “ทองสุพรรณ” ผลสีเหลืองและสีดำถูกเก็บเกี่ยวจาก ศูนย์ฝึกทหารใหม่ อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย (รูปที่ 3.2) ถูกนำมาล้างห้องปฏิบัติการสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หลังจากนั้นทำการแกะเปลือกผลและกะเทาะเปลือกหุ้มเมล็ดโดยใช้วิธีแกะออกทีละเมล็ดโดยใช้คีมบีบ แล้วเตรียมเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ 3 ขนาดคือ แบบเต็มเมล็ด (รูปที่ 3.1a), แบบ ¼ เมล็ด (รูปที่ 3.1b) และแบบผง (รูปที่ 3.1c) เพื่อหาค่าการนำความร้อนและการแพร่ความร้อน และการเตรียมเนื้อในเมล็ดรูปแบบ ¼ เมล็ดทำโดยใช้มีดเล็กบางแบ่งครึ่งเมล็ดแล้วหันอีกครั้งที่เหลือ การเตรียมแบบผงทำโดยใช้เครื่องปั่นผลไม้ (MX-T110PN, National, Taiwan) บดเป็นเวลา 1 นาทีแล้วร่อนผ่านตระแกรงที่มีรูขนาด 1.18 mm สำหรับการวัดความร้อนจำเพาะใช้เมล็ดแบบชิ้นเล็ก (ข้อจำกัดของเครื่องวัด) การเตรียมเมล็ดแบบชิ้นเล็กทำโดยใช้มีดขนาดเล็กหันเป็นชิ้นบาง (น้ำหนักประมาณ 0.060 g ต่อชิ้น) สำหรับการเตรียมรูปแบบเมล็ดแบบผงใช้เครื่องปั่นผลไม้ (MX-T110PN, National, Taiwan) บดเนื้อในเมล็ด เป็นเวลา 1 นาทีแล้วร่อนผ่านตระแกรงที่มีรูขนาด 1.18 mm โดยทดลองตัวอย่างละ 0.060 g



รูปที่ 3.1a



รูปที่ 3.1b



รูปที่ 3.1c

รูปที่ 3.1 เนื้อในเมล็ดสบู่ดำรูปแบบเต็มเมล็ด (รูปที่ 3.1a), แบบ ¼ เมล็ด (รูปที่ 3.1b) และแบบผง (รูปที่ 3.1c)

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างการทดลองสำหรับการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

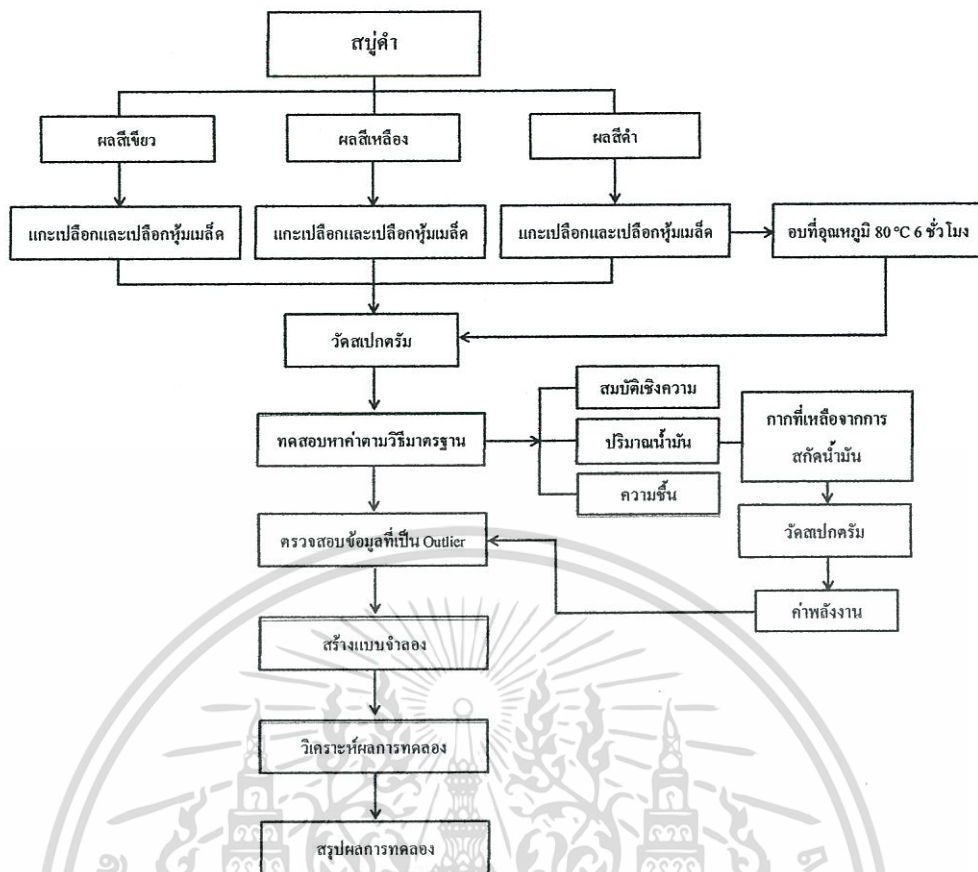
ตัวอย่างการทดลองใช้ เมล็ดสบู่ดำสายพันธุ์ “ทองสุพรรณ” ผลสีเขียว, ผลสีเหลืองและผลสีดำถูกเก็บเกี่ยวจาก ศูนย์ฝึกทหารใหม่ อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย ถูกนำมาล้าง

เกษตร สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากนั้นทำการแกะเปลือกผลและกะเทาะเปลือกหุ้มเมล็ดโดยใช้วิธีแกะออกทีละเมล็ดโดยใช้คีมบีบ การทดลองทั้งหมดใช้ตัวอย่างเนื้อในเมล็ดสับุดำ 100 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 64 g แบ่งเป็น 4 ระดับความแตกต่างคือ เนื้อในเมล็ดจากผลสีเขียว 25 ตัวอย่าง เนื้อในเมล็ดจากผลสีเหลือง 25 ตัวอย่าง เนื้อในเมล็ดจากผลสีดำ 25 ตัวอย่าง และเนื้อในเมล็ดจากผลสีดำที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จำนวน 25 ตัวอย่าง รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการทดลอง เพื่อการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับุดำโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เริ่มทดลองโดยการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ที่ละตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างไปหาสมบัติเชิงความร้อนได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน การนำความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนซึ่งใช้ตัวอย่างที่ได้สกัดน้ำมันออกแล้ว



รูปที่ 3.2 ผลสับุดำที่ถูกเก็บสำหรับการทดลอง



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดลองเพื่อการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับคั่วโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

### 3.2 การสแกนสเปกตรัมเนื้อในเมล็ดสับคั่วด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer

การทดลองใช้ตัวอย่างเนื้อในเมล็ดสับคั่วที่ความแตกต่าง 4 ระดับตามหัวข้อ 3.1 และจากนั้นนำมาวางไว้ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ (ประมาณ  $25 \pm 1$  °C)

#### อุปกรณ์

1. เครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany)
2. เครื่องชั่งไฟฟ้า (ARC140 Adventure, OHAUS ความละเอียด 0.0001 g)
3. ถ้วยควอทซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร

#### วิธีการทดลอง

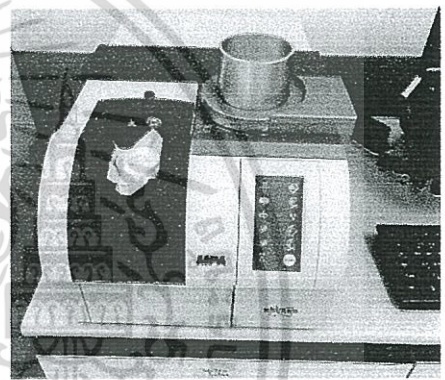
การทำนายสมบัติเชิงความร้อน ความชื้นและปริมาณน้ำมันเตรียมตัวอย่างการทดลองทั้งหมด 100 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นการทดสอบกับเนื้อในเมล็ดสับคั่วจากผลเขียว 25 ตัวอย่าง ผลสีเหลือง 25 ตัวอย่าง ผลสีแดง 25 ตัวอย่าง และแบบอบแห้ง 25 ตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างต้องทำการตวงให้ได้ปริมาตรของตัวอย่างเท่ากัน โดยใช้ปิเกตอร์ขนาดตัวอย่างละ 100 ml แล้วเทลงในถ้วยควอทซ์ (รูปที่ 3.4) จากนั้นนำมาสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany) (รูปที่ 3.5) ซึ่งมีการวัดแบบ Reflectance ที่ช่วงจำนวนคลื่นระหว่าง  $12,500-4,000$   $\text{cm}^{-1}$  (ความยาวคลื่น 800-2500 nm) สแกนทุกๆ  $16$   $\text{cm}^{-1}$  แล้วนำตัวอย่างนำมาวิเคราะห์ สมบัติเชิงความร้อน ได้แก่ การแพร่ เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อน การนำความร้อน (ส่วนความร้อนจำเพาะใช้วิธีคำนวณ) ความชื้นและปริมาณน้ำมันด้วยวิธีมาตรฐานดั้งเดิมต่อไป

สำหรับการทำนายค่าความร้อน ใช้ตัวอย่างในส่วนที่เป็นกากที่เหลือจากการสกัดน้ำมันโดยแบ่งเป็น 100 ตัวอย่าง โดยเป็นตัวอย่างจากผลสีเขียว 25 ตัวอย่าง ผลสีเหลือง 25 ตัวอย่าง ผลสีดำ 25 ตัวอย่างและแบบอบแห้ง 25 ตัวอย่าง ตัวอย่างถูกเทลงในขวด vial ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm ใช้แผ่นส่องผ่านสะท้อน (transflection plate) ทำด้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าขวดเล็กน้อย กดทับตัวอย่างโดยมีความลึกของแผ่นสแตนเลสที่เป็นช่องที่บรรจุกากเท่ากับ 1 mm ดังนั้นจึงมี path length เท่ากับ 2 mm จากนั้นการสแกนด้วยเครื่อง MPA- NIR Spectrometer อุณหภูมิห้อง  $25 \pm 1$  °C ที่จำนวนคลื่นระหว่าง  $12,500-4,000$   $\text{cm}^{-1}$  สแกนทุกๆ  $16$   $\text{cm}^{-1}$  การสแกนซ้ำ 64 ครั้งต่อ 1 spectrum จากนั้นนำตัวอย่างนำมาอัดให้เป็นเม็ดน้ำหนักประมาณ 0.5-1.0 g แล้วนำไปหาค่าความร้อน (ขั้นตอนในข้อที่ 3.6) ต่อไป



รูปที่ 3.4 การเทเนื้อในเมล็ดสับด่างลงในถ้วยควอทซ์



รูปที่ 3.5 การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany)

### 3.3 การวัดสมบัติเชิงความร้อน

#### 3.3.1 การวัดค่าการแพร่ความร้อน

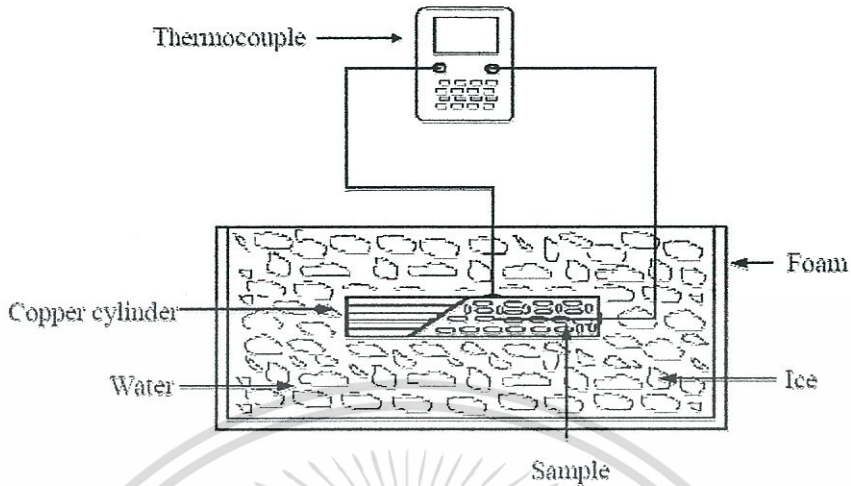
##### อุปกรณ์

1. ท่อทองแดงทรงกระบอก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm ยาว 100 mm และหนา 1 mm)
2. เทอร์โมคัปเปิล (type K) (51/52-2, Fluke, China)
3. กล่องโฟมสี่เหลี่ยมขนาด 50×40×40 cm

##### วิธีการทดลอง

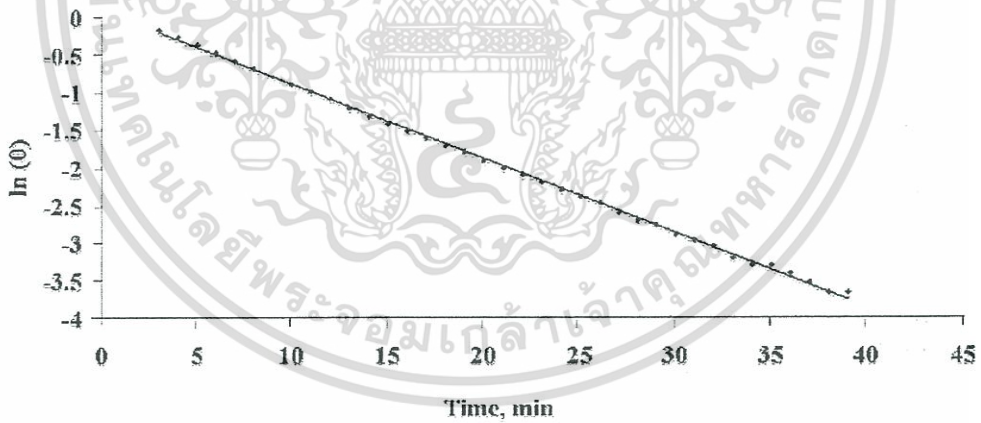
การแพร่ความร้อนถูกวัดโดยใช้ วิธี Dickerson method ตามหลักการของสมการ one-dimensional Fourier equation โดยใช้ท่อทรงกระบอก อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย ท่อทองแดงทรงกระบอก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm ยาว 100 mm และหนา 1 mm), เทอร์โมคัปเปิล (type K) (51/52-2, Fluke, China) และกล่องโฟมสี่เหลี่ยมบรรจุน้ำและน้ำแข็งในปริมาณที่

พอเหมาะ เพื่อสามารถกำหนดความหนาแน่นให้คงที่บรรจุตัวอย่างลงในท่อทรงกระบอกปริมาณ 36.20 g ปริมาตร 96.16 cm<sup>3</sup> ได้ความหนาแน่น 0.38 g cm<sup>-3</sup>



รูปที่ 3.6 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน

รูปที่ 3.6 แสดงไดอะแกรมในการทดลองการแพร่ความร้อน ปลายข้างหนึ่งของสายเทอร์โมคัปเปิลเส้นหนึ่งเสียบเข้าแกนกลางของท่อและปลายด้านหนึ่งของเทอร์โมคัปเปิลอีกเส้นหนึ่งติดไว้ที่ขอบท่อ นำท่อที่บรรจุตัวอย่างแช่ลงในกล่องที่ผสมน้ำกับน้ำแข็งแล้วเริ่มจับเวลาพร้อมทั้งบันทึกอุณหภูมิทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิที่กลางท่อและที่ผนังท่อเริ่มคงที่แล้วจึงนำข้อมูลพล็อตในสมการ  $\ln(\theta) = f(t)$  ตัวอย่างในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กราฟพล็อตระหว่าง  $\ln(\theta)$  และเวลา (t) เมื่อ  $\theta = (T_c - T_e) / (T_o - T_e)$

ค่า  $\theta$  คำนวณได้จากสมการ:

$$\theta = \frac{T_c - T_e}{T_o - T_e}$$

3.1

เมื่อ  $\theta$  คือ dimensionless temperature ratio,  $T_c$  คืออุณหภูมิที่แกนกลางท่อ (°C),  $T_e$  คืออุณหภูมิที่ผิวท่อ (°C), และ  $T_o$  คืออุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่าง (°C) สำหรับการวัดค่าคงที่ของเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(time constant,  $\tau$ ) คำนวณได้จากการหาความชันของกราฟความสัมพันธ์  $\ln(\theta) = f(t)$  และค่าการแพร่ความร้อน ( $\alpha$ ) คำนวณได้โดยใช้สมการ (Bairi et al. 2007):

$$\alpha = \frac{1}{\tau} \left[ \frac{R}{2.405} \right]^2 \quad 3.2$$

เมื่อ  $\alpha$  คือค่าการแพร่ความร้อน ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ),  $R$  คือรัศมีของท่อ (m), และ  $\tau$  คือค่าคงที่ของเวลา (time constant) (s) ทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้งต่อการทดลอง

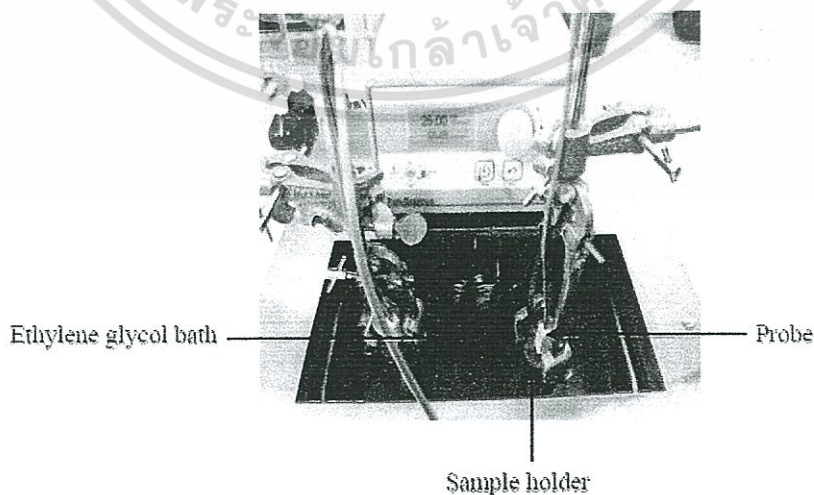
### 3.3.2 การวัดค่าการนำความร้อน

#### อุปกรณ์

1. Thermal conductivity probe (TC-18, East 30 sensor, USA)
2. ท่อทองแดง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 27 mm ยาว 60 mm หนา 1 mm)
3. สารละลาย ethylene glycol
4. data logger (2620A Hydra Data Acquisition Unit, Fluke, USA)
5. ชุดจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 3 V
6. เครื่องควบคุมอุณหภูมิของเหลว (9502A12E, PolyScience, USA)
7. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า (Adventure ARC 120, OHAUS, USA ความละเอียด 0.01 g)

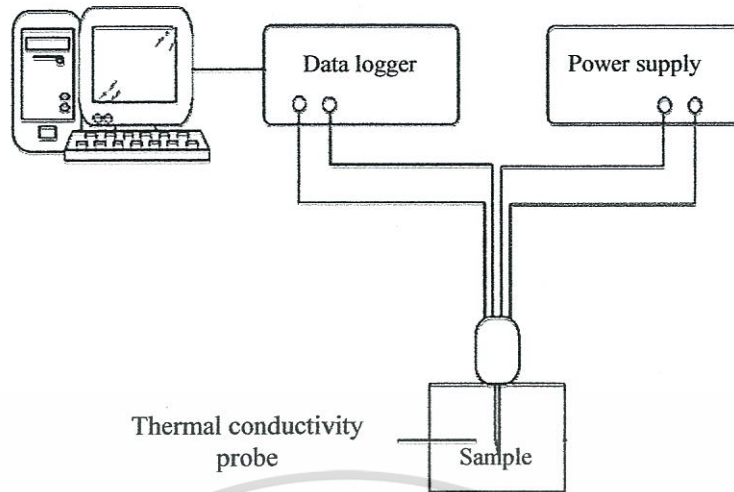
#### วิธีการทดลอง

ค่าการนำความร้อนถูกวัดโดยใช้วิธี transient technique ใช้แหล่งกำเนิดความร้อนแบบเส้น (รูปที่ 3.8) โดยใช้ thermal conductivity probe (TC-18, East 30 sensor, USA) เสียบเข้าแกนกลางของท่อทองแดงซึ่งด้านในบรรจุตัวอย่างการทดลอง ค่าความหนาแน่นถูกกำหนดให้คงที่โดยการบรรจุลงในท่อทรงกระบอกที่มีปริมาตร  $34.43 \text{ cm}^3$  น้ำหนัก  $12.97 \text{ g}$  (ชั่งด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า Adventure ARC 120, OHAUS, USA) ได้ความหนาแน่น  $0.38 \text{ g cm}^{-3}$



รูปที่ 3.8 การทดลองวัดค่าการนำความร้อนโดยใช้ line heat source probe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 การต่อวงจรการทดลองวัดค่าการนำความร้อนโดยใช้ line heat source probe

ใช้ท่อบรรจุตัวอย่างทำจากทองแดงซึ่งมีความสูง 60 mm เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 27 mm หัว probe ทำจาก stainless steel ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 1.27 mm ยาว 60 mm ส่วนแกนกำเนิดความร้อนด้านในทำจาก nickel ตัวอย่างการทดลองในท่อทองแดงถูกทำให้สมดุลความร้อนโดยแช่ลงในถังที่บรรจุด้วยสารละลาย ethylene glycol ที่อุณหภูมิต่างๆที่ 25, 40, 60, 80 และ 100°C ตามลำดับ เมื่อตัวอย่างการทดลองเข้าถึงอุณหภูมิสมดุลกับสารละลาย ethylene glycol ทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังแกนกำเนิดความร้อน (heater wire) โดยใช้พาวเวอร์ DC ที่ความต่างศักย์ 3 V กระแส 50 mA ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งให้ความร้อนในแนวรัศมี ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิถูกวัดโดยเซ็นเซอร์ที่หัว probe (E type thermocouple) และถูกบันทึกทุกๆ 1 วินาทีภายในเวลา 3 นาที โดยใช้ data logger (2620A Hydra Data Acquisition Unit, Fluke, USA) จากนั้นพล็อตกราฟของ  $T$  (อุณหภูมิ) และ  $\ln(t)$  (เวลา) โดยสามารถคำนวณค่าการนำความร้อนโดยใช้สมการ:

$$k = \frac{Q}{4\pi S} \quad 3.3$$

เมื่อ  $k$  คือค่าการนำความร้อน ( $\text{W m}^{-1}\text{C}^{-1}$ ),  $Q$  คืออัตราความร้อนที่จ่ายเข้าแกนกำเนิดความร้อน (heat wire) ( $\text{W m}^{-1}$ ),  $t$  คือเวลา (s),  $S$  คือความชันที่พล็อตระหว่าง  $T$  และ  $\ln(t)$  ซึ่งความร้อนที่จ่ายเข้าแกนกำเนิดความร้อน ( $Q$ ) คำนวณโดยใช้สมการ:

$$Q = \left[ \frac{E_{ref}^2}{R_{ref}^2} \right] \times R_m \quad 3.4$$

เมื่อ  $E_{ref}$  คือความต่างศักย์ที่ตกคร่อมความต้านทานอ้างอิงในวงจรของ thermal conductivity probe (V), และ  $R_{ref}$  คือค่าความต้านทานอ้างอิง (ohm),  $R_m$  คือค่าความต้านทานของแกนกำเนิดความร้อน (heat wire) ต่อความยาว ( $\text{ohm m}^{-1}$ ) ในแต่ละการทดลองทำซ้ำ 4 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การวัดและการคำนวณความร้อนจำเพาะ

#### อุปกรณ์

1. differential scanning calorimeter (DSC1, Mettler Toledo, USA)

#### วิธีการทดลอง

เครื่อง differential scanning calorimeter (DSC1, Mettler Toledo, USA) ถูกใช้ในการหาค่าความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดำ หลังจากปรับตั้งค่าอุณหภูมิและกำลังของอุปกรณ์ให้ความร้อนด้วยอลูมิเนียม (aluminum pans) ที่มีน้ำหนักเท่ากันถูกวางในตำแหน่งใส่ถ้วยตัวอย่างการทดลอง และตัวอย่างอ้างอิง ตามลำดับ ปรับค่าเริ่มต้นของ calorimeter, base-line temperature และอุณหภูมิเท่ากับ 25°C ทำการสแกนที่อัตรา 10°C min<sup>-1</sup> จาก 25°C ถึง 100°C สำหรับค่า baseline-Temperature ทำการสแกน Sapphire น้ำหนัก 0.060 mg ซึ่งถูกวางใน sample pan บน sample holder กับ reference holder แล้วทำการสแกน ต่อมาทำการสแกนตัวอย่างเมล็ดสับดำน้ำหนัก 0.056 mg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนัก Sapphire ในข้างต้น ทำการสแกนเนื้อในเมล็ดสับดำทั้งสองรูปแบบเมล็ด (แบบชิ้นเล็กและแบบผง) 3 ครั้งต่อการทดลอง ค่าความร้อนถูกคำนวณโดยใช้สมการ:

$$C_p = \frac{Y}{Y_0} \frac{m_0}{m} C_{sp} \quad 3.5$$

เมื่อ  $C_p$  และ  $C_{sp}$  คือความร้อนจำเพาะของตัวอย่างการทดลองและ sapphire, ตามลำดับ (kJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>)  $m$  และ  $m_0$  คือน้ำหนักของตัวอย่างการทดลองและ sapphire, ตามลำดับ (kg), และ  $Y$  และ  $Y_0$  คือความแตกต่างอัตราการไหลพลังงานความร้อน (heat flow) ระหว่าง baseline และ sapphire runs, ตามลำดับ (mW)

สำหรับความร้อนจำเพาะในการประมาณค่ามาตรฐานเพื่อทำนายค่าโดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีใช้วิธีการคำนวณโดยใช้สมการ:

$$\alpha = \frac{k}{\rho_B C_p} \quad 3.6$$

เมื่อ  $\alpha$  คือค่าการแพร่ความร้อน (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>),  $k$  คือค่าการนำความร้อน (Wm<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>),  $C_p$  คือความร้อนจำเพาะ (kJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>),  $\rho_B$  คือความหนาแน่นรวม (kg m<sup>-3</sup>)

### 3.4 การวัดความชื้น

#### อุปกรณ์

1. เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (ULM 500, Memmert, Germany)
2. เครื่องชั่งไฟฟ้า (Adventure ARC 140, OHAUS ความละเอียด 0.0001 g)
3. กระป๋องอลูมิเนียมขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm, สูง 4 cm พร้อมฝาปิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วิธีการทดลอง

นำกระป๋องอลูมิเนียมที่ใช้เป็นภาชนะในการอบเข้าอบในตู้อบ (ULM 500, Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นตัดแบ่งเมล็ดสับดำให้เป็นชิ้นขนาดเล็กรวมกันประมาณ 1 ส่วน 4 ของเมล็ด นำตัวอย่างใส่ในกระป๋องอลูมิเนียมแล้วชั่งน้ำหนัก จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 105 ± 1°C และชั่งน้ำหนักทุกๆ 6 ชั่วโมงจนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณความชื้นฐานเปียก (%) จากสมการ:

$$MC = \frac{(M_i - M_f)}{M_i} \times 100 \quad 3.7$$

เมื่อ  $MC$  คือความชื้นใน % w.b. (ฐานเปียก),  $M_i$  คือน้ำหนักมวลเริ่มต้น (g),  $M_f$  คือน้ำหนักมวลหลังอบ (g) โดย 1 ตัวอย่างทำการทดลอง 3 ซ้ำ

### 3.5 การวัดปริมาณน้ำมัน

#### อุปกรณ์

1. เครื่องหมุนเหวี่ยงที่สามารถตั้งรอบการหมุนได้ (E711071, Labnet, USA)
2. เฮกเซน (98.5%, MACRON)
3. เครื่องเขย่าที่สามารถตั้งรอบการหมุนได้ (RM-2L, Intelli-Mixer, Russia)
4. ปิเปตอัตโนมัติ (L5000, Witopet, Germany ขนาด 1-5 ml)
5. หลอดแก้วขนาด 20 ml
6. โกร่งบดยา
7. เครื่องชั่งไฟฟ้า (AR2140 Adventure, OHAUSS ความละเอียด 0.0001 g)
8. เครื่องอบ Infrared moisture balance (HB43-S, METTLER TOLEDO, Switzerland)

#### วิธีการทดลอง

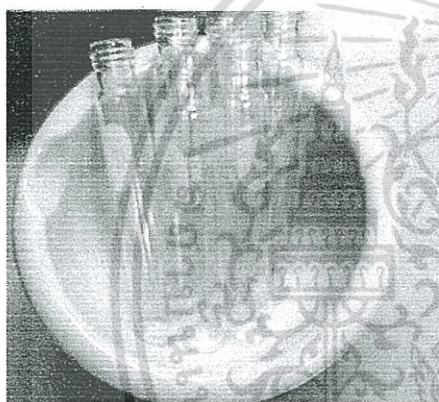
เนื้อในเมล็ดสับดำจากผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้งมีความชื้นที่ต่างกัน ดังนั้นต้องปรับให้มีความชื้นใกล้เคียงกันก่อนการสกัด เนื่องจากเนื้อในเมล็ดสับดำที่มีความชื้นมากไม่สามารถสกัดน้ำมันออกได้ (จากการทดลองเบื้องต้น) เพราะโมเลกุลของน้ำอยู่ล้อมรอบโมเลกุลของน้ำมันทำให้เฮกเซนไม่สามารถเข้าถึงโมเลกุลน้ำมันได้ ดังนั้นจึงต้องมีการไล่ความชื้นออก โดยวิธีใช้เครื่อง Infrared moisture balance โดยการตัดแบ่งตัวอย่างออกเป็นชิ้นเล็กๆ ประมาณ 5 g แล้วเทลงในถาดอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm จากนั้นจึงนำถาดอลูมิเนียมเข้าในเครื่อง แล้วปิดฝา เครื่องจะทำการอบแบบอัตโนมัติ โดยเนื้อในเมล็ดจากผลสีเหลืองอบให้ความชื้นออกไป 40 % ผลสีเขียวอบให้ความชื้นออกไป 51 % ทำให้เหลือความชื้นประมาณ 10-13 % ส่วนเนื้อในเมล็ดสับดำผลสีดำ (มีความชื้นเฉลี่ยประมาณ 10 %) และแบบอบแห้ง (มีความชื้นเฉลี่ยประมาณ 0.8 %) แล้วบดด้วยโกร่งบดยาเสร็จแล้วชั่งตัวอย่างใส่ลงในหลอดพลาสติกขนาด 3 ml สำหรับเครื่องหมุนเหวี่ยง หลอดละประมาณ 0.3 g จากนั้นทำการสกัดน้ำมัน (Vaknin et al. 2011) โดยเติมเฮกเซนลง 1.5 ml แล้วปิดฝานำไปเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าที่รอบการหมุน 15 rpm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไป

หมุนเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลวออกจากกันโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 rpm เป็นเวลา 20 นาที แล้วเทแยกชั้นของของเหลวออก (Vaknin et al. 2011) ดังรูปที่ 3.10 ส่วนของแข็งที่เหลือ เติมน้ำละลายเฮกเซนลงไป 1.5 ml แล้วทำการสกัดน้ำมันเหมือนวิธีข้างต้น อีก 2 ครั้งเพื่อให้สกัดน้ำมันได้หมด จากนั้นนำชั้นของของเหลวที่แยกทั้ง 3 ครั้งไปทำการระเหยเอาเฮกเซนออกโดยการตั้งไว้ในที่โล่งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักน้ำมันที่เหลือในหลอดแก้ว และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำมันที่สกัดได้จากสมการ:

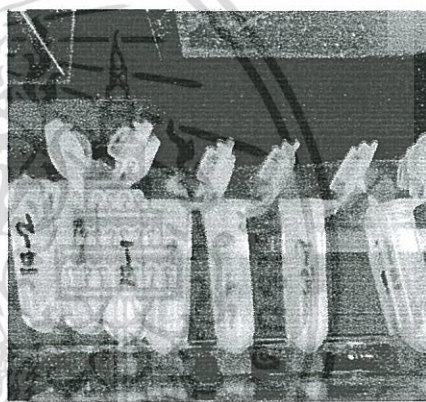
$$OC = \frac{O_f}{S_i} \times 100 \quad 3.8$$

$OC$  คือ Oil content (%),  $S_i$  คือน้ำหนักตัวอย่างที่ได้จากการบด (g) และ  $O_f$  คือน้ำหนักของน้ำมันที่สกัดได้ (g)

สำหรับของแข็งที่เหลือ จากการสกัดน้ำมันรอบสุดท้าย (รูปที่ 3.11) ถูกนำไปสแกนด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรดตามวิธีในหัวข้อ 3.2 แล้วใช้ในการทดลองหาค่าความร้อนต่อไปตามหัวข้อ 3.6



รูปที่ 3.10 ของเหลวที่ได้จากการสกัด



รูปที่ 3.11 ของแข็งที่เหลือจากการสกัดน้ำมัน

### 3.6 การวัดค่าความร้อน

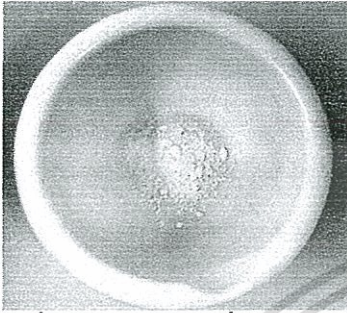
#### อุปกรณ์

1. เครื่อง bomb calorimeter (C200, IKA, Germany)
2. เครื่องชั่งไฟฟ้า (AR2140 Adventure, OHAUSS ความละเอียด 0.0001 g)
3. เครื่องอัดเม็ด (pellet press)

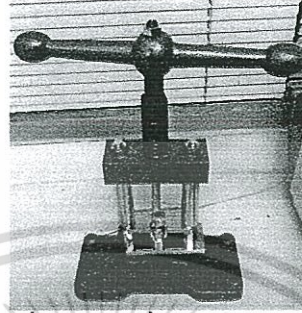
#### วิธีการทดลอง

นำตัวอย่างที่ผ่านการตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer น้ำหนักประมาณ 0.5-1.0 g ที่มีลักษณะเป็นผง (รูปที่ 3.12) จากนั้นอัดให้เป็น pellet น้ำหนักประมาณ 0.5-1.0 g (รูปที่ 3.14) โดยใช้เครื่อง pellet press (รูปที่ 3.13) แล้วนำตัวอย่างวางลงในถ้วยแก้ว แล้ววางถ้วยแก้วเข้ากับตะขอเกี่ยวของ bomb head นำด้าย (lead wire) ไปมัดเข้ากับ bomb head เมื่อสอดเสร็จแล้วนำตัวอย่างวางทับปลายทั้งสองข้างของด้ายโดย ขั้นตอนนี้ต้องระวังอย่าให้ด้ายแตะโดนขอบของถ้วยแก้ว และต้องให้ตัวอย่างวางบนปลายเส้นด้าย จากนั้นนำ bomb head ใส่ใน oxygen bomb ปิดฝา เติมน้ำออกซิเจนใน bomb โดยการเปิดวาล์วของถังแก๊สออกซิเจน ตั้ง pressure gauge ไว้ที่ 30 bar

จากนั้นกด O<sub>2</sub> Fill Key เครื่องจะทำการเติม ออกซิเจนให้อัตโนมัติโดยใช้เวลาประมาณ 30 วินาที จากนั้นนำชุด oxygen bomb วางลงในเครื่อง bomb calorimeter โดยต้องวางให้ลงตำแหน่งพอดี หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นลงในเครื่องโดยให้น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิในช่วง 22-25° C อยู่ในช่วงระดับน้ำที่กำหนด ปรับค่าการวัดเป็นแบบ isoperibol ใส่ค่าน้ำหนักของตัวอย่างแล้วกด Start รอประมาณ 17 นาที เครื่องจะแสดงค่าความร้อนออกมาในหน่วย J/g



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างที่นำมาอัดเม็ด



รูปที่ 3.13 เครื่อง pellet press



รูปที่ 3.14 เมล็ดที่ได้จากการอัด

### 3.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ค่าสมบัติเชิงความร้อนได้แก่ การแพร่ความร้อนและการนำความร้อน ปริมาณน้ำมัน ความชื้นและค่าความร้อน จากการทดลองจำเป็นต้องตัดค่าบางส่วนของที่มีค่านอกกลุ่ม (Outlier) ออกจากผลการทดลอง ซึ่งอาจเกิดจากตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการทดลอง ซึ่งตัวอย่างที่ผ่านการตรวจสอบแล้วนั้นจะต้องมีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 3$  หากมีค่าอยู่นอกช่วงดังกล่าวนี้ต้องตัดออกจากกลุ่มเพราะเกิดจากตัวอย่างผิดปกติ หรือเกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการทดลอง (จากการตรวจสอบไม่พบค่านอกกลุ่มเลย)

$$\frac{(X_i - \bar{X})}{SD} < \pm 3 \quad 3.9$$

เมื่อ  $X_i$  คือค่าที่หาได้จากวิธีมาตรฐานแต่ละตัวอย่าง  
 $\bar{X}$  คือค่าเฉลี่ย  
 $SD$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง

#### 3.7.1 การวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม

การวิเคราะห์สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) จากค่าการดูดซับคลื่นในช่วงจำนวนคลื่นระหว่าง 12500-4000 cm<sup>-1</sup> (800-2500 nm) ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ของเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่ระยะเก็บเกี่ยวผลสีเขียว, ผลสีเหลือง, ผลสีดำและแบบอบแห้งและจากกากที่ได้จากการสกัดน้ำมัน จะวิเคราะห์จากแถบการดูดซับคลื่นที่ปรากฏในสเปกตรัม โดยพิจารณาให้สอดคล้องกับองค์ประกอบที่มีในเนื้อในเมล็ดสับดูดำ

#### 3.7.2 การสร้างสมการในการทำนาย

การสร้างสมการทำนายทำโดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง (optical data) กับสมบัติเชิงความร้อน ได้แก่ การแพร่ความร้อน การนำความร้อน (ส่วนความร้อนจำเพาะใช้วิธีคำนวณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นและปริมาณน้ำมันที่วัดด้วยวิธีมาตรฐานดั้งเดิม โดยวิธี Partial least squares regression (PLSR) และใช้โปรแกรม OPUS version 7.0.129 ทั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นหรือที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นโดยวิธี constant offset elimination, straight line subtraction, vector normalization (SNV), min-max normalization, multiplicative scattering correction, first derivative, second derivative, first derivative + straight line subtraction, first derivative + SNV และ first derivative + MSC จะพิสูจน์แบบจำลองโดยใช้วิธี full cross validation เมื่อได้แบบจำลองจะคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่า root mean square error of cross validation (RMSECV) ที่ต่ำที่สุด จากนั้นจะบันทึกค่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ), ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (root mean squared error of cross validation; RMSECV), ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (bias), และ อัตราส่วนระหว่างค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ratio of standard error of validation to standard deviation; RPD) และยังบันทึกค่า regression coefficient และ X-loading weight ที่จำนวนคลื่นต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

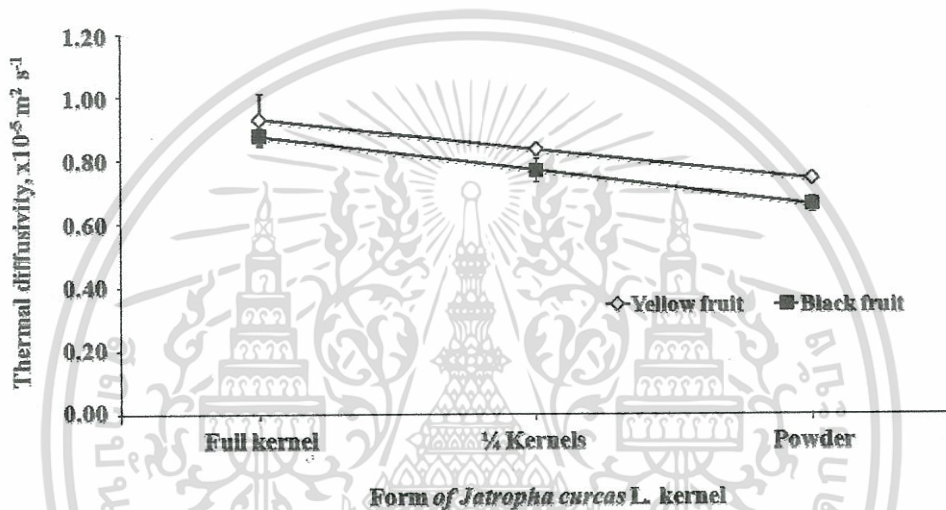
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 สมบัติเชิงความร้อนของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

##### 4.1.1 การแพร่ความร้อน (Thermal diffusivity)

การแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่แบบทั้งเมล็ด, ¼ เมล็ดและแบบผงของผลสีดำและผลสีเหลืองมีค่าลดลงเมื่อขนาดของอนุภาคลดลงแสดงในรูปที่ 4.1

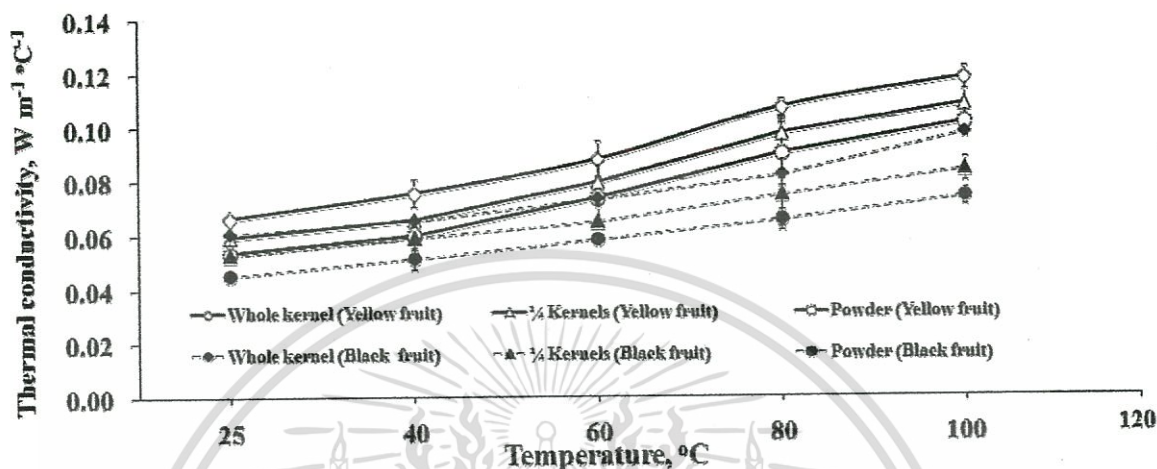


รูปที่ 4.1 ค่าการแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำของผลสีเหลืองและดำที่ขนาดเมล็ดต่างกัน

ค่าการแพร่ความร้อนของแบบทั้งเมล็ด, ¼ เมล็ดและแบบผงของผลสีเหลืองมีค่าเท่ากับ  $9.303 \times 10^{-6}$ ,  $8.371 \times 10^{-6}$ , และ  $7.456 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับ สำหรับผลสีดำมีค่าเท่ากับ  $8.792 \times 10^{-6}$ ,  $7.723 \times 10^{-6}$ , และ  $6.652 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  ตามลำดับ เมล็ดสบู่ดำแบบทั้งเมล็ดมีค่าการแพร่ความร้อนสูงสุด แบบ ¼ เมล็ดและแบบผงมีค่าลดลงตามลำดับ ในขณะที่ผลสีเหลืองมีค่าการแพร่ความร้อนมากกว่าผลสีดำในทุกแบบเมล็ด ซึ่งเป็นผลจากผลสีเหลืองมีความชื้นมากกว่าผลสีดำซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของนักวิจัยดังนี้ ผลการทดลอง papaya (*Carica papaya* L.) และ cashew apple (Kurozawa et al., 2008) และ sheanut seed (Aviara และ Haque, 2001) และมีแนวโน้มแตกต่างกันกับ minor millet grains และ flours (Subramanian และ Viswanathan, 2003), และ barley (Hobani และ Tolba, 1995)

#### 4.1.2 การนำความร้อน (Thermal conductivity)

การนำความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่ระยะผลสีเหลืองและผลสีดำมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความต่างของขนาดอนุภาคแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ค่าการนำความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ (ผลเหลืองและผลดำ) ที่รูปแบบเมล็ด อุณหภูมิต่างกัน

การนำความร้อนของผลสีเหลืองในรูปแบบทั้งเมล็ด, ¼ เมล็ดและแบบผงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 ถึง 100°C โดยมีค่า 0.0663 ถึง 0.1181, 0.0593 ถึง 0.1087 และ 0.0536 ถึง 0.1015 W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> ตามลำดับ สำหรับผลสีดำการนำความร้อนมีค่าเท่ากับ 0.0608 ถึง 0.0977, 0.0527 ถึง 0.0841, และ 0.0452 ถึง 0.0740 W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> ตามลำดับ การนำความร้อนของทั้งสองระยะการเก็บเกี่ยวถูกพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แบบทั้งเมล็ดพบว่ามีค่าการนำความร้อนสูงสุด ¼ เมล็ดและแบบผงมีค่าต่ำลงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ (Jasansky และ Bilanski, 1973) ศึกษาการนำความร้อน soybeans สามรูปแบบเมล็ดคือ ทั้งเมล็ด (whole kernel), แบบทำให้แตก (crushed kernel) และแบบผง (powder) การทดลองพบว่าการนำความร้อนมีความสัมพันธ์กับขนาดอนุภาค, ความชื้นและอุณหภูมิ ซึ่งการนำความร้อนในทุกขนาดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น แบบทั้งเมล็ด (whole kernel) มีค่าการนำความร้อนสูงสุด แบบทำให้แตก (crushed kernel) และแบบผงมีค่าต่ำลงตามลำดับ

การนำความร้อนของทุกรูปแบบเมล็ดจากผลสีเหลืองมีค่ามากกว่าผลสีดำ ซึ่งเป็นผลมาจากมีความชื้นมากกว่า สอดคล้องกับผลการทดลองกับเมล็ด safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seeds (Kara et al., 2011), guna seeds (Aviara et al., 2008), sheanut kernels (Aviara และ Haque, 2001) และ dates (Hobani และ Al-Askar, 2000)

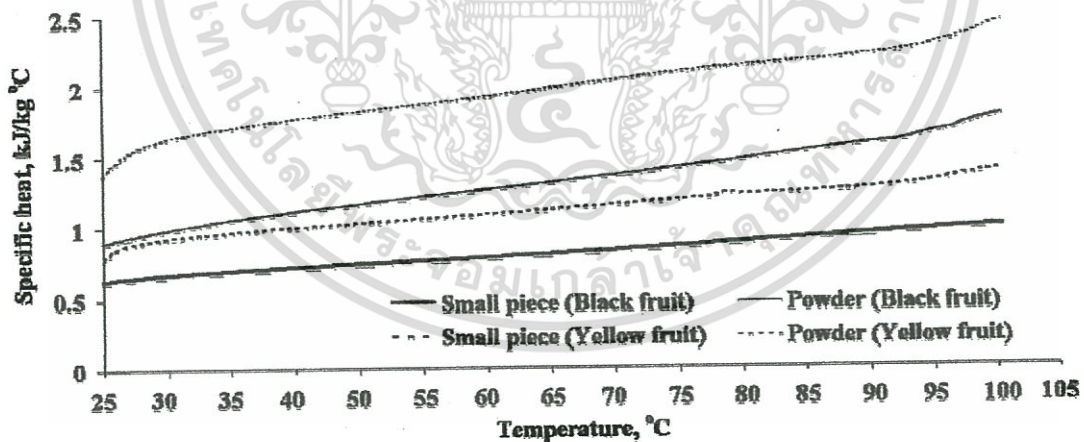
อย่างไรก็ตามมีผลการทดลองของนักวิจัยพบว่ามีแนวโน้มที่ตรงข้าม อาทิเช่น roselle seeds (Bangboye และ Adejumo, 2010), peanut pods, และ kernels และ shells (Bitra et al., 2010) สมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนที่ความแตกต่างของขนาดเมล็ดและระยะเก็บเกี่ยวกับอุณหภูมิแสดงได้ในตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อน,  $k$  (W/m °C) และอุณหภูมิ,  $T$  °C

ตัวอย่าง	ค่าการนำความร้อน ( $k$ )	$R^2$
แบบเต็มเมล็ด (ผลสีเหลือง)	$k=0.0135T+5.05\times 10^{-2}$	0.986
¼ เมล็ด (ผลสีเหลือง)	$k=0.0131T+4.29\times 10^{-2}$	0.980
แบบผง (ผลสีเหลือง)	$k=0.0127T+3.78\times 10^{-2}$	0.981
แบบเต็มเมล็ด (ผลสีดำ)	$k=0.0091T+4.86\times 10^{-2}$	0.956
¼ เมล็ด (ผลสีดำ)	$k=0.0079T+4.34\times 10^{-2}$	0.986
แบบผง (ผลสีดำ)	$k=0.0071T+3.74\times 10^{-2}$	0.996

#### 4.1.3 ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)

ความร้อนจำเพาะของเนื้อในเมล็ดสับดำทั้งสองรูปแบบคือ แบบชิ้นเล็กและแบบผงและสองระยะการเก็บเกี่ยวที่ช่วงอุณหภูมิจาก 25 ถึง 100 °C แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนจำเพาะของเนื้อในเมล็ดสับดำ (ผลสีเหลืองและดำ), ที่รูปแบบเมล็ดและอุณหภูมิต่างกัน

ความร้อนจำเพาะแบบชิ้นเล็กของผลสีเหลืองมีค่าจาก 0.7852 ถึง 1.3929 และแบบผงมีค่า 1.3823 ถึง 2.4510  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  สำหรับแบบชิ้นเล็กของผลสีดำมีค่า 0.6258 ถึง 0.9933 และแบบผงมีค่า 0.8930 ถึง 1.7810  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  ผลสีเหลืองมีค่าความร้อนจำเพาะมากกว่าผลสีดำและแบบผงมีค่าความร้อนจำเพาะมากกว่าแบบชิ้นเล็ก ซึ่งเป็นผลมาจากผลสีดำมีค่าความชื้นมากกว่าผลสีดำและแบบผงมีช่องว่างของเนื้อวัสดุมากกว่าแบบชิ้นเล็กทำให้การเพิ่มความร้อนทำได้น้อยกว่า

ความร้อนจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองกับ peppers (Uengkimbuan et al., 2011), wheat (Cao et al., 2010), guna seeds (Aviara, 2008), cereal flours (Kaletunç, 2007), borage seeds (Yang et al., 2002), sheanut kernels (Aviara และ Haque, 2001) และ cumin seeds (Singh และ Goswami, 2000) สมการความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของทั้งสองรูปแบบเมล็ดและระยะการเก็บเกี่ยวกับอุณหภูมิ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ,  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) และอุณหภูมิ ( $T$ ,  $^\circ\text{C}$ ) ที่รูปแบบเมล็ดต่างกัน

ตัวอย่าง	ความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ )	$R^2$
แบบผง (ผลสีเหลือง)	$C_p = 0.00180T + 1.58$	0.981
แบบชิ้นเล็ก (ผลสีเหลือง)	$C_p = 0.00100T + 0.89$	0.987
แบบผง (ผลสีดำ)	$C_p = 0.00170T + 0.93$	0.994
แบบชิ้นเล็ก (ผลสีดำ)	$C_p = 0.00080T + 0.64$	0.997

#### 4.2 การพัฒนาเทคนิคการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนของชีวมวลโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี: กรณีศึกษาเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

ผลการตรวจวัดตามวิธีมาตรฐาน

##### 4.2.1 สมบัติเชิงความร้อน

##### 4.2.1.1 ผลการหาค่าการแพร่ความร้อนของเนื้อในสบู่ดำ

ผลการหาค่าการแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำทั้ง 4 กลุ่ม ผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำ และแบบอบแห้ง มีค่าลดลงตามระยะการเก็บเกี่ยวแสดงดังตารางที่ 4.3

#### ตารางที่ 4.3 การแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสุบุดำต่างกัน

การแพร่ความร้อน ( $m^2/s$ )		
กลุ่ม	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ผลสีเขียว	0.000010654c	0.0000005027
ผลสีเหลือง	0.000009309b	0.0000013744
ผลสีดำ	0.000008850b	0.0000008292
แบบอบแห้ง	0.000007870a	0.0000019352

หมายเหตุ ตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงถึงค่าที่แตกต่างกันที่  $p > 0.05$

ผลการทดลองพบว่าค่าการแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดสุบุดำของผลสีเขียว เหลือง ดำ และแบบอบแห้งมีค่าลดลงตามระยะการเก็บเกี่ยวคือ 0.000010654, 0.000009309, 0.000008850, และ 0.00000787  $m^2/s$  ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากความชื้นของผลสีเขียวมีค่ามากกว่าผลสีเหลือง ดำ และแบบอบแห้ง ตามลำดับมีซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของนักวิจัยดังนี้ ผลการทดลอง *Jatropha curcas* L. (Sirisomboon & Posom, 2012), papaya (*Carica papaya* L.), cashew apple (Kurozawa et al., 2008), sheanut seed (Aviara & Haque, 2001) และมีแนวโน้มแตกต่างกันกับ minor millet grains และ flours (Subramanian & Viswanathan, 2003), และ barley (Hobani & Tolba, 1995)

#### 4.2.1.2 ผลการหาค่าการนำความร้อนของเนื้อในเมล็ดสุบุดำ

การนำความร้อนของเนื้อในเมล็ดสุบุดำที่อุณหภูมิ 40 และ 100 °C ที่ระยะผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำ และแบบอบแห้ง มีค่าเปลี่ยนแปลงตามระยะการเก็บเกี่ยวแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าการนำความร้อนของเนื้อในเมล็ดสุบุดำที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสุบุดำและอุณหภูมิที่ต่างกัน

การนำความร้อน ( $w m^{-1} C^{-1}$ )				
กลุ่ม	40°C		100°C	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ผลสีเขียว	0.127951d	0.030205	0.33175d	0.077538
ผลสีเหลือง	0.091715c	0.024096	0.15440c	0.057033
ผลสีดำ	0.059763b	0.006125	0.09898b	0.021192
แบบอบแห้ง	0.045592a	0.001574	0.05650a	0.002880

หมายเหตุ ตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงถึงค่าที่แตกต่างกันที่  $p > 0.05$

การนำความร้อนของผลสีเขียว สีเหลือง ผลสีดำ และแบบอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 และ 100 °C มีค่า 0.127951 และ 0.33175, 0.091715 และ 0.15440, 0.059763 และ 0.09898, 0.045592 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $0.05650 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  ตามลำดับ การนำความร้อนของทั้งสี่กลุ่มถูกพบว่ามีความเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงความร้อนในเมล็ดมีความสูงนั่นคือน้ำและสารอื่นๆในเมล็ดมีความปริมาตรความร้อนสูงด้วยทำให้น้ำความร้อนได้เร็วขึ้น

การนำความร้อนของเนื้อในเมล็ดจากผลสีเขียวมากกว่าผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้ง ซึ่ง มีผลเนื่องจากมีความชื้นมากกว่า สอดคล้องกับผลการทดลองของ *Jatropha curcas* L. (Sirisomboon & Posom, 2012), safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seeds (Kara et al., 2011), guna seeds (Aviara et al., 2008), sheanut kernels (Aviara & Haque, 2001) และ dates (Hobani & Al-Askar, 2000) อย่างไรก็ตามมีผลการทดลองของนักวิจัยที่พบว่ามีความโน้มที่ตรงข้ามอาทิเช่น roselle seeds (Bamgboye & Adejumo, 2010), peanut pods, และ kernels และ shells (Bitra et al., 2010)

#### 4.2.1.3 ผลการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำ

ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 40 และ  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ระยะผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้ง ที่คำนวณได้มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและระยะการเก็บเกี่ยว แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความร้อนจำเพาะของเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสบู่ดำและอุณหภูมิที่ต่างกัน

กลุ่ม	ความร้อนจำเพาะ ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ )			
	40 $^{\circ}\text{C}$		100 $^{\circ}\text{C}$	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ผลสีเขียว	26.2870c	6.2018	68.2098c	16.2748
ผลสีเหลือง	22.1110bc	6.7409	37.7210b	18.0348
ผลสีดำ	14.9323a	2.4827	24.8997a	7.0030
แบบอบแห้ง	16.8512ab	21.7232	20.9970a	27.5815

หมายเหตุ ตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงถึงค่าที่แตกต่างกันที่  $p > 0.05$

ความร้อนจำเพาะเนื้อในเมล็ดสบู่ดำที่ระยะผลสีเขียว สีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 40 และ  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  มีค่า 26.2870 และ 68.2098, 22.1110 และ 37.7210, 14.9323 และ 24.8997, 16.8512 และ 20.9970  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  แต่จากบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.1 พบว่าค่าความร้อนจำเพาะที่วัดได้โดยใช้เครื่อง differential scanning calorimeter สำหรับเนื้อในเมล็ดสบู่ดำลักษณะต่างๆ มีค่าน้อยกว่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนจำเพาะแบบเนื้อชิ้นเล็กของผลสีเหลืองที่อุณหภูมิ 40 และ 100 °C มีค่าจาก 0.7852 และ 1.3929 kJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> สำหรับแบบเนื้อชิ้นเล็กของผลสีดำที่อุณหภูมิ 40 และ 100 °C มีค่า 0.6258 และ 0.9933 kJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> แต่สำหรับการหาโดยวิธีการคำนวณความร้อนจำเพาะของผลสีเหลืองที่อุณหภูมิ 40 และ 100 °C มีค่า 22.1110 และ 37.7210 สำหรับผลสีดำมีค่า 14.9323 และ 24.8997 ทั้งนี้เป็นเพราะการคำนวณใช้ความหนาแน่นรวมซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความหนาแน่นเนื้อของเนื้อในเมล็ดสับดู่มากเนื่องจากรวมช่องว่างของอากาศระหว่างเมล็ดด้วย ในขณะที่การวัดด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter วัดที่ขึ้นเนื้อชิ้นเล็กๆเพียงชิ้นเดียวจึงทำให้ค่าต่างกัน และการวัดค่าการนำความร้อนและการแพร่ความร้อนเป็นการวัดแบบรวม (Bulk) ไม่ใช่แบบชิ้นเล็ก

ความร้อนจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองกับ peppers (Uengkimbuan et al., 2011), wheat (Cao et al., 2010), guna seeds (Aviara, 2008), cereal flours (Kaletunç, 2007), borage seeds (Yang et al., 2002), sheanut kernels (Aviara และ Haque, 2001) และ cumin seeds (Singh และ Goswami, 2000)

#### 4.2.2 ปริมาณความชื้น

ผลการหาปริมาณความชื้นของเนื้อในเมล็ดสับดูทั้งหมด 4 กลุ่ม ผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้ง แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ปริมาณความชื้นของเนื้อในเมล็ดสับดูที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับดูที่แตกต่างกัน

กลุ่ม	ปริมาณความชื้น (% wb.)	
	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ผลสีเขียว	64.2301d	5.6419
ผลสีเหลือง	41.717c	3.8568
ผลสีดำ	10.3811b	1.5198
แบบอบแห้ง	0.8907a	0.2705

หมายเหตุ ตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงถึงค่าที่แตกต่างกันที่  $p > 0.05$

จากผลการทดลองหาค่าปริมาณความชื้นพบว่าความชื้นมีค่าลดลงตามระยะเก็บเกี่ยว คือ ผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้งตามลำดับ ซึ่งยังพบว่าทั้ง 4 รูปแบบนี้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.2.3 ปริมาณน้ำมัน

ผลการตรวจหาปริมาณน้ำมันของเนื้อในเมล็ดสับดูทั้งหมด 4 กลุ่มคือ ผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้ง แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ปริมาณน้ำมันของเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับดูดำที่แตกต่างกัน

ปริมาณน้ำมัน (%)		
กลุ่ม	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ผลสีเขียว	42.5621a	2.8877
ผลสีเหลือง	42.7694a	4.0690
ผลสีดำ	44.9398a	4.9792
แบบอบแห้ง	42.6150a	4.1375

หมายเหตุ ตัวอักษรต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงค่าที่แตกต่างกันที่  $p > 0.05$

จากผลการทดลองค่าปริมาณน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกันที่ระยะเก็บเกี่ยวผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้งมีค่าเท่ากับ 42.5621, 42.7694, 44.9398, 42.6150 %, ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการสกัดน้ำมันสามารถทำได้กับเนื้อในเมล็ดของผลสีดำและแบบอบแห้งแต่ไม่สามารถสกัดได้กับผลสีเหลืองและสีเขียว เนื่องจากมีโมเลกุลของน้ำอยู่รอบๆเซลล์ทำให้เฮกเซนเข้าไปยังโมเลกุลของน้ำมันไม่ได้จึงต้องลดความชื้นของเนื้อในเมล็ดของผลสีเหลืองและสีเขียวก่อนการสกัดน้ำมัน โดยกลุ่มผลสีเหลืองจะไล่ความชื้นออก 30-31 % ของค่าเริ่มต้น ส่วนผลสีเขียวไล่ความชื้นออก 50-51 % ซึ่งทำให้ตัวอย่างมีความชื้นเหลือประมาณ 10 %wb ส่วนผลดำมีความชื้นประมาณ 10 %wb ส่วนแบบอบแห้งมีค่าต่ำสุดคือ 0.8907 %wb และในการสกัดน้ำมันของเนื้อในเมล็ดของผลสีเขียวเลือกเมล็ดที่มีเปลือกสีดำ (ผลเขียวแบบบริบูรณ์เต็มที่, matured green) ดังนั้นจะเห็นว่าอายุการเก็บเกี่ยวมีผลน้อยต่อปริมาณน้ำมัน

