



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดปริมาณความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหามาต  
โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

Feasibility study for the evaluation of moisture content in tapioca starch cake  
by near Infrared spectroscopy

รศ. ดร. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดปริมาณความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด  
โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

Feasibility study for the evaluation of moisture content in tapioca starch cake  
by near Infrared spectroscopy

รศ. ดร. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1269๗๕๗6



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดปริมาณความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด  
โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี  
Feasibility study for the evaluation of moisture content in tapioca starch cake  
by near Infrared spectroscopy

รศ. ดร. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดปริมาณความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด  
โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

แหล่งเงินงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2557 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 60,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2556 ถึงวันที่ 30 เดือน กันยายน พ.ศ. 2557

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย

น.ส. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ (หัวหน้าโครงการ) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาความเป็นไปได้ของ near-infrared (NIR) reflectance spectroscopy ในการวัดความชื้นของแป้งมันสำปะหลังโดยนำตัวอย่างของแป้งมันสำปะหลังสแกนโดยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วง wavenumber  $12,500-4,000\text{ cm}^{-1}$  (800-2500 nm), micro NIR spectrometer ที่ช่วง wavelength 1150-2150 nm และ NIR gun ที่ช่วง wavelength 600-1100 nm เพื่อหาปริมาณความชื้นโดยเทียบกับเครื่องมาตรฐาน Infrared moisture analyser ผลลัพธ์ของแบบจำลองทางสถิติชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองจากเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่สร้างจากข้อมูลชุดห้องปฏิบัติการ, โรงงาน และ ห้องปฏิบัติการและโรงงาน โดยวิธี Partial least squares regression โดยมีจำนวนแฟคเตอร์เท่ากับ 8, 7 และ 6 ตามลำดับ สามารถพยากรณ์ปริมาณความชื้นได้ดีที่สุด โดยมีค่าความผิดพลาดยกกำลังสองเฉลี่ยของการพิสูจน์แบบไขว้ (RMSECV) เท่ากับ 0.75, 0.92 และ 0.91% และ สัมประสิทธิ์การพิจารณา ( $R^2$ ) 99.44, 99.07 และ 99.19% ตามลำดับ จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้ต่อไปในโรงงานแป้งมันสำปะหลัง

คำสำคัญ : ความชื้น แป้งมันสำปะหลังหมาด เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

**Research Title:** Feasibility study for the evaluation of moisture content in tapioca starch cake by near Infrared spectroscopy

**Researchers:** Panmanas Sirisomboon

**Faculty:** Engineering **Department:** Mechanical Engineering

### ABSTRACT

A feasibility study of rapid predictive method based on near-infrared (NIR) reflectance spectroscopy was developed to measure tapioca starch cake moisture content. The starch cake samples were scanned by FT-NIR spectrometer with the wavenumber  $12,500-4,000\text{ cm}^{-1}$  (800-2500 nm), micro NIR spectrometer with the wavelength of 1150-2150 nm and NIR gun with the wavelength of 600-1100 nm and analyzed for moisture content by infrared moisture analyser. Results of statistical modeling indicated that the NIR spectroscopy was reasonably accurate in predicting moisture content. The best model was from FT-NIR spectrometer developed from data sets of laboratory, factory and combination of laboratory and factory by partial least squares regression where 8, 7 and 6 factors were used respectively. The root mean square error of cross-validation (RMSECV) were 0.75, 0.92, 0.91% and coefficient of determination correlation ( $R^2$ ) of 99.44, 99.07 and 99.19%, respectively. The NIR-based protocol developed in this study can be used as the guidance for further application in the tapioca starch factory