#### 4.2.4 ค่าความร้อน

ผลการหาค่าความร้อนของกากเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่เหลือจากการสกัดน้ำมัน ทั้ง 4 กลุ่มคือผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้ง แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าความร้อนของกากเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่เหลือจากการสกัดน้ำมันออก

ค่าความร้อน (J/g)		
กลุ่ม	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ผลสีเขียว	18196a	735
ผลสีเหลือง	19328c	777
ผลสีดำ	18772b	851
แบบอบแห้ง	17979a	358

หมายเหตุ ตัวอักษรต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงค่าที่แตกต่างกันที่  $p > 0.05$

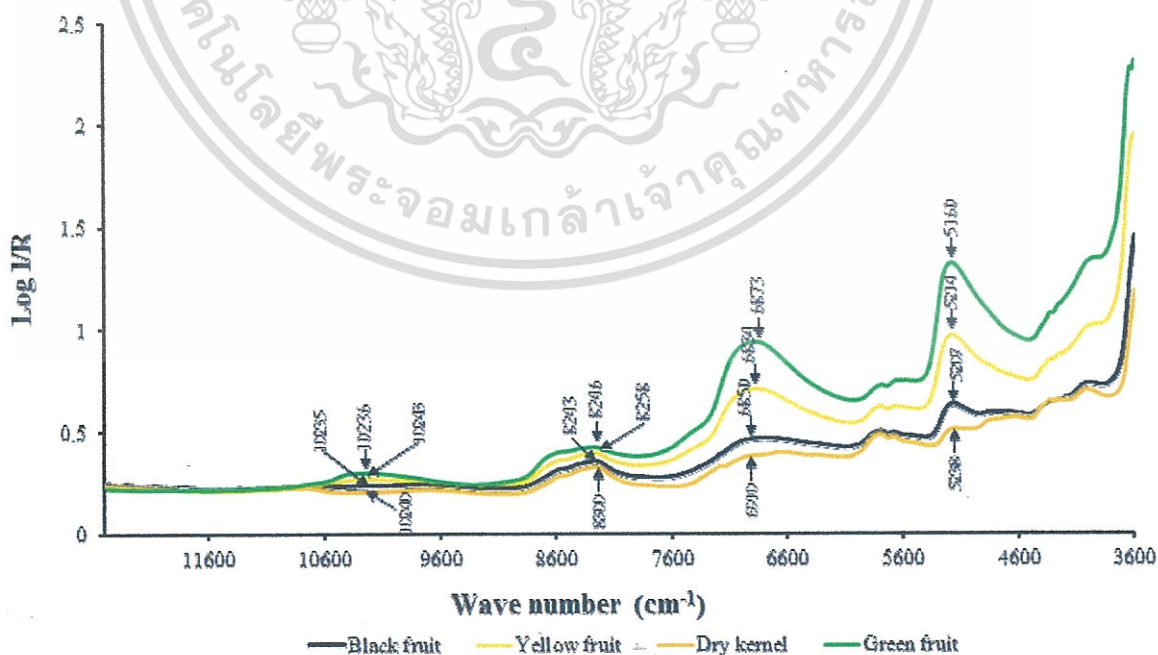
ผลการทดลองการหาค่าความร้อนของกากเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่เหลือจากการสกัดน้ำมัน ทั้ง 4 กลุ่มคือผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้งมีค่าเท่ากับ 18196, 19328, 18772 และ 17979 J/g ตามลำดับ ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ พบว่ากากเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่เหลือไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสกัดน้ำมันของกลุ่มผลสีเหลืองมีค่าสูงสุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขณะที่ผลเขียวเนื้อในเมล็ดยังมีพัฒนาการเช่นการแบ่งเซลล์หรือการขยายตัวของเซลล์ยังไม่เต็มที่ เมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็นผลสีเหลือง เซลล์มีการเจริญเติบโตเต็มที่แล้วและเมื่อผลแก่เป็นผลดำเซลล์ก็เหี่ยวแห้งลง ส่วนเนื้อในเมล็ดแบบอบแห้งเซลล์ยิ่งแห้งลงมากขึ้นอีก ซึ่งสิ่งเหล่านี้อาจมีผลทำให้ค่าความร้อนน้อยกว่าผลสุกเต็มที่ ในปัจจุบัน (นิรนาม, 2556c) มีการนำเศษวัสดุทางการเกษตรมาใช้เป็นพลังงานกับโรงงานอุตสาหกรรม ต้นกำลังเช่นโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่กำลังใช้กันอยู่เช่น ลำต้นมันสำปะหลัง แกลบ กะละปาล์ม เส้นใยปาล์ม ชานอ้อย ซึ่งมีค่าความร้อนเท่า 18420 13,517 16,900 11,400 7,368 J/g ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากากสับุดามีค่าความร้อนที่สูงกว่าวัสดุที่กล่าวมา ดังนั้นกากสับุดาสามารถนำมาทำเป็นพลังงานทดแทนในการเผาไหม้ได้เนื่องจากมีค่าความร้อนที่สูง

### 4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะสเปกตรัม

#### 4.3.1 สเปกตรัมของเนื้อในเมล็ดสับุดาที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับุดาที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงย่าน NIR ที่ wavenumber ระหว่าง 12500 - 4000  $\text{cm}^{-1}$  (800-2500 nm) ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany) สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อในเมล็ดสับุดาที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับุดาที่แตกต่างกันทั้ง 4 กลุ่มคือผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่า เกิดการดูดกลืนแสงชัดเจนของเนื้อในเมล็ดสับุดาที่ wave number เดียวกันที่ 10236, 8246, 6873 และ 5160  $\text{cm}^{-1}$  (977 1213 1455 1938 nm) พิกัดที่ 970, 1450 และ 1940 nm เป็นการดูดซับคลื่นของน้ำ (O-H stretch second overtone, O-H stretch first overtone และ O-H stretch + O-H deformation ตามลำดับ) และพิกัดที่ 1215 nm เป็นการดูดซับของ  $\text{CH}_2$  ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของกรดไขมัน (fatty acid) (C-H stretch second overtone) (Osborne and Fearn, 1986)

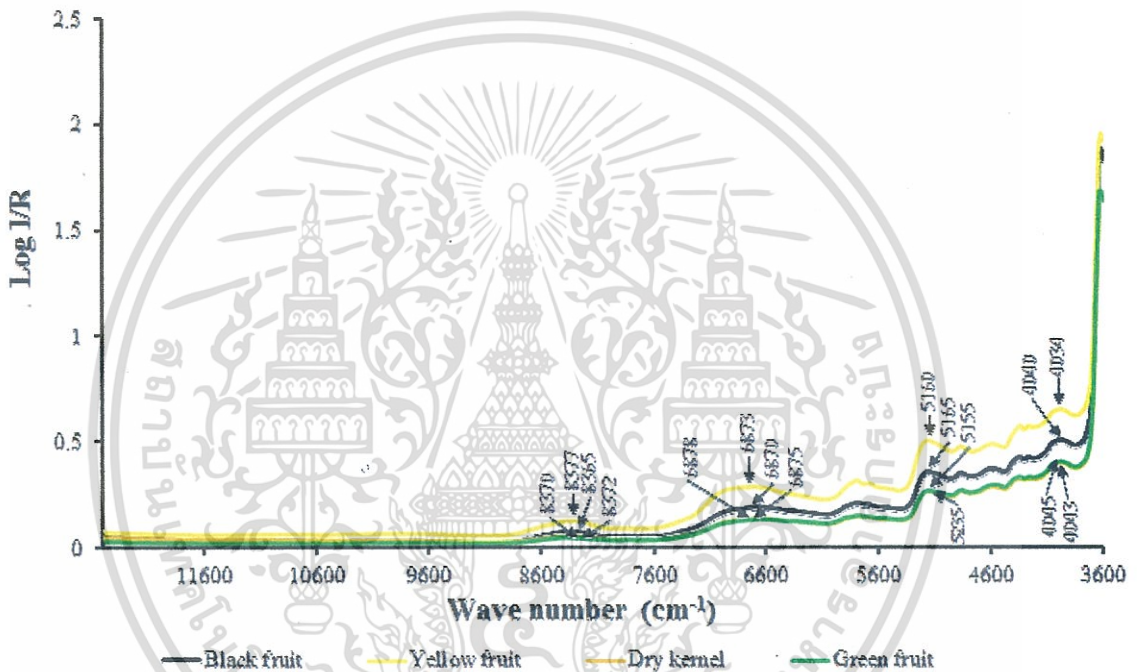


รูปที่ 4.4 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อในเมล็ดสับุดาที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับุดาที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 สเปกตรัมของกากเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่เหลือจากการสกัดน้ำมันออกที่ระยะการเก็บเกี่ยวผล สับดูดำที่แตกต่างกัน

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของกากเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่เหลือจากการสกัดน้ำมันออกที่ระยะ การเก็บเกี่ยวผลสับดูดำที่แตกต่างกันทั้ง 4 กลุ่มคือผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้งสับดูดำ ที่ได้จากเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ที่ wavenumber ระหว่าง 12500 - 4000  $\text{cm}^{-1}$  (800-2500 nm) พบว่ากากสับดูดำมีการดูดกลืนคลื่นแสงที่ระดับ wavenumber เดียวกันทั้งสี่ระดับความแตกต่างของตัวอย่างคือ 8377, 6873, 5160,  $\text{cm}^{-1}$  (1194 1455 1938 nm) แสดงดังรูปที่ 4.5 พีคที่ 1450 และ 1940 nm เป็นการดูดซับคลื่นของน้ำ (O-H stretch first overtone และ O-H stretch + O-H deformation ตามลำดับ) พีคที่ 1196 และ 1198 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ glucose และ sucrose ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมเฉลี่ยของกากเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่เหลือจากการสกัดน้ำมันออกที่ระยะการเก็บเกี่ยวผลสับดูดำที่แตกต่างกัน

#### 4.4 ผลการทำนายสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมัน และค่าความร้อนของ สับดูดำด้วยวิธี Partial Least Squares Regression

ค่าทางสถิติของสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมัน และค่าความร้อนของสับดูดำที่ใช้ สร้างสมการทำนายโดยใช้วิธี Partial Least Squares Regression จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ แสดงดังตารางที่ 4.9 ซึ่งผลการสร้างสมการทำนายค่าความสัมพันธ์ มีรายละเอียดดัง ตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 ค่าทางสถิติของความชื้น, ปริมาณน้ำมัน, ค่าความร้อนและสมบัติเชิงความร้อนของ  
 สบู่ดำที่ใช้สร้างสมการทำนาย

Parameter		N	Max	Min	Mean	SD
Thermal diffusivity ( $m/s^2$ )		98	0.00001155	0.0000008341	0.000009171255	1.6148E-06
Thermal conductivity ( $w m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )	40 $^\circ C$	97	0.19911	0.04328	0.08125	0.03725
	100 $^\circ C$	99	0.46217	0.05311	0.16041	0.11601
Specific heat ( $kJ kg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )	40 $^\circ C$	99	120.6044	9.9971	20.045415	12.5030
	100 $^\circ C$	98	152.7752	11.9729	37.956921	26.1953
Moisture (% wb.)		100	73.0611	0.2851	29.3048	25.5565
Oil content (%)		100	55.5379	33.6919	43.2216	4.1467
Heat value (J/g)		100	21334	17066	18569.09	873.649

ตารางที่ 4.10 ผลการสร้างสมการและการทำนายสมบัติต่างๆของสบู่ดำโดยวิธี Partial Least Squares Regression

Parameter		wave number range	Pre-processing	Rank	$R^2$	RMSECV	RPD	Bias
Thermal diffusivity ( $m/s^2$ )		9403.8 - 4242.9	First derivative + MSC	4	53.4	8.99E-07	1.47	-2.27E-08
Thermal conductivity ( $w m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )	40 $^\circ C$	4605.4 - 4420.3	First derivative + vector normalization (SNV)	1	76.66	0.0157	2.07	8.35E-06
	100 $^\circ C$	9403.8 - 7498.3	Min - max normalization	2	82.77	0.0481	2.41	-3.84E-05
Specific heat ( $kJ kg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )	40 $^\circ C$	9403.8 - 8447.2	Constant offset elimination	3	51.75	5.06	1.44	-0.0134
	100 $^\circ C$	9403.8 - 7498.3	Min - max normalization	2	75.41	11.3	2.02	-0.0191
Moisture (% wb.)		9403.8 - 7498.3 4605.4 - 4242.9	First derivative + MSC	2	98.46	3.16	8.05	- 0.000436
Oil content (%)		7506-5446.3	Constant offset elimination	4	11.09	3.89	1.06	0.0156
Heat value (J/g)		9403.8 - 6094.3 4605.4 - 4242.9	vector normalization (SNV)	7	65.82	508	1.71	-9.22

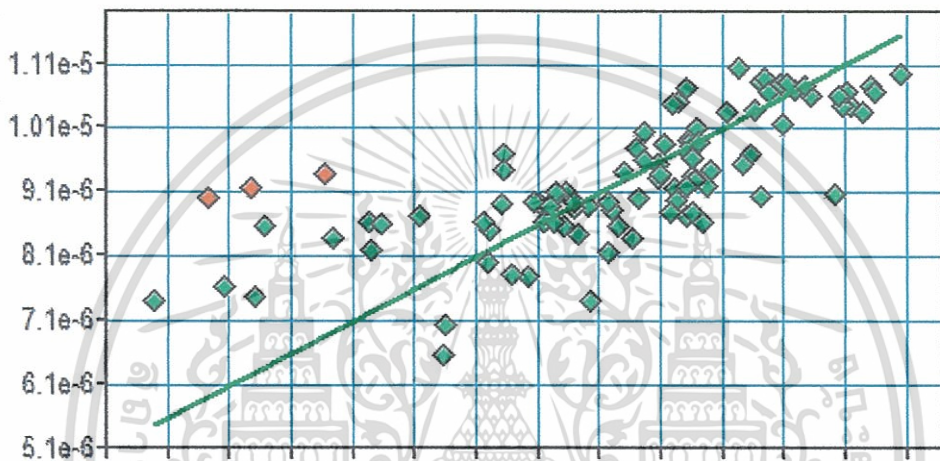
หมายเหตุ : RPD= ratio of the SEP to the SD, Bias= error, SEP= Standard error of Prediction, RMSECV=Root mean square error of cross validation, Rank=PLS factor,  $R^2$  = Coefficient of determination  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.1 ผลการสร้างสมการทำนายสมบัติเชิงความร้อน

##### 4.4.1.1 การแพร่ความร้อน

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.6 ผลการทำนายค่าการแพร่ความร้อนเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ โดยวิธีมาตรฐานโดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ First derivative + MSC มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 53.4, ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (root mean squared error of cross validation; RMSECV) เท่ากับ  $8.99E-007$ , bias เท่ากับ  $-2.27E-008$ , RPD เท่ากับ 1.47

Prediction vs True / Thermal Diffusivity [m/s<sup>2</sup>] / Cross Validation



Rank: 4  $R^2 = 53.4$  RMSECV =  $8.99E-007$  Bias:  $-2.27E-008$  RPD: 1.47  
Validation No 7 New  $\alpha_2$

รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าการแพร่ความร้อนที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน หมายเหตุ จุดแดงหมายถึงตัวอย่างที่เป็น outlier

ค่า Regression coefficient ถูกใช้เป็นพื้นฐานแรกในการตรวจผลกระทบของความยาวคลื่นต่างๆ (X-variable) ในการทำนายตัวแปรตาม (Y) และค่าสัมบูรณ์ของ Regression coefficient ที่มีค่าสูงชี้ได้ถึงถึงความสำคัญของอิทธิพลของความยาวคลื่นนั้นต่อโมเดลอย่างมีนัยสำคัญ

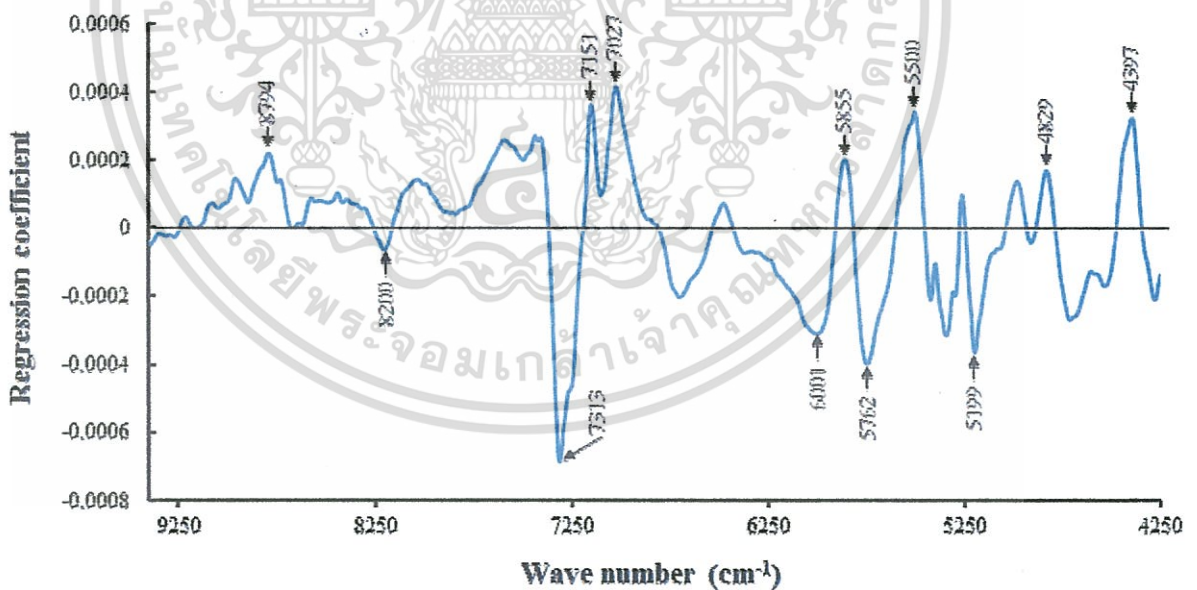
จาก Wikipedia (2013) เนื้อในเมล็ดสบูดำประกอบด้วย Saturated fatty acids 20% และ unsaturated fatty acids อยู่ 80% และมีปริมาณน้ำมันประมาณ 25–40% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้เนื้อในเมล็ดยังประกอบไปด้วยสารเคมีอื่นๆ อาทิเช่น saccharose (Sucrose), raffinose, stachyose, glucose, fructose, galactose, และ protein. ปริมาณน้ำมันส่วนใหญ่ถูกสร้างจาก oleic และ linoleic acids ซึ่งประกอบไปด้วยพันธะต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.2 นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆอีกเช่น curcasin, arachidic, linoleic, myristic, oleipalmitic, stearic acids และ curcin

จากรูปที่ 4.7 Regression coefficient plot ของค่าการแพร่ความร้อน พบพิกซึ่งมีความสำคัญต่อสมการที่ wave number เท่ากับ 8794 8200 7313 7151 7027 6001 5855 5762 5500 5199 4829 4397  $\text{cm}^{-1}$  (1137 1220 1367 1398 1423 1666 1708 1736 1818 1923

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

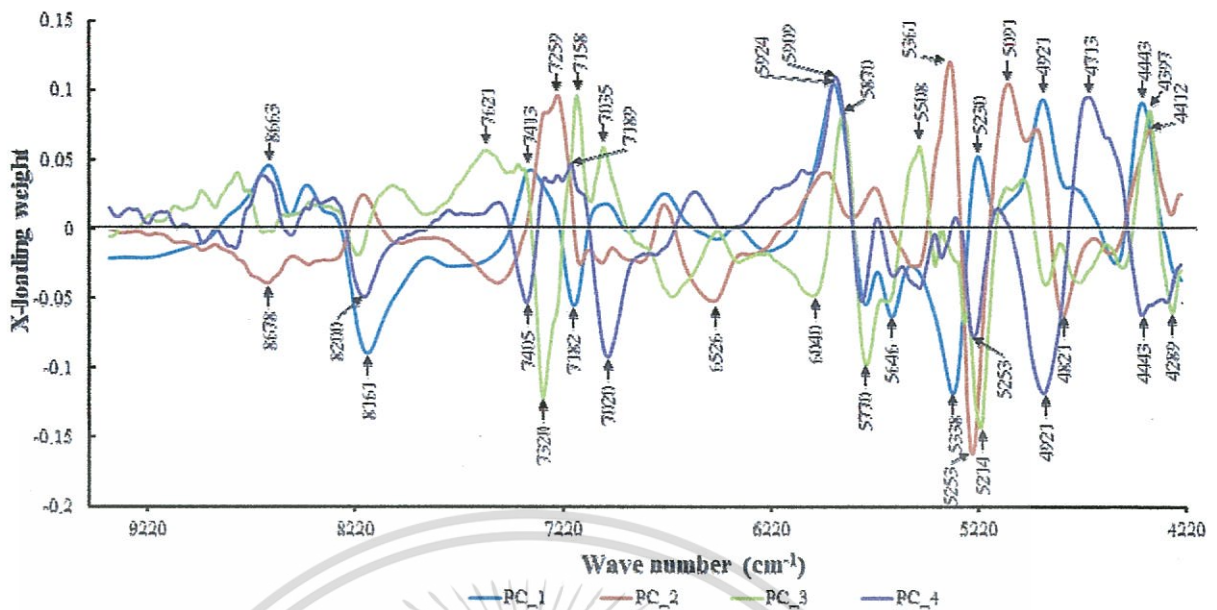
2071 2274 nm) จาก Osborne and Fearn (1986) พีคที่ 1367, 1818 1220 และ 2071 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose พีคที่ 2274 เป็นการดูดซับคลื่นของ starch (O-H stretch + C-C stretch) พีคที่ 1398 เป็นการดูดซับของ  $\text{CH}_2$  ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของน้ำมัน (2x C-H stretch second + C-H deformation)

สำหรับค่า X-loading weight plot นั้นถ้าความยาวคลื่นที่มีค่า X-loading weight มาก แสดงว่ามีความสำคัญต่อการทำนายตัวแปรตาม รูปที่ 4.8 แสดงค่า X-loading weight ของสมการการแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับุดำซึ่งมี 4 factor (rank) สำหรับการทำนายผล สำหรับ factor 1 พบพีคซึ่งมีความสำคัญต่อสมการสำหรับที่ wavenumber เท่ากับ 8663 8161 7413 7182 5924 5646 5338 5230 4921 4443  $\text{cm}^{-1}$  (1154 1225 1349 1392 1688 1771 1873 1912 2032 2251 nm) factor 2 ที่ wavenumber เท่ากับ 8678 7259 6526 5361 5253 5091 4821 4412  $\text{cm}^{-1}$  (1152 1378 1532 1865 1904 1964 2074 2267 nm) factor 3 ที่ wavenumber เท่ากับ 7621 7320 7158 5870 5770 5508 5214 4397 4289  $\text{cm}^{-1}$  (1312 1366 1397 1704 1733 1816 1918 2274 2332 nm) factor 4 ที่ wavenumber เท่ากับ 8200 7405 7189 7020 5924 5253 4921 4713 4443 4289  $\text{cm}^{-1}$  (1220 1350 1391 1425 1688 1904 2023 2122 2251 2332 nm) จาก Osborne and Fearn (1986) พีคที่ 1392 nm เป็นการดูดซับของน้ำมัน (2x C-H stretch + C-H deformation) พีคที่ 1365 และ 1820 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose พีคที่ 2276 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ starch (O-H stretch + C-C stretch) พีคที่ 2050 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ protein (N-H sym stretch+amide II)



รูปที่ 4.7 Regression coefficient plot ของสมการการแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับุดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ค่า X-loading weight ของสมการการแพร่ความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูต้า

#### 4.4.1.2 การนำความร้อน

การทำนายค่าการนำความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูต้าทดลองสมการเพื่อทำนายอุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C ซึ่งผลการทำนายเป็นดังนี้

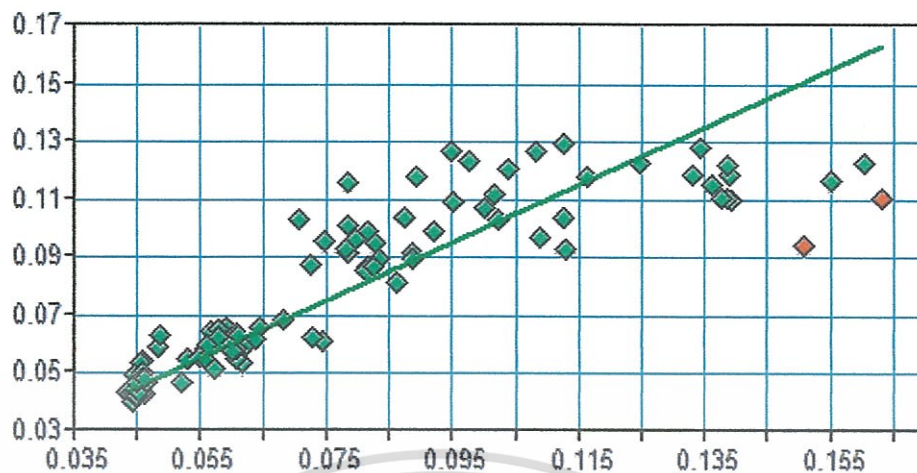
##### การนำความร้อน 40 °C

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.9 ผลการทำนายค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้โดยวิธีมาตรฐานโดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ First derivative + vector normalization (SNV) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 76.66, ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (root mean squared error of cross validation; RMSECV) เท่ากับ 0.0157, bias เท่ากับ 8.35E-06, RPD เท่ากับ 2.07

จากรูปที่ 4.10 Regression coefficient plot ของค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C พบพิกัดซึ่งมีความสำคัญต่อสมการที่ wave number เท่ากับ 4528 4458  $\text{cm}^{-1}$  (2208 2243 nm) จาก Osborne and Fearn (1986) พิกัดที่ 2200 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose พิกัดที่ 2242 เป็นการดูดซับคลื่นของ amino acid (N-H stretch +  $\text{NH}_3^+$  deformation)

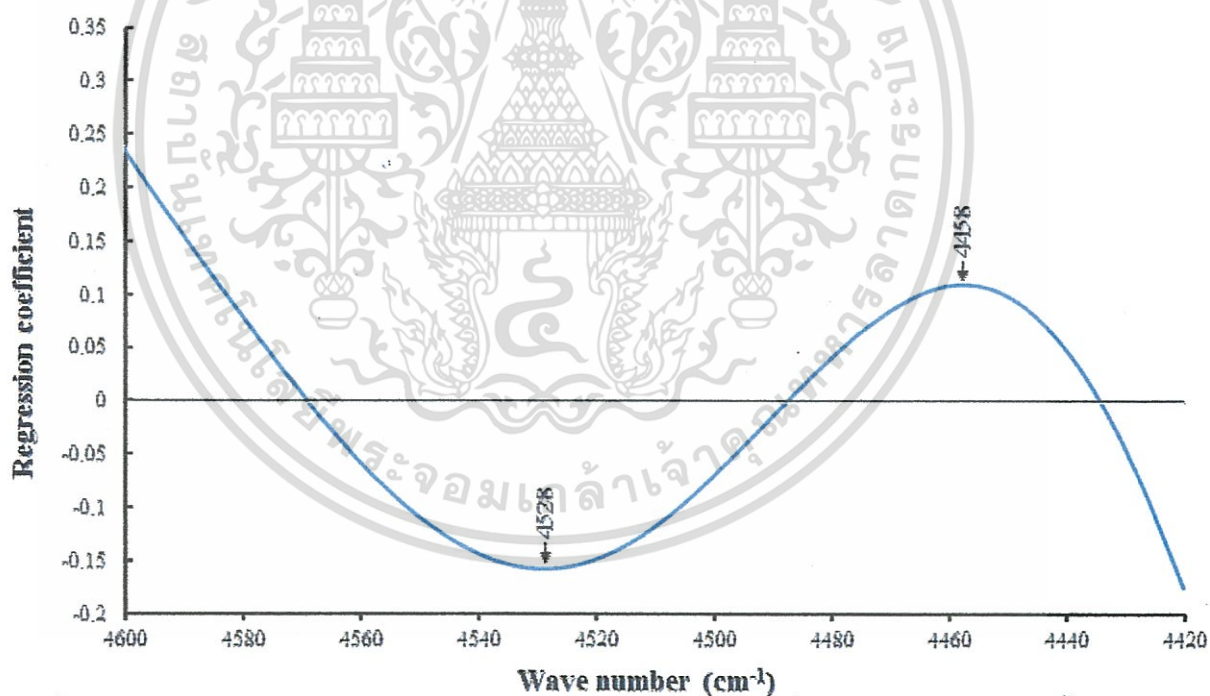
รูปที่ 4.11 แสดงค่า X-loading weight ของการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ของเนื้อในเมล็ดสับดูต้า พบพิกัดซึ่งมีความสำคัญต่อสมการสำหรับที่ wavenumber เท่ากับ 4528 4458  $\text{cm}^{-1}$  (2208 2243 nm) จาก Osborne and Fearn (1986) พิกัดที่ 2200 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose พิกัดที่ 2242 เป็นการดูดซับคลื่นของ amino acid (N-H stretch +  $\text{NH}_3^+$  deformation)

Prediction vs True / Conductivity 40 C [w/m.C] / Cross Validation



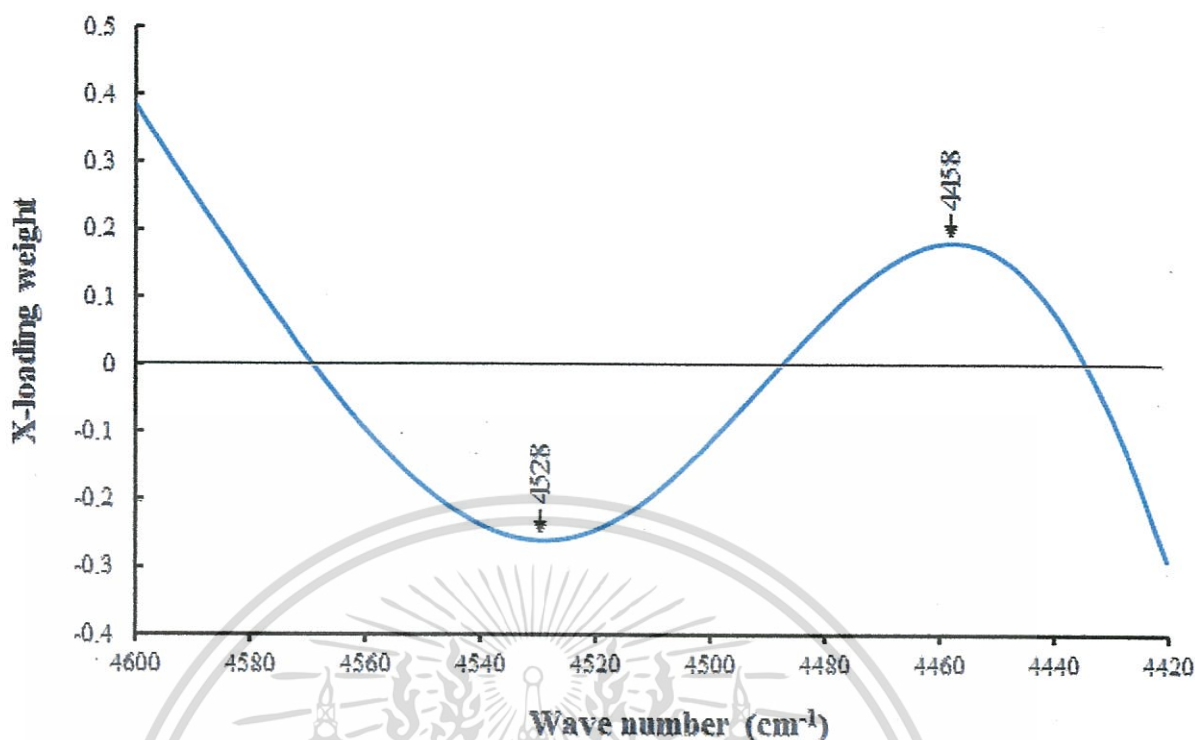
Rank: 1  $R^2 = 76.66$  RMSECV = 0.0157 Bias: 8.35E-006 RPD: 2.07  
Validation No 16 New.c2

รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน



รูปที่ 4.10 Regression coefficient ของสมการการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ของเนื้อในเมล็ดสับจั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 X-loading weight ของสมการการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ของเนื้อในเมล็ดสับคั่ว

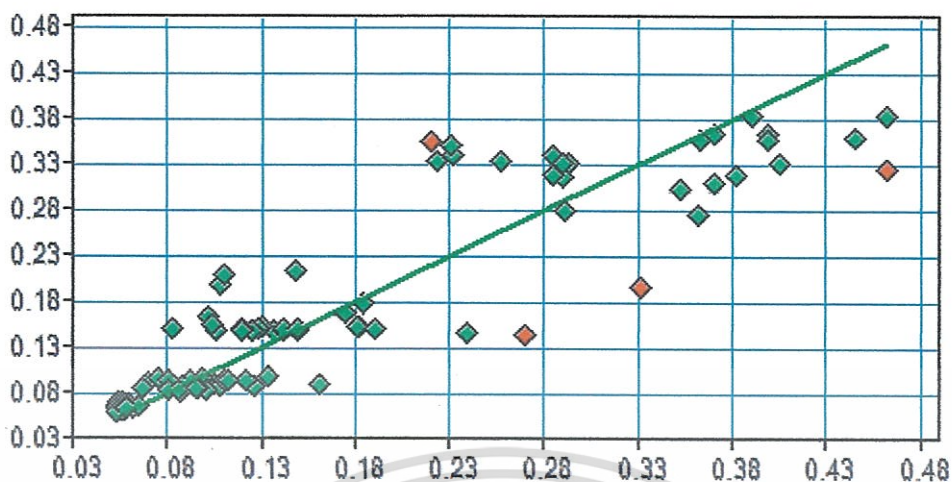
#### การนำความร้อน 100 °C

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.12 ผลการทำนายค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้โดยวิธีมาตรฐานโดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ Min - max normalization มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 82.77, ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (root mean squared error of cross validation; RMSECV) เท่ากับ 0.0481, bias เท่ากับ  $-3.84E-05$ , RPD เท่ากับ 2.41

จากรูปที่ 4.13 Regression coefficient plot ของค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C พบพิกัดซึ่งมีความสำคัญต่อสมการที่ wave number เท่ากับ  $8925 \text{ } 8262 \text{ cm}^{-1}$  (1120 1210 nm) จาก Osborne and Fearn (1986) พิกัดที่ 1207 เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose

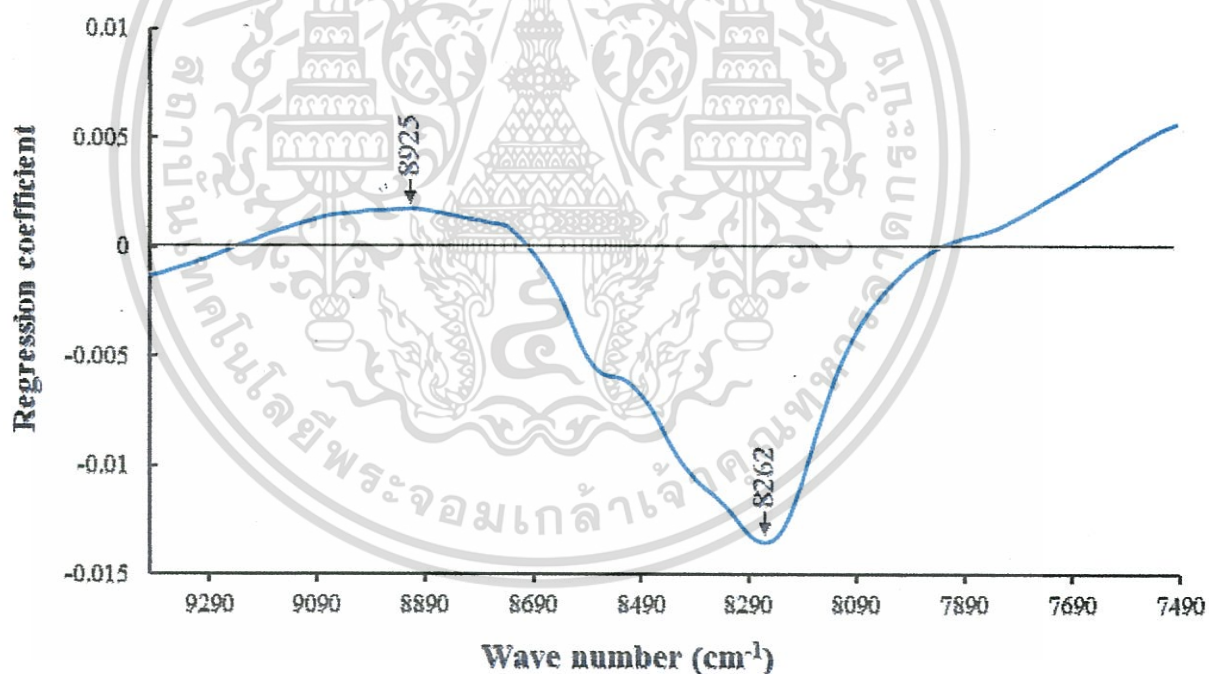
รูปที่ 4.14 แสดงค่า X-loading weight ของการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ของเนื้อในเมล็ดสับคั่วซึ่งมี 2 factor เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญกับค่าการทำนายสำหรับ factor 1 พบพิกัดซึ่งมีความสำคัญต่อสมการสำหรับที่ wavenumber เท่ากับ  $8724 \text{ } 8262 \text{ cm}^{-1}$  (1146 1210 nm) และ factor 2 ที่ wavenumber  $8262 \text{ cm}^{-1}$  (1210 nm) จาก Osborne and Fearn (1986) พิกัดที่ 1207 เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose

Prediction vs True / Conductivity 100 [w/m.C] / Cross Validation



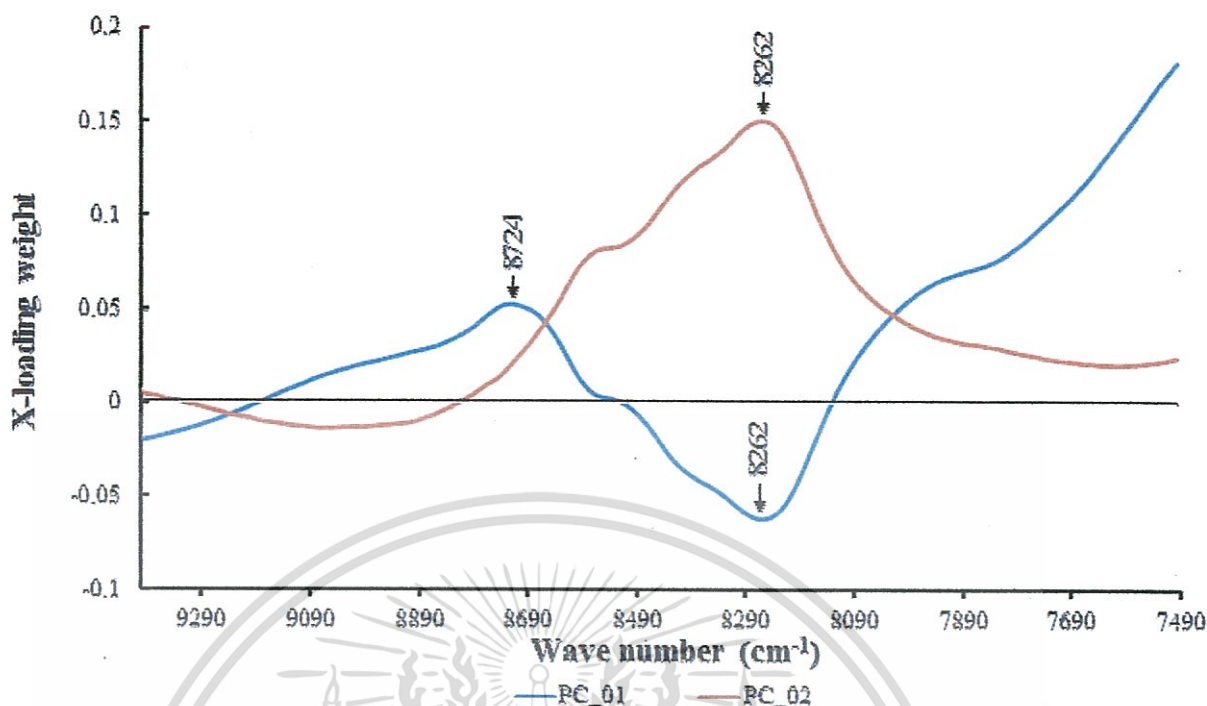
Rank: 2  $R^2 = 82.77$  RMSECV = 0.0481 Bias: -3.84E-005 RPD: 2.41  
Validation No 18 New  $\sigma^2$

รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์  
อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน



รูปที่ 4.13 Regression coefficient ของสมการการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ของเนื้อใน  
เมล็ดสบู่ดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 X-loading weight ของสมการการนำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ของเนื้อในเมล็ด สับุดำ

#### 4.4.1.3 ความร้อนจำเพาะ

##### ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 40 °C

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.15 ผลการทำนายค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 40 °C เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้โดยวิธีมาตรฐานโดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ Constant offset elimination มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 51.75, ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (root mean squared error of cross validation; RMSECV) เท่ากับ 5.06, bias เท่ากับ -0.0134, RPD เท่ากับ 1.44

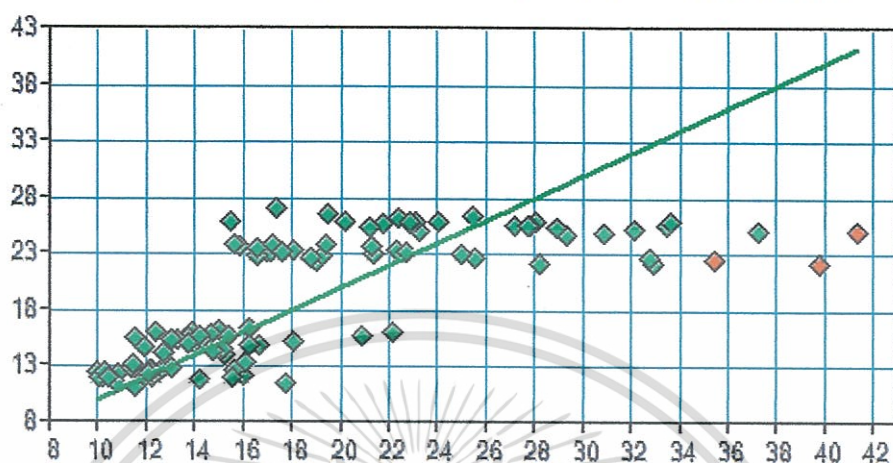
จากรูปที่ 4.16 Regression coefficient plot ของค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 40 °C พบพิกัดซึ่งมีความสำคัญต่อสมการที่ wave number เท่ากับ 9326 9295 9272 9241 9226 8910 8856 8809 8640 8578

$\text{cm}^{-1}$  ( 1072 1076 1079 1082 1084 1122 1129 1135 1157 1166 nm) จาก Osborne and Fearn (1986) พิกัดที่ 1152 เป็นการดูดซับคลื่นของ  $\text{CH}_3$  (C-H stretch second overtone) ที่ 1170 เป็นการดูดซับคลื่นของ  $\text{HC}=\text{CH}$  (C-H stretch second overtone)

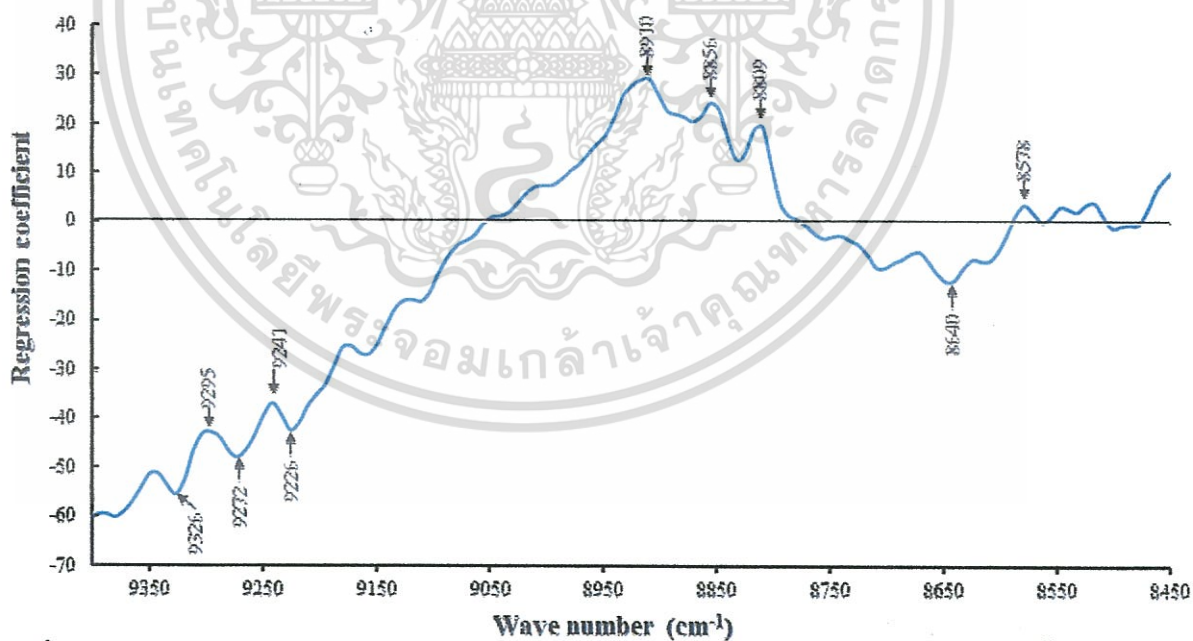
รูปที่ 4.17 แสดงค่า X-loading weight ของความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 40 °C ของเนื้อในเมล็ดสับุดำ ซึ่งมี 3 factor (rank) ที่สำคัญสำหรับการทำนายผล สำหรับ factor 1 พบพิกัดซึ่งมีความสำคัญต่อสมการสำหรับที่ wavenumber เท่ากับ  $8670 \text{ cm}^{-1}$  (1153 nm) factor 2 ที่ wavenumber  $8917 8809 8709 \text{ cm}^{-1}$  ( 1121 1135-1148 nm) factor 3 ที่ wavenumber  $9350 9326 9295 9272 9241 9226 8925 8856 8809 8709 8501 \text{ cm}^{-1}$  (1070 1072 1076 1079 1082 1084 1120 1129 1135 1148 1176 nm) จาก Osborne and Fearn (1986) พิกัดที่

1152 เป็นการดูดซับคลื่นของ  $\text{CH}_3$  (C-H stretch second overtone) ที่ 1170 เป็นการดูดซับคลื่นของ  $\text{HC}=\text{CH}$  (C-H stretch second overtone)

Prediction vs True / Specific heat 40 C [kJ/kg.C] / Cross Validation

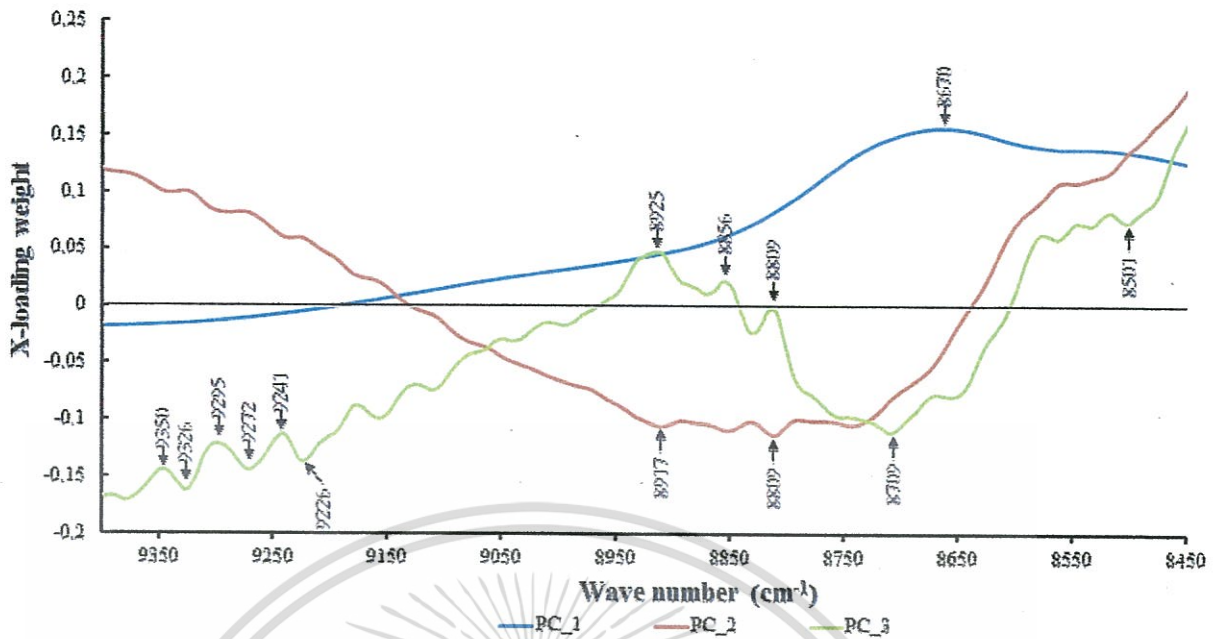


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 40 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน



รูปที่ 4.16 Regression coefficient ของสมการความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 40 °C ของเนื้อในเมล็ดสับุดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 X-loading weight ของสมการความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 40 °C ของเนื้อในเมล็ด สับดูต้า

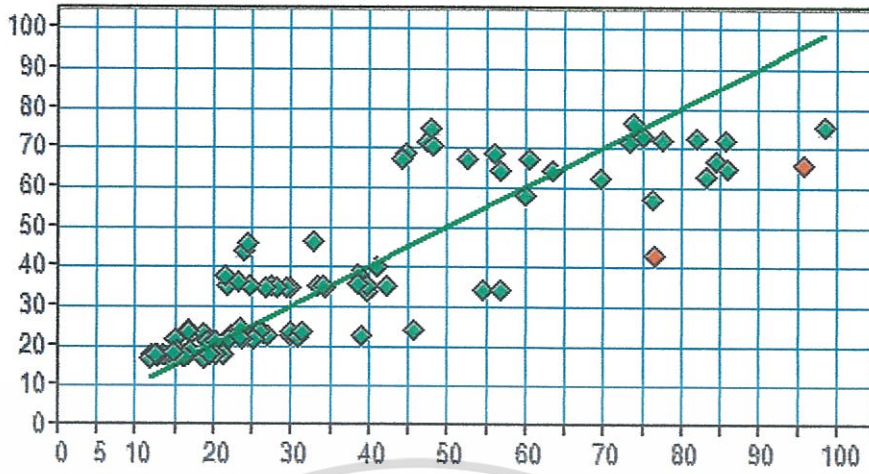
#### ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 °C

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.18 ผลการทำนายค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 °C เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้โดยวิธีมาตรฐานโดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ Min - max normalization มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 75.41, ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (root mean squared error of cross validation; RMSECV) เท่ากับ 11.3, bias เท่ากับ -0.0191, RPD เท่ากับ 2.02

จากรูปที่ 4.19 Regression coefficient plot ของค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 °C พบพิกัดซึ่งมีความสำคัญต่อสมการที่ wave number เท่ากับ 8917 8555 8262  $\text{cm}^{-1}$  (1121 1169 1210 nm) จาก Osborne and Fearn (1986) พิกัดที่ 1207 เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose พิกัดที่ 1170 เป็นการดูดซับคลื่นของ HC=CH (C-H stretch second overtone)

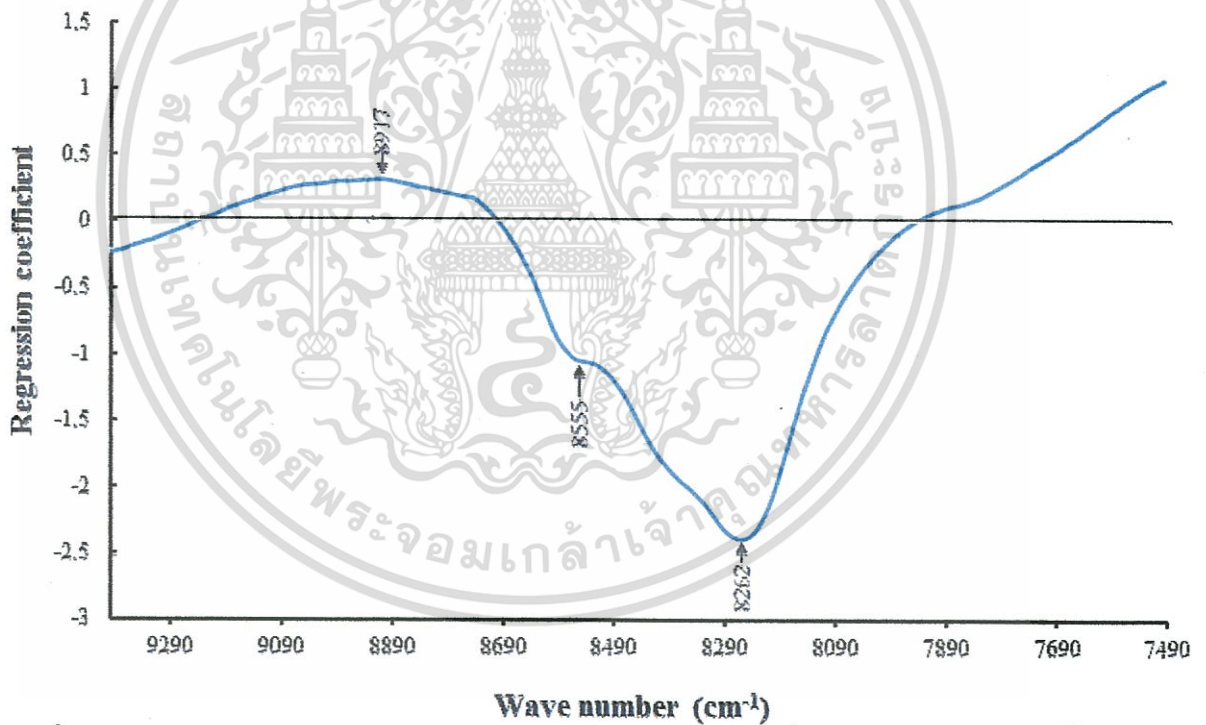
รูปที่ 4.20 แสดงค่า X-loading weight ของความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 °C ของเนื้อในเมล็ด สับดูต้า ซึ่งมี 2 factor (rank) ที่สำคัญสำหรับการทำนายผล สำหรับ factor 1 พบพิกัดซึ่งมีความสำคัญต่อสมการสำหรับที่ wavenumber เท่ากับ 8724 8254  $\text{cm}^{-1}$  (1146 1212 nm) factor 2 ที่ wavenumber 8562 8254  $\text{cm}^{-1}$  (1168 1212 nm) จาก Osborne and Fearn (1986) พิกัดที่ 1207 เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose พิกัดที่ 1170 เป็นการดูดซับคลื่นของ HC=CH (C-H stretch second overtone) พิกัดที่ 1215 เป็นการดูดซับคลื่นของ  $\text{CH}_2$  (C-H stretch second overtone)

Prediction vs True / Specific heat 100 C [kJ/kg.C] / Cross Validation



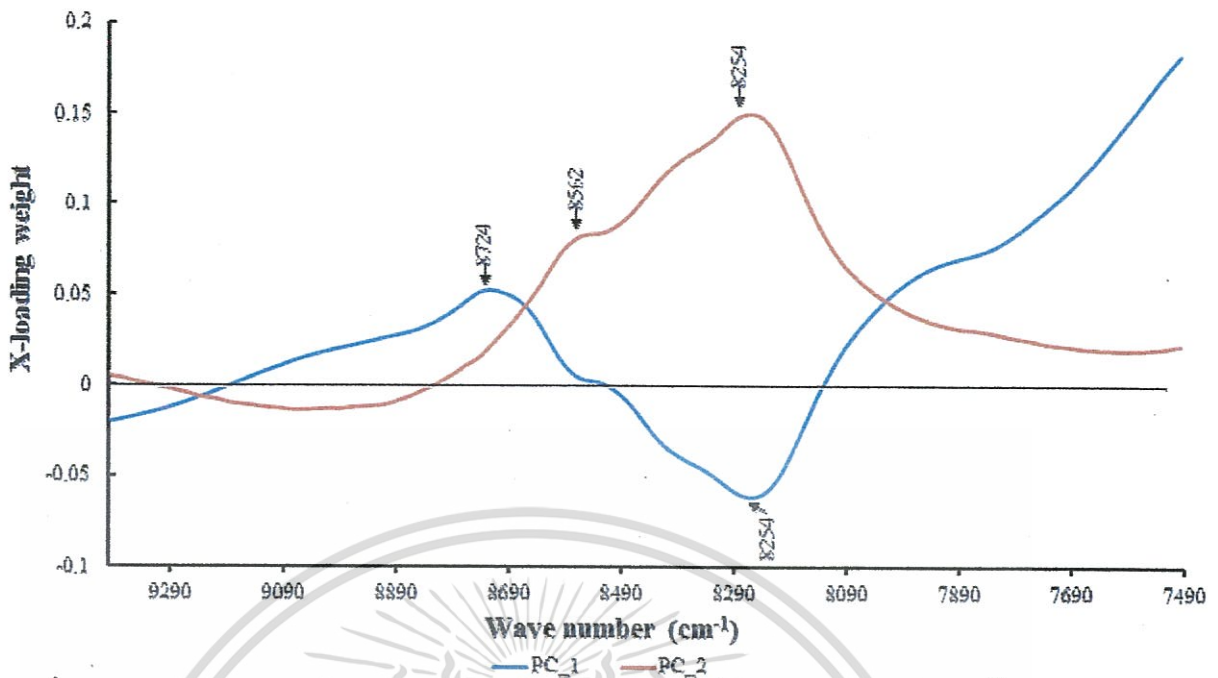
Rank: 2  $R^2 = 75.41$  RMSECV = 11.3 Bias: -0.0191 RPD: 2.02  
 Validation No 22 New  $q^2$

รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์  
 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน



รูปที่ 4.19 Regression coefficient ของสมการความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 °C ของน้ำ  
 ในเมล็ดสบู่ดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 X-loading weight ของสมการความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 100 °C ของเนื้อในเมล็ดสับดำ

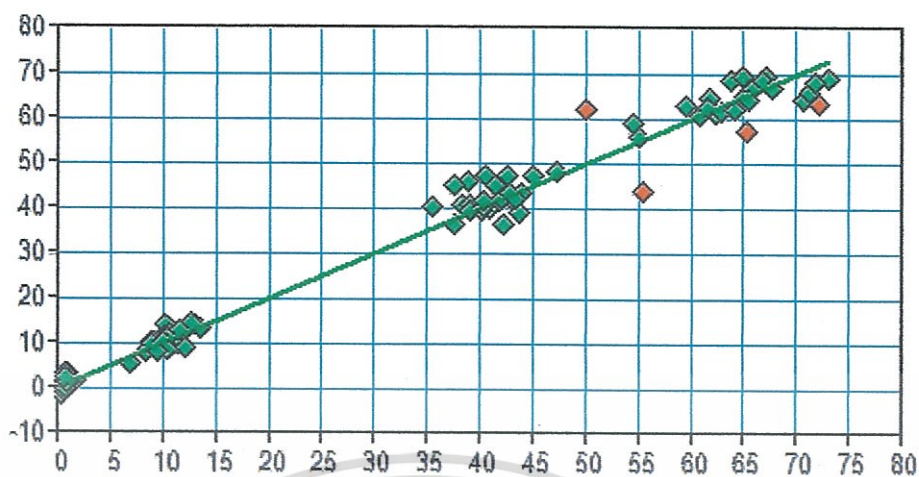
#### 4.4.2 ผลการสร้างสมการทำนายค่าความชื้น

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.21 ผลการทำนายความชื้น เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้โดยวิธีมาตรฐานโดยมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ First derivative + MSC มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 98.46, ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (root mean squared error of cross validation; RMSECV) เท่ากับ 3.16, bias เท่ากับ -0.000436, RPD เท่ากับ 8.05

จากรูปที่ 4.22 Regression coefficient plot ของค่าความชื้นพบพิกที่มีความสำคัญต่อสมการที่ wave number เท่ากับ 8794 8624 8154 7914 7583 4566 4458 4381 4289  $\text{cm}^{-1}$  (1137 1160 1226 1264 1319 2190 2243 2283 2332 nm)

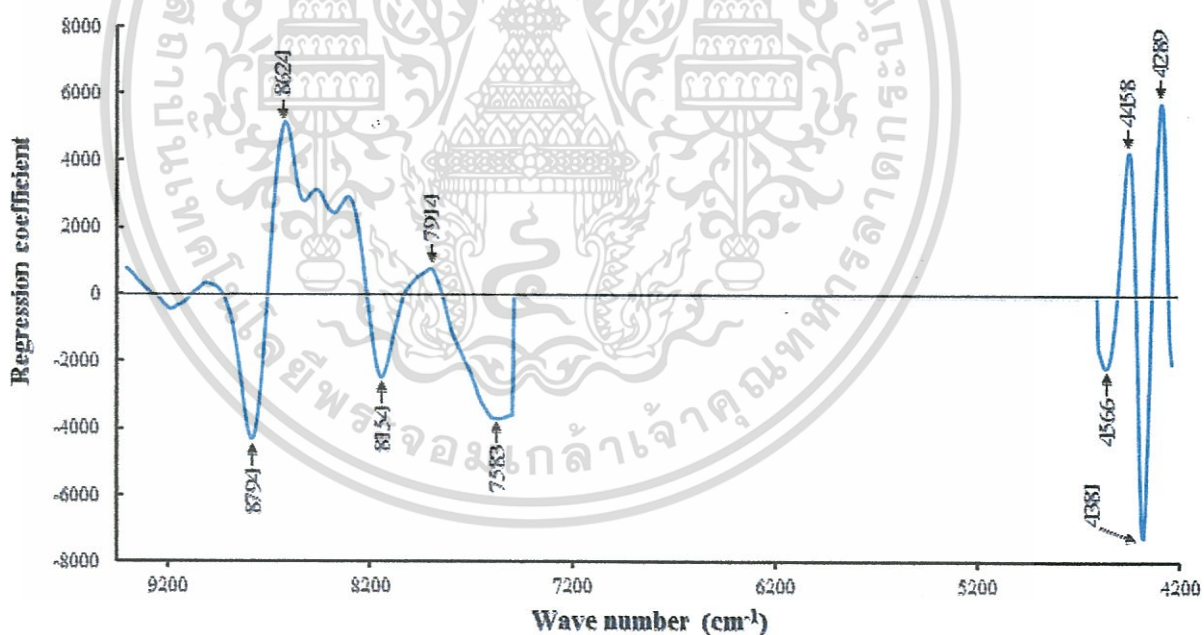
รูปที่ 4.23 แสดงค่า X-loading weight ของความชื้นของเนื้อในเมล็ดสับดำ ซึ่งมี 2 factor (rank) ที่สำคัญสำหรับการทำนายผล สำหรับ factor 1 พบพิกที่มีความสำคัญต่อสมการสำหรับที่ wavenumber เท่ากับ 8786 8616 7536 4451  $\text{cm}^{-1}$  (1138 1161 1327 2247 nm) factor 2 ที่ wavenumber 8794 8632 4605 4458 4389 4289  $\text{cm}^{-1}$  (1137 1158 2172 2243 2278 2332 nm) ไม่พบพิกการดูดซับคลื่นน้ำ (970, 1450 และ 1940 nm) พิกที่ 2280 nm คือการดูดซับคลื่นของ  $\text{CH}_3$  (C-H stretch + C-H deformation) พิกที่ 2236 nm คือการดูดซับคลื่นของ cellulose (C-H stretch + C-H deformation) พิกที่ 2242 nm คือการดูดซับคลื่นของ amino acid (N-H stretch + C=O stretch) (Osborne and Fearn, 1986)

Prediction vs True / moisture [% wb.] / Cross Validation



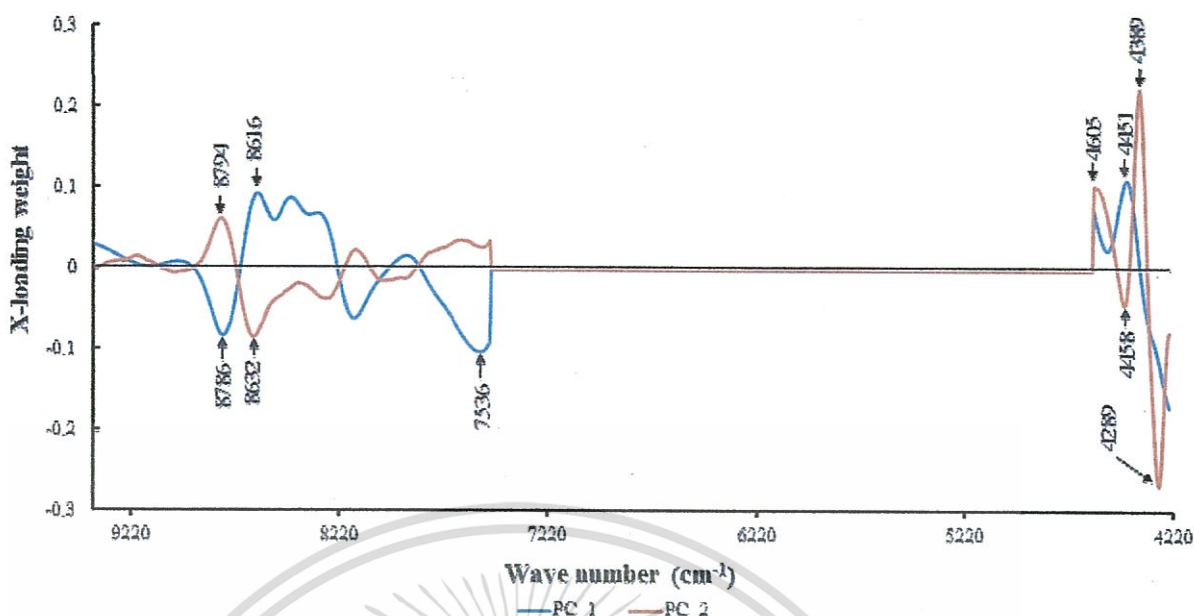
Rank: 2  $R^2 = 98.46$  RMSECV = 3.16 Bias: -0.000436 RPD: 8.05  
Validation No 2 New.c2

รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของเนื้อในเมล็ดสบูดำที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน



รูปที่ 4.22 Regression coefficient ของสมการความชื้นของเนื้อในเมล็ดสบูดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 X-loading weight ของสมการความชื้นของเนื้อในเมล็ดสบูดำ

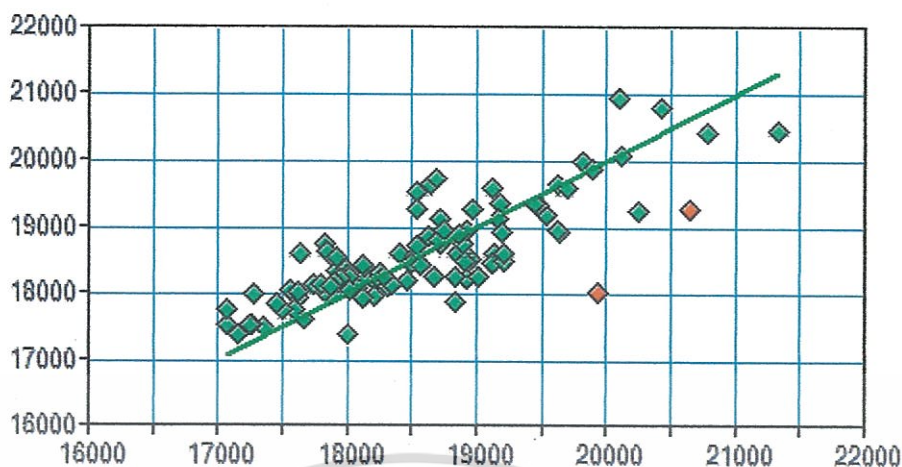
#### 4.4.3 ผลการสร้างสมการทำนายปริมาณน้ำมัน

สำหรับการใช้ NIR ในการทำนายปริมาณน้ำมันพบว่าขั้นแรกของการตรวจวัดโดยวิธีมาตรฐานพบว่าค่าปริมาณน้ำมันมีค่าไม่แตกต่างกันในทุกระยะการเก็บเกี่ยวดังนั้นค่าในการทำนายด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจึงไม่สามารถทำนายได้อย่างถูกต้อง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) ต่ำมากเท่ากับ 11.09 % ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์แบบไขว้ (root mean squared error of cross validation; RMSECV) เท่ากับ 3.89, bias เท่ากับ 0.0156%, RPD เท่ากับ 1.06

#### 4.4.4 ผลการทำนายค่าความร้อน

จากรูปที่ 4.24 ผลการทำนายค่าความร้อนเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้โดยวิธีมาตรฐานโดยมีการลดผลกระทบจากปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัมแบบ vector normalization (SNV) ค่าความร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 65.82, ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบประสิทธิภาพ (root mean squared error of cross validation; RMSECV) เท่ากับ 508, bias เท่ากับ -9.22, RPD เท่ากับ 1.71

Prediction vs True / heat value [J/g] / Cross Validation

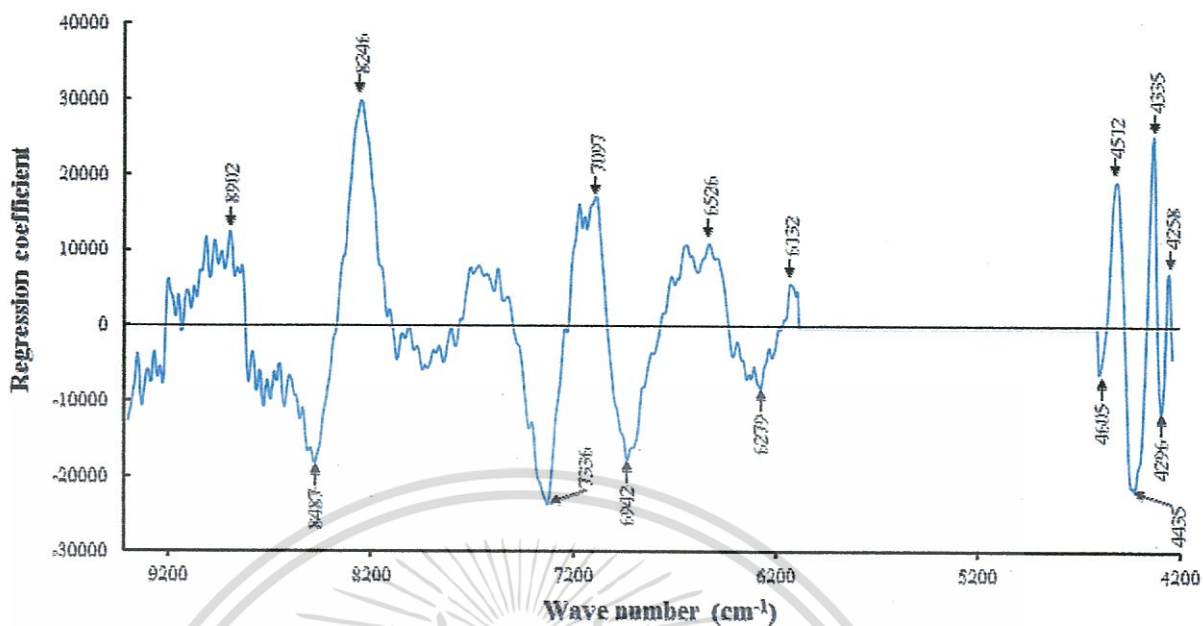


Rank: 7  $R^2 = 65.82$  RMSECV = 508 Bias: -9.22 RPD: 1.71  
Validation No 25 New.๑2

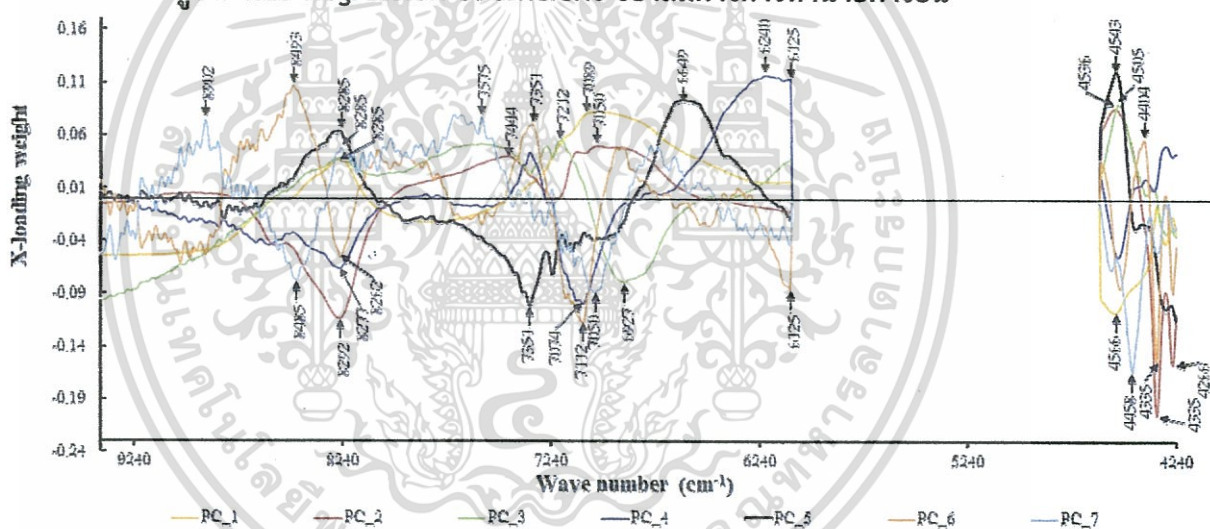
#### รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบค่าความร้อนของกากเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่ทำนายโดยวิธีเนียร์ อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน

จากรูปที่ 4.25 กราฟ Regression coefficient ของค่าความร้อนที่สเปกตรัม NIR ของสับดูดำมีความสำคัญที่ wave number เท่ากับ 8902 8487 8246 7336 7097 6942 6526 6279 6132 4605 4512 4435 4335 4296 4258  $\text{cm}^{-1}$  (1123 1178 1213 1363 1409 1441 1532 1593 1631 2172 2216 2255 2307 2328 2349 nm) พีคที่ 1215 nm คือการดูดซับคลื่นของ  $\text{CH}_2$  (C-H stretch second overtone) พีคที่ 1360 nm คือการดูดซับคลื่นของ  $\text{CH}_3$  ( $2\times\text{C-H}$  stretch + C-H deformation) พีคที่ 2310 nm คือการดูดซับคลื่นของ  $\text{CH}_2$  (C-H stretch + C-H deformation) พีคที่ 2252 nm คือการดูดซับคลื่นของ starch (O-H stretch + O-H deformation) (Osborne and Fearn, 1986)

รูปที่ 4.26 แสดงค่า X-loading weight ของความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดำ ซึ่งมี 7 factor (rank) ที่สำคัญสำหรับการทำนายผล สำหรับ factor 1 พบพีคซึ่งมีความสำคัญต่อสมการสำหรับที่ wavenumber เท่ากับ 8285 7089 4566  $\text{cm}^{-1}$  (1207 1411 2190 nm) factor 2 ที่ wavenumber 8292 7050 7444 4536 4335 4266  $\text{cm}^{-1}$  (1206 1418 1343 2205 2307 2344 nm) factor 3 ที่ wavenumber 8285 7212 6927 4505  $\text{cm}^{-1}$  (1207 1387 1444 2220 nm) factor 4 ที่ wavenumber 8277 7074 6240 6125  $\text{cm}^{-1}$  (1208 1414 1603 1633 nm) factor 5 ที่ wavenumber 8285 7351 6649 4543  $\text{cm}^{-1}$  (1207 1360 1504 2201 nm) factor 6 ที่ wavenumber 8493 7351 7112 6125 4404 4335  $\text{cm}^{-1}$  (1177 1360 1406 1633 2271 2307 nm) factor 7 ที่ wavenumber 8902 8485 8285 7575 7050 4458  $\text{cm}^{-1}$  (1123 1179 1207 1320 1418 2243 nm) พีคที่ 2310 nm คือการดูดซับคลื่นของ  $\text{CH}_2$  (C-H stretch + C-H deformation) พีคที่ 2242 nm คือการดูดซับคลื่นของ amino acid (N-H stretch + C=O stretch) พีคที่ 1207 เป็นการดูดซับคลื่นของ cellulose พีคที่ 2190 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ  $\text{HC}=\text{CH}$  ( $\text{CH}_2$  asymmetric stretch + C=stretch)



รูปที่ 4.25 Regression coefficient ของสมการการทำนายค่าร้อน



รูปที่ 4.26 X-loading weight plot ของสมการการทำนายค่าความร้อน

#### 4.5 ผลการทำนายสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมัน และค่าความร้อนของ สบู่ดำด้วยวิธี Partial Least Squares Regression ที่ตัดกลุ่มตัวอย่างแบบบอบแห้ง ออก

ค่าทางสถิติของความชื้น, ปริมาณน้ำมัน, ค่าความร้อนและสมบัติเชิงความร้อนของสบู่ดำที่ตัดกลุ่มตัวอย่างแบบบอบแห้งออกที่ใช้สร้างสมการทำนายโดยใช้วิธี Partial Least Squares Regression จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ แสดงดังตารางที่ 4.11 ซึ่งผลการสร้างสมการทำนายค่าความสัมพันธ์ มีรายละเอียดดังตารางที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าทางสถิติของความชื้น, ปริมาณน้ำมัน, ค่าความร้อนและสมบัติเชิงความร้อนของสบู่ออกที่ใช้สร้างสมการทำนายที่ตัดกลุ่มตัวอย่างแบบบอบแห้งออก

Parameter		N	Max	Min	Mean	SD
Thermal diffusivity ((m/s <sup>2</sup> ))		75	1.1550E-05	5.0257E-06	9.6050E-06	1.2294E-06
Thermal conductivity (w m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	40 °C	75	0.19911	0.04849	0.09314	0.03582
	100 °C	75	0.46217	0.06649	0.19505	0.11463
Specific heat (kJ kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	40 °C	75	41.34448	11.51679	21.11015	7.17614
	100 °C	75	99.51766	14.95814	43.61020	23.27499
Moisture (% wb.)		75	73.0611	6.9044	38.7762	22.58531
Oil content (%)		75	55.5379	33.9842	43.4238	4.15777
Heat value (J/g)		75	21334.0	17066.0	18765.7	907.2

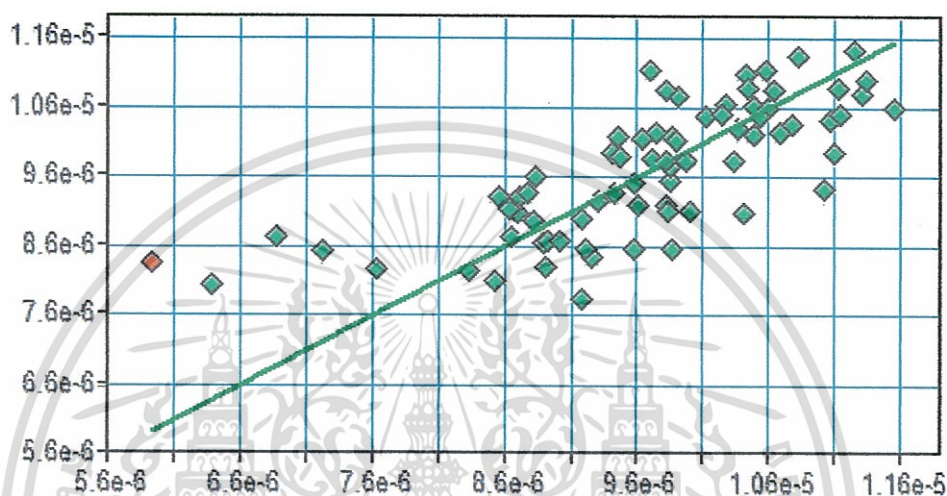
ตารางที่ 4.12 ผลการสร้างสมการและการทำนายสมบัติต่างๆของสบู่ออกที่ใช้สร้างสมการทำนายที่ตัดกลุ่มตัวอย่างแบบบอบแห้งออกโดยวิธี Partial Least Squares Regression

Parameter		wave number range	Pre-processing	Rank	R <sup>2</sup>	RMSECV	RP D	Bias
Thermal diffusivity ((m/s <sup>2</sup> ))		9403.8 - 7498.3	Min - max normalization	6	55.02	9.11E-007	1.49	-4.17E-00
Thermal conductivity (w m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	40 °C	4605.4 - 4420.3	First derivative + vector normalization (SNV)	4	64.74	0.0234	1.68	1.27E-00
	100 °C	9403.8 - 7498.3	Min - max normalization	2	74.82	0.0571	1.99	-4.38E-00
Specific heat (kJ kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	40 °C	9403.8 - 7421.2 4605.4-4242.9	Straight line subtraction	9	52.33	4.92	1.45	-0.083
	100 °C	9403.8 - 7498.3	Min - max normalization	2	67.18	14.9	1.75	-0.0193
Moisture (% wb.)		9403.8 - 5446.3 4605.4 - 4242.9	Straight line subtraction	6	97.23	3.37	6.01	0.00346
Oil content (%)		9403.8-7498.3 5454-4597.7	Vector normalization (SNV)	8	19.61	3.7	1.12	0.0773
Heat value (J/g)		9403.8 - 7498.3 4428 - 4242.9	Multiplicative scattering correction	3	66.79	519	1.74	-1.36

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32, 4.33 แสดงผลการทำนายค่าสมบัติของสบู่ดำที่ตัดตัวอย่างแบบอบแห้งออกแล้วทำการสร้างสมการขึ้นใหม่เพื่อทำนายค่าพบว่าการทำนายค่าความชื้น การนำความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C และความร้อนจำเพาะที่ 100 °C ผลการทำนายที่ได้ผลไม่ดีขึ้น ส่วนค่าค่าการแพร่ความร้อน ความร้อนจำเพาะที่ 40 °C และค่าพลังงานมีผลการทำนายที่ดีขึ้นแต่ไม่มาก (จากเดิม  $R^2$  เท่ากับ 53.40 เพิ่มเป็น 55.02, จากเดิม 51.75 เพิ่มเป็น 52.33, จากเดิม 65.82 เพิ่มเป็น 66.79 ตามลำดับ)

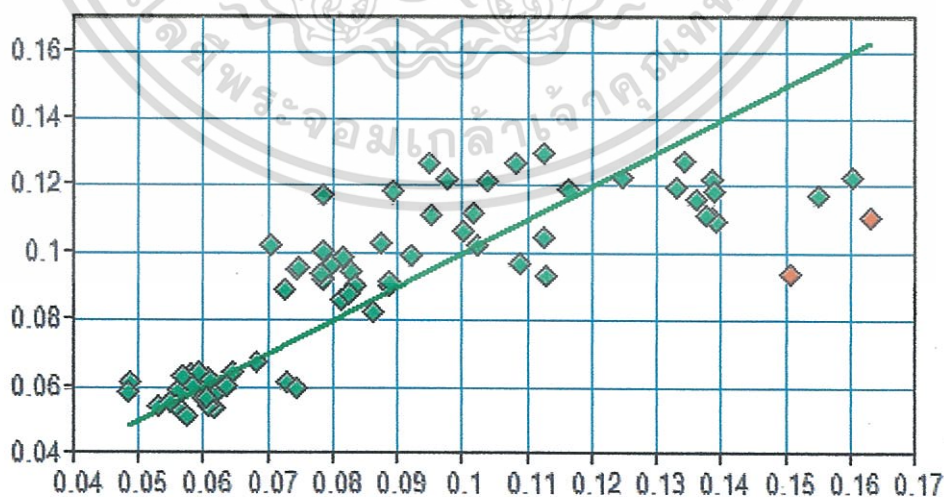
Prediction vs True / diffuse [( m/s<sup>2</sup>)] / Cross Validation



Rank: 7  $R^2 = 55.02$  RMSECV = 7.42E-007 Bias: -4.17E-009 RPD: 1.49

รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบค่าการแพร่ความร้อนที่ตัดตัวอย่างแบบอบแห้งออกที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน

Prediction vs True / conduct 40 [( w m<sup>-1</sup>c<sup>-1</sup>)] / Cross Validation

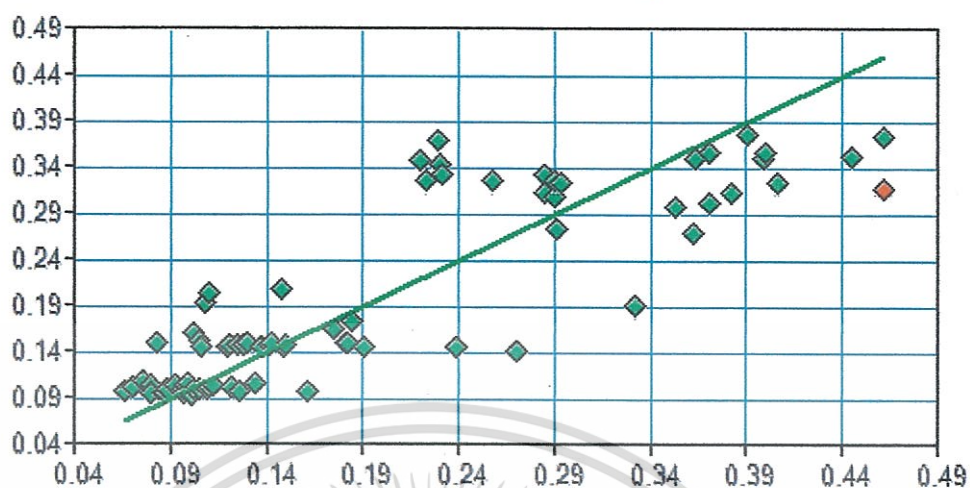


Rank: 1  $R^2 = 64.74$  RMSECV = 0.0182 Bias: 1.27E-005 RPD: 1.68  
Validation No 9 New.q2

รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนที่ตัวอย่างแบบอบแห้งออกที่อุณหภูมิ 40 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

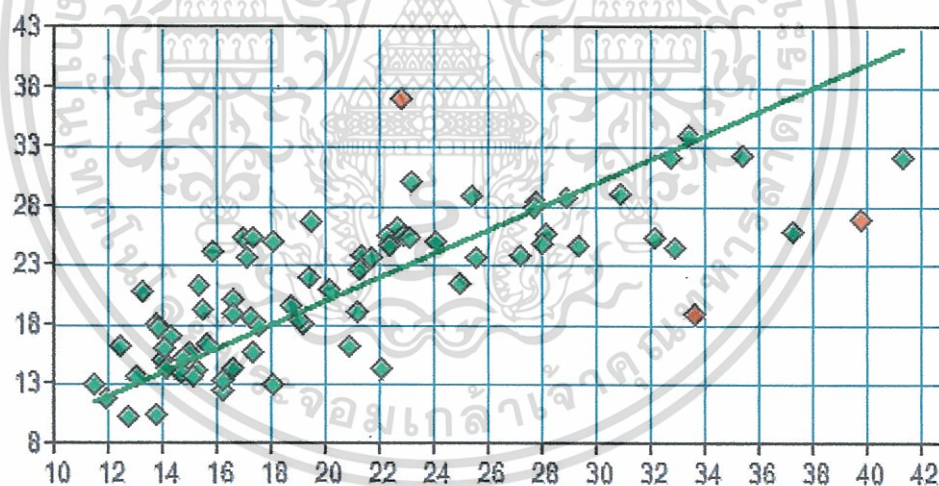
Prediction vs True / conduct 100 [(k, w m-1c?-1)] / Cross Validation



Rank: 2  $R^2 = 74.82$  RMSECV = 0.0571 Bias:  $-4.38E-005$  RPD: 1.99  
Validation No 10 New.q2

รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนที่ตัวอย่างแบบบอแห้งออกที่อุณหภูมิ 100 °C ที่  
ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน

Prediction vs True / specific heat 40 [(Cp, KJ Kg-1 C?-1)] / Cross

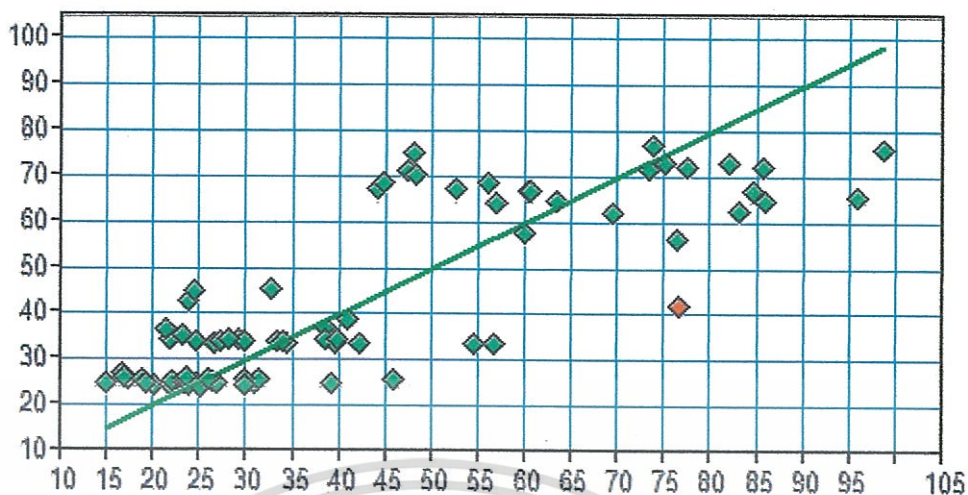


Rank: 9  $R^2 = 52.33$  RMSECV = 4.92 Bias:  $-0.083$  RPD: 1.45  
Validation No 11 New.q2

รูปที่ 4.30 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะที่ตัวอย่างแบบบอแห้งออกที่อุณหภูมิ 40 °C ที่  
ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

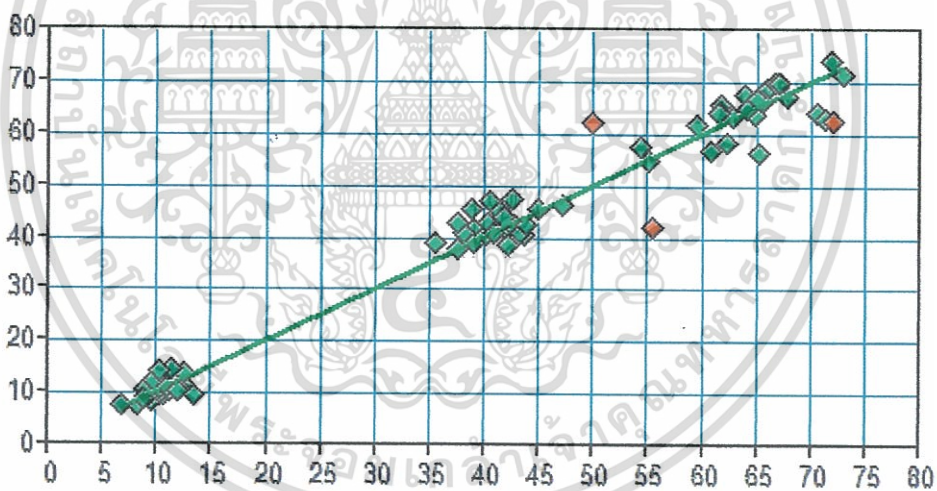
Prediction vs True / specific heat 100 [(Cp, KJ Kg-1 C?-1)] / Cross



Rank: 2  $R^2 = 67.18$  RMSECV = 12.8 Bias: -0.0193 RPD: 1.75  
Validation No 13 New.  $\sigma^2$

รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะที่ตัวอย่างแบบอบแห้งออกที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน

Prediction vs True / moisture [% wb] / Cross Validation

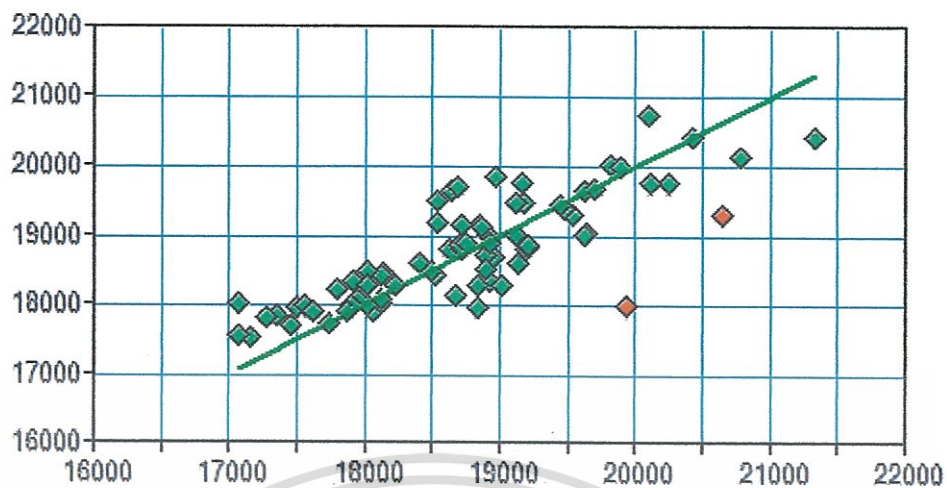


Rank: 6  $R^2 = 97.23$  RMSECV = 3.73 Bias: 0.00346 RPD: 6.01  
Validation No 4 New.  $\sigma^2$

รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของเนื้อในเมล็ดสบูดำที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Prediction vs True / heat value [J/g] / Cross Validation



Rank: 3  $R^2 = 66.79$  RMSECV = 519 Bias: -1.36 RPD: 1.74  
 Validation No 1 New.c2

รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบค่าความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูคำที่ทำนายโดยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีกับค่าวัดจากวิธีมาตรฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการศึกษา

### 5.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงความร้อน

สรุปผลการทดลองค่าการนำความร้อน, การแพร่ความร้อนและความร้อนจำเพาะที่สองระยะการเก็บเกี่ยว คือ ผลเหลืองและผลดำ การนำความร้อนและการแพร่ความร้อนโดยใช้ความแตกต่างของอนุภาคเมล็ดสามรูปแบบคือ ทั้งเมล็ด, ¼ เมล็ดและแบบผง สำหรับการนำความร้อนและการแพร่ความร้อน ในขณะที่สำหรับความร้อนจำเพาะใช้ความแตกต่างของอนุภาคเมล็ดสองรูปแบบคือ แบบชิ้นเล็กและแบบผง สรุปได้ดังนี้

5.1.1 การแพร่ความร้อนแบบทั้งเมล็ด, ¼ เมล็ดและแบบผงที่ระยะผลสีเหลืองและสีดำถูกพบว่ามีค่าลดลงเมื่อขนาดอนุภาคลดลงและผลสีเหลืองมีค่าการแพร่ความร้อนมากกว่าผลสีดำในทุกแบบเมล็ด

5.1.2 การนำความร้อนของสองระยะเก็บเกี่ยวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและเนื้อในเมล็ดจากผลสีเหลืองมีค่าการนำความร้อนมากกว่าผลสีดำและแบบทั้งเมล็ดมีค่าการนำความร้อนสูงสุดและ ¼ เมล็ดและแบบผงมีค่าลดลงตามลำดับ

5.1.3 ความร้อนจำเพาะของเนื้อในเมล็ดสับดูดำทั้งสองระยะการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 25-100 °C เนื้อในเมล็ดจากผลสีเหลืองมีความร้อนจำเพาะมากกว่าผลสีดำและรูปแบบผงมีความจำเพาะมากกว่าแบบชิ้นเล็ก

5.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการนำความร้อนและความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิเป็นแบบเส้นตรง

### 5.2 ผลการศึกษาการพัฒนาเทคนิคการวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมัน และค่าความร้อนของชีวมวลโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี: กรณีศึกษา เนื้อในเมล็ดสับดูดำ

ในการทดลองใช้เนื้อในเมล็ดสับดูดำทั้งหมด 3 ระยะการเก็บเกี่ยวคือ ผลสีเขียว ผลสีเหลืองและผลสีดำ และแบบอบแห้ง จำนวน 100 ตัวอย่างแบ่งเป็น ผลสีเขียว 25 ตัวอย่าง ผลสีเหลือง 25 ตัวอย่าง ผลสีดำ 25 ตัวอย่าง และแบบอบแห้ง 25 ตัวอย่างโดยใช้การสแกนการดูดซับคลื่นเนียร์อินฟราเรดด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany) แล้ววัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันของเนื้อในเมล็ดสับดูดำด้วยวิธีมาตรฐาน ส่วนค่าความร้อนใช้ตัวอย่างที่เป็นกากเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่เหลือจากการสกัดน้ำมันโดยสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany) แล้ววัดค่าความร้อนด้วยวิธีมาตรฐาน จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง (Optical data) กับสมบัติต่างๆที่วัดด้วยวิธีมาตรฐานเพื่อสร้างสมการในการทำนายสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมัน และค่าความร้อนโดยสรุปได้ดังนี้

### 5.2.1 สรุปผลการวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม

จากการสังเกตสเปกตรัมดั้งเดิม (raw spectrum) ที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของเนื้อในเมล็ดสับดูดำในช่วงจำนวนคลื่น  $12500-4000 \text{ cm}^{-1}$  ความยาวคลื่น  $800-2500 \text{ nm}$  ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany) พบว่า สเปกตรัมดั้งเดิมพบว่าการดูดซับคลื่นของเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่ระยะผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้งเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดียวกันที่ 977 1455 และ 1938 nm ซึ่งเป็นแถบการดูดซับคลื่นของน้ำ และที่ 1213 nm ซึ่งเป็นแถบการดูดซับคลื่นของน้ำมัน

สำหรับสเปกตรัมดั้งเดิม (raw spectrum) ของกากเนื้อในเมล็ดสับดูดำที่ระยะผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้งเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดียวกันที่ 1194 1455 และ 1938 nm ซึ่งที่ 1194 nm เป็นการดูดซับคลื่นของ glucose และ sucrose และพีคที่ 1450 และ 1940 nm เป็นการดูดซับคลื่นของน้ำ

### 5.2.2 สรุปผลการสร้างสมการทำนายสมบัติของสับดูดำด้วยวิธี Partial Least Squares Regression

#### 5.2.2.1 สรุปผลการสร้างสมการทำนายสมบัติเชิงความร้อน

ในการทำนายสมบัติเชิงความร้อนของเนื้อในเมล็ดสับดูดำได้แก่ การแพร่ความร้อน การนำความร้อนที่อุณหภูมิ  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีพบว่าสมการมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 53.4 76.66 82.77 51.75 และ 75.41 ตามลำดับ และค่า RPD เท่ากับ 1.47 2.07 2.41 1.44 และ 2.02 ตามลำดับ จาก Williams (2007) ค่า  $R^2$  ช่วง 50-64% ใช้ได้สำหรับการแบ่งกลุ่มอย่างหยาบ 66-81% ใช้ได้สำหรับการแบ่งกลุ่มและการประมาณค่า 82-90% ใช้ได้กับการประยุกต์ใช้เกือบทั้งหมดรวมทั้งในงานวิจัยค่า RPD ช่วง 0.0-1.9 ไม่แนะนำให้ใช้ 2.0-2.4 ใช้ได้กับการแบ่งกลุ่มอย่างหยาบ ดังนั้นจะเห็นว่าผลการทำนายค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ทำนายได้ค่าที่ดีที่สุดและในการทำนายค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิ  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และความร้อนจำเพาะที่  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ผลการทำนายที่สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าได้

สำหรับผลการทำนายค่าการแพร่ความร้อนและความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ได้ผลที่ไม่สามารถนำไปใช้ได้ แต่อย่างไรก็ตามการประเมินค่าดังกล่าวมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (bias) ที่น้อยคิดเป็น 0.24 และ 0.06 % ของค่าเฉลี่ยตามลำดับ ดังนั้นจึงอาจสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหาคายอมรับความผิดพลาดนี้ แทนที่จะต้องใช้วิธีดั้งเดิมซึ่งใช้เวลานานมาก (เวลาในการเตรียมตัวอย่างประมาณ 30 นาทีต่อหนึ่งตัวอย่าง เวลาในการวัด 30 นาทีต่อหนึ่งตัวอย่าง) หากใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีใช้เวลาเพียง 2 นาที

#### 5.2.2.2 สรุปผลการสร้างสมการทำนายค่าความชื้น

ในการทำนายค่าความชื้นของเนื้อในเมล็ดสับดูดำโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีพบว่าได้ผลการทำนายที่ดีที่สุด โดยค่าสมการมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 98.46, RPD เท่ากับ 8.05 จาก Williams (2007) ค่า  $R^2$  และค่า RPD ตั้งแต่ 98 และ 4.1 ขึ้นไป ตามลำดับ ใช้ได้ผลดีเยี่ยมทุกการประยุกต์ใช้งาน

### 5.2.2.3 สรุปผลการสร้างสมการทำนายปริมาณน้ำมัน

สมการการทำนายปริมาณน้ำมันของเนื้อในเมล็ดสับดูดาโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีไม่สามารถใช้ทำนายค่าได้อย่างถูกต้อง

### 5.2.2.4 สรุปผลการสร้างสมการทำนายค่าความร้อน

ในการทำนายค่าความร้อนของกากเนื้อในเมล็ดสับดูดาโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีพบว่าสมการมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 65.82 และค่า RPD เท่ากับ 1.71 ซึ่งค่า  $R^2$  (Williams, 2007) ช่วง 50-64 % ใช้ได้สำหรับการแบ่งกลุ่มอย่างหยาบ 66-81 % ใช้ได้สำหรับการแบ่งกลุ่มและการประมาณค่า สำหรับ RPD ช่วง 0.0-1.9 ไม่แนะนำให้ใช้ อย่างไรก็ตามในการประยุกต์ใช้งานใช้งานดังกล่าวหากมีการยอมรับค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (bias) ซึ่งมีค่าน้อยคิดเป็น 0.05 % ของค่าเฉลี่ย ดังนั้นค่าอาจสามารถนำไปใช้งานได้ แทนที่จะต้องใช้วิธีดั้งเดิมซึ่งใช้เวลานานมาก (เวลาในการเตรียมตัวอย่างประมาณ 30 นาทีต่อหนึ่งตัวอย่าง เวลาในการวัด 17 นาทีต่อหนึ่งตัวอย่าง) หากใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีใช้เวลาเพียง 2 นาที

## 5.3 สรุปผลการสร้างสมการทำนายสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมัน ค่าความร้อนและของเนื้อในเมล็ดสับดูดาที่ใช้สร้างสมการทำนายที่ตัดกลุ่มตัวอย่างแบบอบแห้งออก

สรุปผลการทำนายค่าสมบัติของสับดูดาที่ตัดตัวอย่างแบบอบแห้งออก แล้วทำการสร้างสมการขึ้นใหม่เพื่อทำนายค่า พบว่าในการใช้ช่วงตัวอย่างที่ขอบเขตกว้าง (ผลสีเขียว ผลสีเหลือง ผลสีดำและแบบอบแห้ง) สามารถสร้างสมการทำนายค่าสมบัติส่วนใหญ่ได้ดีกว่า เช่น ความชื้น การนำความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C และ 100 °C และความร้อนจำเพาะที่ 100 °C ได้ผลดีกว่าและในการทำนายค่าการแพร่ความร้อน ความร้อนจำเพาะที่ 40 °C และค่าความร้อนใช้ช่วงตัวอย่างแคบกว่าสามารถทำได้ผลที่ดีกว่าแต่ไม่มาก แสดงให้เห็นว่าในการสร้างสมการทำนายโดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีหากมีช่วงตัวอย่างที่กว้างในการสร้างสมการ ผลการทำนายยังมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

## 5.4 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในการทดลองนี้ต้องใช้เวลารอเครื่องมือวัด (bomb calorimeter) เป็นเวลานาน ทำให้มีเวลาทดลองน้อยโดยมีตัวอย่างเพียง 100 ตัวอย่าง ทำให้ต้องทำการพิสูจน์โดยวิธี full cross validation ซึ่งโดยหลักการเป็นที่ยอมรับได้ หากการทดลองมีตัวอย่างที่มากกว่านี้ (อย่างน้อย 200 ตัวอย่าง) อาจแบ่งตัวอย่างออกเป็น calibration set และ validation set ซึ่งผลการทำนายอาจได้ผลที่น่าเชื่อถือกว่านี้

## เอกสารอ้างอิง

Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., & Hassan-Beygi, S. R. "Specific heat and thermal conductivity of berberis fruit (*Berberis vulgaris*)." *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 3. 2008. Pp. 330-336

Al-Mahasneh, M. A., Ababneh, H. A., & Rababah, T. "Some engineering and thermal properties of black cumin (*Nigella sativa* L.) seeds." *International Journal of Food Science and Technology*, 43. 2008. Pp. 1047-1052

Aremu, A. K., & Fadele, O. K. "Moisture dependent thermal properties of doum palm fruit." *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, 1. 2010. Pp. 199-204

Aviara, N. A., & Haque, M. A. "Moisture dependence of thermal properties of sheanut kernel." *Journal Food Engineering*, 47. 2001. Pp. 109-113

Aviara, N. A., Ehiabhi, S. E., Ajibola, O. O., Oni, S. A., Power, P. P., Abbas, T., et al. "Effects of moisture content and temperature on the specific heat of soya bean, *Moringa oleifera* seed and *Mucuna flagellipes* nut." *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 4. 2011. Pp. 87-92

Aviara, N. A., Haque, M. A., & Ogunjimi, L. A. O. "Thermal properties of guna seed." *International Agrophysics*, 22. 2008. Pp. 291-297

Bai'ri, A., Laraqj, N. "Diagrams for fast transient conduction in sphere and long cylinder subject to sudden and violent thermal effect on its surface." *Applied Thermal engineering*, 23(11). 2003. Pp. 1373-1390

Bai'ri, A., Laraqj, N., & García de María, J. M. "Determination of thermal diffusivity of foods using 1D Fourier cylindrical solution." *Journal of Food Engineering*, 78. 2007. Pp. 669-675

Bamgboye, A. I., & Adejumo, O. I. "Thermal properties of roselle seeds." *International Agrophysics*, 24. 2010. Pp. 85-87

Bitra, V. S. P., Banu, S., Ramakrishna, P., Narender, G., & Womac, A.R. "Moisture dependent thermal properties of peanut pods, kernels, and shells." *Biosystems Engineering*, 106. 2010. Pp. 503-512

Cao, Y., Li, G., Zhang, Z., Chen, L., Li, Y., & Zhang, T. "The specific heat of wheat. 10th International working conference on stored product protection." Julius Ku'hn-Archiv, 425. 2010. Pp. 243-249

Chen, C-R., Cheng, Y-J., Ching, Y-C., Hsiang, D. and Chang, C-M. J. "Green production of energetic *Jatropha* oil from de-shelled *Jatropha curcas* L. seeds using supercritical carbon dioxide extraction." The Journal of Supercritical Fluids. 2012.

Chueamchaitrakun, P., Chompreeda, P., Haruthaithanasan, V., Suwonsichon, T. and Kasemsamran, S. "Prediction of Pasting and Thermal Properties of Mixed Hom-Mali and Glutinous Rice Flours Using Near Infrared Spectroscopy." Kasetsart J. (Nat. Sci.), 45. 2011. Pp. 481 - 489

Dickerson, R. W. "An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods." Food Technology, 19. 1965. Pp. 198-204

Elfadl, E. et. al. "Development of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) calibration model for estimation of oil content in a worldwide safflower germplasm collection." International Journal of Plant Production, 4(4). 2010. pp. 259-270

Fassio, A and Cozzolino, D. "Non-Destructive Prediction of Chemical Composition in Sunflower Seeds by Near Infrared Spectroscopy." Industrial Crops and Products, 20. 2004. Pp. 321-329

Fassio, A and Cozzolino, D. "Non-Destructive Prediction of Chemical Composition in Sunflower Seeds by Near Infrared Spectroscopy." Industrial Crops and Products. 20. 2004. Pp. 321-329

Food Network Solution. 2013a. Oleic acid. [Online].Available:

<http://www.foodnetworksolution.com/uploaded/OleicAcid.jpg>. Accessed online on April 26, 2013.

Food Network Solution. 2013b. Linoleic acid. [Online].Available:

<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1647/linoleic-acid-กรดลิโนเลอิก>. Accessed online on April 26, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Gaines, C.S. and W.R. Windham. "Effect of wheat moisture content on meal apparent particle size and hardness scores determined by near-infrared reflectance spectroscopy." *Cereal Chem.* 75(3). 1998. Pp. 386–391
- Govindarajan, K. N., Kandala, C. V. K. and Subbiah, J. "NIR Reflectance Spectroscopy for Nondestructive Moisture Content Determination in Peanut Kernels." *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 52(5). 2009. Pp. 1661-1665
- Hacikuru, I., & Kocabiyik, H. "Thermal properties of coriander and anise seeds. *The Philippine Agricultural Scientist*, 91. 2008. Pp. 401-407
- Hobani, A. I. and Al-Askar, S. R. "Effective Thermal Properties of Dates". *Faculty of Food and Agriculture Sciences Research Center*, 90. 2000. Pp. 5-20
- Hobani, A. I., Tolba, M. H. "Bulk thermal conductivity and diffusivity of barley." *Research Bulletin*, 53. 1995. Pp. 5-17
- Hobani, A. I., & Al-Askar, S. R. "Effective thermal properties of dates." *Research Bulletin*, 92. 2000. pp. 5-20
- Huang, C., Han, L., Yang, Z. and Liu, X. "Prediction of heating value of straw by proximate data, and near Infrared Spectroscopy ." *Energy Conversion and Management*, 49 (12). 2008. Pp. 3433-3438
- Jasansky, A., & Bilanski, W. K. "Thermal conductivity of whole and ground soybeans." *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 16. 1973. Pp. 100-103
- Jiang, H. Y. "Analysis of protein, starch and oil content of single intact kernels by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) in maize (*Zea mays* L.)." *Journal compilation*, 126. 2007. Pp. 492-497
- Jingura, R. M. "Technical options for optimization of production of *Jatropha* as a biofuel feedstock in arid and semi-arid areas of Zimbabwe." *Biomass and Bioenergy*, 35(5). 2011. pp. 2127-2132
- Jörg-Peter Conzen. "Multivariate Calibration. A practical guide for developing methods in the quantitative analytical chemistry" *Bruker Optik GmbH*. 2006. Pp. 116

- Kaletunc, G. "Prediction of heat capacity of cereal flours: a quantitative empirical correlation." *Journal of Food Engineering*, 82. 2007. Pp. 589-594
- Kara, M. et. al. "Thermal conductivity of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seeds." *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(3). 2011. Pp. 687-692
- Kartika, I. A., Yuliani, S., Kailaku, S.I. and Rigal, L. "Moisture sorption behaviour of *Jatropha* seed (*Jatropha curcas*) as a source of vegetable oil for biodiesel production." *Biomass and Bioenergy*, 36. 2012. Pp. 226-233
- Kim, Y. S., Flores, R. A., Chung, O. K., & Bechtel, D. B. "Physical, chemical, and thermal characterization of wheat flour milling coproducts." *Journal of Food Process Engineering*, 26. 2003. Pp. 469-488
- Kocabiyik, H. et. al. "Effect of moisture content on thermal properties of pumpkin seed." *Journal International of Food Properties*, 12(2). 2009. Pp. 227-285
- Kouchakzadeh, A., & Tavakoli, T. "The effect of moisture and temperature on thermophysical properties of Iranian pistachios." *World Applied Sciences Journal*, 7. 2009. Pp. 1552-1558
- Kumar, A. and Sharma, S. "An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.)." *Industrial Crops and Products*, 28(1). 2008. Pp. 1-10
- Kurozawa, L. E., Park, K. J., & Azoubel, P. M. "Thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya* L.) and cashew apple (*Anacardium occidentale* L.)." *Journal of Food Technology*, 11. 2008. Pp. 78-85
- Kwan, S. K. et al. "Use of Near-Infrared Spectroscopy for Estimating Fatty Acid Composition in Intact Seeds of Rapeseed." *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 10. 2007. Pp. 15-20
- Ladawan Na Ayudhaya, N. and Garivait, S. "Potential of *Jatropha Curcas* Derived Biodiesel for Rice Farmers in Thailand." *Energy Procedia*, 9. 2011. Pp. 252-263
- Laohasongkram, K., Chaiwanichsiri, S., Thunpithayakul, C., & Ruedeesarnt, W. "Thermal properties of mangoes." *Journal of the Science Society of Thailand*, 21. 1995. Pp. 63-74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Leonardo, V. et. al. "Estimation of seed weight, oil content and fatty acid composition in intact single seeds of rapeseed ( *Brassica napus* } L.) by near-infrared reflectance spectroscopy ." *BIOMEDICAL AND LIFE SCIENCES*, 106(1). 2006. Pp. 79-85
- Liu,X., Ye,M., Pu, B. and Tang, Z. "Risk management for *Jatropha curcas* based biodiesel industry of Panzhihua Prefecture in Southwest China." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3). 2012. Pp. 1721-1734
- Lu, G-q., Huang, H-h. and Zhang, D-p . "Application of near-infrared spectroscopy to predict sweetpotato starch thermal properties and noodle quality." *Journal of Zhejiang University Science*, 7(6). 2011. Pp. 475-481
- Meghwal, M., & Goswami, T. K. "Thermal properties of black pepper and its volatile oil." *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*. ISSN: 0976-2612, 2. ISSN: 0976-2612, 2011. pp. 334-344
- Mohsenin, N N. "Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials." Gordon and Breach. 1980. Pp. 83-121
- Mortaza A. et. al. "Specific Heat and Thermal Conductivity of Berberis Fruit (*Berberis vulgaris*)". *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. 3 (1). 2008. Pp. 330-336
- Norris, K.H. and P.C. Williams. "Optimization of mathematical treatment of raw near-infrared signal in the measurement of protein in hard red spring wheat I." *Influence of particle size. Cereal Chem*, 61. 1984. Pp. 158 - 165
- Osborne, B.G and Fearn, T. *Near Infrared Spectroscopy in Food Analysis*, Longman Scientific & Technical, New York, USA. 1986. Pp. 200
- Pandey, V. C., Singh, K., Singh, J. S., Kumar, A., Singh, B. and Singh, R. P. "*Jatropha curcas*: A potential biofuel plant for sustainable environmental development." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5). 2012. Pp. 2870-2883
- Pérez-Vich, B. et. al. "Determination of Seed Oil Content and Fatty Acid Composition in Sunflower Through the Analysis of Intact seeds, Meal and Oil by Near-Infrared Reflectance Spectroscopy ." *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 75(5). 1998. Pp. 547-555

- Rudolphi, S., von Witzke-Ehbrecht, S., and Becker, H.C. "Development of Near-Infrared Reflectance Spectroscopy to Estimate Oil Content in Safflower." Vith International Safflower Conference. 2006. Pp. 344-347
- Sharon L.M. Preece a, Brent W. Auvermann, James C. MacDonald and Cristine L.S. Morgan. "Predicting the heating value of solid manure with visible and near-infrared spectroscopy". Fuel. 2012. Pp. 1-5
- Singh, K. K., & Goswami, T. K. "Thermal properties of cumin seed". Journal of Food Engineering, 45. 2000. Pp. 181-187
- Singh, K. K., Mohammad, S., & Kotwaliwale, N. "Moisture dependent physical and thermal properties of chickpea". Journal of Food Science Technology-Mysore, 45. 2008. Pp. 259-262
- Sirisomboon, P. and Kitchaiya, P. "Physical properties of *Jatropha curcas* L. kernels after heat treatments." Biosystems Engineering, 102 (2). 2009. Pp. 244-250
- Sirisomboon, P. and Posom, J. "Thermal properties of *Jatropha curcas* L. kernels a." Biosystems Engineering. 2012. pp. 402-409
- Subramanian, S., & Viswanathan, V. "Thermal properties of minor millet grains and flours". Biosystems Engineering, 84. 2003. Pp. 289-296
- Tabil, L. G., Eliason, M. V., & Qi, H. "Thermal properties of sugarbeet roots." Journal of Sugar Beet Research, 40. 2003. Pp. 209-228
- Timbers, G. E. "Properties of rapeseed: thermal conductivity and specific heat." Canadian Agricultural Engineering, 17. 1975. pp. 81-84
- Uengkimbuan, N. et. al. "Thermo-Physical Properties of Pepper (*Piper nigrum* L.)". Thai Journal of Agricultural Science. 42(1). 2011. Pp. 326-329
- Uengkimbuan, N., Nuthong, O., & Boonpain, P. "Thermophysical properties of pepper (*Piper nigrum* L.)". Agricultural Science Journal, 42. 2011. Pp. 326-329
- Vaknin, Y., Ghanim, M., Samra, S., Dvash, L., Hendelsman, E., Eisikowitch, D. and Samocha, Y. "Predicting *Jatropha curcas* seed-oil content, oil composition and protein content using

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

near-infrared spectroscopy—A quick and non-destructive method.” *Industrial Crops and Products*, 34(1). 2011. Pp. 1029-1034

Wan, P. J., & Zarins, Z. M. “Specific heats of cotton seed and its co-products.” *Journals of the American Oil Chemists’ Society*, 80. 2003. Pp. 123-126

Wikipedia, 2013a. *Jatropha curcas*. [Online].Available:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Jatropha\\_curcas](http://en.wikipedia.org/wiki/Jatropha_curcas). Accessed online on April 26, 2013.

Wikipedia, 2013b. *Oleic acid*. [Online].Available:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Oleic\\_acid](http://en.wikipedia.org/wiki/Oleic_acid). Accessed online on April 26, 2013.

Williams, P. 2007. “Near-infrared Technology-Getting the Best Out of Light.” PDK Grain, Nanaimo, British Columbia, and Winnipeg, Manitoba, Canada.

Yang, J., & Zhao, Y. Y. “Thermal properties of radish and alfalfa seeds.” *Journal of Food Process Engineering*, 24. 2001. Pp. 291-313

Yang, W., Siebenmorgen, T. J., Thielen, T. P. H., & Cnossen, A. G. “Effect of glass transition on thermal conductivity of rough rice”. *Biosystems Engineering*, 84. 2003. Pp. 193-200

Yang, W., Sokhansanj, S., Tang, J., & Winter, P. “Determination of thermal conductivity specific heat and thermal diffusivity of borage seeds”. *Biosystems Engineering*, 82. 2002. Pp. 169-176

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน รายงานพลังงานของประเทศไทย. 2552.  
[http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com\\_content&view=article&id=140:-2546-2551-&catid=58&Itemid=68](http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=140:-2546-2551-&catid=58&Itemid=68)

กรมวิชาการเกษตร. 2552. ความเป็นมาของสบู่ดำ. [Online].Available:  
<http://it.doa.go.th/vichakan/news.php?newsid=15>.

จากวิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2556. ความร้อนจำเพาะ. [Online].Available:  
<http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%A3%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%88%E0%B8%B3%E0%B9%80%E0%B8%9E%E0%B8%B2%E0%B8%B0>. เข้าถึงเมื่อ 26 พฤษภาคม 2556.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิรนาม. 2556a. บทที่ 2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย. [Online].Available: <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM334/CM334-2.pdf>. เข้าถึงเมื่อ 26 พฤษภาคม 2556.

นิรนาม. 2556b. การหาความชื้นของวัสดุเกษตรและอาหาร. [Online].Available: [http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning47/ea341/lesson3/ch03\\_1.pdf](http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning47/ea341/lesson3/ch03_1.pdf). เข้าถึงเมื่อ 26 พฤษภาคม 2556.

นิรนาม. 2556c. การส่งเสริมการใช้พลังงานชีวมวลของประเทศไทย. 2556. [Online].Available: <http://www.aepd.doae.go.th/?p=1370>. เข้าถึงเมื่อ 26 พฤษภาคม 2556.

นิรนาม. 2556d. การหาค่าพลังงานสะสมในอาหารและวิธีการใช้งานเครื่อง Bomb calorimeter. [Online].Available: [http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473\(51\)/FY473-13.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/f/FY473(51)/FY473-13.pdf). เข้าถึงเมื่อ 26 พฤษภาคม 2556.

ปานมนัส ศิริสมบุรณ์, รวิภัทร ลากเจริญสุข, กรรณพด แก้วสอน, พลนันท อ่อนไสว, บัณฑิต ทองสร้อย, นัฐกรณ์ สอนสงวน, สมชาย กลัดสุข, ศิวดล รัตน์โอภา, อภิชาติ สมผิว และกิงดาว ชนะโชติ .2556. “การคาลิเบรชันแบบตัวแปรพหุ แนวแนวเชิงปฏิบัติสำหรับการพัฒนาแบบจำลองในเคมีวิเคราะห์” <http://www.nirsresearch.com>.

ปานมนัส ศิริสมบุรณ์. 2556. เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตเกษตรและอาหาร. [Online].Available: [www.nirsresearch.com](http://www.nirsresearch.com).

พินิจ จันทร. 2549. พืชน้ำมัน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: นานา อินเทอร์เน็ตเดีย.

รณฤทธิ์ ฤทธิธิน และคณะ. “การประเมินปริมาณน้ำมันของผลปาล์มน้ำมันด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด (NIR).” วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 42(1). 2554. Pp. 71-74

อภิชาติ ศรีสะอาด. 2549. สบู่ดำปืมน้ำมันในชุมชน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: นานา อินเทอร์เน็ตเดีย.

อภิคุณธ์ แก้วกับทอง. “การตรวจสอบปริมาณเนื้อเยื่อของน้ำยางพาราสดและชั้นด้วยวิธีไม่ทำลายโดยเทคนิค Near-infrared spectroscopy.” หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต หลักสูตรวิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.



ภาคผนวก ก  
ผลการตรวจวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้น ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนของเนื้อ  
ในเมล็ดสบู่ดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ผลการตรวจวัดสมบัติเชิงความร้อน ความชื้นและปริมาณน้ำมัน

ตัวอย่าง	ระยะเก็บเกี่ยว	ความชื้น (%wb)	ปริมาณน้ำมัน (%)	การแพร่ความร้อน ( $\alpha, m/s^2$ )	การนำความร้อน ( $K, w m^{-1} c^{\circ 1}$ )		ความร้อนจำเพาะ ( $C_p, KJ Kg^{-1} C^{\circ 1}$ )	
					40°C	100°C	40°C	100°C
1	ผลสดำ	10.3098	47.3440	8.82154E-06	0.06042	0.07001	14.9724	17.3486
2	ผลสดำ	10.2386	39.8716	6.38615E-06	0.06461	0.13384	22.1184	45.8156
3	ผลสดำ	9.7022	46.4805	9.21187E-06	0.05919	0.12590	14.0454	29.8769
4	ผลสดำ	8.9856	48.9957	8.53231E-06	0.04849	0.09263	12.4237	23.7336
5	ผลสดำ	11.1462	47.2100	8.92555E-06	0.05669	0.12177	13.8851	29.8240
6	ผลสดำ	11.2975	42.4354	8.65648E-06	0.06084	0.10514	15.3638	26.5509
7	ผลสดำ	8.3323	49.8704	9.71708E-06	0.05313	0.06649	11.9534	14.9581
8	ผลสดำ	10.2946	45.5501	9.26311E-06	0.04880	0.08008	11.5168	18.8985
9	ผลสดำ	10.6622	55.5379	9.82021E-06	0.06178	0.07538	13.7519	16.7804
10	ผลสดำ	10.4044	50.8430	8.62957E-06	0.05798	0.09729	14.6880	24.6468
11	ผลสดำ	9.4796	52.9035	8.69262E-06	0.05573	0.08811	14.0160	22.1589
12	ผลสดำ	8.9538	45.0751	7.22876E-06	0.05498	0.10215	16.6280	30.8909
13	ผลสดำ	9.1591	48.7921	9.18140E-06	0.05583	0.09798	13.2938	23.3285
14	ผลสดำ	6.9044	46.5761	9.85507E-06	0.05740	0.08738	12.7323	19.3826
15	ผลสดำ	8.8750	44.7549	8.84027E-06	0.05792	0.10857	14.3238	26.8478
16	ผลสดำ	11.9341	45.2140	9.01248E-06	0.07449	0.16135	18.0691	39.1379
17	ผลสดำ	11.4680	41.6186	7.63994E-06	0.07297	0.11000	20.8796	31.4740
18	ผลสดำ	12.9404	49.4105	1.04094E-05	0.06221	0.08029	13.0648	16.8610
19	ผลสดำ	13.4987	35.9131	9.42029E-06	0.06113	0.11218	14.1855	26.0322
20	ผลสดำ	12.6143	38.0862	9.18140E-06	0.06828	0.09885	16.2569	23.5355
21	ผลสดำ	10.2929	40.9439	8.71081E-06	0.06086	0.08029	15.2738	20.1503
22	ผลสดำ	12.0910	42.1885	8.76583E-06	0.06062	0.10065	15.1184	25.1013
23	ผลสดำ	10.0585	38.7525	8.90645E-06	0.06000	0.09685	14.7258	23.7706
24	ผลสดำ	10.3437	40.3758	8.56742E-06	0.06372	0.08596	16.2579	21.9327
25	ผลสดำ	9.5421	38.7535	8.89694E-06	0.05601	0.09546	13.7630	23.4554
26	ผลสีเหลือง	43.7207	42.0673	1.00091E-05	0.15068	0.13712	32.9098	29.9482
27	ผลสีเหลือง	40.9557	45.8824	9.58289E-06	0.17436	0.23922	39.7758	54.5721
28	ผลสีเหลือง	40.1673	42.2186	5.02567E-06	0.08143	0.13041	35.4186	56.7254
29	ผลสีเหลือง	42.2731	36.4286	5.92707E-06	0.08882	0.26982	32.7599	99.5177
30	ผลสีเหลือง	38.2334	38.9794	9.58289E-06	0.08344	0.12841	19.0342	29.2930

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	ระยะเก็บเกี่ยว	ความชื้น (%wb)	ปริมาณน้ำมัน (%)	การแพร่ความร้อน ( $\alpha$ , $m^2/s^2$ )	การนำความร้อน ( $K$ , $w$ $m^{-1}c^{-1}$ )		ความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ , $KJ$ $Kg^{-1} C^{-1}$ )	
					40°C	100°C	40°C	100°C
31	ผลสีเหลือง	37.5769	41.6043	6.87658E-06	0.08870	0.12504	28.1982	39.7491
32	ผลสีเหลือง	39.0646	50.5075	9.60500E-06	0.07468	0.12022	16.9976	27.3613
33	ผลสีเหลือง	43.9289	42.3042	9.97309E-06	0.07249	0.18203	15.8887	39.8997
34	ผลสีเหลือง	39.1300	54.2267	1.10153E-05	0.08617	0.14229	17.1010	28.2380
35	ผลสีเหลือง	41.4557	45.2161	9.83180E-06	0.10028	0.18407	22.2972	40.9279
36	ผลสีเหลือง	40.3168	42.8443	8.33587E-06	0.08153	0.08315	21.3803	21.8065
37	ผลสีเหลือง	40.3443	34.4968	9.30451E-06	0.10881	0.14189	25.5656	33.3363
38	ผลสีเหลือง	41.9024	40.7838	9.86675E-06	0.10244	0.19115	22.6964	42.3507
39	แบบอบแห้ง	1.0785	34.7950	6.30874E-06	0.04617	0.05388	15.9968	18.6696
40	แบบอบแห้ง	1.1074	41.3923	8.73823E-06	0.04536	0.05553	11.3475	13.8921
41	แบบอบแห้ง	1.0093	33.6919	7.86358E-06	0.04508	0.06006	12.5310	16.6977
42	แบบอบแห้ง	1.0733	46.3254	8.20447E-06	0.04606	0.05638	12.2716	15.0213
43	แบบอบแห้ง	0.9352	37.8306	7.26027E-06	0.04328	0.05405	13.0307	16.2739
44	แบบอบแห้ง	0.8595	43.4530	8.21256E-06	0.04571	0.05499	12.1684	14.6383
45	แบบอบแห้ง	0.9382	44.7767	6.06963E-06	0.04462	0.05397	16.0708	19.4370
46	แบบอบแห้ง	0.9085	40.3547	7.83399E-06	0.04401	0.05769	12.2807	16.0992
47	แบบอบแห้ง	0.7688	39.5513	5.48948E-06	0.04467	0.05311	17.7899	21.1479
48	แบบอบแห้ง	0.2851	44.8272	8.38624E-06	0.04438	0.05502	11.5689	14.3429
49	แบบอบแห้ง	1.1286	45.3750	9.03203E-06	0.04484	0.05578	10.8520	13.5015
50	ผลสีเหลือง	42.6159	44.8960	9.86675E-06	0.07055	0.10797	15.6307	23.9218
51	ผลสีเหลือง	47.2288	43.1283	9.46311E-06	0.09212	0.33169	21.2806	76.6241
52	แบบอบแห้ง	0.9736	47.8114	9.36731E-06	0.04591	0.05518	10.7146	12.8764
53	แบบอบแห้ง	0.6637	50.2792	9.87845E-06	0.04597	0.05451	10.1727	12.0637
54	แบบอบแห้ง	0.8061	46.0731	8.32753E-06	0.04557	0.05689	11.9631	14.9354
55	แบบอบแห้ง	1.6974	42.4690	9.72843E-06	0.04449	0.05339	9.9971	11.9967
56	แบบอบแห้ง	1.1441	42.0725	6.93961E-06	0.04507	0.05414	14.1989	17.0540
57	แบบอบแห้ง	1.1116	46.5016	8.16425E-06	0.04570	0.05683	12.2374	15.2162
58	แบบอบแห้ง	0.5797	41.9780	9.82021E-06	0.04524	0.05378	10.0706	11.9729
59	แบบอบแห้ง	0.5986	39.2270	9.93739E-06	0.04663	0.05879	10.2567	12.9320
60	แบบอบแห้ง	0.7506	43.1502	9.68318E-06	0.04611	0.05618	10.4092	12.6831

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	ระยะเก็บเกี่ยว	ความชื้น (%wb)	ปริมาณน้ำมัน (%)	การแพร่ความร้อน ( $\alpha, m/s^2$ )	การนำความร้อน ( $K, w m^{-1} C^{-1}$ )		ความร้อนจำเพาะ ( $C_p, KJ Kg^{-1} C^{-1}$ )	
					40°C	100°C	40°C	100°C
61	แบบอบแห้ง	0.6366	46.5317	8.31922E-06	0.04592	0.06165	12.0669	16.1990
62	แบบอบแห้ง	0.7132	37.2702	8.74741E-06	0.04593	0.05921	11.4776	14.7967
63	แบบอบแห้ง	1.0029	43.0655	6.27546E-06	0.04494	0.05823	15.6554	20.2856
64	แบบอบแห้ง	0.7079	39.0754	7.33058E-06	0.05214	0.06512	15.5475	19.4186
65	แบบอบแห้ง	0.7915	43.1922	8.34088E-07	0.04602	0.05829	120.6044	152.7752
66	ผลสีเหลือง	42.8954	42.5708	9.82021E-06	0.07458	0.11980	16.6018	26.6696
67	ผลสีเหลือง	42.0366	45.1664	9.40964E-06	0.08278	0.10634	19.2319	24.7055
68	ผลสีเหลือง	40.5976	40.0860	9.85507E-06	0.08760	0.10997	19.4314	24.3948
69	ผลสีเหลือง	44.9388	39.3503	9.89018E-06	0.07832	0.14815	17.3119	32.7471
70	ผลสีเหลือง	55.4040	43.6977	1.03319E-05	0.07850	0.10143	16.6091	21.4613
71	ผลสีเหลือง	38.9371	45.2533	9.91373E-06	0.07819	0.17499	17.2405	38.5873
72	ผลสีเหลือง	35.5544	44.2552	9.47387E-06	0.08133	0.14921	18.7668	34.4289
73	ผลสีเหลือง	42.7233	44.1955	9.86675E-06	0.11288	0.10454	25.0104	23.1607
74	ผลสีเหลือง	43.3246	44.1955	9.63835E-06	0.07957	0.14987	18.0473	33.9916
75	ผลสีเหลือง	37.6062	39.1135	1.02682E-05	0.08263	0.18135	17.5912	38.6078
76	ผลสีเขียว	62.3562	43.5008	1.05814E-05	0.09759	0.29358	20.1622	60.6514
77	ผลสีเขียว	55.0699	43.2258	1.03705E-05	0.13921	0.36210	29.3450	76.3296
78	ผลสีเขียว	65.2810	43.8906	1.05948E-05	0.11254	0.29097	23.2211	60.0363
79	ผลสีเขียว	49.9910	42.3784	1.11480E-05	0.13859	0.29029	27.1763	56.9236
80	ผลสีเขียว	60.9026	43.7517	9.73981E-06	0.13766	0.37090	30.8978	83.2481
81	ผลสีเขียว	54.4528	42.0589	1.10886E-05	0.16303	0.35281	32.1407	69.5551
82	ผลสีเขียว	65.9144	41.0662	1.08290E-05	0.13892	0.36340	28.0430	73.3600
83	ผลสีเขียว	72.1026	42.3674	1.11182E-05	0.18965	0.28508	37.2894	56.0534
84	ผลสีเขียว	63.9030	42.4630	1.15500E-05	0.13436	0.39013	25.4299	73.8402
85	ผลสีเขียว	59.5560	40.5275	1.06900E-05	0.13611	0.25783	27.8348	52.7251
86	ผลสีเขียว	64.9864	41.7507	1.02430E-05	0.10822	0.46217	23.0969	98.6364
87	ผลสีเขียว	70.6865	41.7387	1.01308E-05	0.15511	0.21991	33.4696	47.4521
88	ผลสีเขียว	61.8400	41.6462	1.13146E-05	0.12455	0.23185	24.0635	44.7959
89	ผลสีเขียว	73.0611	43.2403	1.04224E-05	0.16029	0.22895	33.6192	48.0206
90	ผลสีเขียว	71.2965	44.7659	1.04486E-05	0.10386	0.23080	21.7303	48.2875

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง าง	ระยะเก็บ เกี่ยว	ความชื้น (%wb)	ปริมาณ น้ำมัน (%)	การแพร่ความ ร้อน ( $\alpha$ , $m/s^2$ )	การนำความร้อน ( $K$ , $w m^{-1} c^{-1}$ )		ความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ , $KJ Kg^{-1} C^{-1}$ )	
					40°C	100°C	40°C	100°C
91	ผลสีเขียว	64.8837	47.3395	1.10591E-05	0.07846	0.22321	15.5082	44.1223
92	ผลสีเขียว	67.0951	43.5928	1.13454E-05	0.11619	0.44535	22.3884	85.8116
93	ผลสีเขียว	66.8022	46.9556	1.06354E-05	0.09497	0.39951	19.5210	82.1169
94	ผลสีเขียว	61.7161	46.3406	9.82021E-06	0.09526	0.28508	21.2048	63.4623
95	ผลสีเขียว	71.9013	42.3877	1.12534E-05	0.08927	0.39922	17.3414	77.5516
96	ผลสีเขียว	61.6315	46.0511	9.70575E-06	0.10164	0.38171	22.8918	85.9737
97	ผลสีเขียว	67.7587	36.8277	1.07730E-05	0.11254	0.37066	22.8370	75.2140
98	ผลสีเขียว	62.8141	33.9842	1.04881E-05	0.13859	0.29029	28.8862	60.5051
99	ผลสีเขียว	64.2118	41.8165	1.05279E-05	0.19911	0.46217	41.3445	95.9672
100	ผลสีเขียว	65.5381	40.3851	1.04881E-05	0.13306	0.40591	27.7336	84.6058



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการตรวจวัดค่าความร้อน

ตัวอย่าง	ระยะเก็บเกี่ยว	ค่าความร้อน(J/g)
1	ผลสีดำ	19131
2	ผลสีดำ	18958
3	ผลสีดำ	18058
4	ผลสีดำ	17920
5	ผลสีดำ	18901
6	ผลสีดำ	19645
7	ผลสีดำ	18405
8	ผลสีดำ	19625
9	ผลสีดำ	18518
10	ผลสีดำ	18131
11	ผลสีดำ	18137
12	ผลสีดำ	17156
13	ผลสีดำ	17346
14	ผลสีดำ	17735
15	ผลสีดำ	18121
16	ผลสีดำ	19539
17	ผลสีดำ	19183
18	ผลสีดำ	19476
19	ผลสีดำ	20648
20	ผลสีดำ	20248
21	ผลสีดำ	19121
22	ผลสีดำ	18977
23	ผลสีดำ	19159
24	ผลสีดำ	18538
25	ผลสีดำ	18639

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	ระยะเก็บเกี่ยว	ค่าความร้อน (J/g)
26	ผลสีเหลือง	20789
27	ผลสีเหลือง	20419
28	ผลสีเหลือง	19623
29	ผลสีเหลือง	20121
30	ผลสีเหลือง	19816
31	ผลสีเหลือง	19701
32	ผลสีเหลือง	18222
33	ผลสีเหลือง	18921
34	ผลสีเหลือง	19010
35	ผลสีเหลือง	18832
36	ผลสีเหลือง	18492
37	ผลสีเหลือง	19444
38	ผลสีเหลือง	19897
39	แบบอบแห้ง	17255
40	แบบอบแห้ง	17661
41	แบบอบแห้ง	17623
42	แบบอบแห้ง	17911
43	แบบอบแห้ง	17590
44	แบบอบแห้ง	18236
45	แบบอบแห้ง	18311
46	แบบอบแห้ง	18258
47	แบบอบแห้ง	17252
48	แบบอบแห้ง	17872
49	แบบอบแห้ง	17832
50	ผลสีเหลือง	18853

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง	ระยะเก็บเกี่ยว	ค่าความร้อน (J/g)
51	ผลสีเหลือง	19121
52	แบบอบแห้ง	18538
53	แบบอบแห้ง	18344
54	แบบอบแห้ง	18464
55	แบบอบแห้ง	18012
56	แบบอบแห้ง	17989
57	แบบอบแห้ง	18211
58	แบบอบแห้ง	18280
59	แบบอบแห้ง	18073
60	แบบอบแห้ง	18568
61	แบบอบแห้ง	17844
62	แบบอบแห้ง	17634
63	แบบอบแห้ง	17982
64	แบบอบแห้ง	17832
65	แบบอบแห้ง	17911
66	ผลสีเหลือง	18911
67	ผลสีเหลือง	18716
68	ผลสีเหลือง	18682
69	ผลสีเหลือง	21334
70	ผลสีเหลือง	20102
71	ผลสีเหลือง	18903
72	ผลสีเหลือง	18543
73	ผลสีเหลือง	18636
74	ผลสีเหลือง	18932
75	ผลสีเหลือง	19191

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

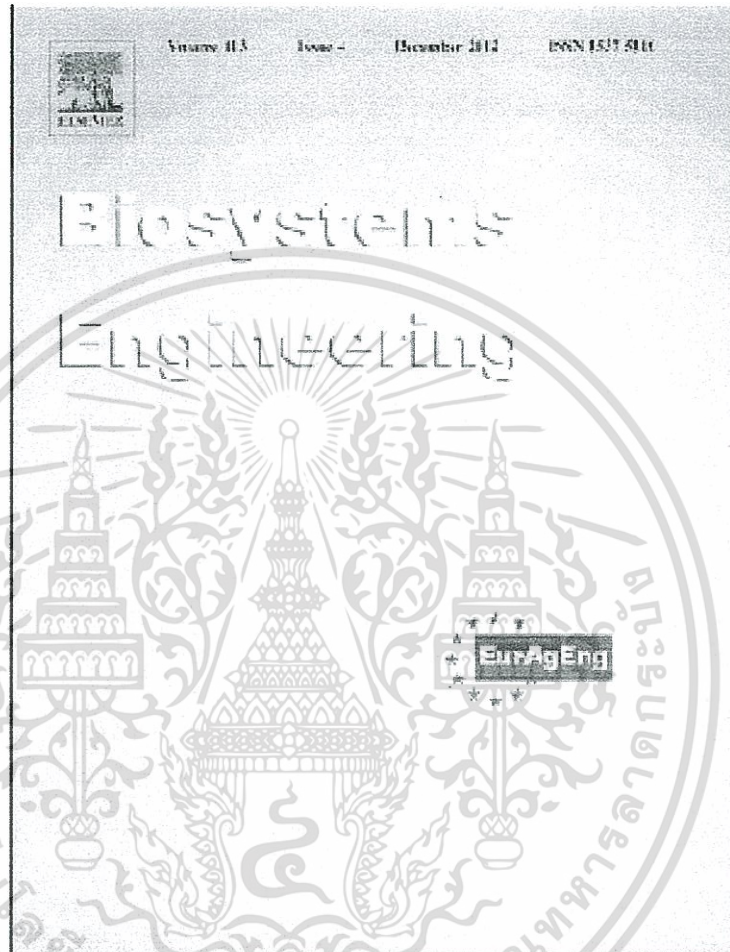
ตัวอย่าง	ระยะเก็บเกี่ยว	ค่าความร้อน (J/g)
76	ผลสีเขียว	17506
77	ผลสีเขียว	17795
78	ผลสีเขียว	18015
79	ผลสีเขียว	18023
80	ผลสีเขียว	18121
81	ผลสีเขียว	18843
82	ผลสีเขียว	18864
83	ผลสีเขียว	19210
84	ผลสีเขียว	19214
85	ผลสีเขียว	18027
86	ผลสีเขียว	17952
87	ผลสีเขียว	17564
88	ผลสีเขียว	18675
89	ผลสีเขียว	19940
90	ผลสีเขียว	17899
91	ผลสีเขียว	17271
92	ผลสีเขียว	17455
93	ผลสีเขียว	17076
94	ผลสีเขียว	17864
95	ผลสีเขียว	17066
96	ผลสีเขียว	17625
97	ผลสีเขียว	18721
98	ผลสีเขียว	18730
99	ผลสีเขียว	18699
100	ผลสีเขียว	18745

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Provided for non-commercial research and education use.  
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ELSEVIER

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SciVerse ScienceDirect

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/issn/15375110](http://www.elsevier.com/locate/issn/15375110)

## Research Paper

Thermal properties of *Jatropha curcas* L. kernels

Panmanas Sirisomboon, Jetsuda Posom\*

Curriculum of Agricultural Engineering, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 19 December 2011

Received in revised form

17 September 2012

Accepted 24 September 2012

Published online 3 November 2012

The thermal properties of *Jatropha curcas* L. kernels, including thermal diffusivity and conductivity were studied where kernels in 3 different forms were investigated, i.e. whole kernels, ¼ kernels and kernel powder. The specific heat of kernels in 2 different forms was also assessed (i.e. small piece of kernel and powdered kernel). The experiments were undertaken using kernels obtained at 2 different harvesting periods, a mature, ripe stage (yellow fruit) and a fully ripe stage (black fruit). The thermal diffusivity of whole kernels, ¼ kernels and kernel powder obtained from yellow fruit were  $9.303 \times 10^{-6}$ ,  $8.370 \times 10^{-6}$  and  $7.455 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , respectively, while those obtained from black fruit were  $8.792 \times 10^{-6}$ ,  $7.723 \times 10^{-6}$  and  $6.552 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , respectively. The thermal conductivity of whole kernels, ¼ kernels and powdered kernels increased with increasing temperature from 25 to 100 °C, ranged from 0.0553 to 0.1181, 0.0592 to 0.1087 and from 0.0535 to 0.1015  $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  for the 3 kernel forms derived from yellow fruit, respectively. For the different kernel forms obtained from the black fruit the corresponding values were 0.0508–0.0977, 0.0527–0.0641 and 0.0452–0.0740  $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , respectively. The specific heat of the small piece kernel and powder obtained from yellow fruit, ranged from 0.7852 to 1.3929 and from 1.3823 to 2.4510  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , respectively. For black fruit, the values ranged from 0.5258 to 0.9933 and from 0.6930 to 1.7810  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , respectively. Linear relationships between thermal conductivity and specific heat with temperature are reported.

© 2012 IAgE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

*Jatropha curcas* L. is a potentially useful source of renewable energy in the form of biodiesel. From the study of Vekrić et al. (2011), the composition of the full ripe stage of *Jatropha* kernel of different varieties was reported, for example, the kernel from the seeds collected from early selections for improved oil yields in Brazil during 2008 contained oil content of 53.83% and protein content of 25.95%. Figure 1 shows the fruits of *Jatropha* at different stages of ripening. These are the mature, the green stage; the yellow, ripe stage; and the black, fully ripe stage. Harvesting of the fruit is at present carried out by hand when the fruit is at the yellow up to black stage of

development. The fruits are subsequently threshed for their seeds, dried naturally by solar radiation, and then pressed for oil. Drying the intact seed with a hard shell can cause difficulties in removing the moisture. Also, pressing of whole seeds with their outer shell intact consumes more energy than pressing the kernels. Furthermore, it is also possible that the outer shell absorbs a fraction of the pressed oil. If the *Jatropha* plant is to make a major impact in the renewable energy industry, the mass processing of its fruit needs considerable optimization. In particular, the optimization of the drying process used for kernels has the greatest potential to increase the processing efficiency. As such, the thermal properties of the kernels including their thermal diffusivity, specific heat,

\* Corresponding author. Tel.: +66 23298000x5120; fax: +66 23298335.

E-mail address: jetsuda\_11@hotmail.com (J. Posom).

1537-5110/\$ – see front matter © 2012 IAgE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.09.013>

Notation		Greek symbols	
$a$	major diameter, mm	$R_{ref}$	resistance of the reference resistor, $\Omega$
$b$	intermediate diameter, mm	$S$	slope of the straight line portion of the plot of $T$ versus $\ln(t)$
$c$	minor diameter, mm	$t$	time, s
$C_p$	specific heat, $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$T$	temperature, $^\circ\text{C}$
$D_g$	geometric mean diameter, mm	$T_c$	temperature in centre of tube, $^\circ\text{C}$
$E_{ref}$	voltage across the reference resistor, V	$T_s$	temperature on surface of tube, $^\circ\text{C}$
$K$	thermal conductivity, $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$T_0$	initial temperature of sample, $^\circ\text{C}$
MC	moisture content, % w.b.		
$M_f$	final weight of sample, g		
$M_i$	initial weight of sample, g		
$Q$	heat input, W		
$R$	radius of the cylinder, m		
$R_{in}$	electric resistance in per unit length, $\Omega \text{ m}^{-1}$		
		$\alpha$	thermal diffusivity, $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$
		$\tau$	time constant, s
		$\theta$	dimensionless temperature ratio ( $\theta = T_c - T_0 / T_s - T_0$ )

and thermal conductivity are expected to be useful heat transfer parameters that could be used in the design of equipment for the drying and processing of *C. curcas* L. kernels.

The primary thermal properties of food and agricultural products are the specific heat, thermal conductivity and thermal diffusivity. The specific heat is the amount of energy required to increase the temperature of a sample by 1  $^\circ\text{C}$ , while the thermal conductivity and thermal diffusivity are involved in the determination of the rate of heat transfer which are useful in the design of efficient process equipment (Hacıkurcu & Kocabiyyik, 2008).

The transient heat flow methods using the line heat source has been used by many researchers for the determination of thermal conductivity of agricultural materials such as safflower [*Carthamus tinctorius* L.] seeds (Kara, Ozturk, Bastaban, & Kalkar, 2011), black pepper and its volatile oil (Meghwal & Goswami, 2011), coriander and arize seeds (Hacıkurcu & Kocabiyyik, 2008), Berberis fruit (Aghbashi, Kiarnehri, & Hassan-Beygi, 2008), papaya (*Carica papaya* L.) and cashew apple (*Anacardium occidentale* L.) (Kurozawa, Park, & Azoubel, 2008), rough rice (Yang, Stebenmorgar, Thielan, & Grosser, 2003), wheat flour (Kim, Flores, Chung, & Rachtel, 2003), boraga seeds (Yang, Sokhansari, Tang, & Winder,

2002), citrus seed (Singh & Goswami, 2000), barley (Hobani & Tolba, 1995), and mangoes (Lachasongkram, Chaiwarichaiti, Thunpithayakul, & Ruedasarnit, 1995).

The thermal diffusivity of a material is usually measured using the transient method of Dickerson (1965) as described by Batri, Laraq, and Garcia de Maria (2007). This method has also been used by other researchers to study dates (Hobani & Al-Askar, 2000) and barley (Hobani & Tolba, 1995).

Differential scanning calorimetry (DSC) is regarded as the most reliable method to measure specific heats of materials, and it is also well suited for determining the temperature dependence of such properties. The specific heat of several grains, seeds, kernels and fruits have been determined with using DSCs, including black pepper and its volatile oil (Meghwal & Goswami, 2011), wheat (Gao et al., 2010), cereal flours (Kalaturg, 2007), cotton seed and its co-products (Wan & Zanin, 2003), boraga seed (Yang et al., 2002). Furthermore, other researchers used the method for determination of specific heat of mixtures of materials such as soya bean, Moringa oleifera seed and Mucuna flagellipes nut (Aviara et al., 2011), peanut pods, kernels and shells (Batra, Baru, Ratnakrishna, Narender, & Womac, 2010), gura seed (Aviara, Haque, & Ogunjimi, 2008), berberis fruit (Aghbashi et al., 2008), sugarbeet roots (Tabil, Eliason, & Qi, 2003), wheat flour (Kim et al., 2003), sheanut kernel (Aviara & Haque, 2001).

The relationship between the thermal properties described above can be established as follows:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (1)$$

where  $\alpha$  is the thermal diffusivity ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ),  $k$  is thermal conductivity ( $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $C_p$  is the specific heat ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), and  $\rho$  is the bulk density of the kernels ( $\text{kg m}^{-3}$ ). Timbers (1975) determined the thermal conductivity of rapeseed using a procedure that employed the measured specific heat, thermal diffusivity and bulk density. In a related study, Kouchakzadeh and Tavakoli (2009) determined the specific heat of Iranian pistachios using a procedure that employed the measured thermal conductivity, thermal diffusivity and bulk density. Furthermore, a number of researchers have determined the thermal diffusivity using the specific heat, thermal conductivity and bulk density of biomaterials such as doum palm fruit (Aremu & Fadele, 2010), peanut pods, kernels

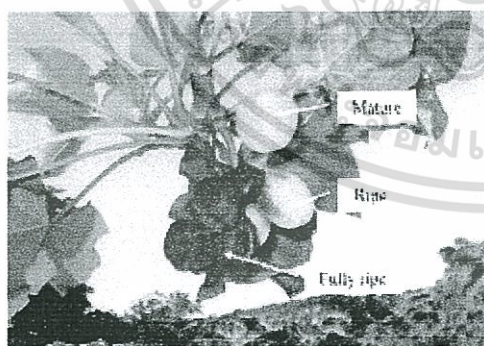


Fig. 1 – Mature fruits of *Jatropha curcas* L. at different stages of ripeness. The stages are the mature stage (green), ripe stage (yellow) and fully ripe stage (black). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

and shells (Bitra et al., 2010), roselle seeds (Bamgboye & Adejumo, 2010), gura seed (Avlara et al., 2008), and curcun seed (Singh & Goswami, 2000).

In order to design equipment and facilities for the drying of such biomaterials, it is necessary to understand their thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heats to allow for efficient processing. To the best of our knowledge, there is currently no published information concerning the thermal conductivity, the thermal diffusivity or the specific heat of the *J. curcas* L. kernel. Therefore, the goal of this work was to characterise their thermal properties. For the determination of thermal conductivity and thermal diffusivity, three different forms including the whole kernel,  $\frac{1}{2}$  kernels and powder, were considered. The two forms of kernel including a small piece of kernel, and powder, were used for the determination of the specific heat.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Sample preparation

Seeds obtained from *J. curcas* L. variety "Tong Supan" fruit, both yellow and black in colour, were sourced from an orchard at the Recruit Training Center, Naval Education Department, in Sattahip, Chonburi, Thailand. Deshelling was performed manually using pliers to obtain the kernels. The kernels were prepared into three different forms, whole kernel,  $\frac{1}{2}$  kernels and kernel powder for the determination of the thermal conductivity and diffusivity. The  $\frac{1}{2}$  kernels were obtained by cutting the whole kernel in half, twice, with cuts perpendicular to each other. The powdered form was obtained by crushing 50 g of whole kernels in a blender (MX-T110PN, National, Taiwan) for 1 min, followed by passing the blended powder through a perforated screen with hole sizes of 1.18 mm. Only powder that passed through the screen was used in the subsequent experiments. An additional sample type was prepared for the measurement of the specific heat, consisting of a small piece of kernel (around 0.053 g per piece), cut using a knife. The specific heat of the powder sample (prepared as described above) was also investigated (around 0.050 g was used as a sample).

### 2.2. Determination of geometric mean diameter and moisture content of *J. curcas* L. kernel

The geometric mean diameter of the kernels from yellow and black fruit were determined as follows: For 30 individual kernel from each of the two fruit categories, the major diameter, intermediate diameter and minor diameter were determined using a Vernier caliper (CD-8°C, Mitutoyo, Japan) reading to an accuracy of 0.01 mm. The geometric mean diameter ( $D_g$ ) was then calculated according to the following formula:

$$D_g = (abc)^{1/3} \quad (2)$$

where  $a$  is the major diameter,  $b$  is the intermediate diameter and  $c$  is the minor diameter (all in mm).

The moisture content of the kernels were determined by drying a sample of cut kernels until constant weight in an oven (ULM 500, Memmert, Gattmang) at  $105 \pm 1$  °C.

Determination of moisture content of *J. curcas* L. kernel was calculated according to equation (3).

$$MC = \frac{(M_i - M_f)}{M_i} \times 100 \quad (3)$$

where MC is the moisture content in % w.b.,  $M_i$  is the initial mass of sample in g and  $M_f$  is the final mass of sample in g. There were 12 samples in this experiment.

### 2.3. Thermal diffusivity measurement

Thermal diffusivity was determined using a one-dimensional Fourier equation applied to a cylinder (Dickerson method). The experimental apparatus consisted of a copper cylinder (35 mm in diameter, 100 mm long and 1 mm in thickness), two thermocouples and an insulation box containing ice-water. The bulk density of the sample in the cylinder was kept constant by filling samples of weight 35.20 g, into the cylindrical container of 35.15 ml. This resulted in bulk densities of  $0.38 \text{ g ml}^{-1}$ . Figure 2 shows a schematic diagram of the apparatus used in the thermal diffusivity experiment. In order to accurately determine the process temperatures, two thermocouples (type K) (52/52-2, Fluke, China) were used. One thermocouple was attached to the outer surface and the other to the centre of the cylinder. The time-temperature data was recorded until a constant rate of temperature rise was obtained for both the surface and the centre thermocouples.

The curve  $\ln(\theta) = f(t)$  was drawn as the example in Fig. 3. The  $\theta$  was calculated by

$$\theta = \frac{T_c - T_s}{T_c - T_0} \quad (4)$$

As a dimensionless temperature ratio,  $T_c$  is the temperature in centre of the tube in °C,  $T_s$  is the temperature on surface of tube in °C, and  $T_0$  is the initial temperature of the sample in °C. Measuring the time constant ( $\tau$ ) can be obtained by carefully measuring the slope of the curve  $\ln(\theta) = f(t)$ , and from this the thermal diffusivity  $\alpha$  can be calculated by means of the simple relation given in Eq. (5) (Bairi et al., 2007):

$$\alpha = \frac{1}{\tau} \left( \frac{R}{2.045} \right)^2 \quad (5)$$

where  $\alpha$  is the thermal diffusivity value in  $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $R$  is the radius of the copper tube in m, and  $\tau$  is a time constant in s. The experiment was repeated four times per kernel type.

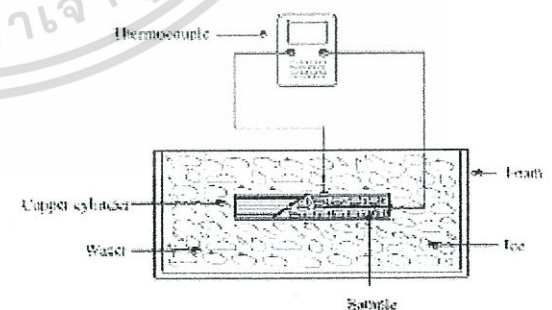


Fig. 2 – Schematic diagram of thermal diffusivity apparatus.

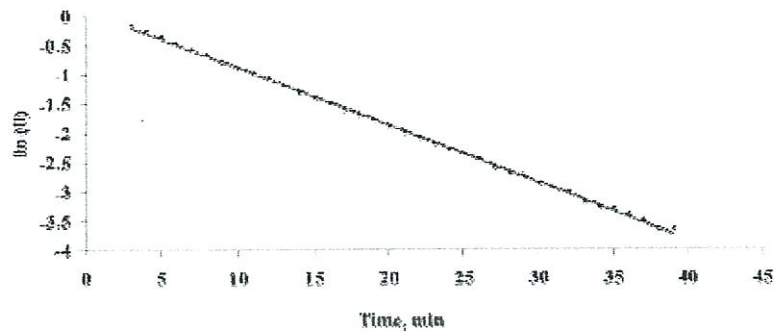


Fig. 3 – A typical thermogram for thermal diffusivity calculation showing the linearity of temperature ratio  $\theta$  versus time when  $\theta = T_c - T_s / T_0 - T_s$ , where  $T_c$  is temperature in centre of tube in °C,  $T_s$  is temperature on surface of tube in °C,  $T_0$  is initial temperature of sample in °C.

#### 2.4. Thermal conductivity measurement

Thermal conductivity determination was performed using the transient technique and a line heat source. A thermal conductivity probe (TC-18, East 30 Sensor, USA) was inserted into the centre of the cylindrical container which was filled with prepared sample (Fig. 4). The cylindrical sample container was made of copper pipe which was 50 mm in height and had a 27 mm inside diameter. The probe was made of a stainless steel tube with a 1.27 mm outer diameter, and a 50 mm length. The heater wire located inside the probe was made of nickel. The samples in the container were equilibrated in an ethylene glycol bath at temperatures of 25, 40, 60, 80 and 100 °C, consecutively. When the sample temperature reached equilibrium the heater wire was energized using a regulated DC power supply consisting of 3 V and 50 mA, to allow a heat transfer from the probe to the surrounding sample in a radial fashion. The resulting temperature rise was measured using the temperature sensor located in the probe (E type thermocouple) and recorded every second over the course of a 3 min period using a data logger (2520A Hydra Data Acquisition Unit, Fluke, USA). A graph of  $T$  (temperature) versus  $\ln(t)$  (time) was plotted and the thermal conductivity was calculated using equation (5):

$$k = \frac{Q \cdot l}{4\pi S} \quad (5)$$

where  $k$  is the thermal conductivity in  $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $Q$  is the heat input in  $\text{W m}^{-1}$ ,  $t$  is the time in second,  $S$  is the slope of the straight line portion of the plot of  $T$  versus  $\ln(t)$ . The heat input  $Q$  was calculated as follows:

$$Q = \left[ \frac{E^2}{R_{ref}} \right] \times R_m \quad (7)$$

where  $E_{ref}$  is the voltage across the reference resistor in the electric circuit of the thermal conductivity probe in V, and  $R_{ref}$  is the resistance of the reference resistor in  $\Omega$ ,  $R_m$  is the electric resistance per unit length in  $\Omega \text{ m}^{-1}$ . The experiment was performed 4 times per sample type.

#### 2.5. Measurement of specific heat

A differential scanning calorimeter (DSC1, Mettler Toledo, USA) was used to determine the specific heat of *J. curcas* L. kernels. After calibrating the equipment temperature and power settings, two empty aluminum pans of the same weight, were placed in the sample and reference holders, respectively. The calorimeter was adjusted to the initial, baseline temperature and allowed to isothermally equilibrate at 25 °C. It was then scanned dynamically at  $10 \text{ } ^\circ\text{C min}^{-1}$  over the temperature range from 25 to 100 °C to determine the baseline. A sapphire test then followed. A 0.050 mg sapphire was placed in the sample pan located in the sample holder, with an empty pan in the reference holder, and the same scanning procedure as before was carried. Subsequently, the *J. curcas* L. kernel samples were divided into test samples of approximately 0.055 mg, which was close to the weight of the sapphire used in the previous step. Scanning procedures with the two *J. curcas* L. kernel forms (i.e. small piece and powder) were performed in triplicate. The specific heat was calculated using the following equation:

$$C_p = \frac{Y \text{ m}_s}{Y_s \text{ m}} C_{sp} \quad (8)$$

where  $C_p$  and  $C_{sp}$  are the specific heats of the sample under investigation and the sapphire, respectively ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

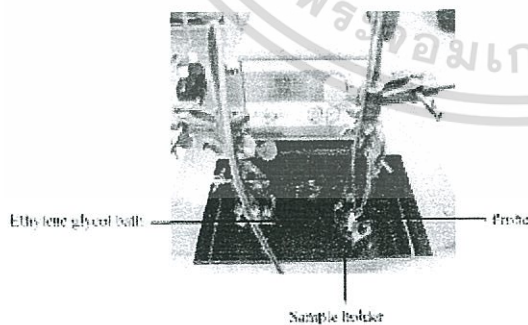


Fig. 4 – Thermal conductivity apparatus using a line heat source probe.

**Table 1 – Geometric mean diameter and moisture content of *Jatropha curcas* L. kernels.**

Properties	N	Mean	SD	Minimum	Maximum
<b>Yellow fruit</b>					
Major diameter, a (mm)	30	14.85	1.05	14.23	16.16
Intermediate diameter, b (mm)	30	10.95	0.61	7.95	8.22
Minor diameter, c (mm)	30	7.35	0.48	6.23	7.92
Geometric mean diameter, $D_g$ (mm)	30	10.48	0.46	9.28	10.52
Moisture content (%w.b.)	12	47.71	6.05	37.88	52.8
<b>Black fruit</b>					
Major diameter, a (mm)	30	15.15	0.47	10.45	16.05
Intermediate diameter, b (mm)	30	9.1	0.35	9.53	12.14
Minor diameter, c (mm)	30	7.28	0.30	6.54	8.49
Geometric mean diameter, $D_g$ (mm)	30	10.01	0.42	9.46	11.88
Moisture content (% w.b.)	12	7.05	0.31	6.03	7.92

N is the number of samples and SD is the standard deviation.

m and  $m_0$  are the weights of the sample and the sapphire, respectively (kg), and Y and  $Y_0$  are the difference in heat flow between the DSC curves of the baseline and sample and sapphire tests, respectively (mW).

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Geometric mean diameter and moisture content

The major diameter, intermediate diameter, minor diameter, geometric mean diameter, and moisture content of the *J. curcas* L. kernels, obtained at the different harvesting periods, are presented in Table 1. All diameter measurements

obtained from kernels taken from the yellow fruit were larger than those obtained from the black fruit. Kernels obtained from the yellow fruit also had a higher moisture content than those from the black fruit, being 5.76 times higher. The geometric mean diameter of the *J. curcas* L. kernels was found to decrease with decreasing moisture content.

#### 3.2. Thermal diffusivity

The thermal diffusivity of whole kernels,  $\frac{1}{4}$  kernels and kernel powder of *J. curcas* L., from both black and yellow fruit were found to decrease with decreasing particle size as shown in Fig. 5. The thermal diffusivity of whole kernels,  $\frac{1}{4}$  kernels and kernel powder from yellow fruit were  $3.903 \times 10^{-6}$ ,  $8.371 \times 10^{-6}$ , and  $7.456 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , respectively, and for black fruit were  $8.732 \times 10^{-6}$ ,  $7.723 \times 10^{-6}$ , and  $6.552 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , respectively. Whole kernels registered the highest thermal diffusivities, an intermediate value was exhibited by  $\frac{1}{4}$  kernels, and kernels in powder form had the lowest thermal diffusivity. Yellow fruit displayed higher thermal diffusivities than that of black fruit. This is presumably a result of the lower moisture content of kernels of the black fruit. The results obtained from thermal diffusivity studies of chickpea (Singh, Mohammad, & Kowaliwala, 2008), papaya (*C. papaya* L.) and cashew apple (Kurozawa et al., 2008), radish and alfalfa seeds (Yang & Zhao, 2001) and sheard seed (Aviara & Haque, 2001) were found to be similar to the results obtained here. However, a different trend was observed for the thermal diffusivity of pumpkin seed (Kocabylyk, Kayisoglu, & Tezer, 2009), coriander and anise seeds (Hacikuru & Kocabylyk, 2008), ruminant feed grains and flours (Subramanian & Viswanathan, 2003), and barley (Hobari & Tolla, 1995). For guia seed, Aviara et al. (2008) reported that the thermal diffusivity of whole seed and kernel increased, and the thermal diffusivity of ground seed and kernel decreased, as the moisture content and temperature increased.

#### 3.3. Thermal conductivity

The average thermal conductivities of *J. curcas* L. kernels, at two stages of ripeness, at a variety of temperatures, and in three different kernel forms, are shown in Fig. 5. The thermal

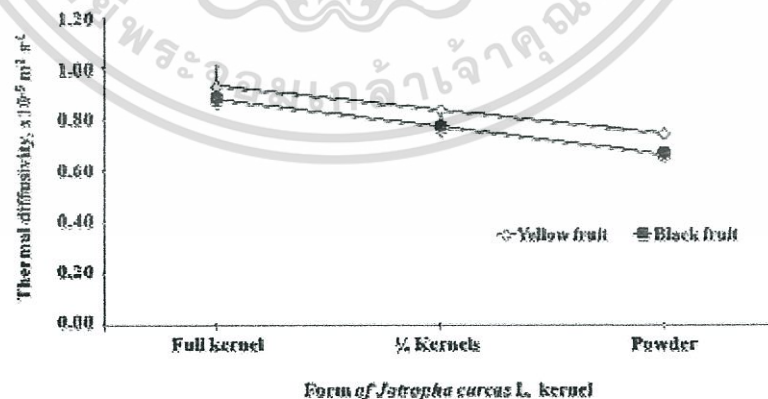


Fig. 5 – Thermal diffusivity of *Jatropha curcas* L. kernels of black and yellow fruits in different forms.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

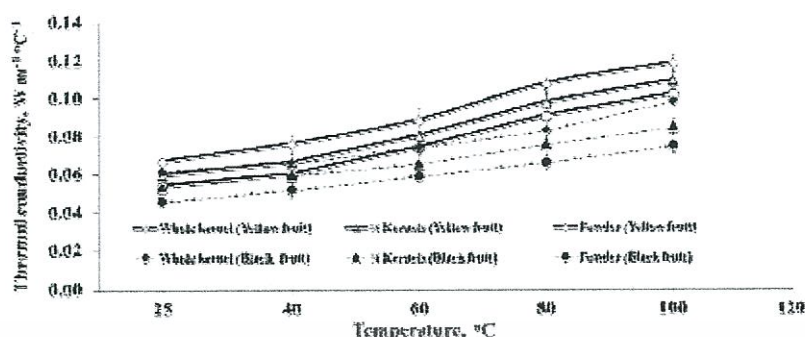


Fig. 6 – Variation of thermal conductivity of *Jatropha curcas* L. kernels (yellow and black fruits) in different forms, and at different temperature.

conductivity of whole kernels,  $\frac{1}{2}$  kernels and powdered kernels increased with increasing temperature from 25 to 100 °C, going from 0.0553 to 0.1181, 0.0533 to 0.1087 and 0.0536 to 0.1015  $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  for the 3 kernel forms derived from yellow fruit, respectively. For the different kernel forms obtained from black fruit the corresponding values were 0.0508–0.0977, 0.0527–0.0841, and 0.0452–0.0740  $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , respectively. The thermal conductivities of kernels at the two stages of ripeness investigated were found to increase with increasing temperature. Whole kernels displayed the highest thermal conductivities, intermediate values were exhibited by  $\frac{1}{2}$  kernels, and the powdered kernels showed the lowest values. These results are similar to those reported by (Jasarsky & Bilanski, 1973) on soybeans in 3 different kernel forms i.e. whole kernel, crushed kernel and powder. These results indicated that the thermal conductivity of the material is dependent upon its particle size, moisture content, and temperature. The thermal conductivity of all soybean particles increased with increasing temperature and moisture content. Whole kernels registered the highest thermal conductivity, a moderate value was exhibited by crushed kernel and powder displayed the lowest values. However, this was in contrast with Avtara et al. (2008) where the thermal conductivity of guava seed, of whole seed and kernel were less than those of ground seed and kernel.

Kernels obtained from yellow *J. curcas* L. fruit had higher thermal conductivities compared to those from black fruit, for a given kernel form. This would appear to be a result of the greater moisture content of kernels sourced from the yellow fruit. This result is in agreement with thermal conductivity data obtained from safflower (*C. tinctorius* L.) seeds (Kara et al., 2011), black cumin (*Nigella sativa* L.) seeds (Al-Mahasneh, Ababneh, & Rababah, 2008), guava seeds (Avtara et al., 2008), chickpea (Singh et al., 2008), sheanut kernels (Avtara & Haque, 2001), radish and alfalfa seeds (Yang & Zhao, 2001) and dates (Hobani & Al-Askar, 2000). However, the opposite trend was observed for roselle seeds (Bamgboye & Adejumo, 2010), peanut pods, and kernels and shells (Batra et al., 2010).

Equations that express the relationship between the thermal conductivity of three different kernel forms (whole kernel,  $\frac{1}{2}$  kernels and powder), and their different harvest period (yellow fruit and black fruit stages), and temperature, have been derived and are reported in Table 2.

### 3.4. Specific heat

The average specific heats of *J. curcas* L. kernels of two different forms, i.e. small piece kernel and kernel powder, at two stages of ripeness, at temperatures ranging from 25 to 100 °C, are shown in Fig. 7. The average specific heat values of the kernels sourced from yellow fruit varied from 0.7852 to 1.3929 for small kernel piece, and 1.3823–2.4510  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  for kernels in powder form. The corresponding values for black fruit were 0.6258–0.9933 for small kernel piece and 0.8930–1.7810  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  for powder. Kernels derived from yellow fruit had a higher specific heat than those from black fruit. This showed the same trend as for the pumpkin seed (Kocabiylık et al., 2009), black cumin (*N. sativa* L.) seeds (Al-Mahasneh et al., 2008), coriander and arisa seeds (Hacikuru & Kocabiylık, 2008), chickpea (Singh et al., 2008) and radish and alfalfa seeds (Yang & Zhao, 2001), where the specific heat increased linearly with moisture content. Our result also corresponded with that of Avtara et al. (2008) for guava seed, where the specific heat of whole seed and kernel was less than those of ground seed and kernel.

In addition, kernels in powder form displayed higher specific heats than those from small kernel pieces. This appears to be a result of the fact that kernels from the yellow fruit contained more moisture than the black fruit, and the powder had a looser texture than the small piece which made the heating process less facile. This was because of the bulk density ( $\rho_b$ ) of the powder and the small pieces were same. When the chamber was filled with material it was not packed

Table 2 – Regression equations describing the relationship between the thermal conductivity ( $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $k$  and temperature ( $^\circ\text{C}$ ),  $T$ .

Sample	Thermal conductivity	$R^2$
Whole kernel (yellow fruit)	$k = 0.0131T + 5.05 \times 10^{-2}$	0.985
$\frac{1}{2}$ Kernels (yellow fruit)	$k = 0.0131T + 4.29 \times 10^{-2}$	0.980
Powder (yellow fruit)	$k = 0.0127T + 3.78 \times 10^{-2}$	0.981
Whole kernel (black fruit)	$k = 0.0091T + 4.86 \times 10^{-2}$	0.956
$\frac{1}{2}$ Kernels (black fruit)	$k = 0.0079T + 4.34 \times 10^{-2}$	0.955
Powder (black fruit)	$k = 0.0071T + 3.74 \times 10^{-2}$	0.956

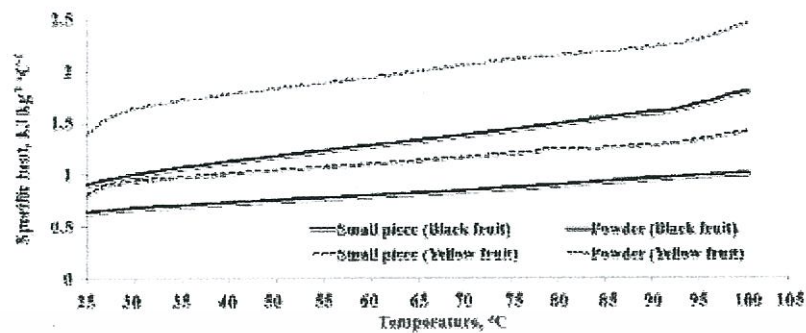


Fig. 7 – Variation of the specific heat of *Jatropha curcas* L. kernels (yellow and black fruits), in different forms, and at different temperatures.

lightly, the powder was slowly fed into the chamber and controlled at the same volume. The solid density of the powder was greater than that of the small pieces. This was because the powder was produced by blending where the mass was cut into very small pieces, the liquid in the mass was removed and it was then compressed through a fine mesh. This made its solid density ( $\rho_s$ ) higher than when it was only cut into small pieces. According to the formula of porosity ( $\Sigma$ ) is  $\Sigma = 1 - \rho_s/\rho_0$ , the porosity of the powder was then higher because of the looser texture.

The specific heat of the smaller particles was higher than for larger particle because the smaller particles needed more heat to increase their temperature which meant their thermal conductivity and thermal diffusivity were low. This agrees with the results of Jaganthy and Bilanski (1973) where the thermal conductivity of whole soybeans was greater than both crushed soybeans and soybean powder.

The specific heat was observed to linearly increase with temperature. This is similar to the results obtained for peppers (Uangkimbuang, Nuthong, & Boonpan, 2011), wheat (Cao et al., 2010), gura seeds (Aviara et al., 2008), cereal flours (Kaleluru, 2007), borage seeds (Yang et al., 2002), sheanut kernels (Aviara & Haque, 2001) and corn seeds (Singh & Goswami, 2000).

Equations that express the relationship between the specific heat of kernels in two different forms (small kernel piece and powder), their different harvest period (yellow fruit and black fruits), and the temperature, have been derived and are reported in Table 3.

Table 3 – Regression equation describing the relationship between the specific heat ( $C_p$ ,  $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) and temperature ( $T$ ,  $^\circ\text{C}$ ).

Sample	Specific heat	$R^2$
Powder (yellow fruit)	$C_p = 0.00180T + 1.58$	0.981
Small piece kernel (yellow fruit)	$C_p = 0.00100T + 0.89$	0.987
Powder (black fruit)	$C_p = 0.00170T + 0.93$	0.994
Small piece kernel (black fruit)	$C_p = 0.00080T + 0.64$	0.997

#### 4. Conclusions

The following conclusions were drawn based upon the experimental study of the thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heats of *J. curcas* L. kernel at two stages of ripeness (i.e. yellow, ripe fruit and black, ripe fruit). The thermal conductivity and diffusivity parameter have been assessed using kernels in 3 different forms (i.e. whole kernel,  $\frac{1}{4}$  kernel and powder), while specific heats have been determined using 2 different forms (i.e. small kernel piece and kernel powder). It was concluded that:

1. The thermal diffusivity of whole kernels,  $\frac{1}{4}$  kernels and kernel powder of *J. curcas* L., obtained from both yellow and black fruits, were found to decrease with decreasing particle size. The thermal diffusivity of kernels taken from yellow fruit was greater than those taken from black fruit. This was true for all kernel forms.
2. The thermal conductivity of *J. curcas* L. kernels at the 2 different stages of ripeness, increased with increasing temperature. The thermal conductivities of kernels taken from yellow fruit were greater than those taken from black fruit. Whole kernels registered the highest thermal conductivities, an intermediate value was exhibited by  $\frac{1}{4}$  kernels and powdered kernels displayed the lowest values.
3. The specific heat of *J. curcas* L. kernels, at two different stages of ripeness, increased with temperature over the range between 25 and 103  $^\circ\text{C}$ . Kernels derived from yellow fruit had a higher specific heat than those from black fruit. In addition, kernels in powder form displayed higher specific heats than those from small kernel pieces.
4. The relationship between the thermal conductivity, the specific heat, and the temperature were shown to be linear in form.

The results of several papers about the change of thermal properties of oil seeds followed different trends, i.e. they contradicted or endorsed each other. This may be because of the different composition of the seeds, however, only the change of moisture content appears to have been reported. Therefore, it would be useful if test results were discussed more meaningfully by examining composition data such as oil, starch or

protein content. The different seed preparation procedures for tests that affect particle properties such as particle size, bulk density, and solid density are also important because they can change of the thermal properties of oil seeds.

#### REFERENCES

- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., & Hassan-Beygi, S. R. (2008). Specific heat and thermal conductivity of berberis fruit (*Berberis vulgaris*). *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 3, 330–336.
- Al-Mahameh, M. A., Ababneh, H. A., & Rababah, T. (2008). Some engineering and thermal properties of black cumin (*Nigella sativa* L.) seeds. *International Journal of Food Science and Technology*, 43, 1047–1052.
- Aremu, A. K., & Fadele, O. K. (2010). Moisture dependent thermal properties of doum palm fruit. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, 1, 199–201.
- Aviara, N. A., Ihtabhi, S. E., Ajibola, O. O., Oni, S. A., Power, P. P., Abbas, T., et al. (2011). Effects of moisture content and temperature on the specific heat of soya bean, *Moringa oleifera* seed and *Micuna flagellipes* nut. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 4, 87–92.
- Aviara, N. A., & Haque, M. A. (2001). Moisture dependence of thermal properties of sheanut kernel. *Journal Food Engineering*, 47, 109–113.
- Aviara, N. A., Haque, M. A., & Ogunjimi, L. A. O. (2008). Thermal properties of gma seed. *International Agrophysics*, 22, 291–297.
- Ba'ni, A., Laraq, N., & Garcia de Maria, I. M. (2009). Determination of thermal diffusivity of foods using 1D Fourier cylindrical solution. *Journal of Food Engineering*, 78, 569–575.
- Bangboye, A. I., & Adejumo, O. I. (2010). Thermal properties of roselle seeds. *International Agrophysics*, 24, 65–67.
- Bitra, V. S. P., Banu, S., Ramakrishna, P., Narender, G., & Womac, A. R. (2010). Moisture dependent thermal properties of peanut pods, kernels, and shells. *Biosystems Engineering*, 105, 503–512.
- Cao, Y., Li, G., Zhang, Z., Chen, L., Yi, Y., & Zhang, T. (2010). The specific heat of wheat. 10th International working conference on stored product protection. *Julius Kühn-Archiv*, 425, 243–249.
- Dickerson, R. W. (1965). An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. *Food Technology*, 19, 198–201.
- Hacikuru, I., & Kocayiyik, H. (2008). Thermal properties of coriander and anise seeds. *The Philippine Agricultural Scientist*, 91, 401–407.
- Hobani, A. I., & Al-Askar, S. R. (2000). Effective thermal properties of dates. *Research bulletin*, 92, 5–20.
- Hobani, A. I., & Tolba, M. H. (1995). Bulk thermal conductivity and diffusivity of barley. *Research bulletin*, 53, 5–17.
- Jasansky, A., & Bilanaki, W. K. (1972). Thermal conductivity of whole and ground soybeans. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 16, 100–103.
- Kaletunç, G. (2007). Prediction of heat capacity of cereal flours: a quantitative empirical correlation. *Journal of Food Engineering*, 82, 589–594.
- Kara, M., Öztürk, I., Bastaban, S., & Kalkan, F. (2011). Thermal conductivity of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seeds. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9, 587–592.
- Kim, Y. S., Flores, R. A., Chung, O. K., & Bachtel, D. B. (2003). Physical, chemical, and thermal characterization of wheat flour milling coproducts. *Journal of Food Process Engineering*, 26, 459–488.
- Kocayiyik, H., Kayisoglu, B., & Tezer, D. (2009). Effect of moisture content on thermal properties of pumpkin seed. *International Journal of Food Properties*, 12, 277–285.
- Kouchakzadeh, A., & Tavakoli, T. (2009). The effect of moisture and temperature on thermophysical properties of Iranian pistachios. *World Applied Sciences Journal*, 7, 1552–1558.
- Kurozawa, L. E., Park, K. I., & Azoubel, F. M. (2008). Thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya* L.) and cashew apple (*Anacardium occidentale* L.). *Journal of Food Technology*, 11, 78–85.
- Laohasongkram, K., Chaiwanichairi, S., Thunphitayakul, C., & Ruadeesart, W. (1995). Thermal properties of mangoes. *Journal of the Science Society of Thailand*, 21, 53–74.
- Meghwal, M., & Goswami, T. K. (2011). Thermal properties of black pepper and its volatile oil. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*. ISSN: 0976-2512, 2. ISSN: 0976-2512, 334–344.
- Singh, K. K., & Goawami, T. K. (2000). Thermal properties of amlin seed. *Journal of Food Engineering*, 45, 181–187.
- Singh, K. K., Mohammad, S., & Kotwalwale, N. (2006). Moisture dependent physical and thermal properties of chickpea. *Journal of Food Science Technology-Mysore*, 45, 259–262.
- Subramanian, S., & Viswanathan, V. (2003). Thermal properties of minor millet grains and flours. *Biosystems Engineering*, 84, 289–296.
- Tabil, L. G., Elison, M. W., & Qi, H. (2003). Thermal properties of sugarbeet roots. *Journal of Sugar Beet Research*, 40, 209–228.
- Timbers, G. E. (1975). Properties of rapeseed: thermal conductivity and specific heat. *Canadian Agricultural Engineering*, 17, 81–84.
- Uengkinbuan, N., Nuthong, O., & Boonpait, P. (2011). Thermophysical properties of pepper (*Piper nigrum* L.). *Agricultural Science Journal*, 42, 325–329.
- Vaknin, Y., Ghanim, M., Samra, S., Dvash, L., Hendelaman, E., Bliskowitch, D., et al. (2011). Predicting *Leptochloa curcas* seed-oil content, oil composition and protein content using near-infrared spectroscopy – a quick and non-destructive method. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 1029–1034.
- Wan, P. L., & Zarins, Z. M. (2003). Specific heats of cotton seed and its co-products. *Journals of the American Oil Chemists' Society*, 80, 123–125.
- Yang, L., & Zhao, Y. Y. (2001). Thermal properties of radish and alfalfa seeds. *Journal of Food Process Engineering*, 24, 291–313.
- Yang, W., Siebenmorgen, T. J., Thissen, T. P. H., & Croasse, A. G. (2003). Effect of glass transition on thermal conductivity of rough rice. *Biosystems Engineering*, 84, 193–200.
- Yang, W., Sokhansanj, S., Tang, J., & Winter, P. (2002). Determination of thermal conductivity specific heat and thermal diffusivity of sorage seeds. *Biosystems Engineering*, 82, 159–176.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายเจษฎา โพธิ์สม  
 วัน เดือน ปีเกิด 10 ธันวาคม 2530 ที่ จังหวัดขอนแก่น  
 ที่อยู่ปัจจุบัน 34/22 หอพัก เอ-บีเฮาส์ ซอย 50 ถ. ลาดกระบัง  
 แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520  
 ที่อยู่ตามทะเบียนบ้าน 90 หมู่ 5 บ้านนาเรียง ตำบลหนองกุง อำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น  
 14140  
 ประวัติการศึกษา 2553 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเครื่องมือและวัสดุ (เกียรตินิยม  
 อันดับ 2), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
 2555 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตร  
 วิศวกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

### ความชำนาญเฉพาะด้าน

- 1.) สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุ
- 2.) เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
- 3.) การทดสอบวัสดุ

### ประสบการณ์การทำงานและงานวิจัย

พ.ศ.2553 การปรับปรุงแม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นส่วน Collar โครงการทุน IRPUS

พ.ศ.2553-2554 วิศวกรแผนกถ่ายเทความร้อนและท่อทองแดงบริษัทมิติซูบิซี เฮฟวีอินดัสทรี-แอร์  
 คอนดิชันเนอร์ จำกัด

พ.ศ.2555-ปัจจุบัน วิศวกรแผนกควบคุมคุณภาพ (ทดสอบวัสดุ) บริษัทไทยฮอนด้า เมนูแพ็กเจอร์ริง  
 จำกัด

พ.ศ.2555 สมบัติเชิงความร้อนของสบูดำ (Thermal properties of *Jatropha curcas* L.)

พ.ศ.2556 การพัฒนาเทคนิคการวัดปริมาณน้ำมันและสมบัติเชิงความร้อนของชีวมวลโดยวิธีไม่ทำลาย  
 ด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี: กรณีศึกษา เนื้อในเมล็ดสบูดำ (Development of the  
 technique for measuring of thermal properties moisture content oil content and  
 heating value of biomass by non-destructive method using near infrared  
 spectroscopy : case study of *Jatropha curcas* kernels)

ผลงานตีพิมพ์ : Sirisomboon, P. and Posom, J. 2012. "Thermal properties of *Jatropha  
 curcas* L. kernels ." Biosystems Engineering.: 402 - 409.