**Keywords :** moisture content, tapioca starch cake, near Infrared spectroscopy

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557



รศ.ดร. ปานมนัส ศิริสมบุญ  
นางสาว วันทนี พูนพัฒนชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ทฤษฎี สมมติฐานและกรอบแนวคิดของ โครงการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.1 มันทำปะหลัง.....	4
2.2 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR Spectroscopy).....	7
2.3 หลักการพื้นฐานของเครื่อง Near Infrared Spectroscopy.....	8
2.4 การเลือกวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น (Selecting the Data Preprocessing Model Method).....	9
2.5 การเลือกจำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสม (Selecting the Appropriate Number of Factors).....	12
2.6 การสร้างสมการ โดยวิธี partial least square regression (PLS-Regression).....	12
2.7 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างสมการ.....	16
2.8 ประโยชน์ของเทคนิค NIR.....	18
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	20
3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง.....	20
3.2 การสแกนด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด.....	22
3.3 การวัดความชื้น.....	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างที่อยู่นอกกลุ่ม.....	23
3.5 การวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม.....	24
3.6 การสร้างสมการในการทำนาย.....	24
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย.....</b>	<b>27</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์ความชื้น.....	27
4.2 ลักษณะของสเปกตรัม.....	27
4.3 ผลของการทำนายของแบบจำลอง.....	30
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>87</b>
5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม.....	87
5.2 สรุปผลการสร้างสมการทำนายค่าความชื้น.....	87
5.3 ผลจาก Regression coefficient plot และ X-loading plot.....	87
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	86
<b>บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย.....</b>	<b>88</b>
<b>บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>93</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>94</b>
ภาคผนวก ก สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย.....	95
<b>ประวัตินักวิจัย.....</b>	<b>98</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การแปลความหมายของค่า R และ $R^2$ (Williams, 2007).....	16
2.2 การอธิบายผลของค่า RPD และ RER (Williams, 2007).....	17
4.1 ค่าทางสถิติของปริมาณความชื้น (%wb) ของแป้งมันสำปะหลังที่วัดโดยวิธีมาตรฐาน.....	27
4.2 ผลการทำนายของแบบจำลอง.....	32
4.3 ค่า Regression coefficient ที่สูงที่สุดของแบบจำลองที่ดีที่สุดที่ได้จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ต่างๆ.....	33
4.4 ค่า X-loading weight ที่สูงที่สุดของแฟกเตอร์ 1-3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดที่ได้จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ต่างๆ.....	34



## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบ.....	6
2.2 การกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารต่างๆ.....	8
2.3 NIR สเปกตรัมของมือคน; วัตถุประสงค์ของสเปกตรัมแบบแปร.....	10
2.4 ข้อมูลสเปกตรัมและความเข้มข้นในรูปแบบเมทริกซ์.....	13
2.5 Schematicdiagram for the factorization of the spectral data matrix X.....	14
3.1 ขั้นตอนการทดลองเพื่อการวัดความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหามาด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ในห้องปฏิบัติการ.....	20
3.2 ขั้นตอนการทดลองเพื่อการวัดความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหามาด้วยเนียร์อินฟราเรดสโกปี ในโรงงาน.....	21
3.3 แป้งมันสำปะหลังที่ถูกเก็บสำหรับการทดลอง.....	22
3.4 ตัวอย่างการสแกนแป้งมันสำปะหลัง ก. MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง ข. MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้ว ค. FQA-NIR Gun ง. FT-NIR spectrometer.....	23
4.1 ลักษณะของสเปกตรัมจากเครื่อง MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรง.....	28
4.2 ลักษณะของสเปกตรัมจากเครื่อง MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนผ่านแก้ว.....	28
4.3 ลักษณะของสเปกตรัมจากเครื่อง FQA-NIR Gun (Fantec, Japan).....	29
4.4 ลักษณะของสเปกตรัมจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany).....	29
4.5 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหามา โดย ใช้ MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการที่เป็นสเปกตรัมดิบ.....	36
4.6 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหามา โดย ใช้ MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการที่เป็นสเปกตรัมดิบ.....	36
4.7 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหามา โดย ใช้ FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการที่เป็นสเปกตรัมดิบ.....	37
4.8 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหามา โดย ใช้ FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ ที่ผ่านการทำ Min-Max normalization.....	37
4.9 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหามา โดย ใช้ FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ ที่ผ่านการทำ Min-Max normalization.....	38

## สารบัญภาพ ( ต่อ )

ภาพที่	หน้า
4.10 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ 1 สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	38
4.11 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ 1 สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	39
4.12 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ 1 สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	39
4.13 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ 1 สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	40
4.14 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ 2 สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	40
4.15 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ 2 สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	41
4.16 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ 2 สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	41
4.17 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ 2 สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	42
4.18 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ 2 สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	42
4.19 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ 2 สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	43
4.20 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ 2 สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	43
4.21 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ 3 สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	44
4.22 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ 3 สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	44

## สารบัญภาพ ( ต่อ )

ภาพที่	หน้า
4.23 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	45
4.24 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ.....	45
4.25 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดยใช้ MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง โดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน ที่ผ่านการทำ SNV + DETRENDING.....	46
4.26 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดยใช้ MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน ที่ผ่านการทำ Range normalization.....	46
4.27 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดยใช้ FQA-NIR Gun สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน ที่ผ่านการทำ SNV + DETRENDING.....	47
4.28 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดยใช้ FT-NIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน ที่ผ่านการทำ Multiplicative Scattering correction.....	47
4.29 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน.....	48
4.30 loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน.....	48
4.31 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน.....	49
4.32 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน.....	49
4.33 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน.....	50

## สารบัญภาพ ( ต่อ )

ภาพที่	หน้า
4.34 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูล โรงงาน.....	50
4.35 ภาพที่ 4.35 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะ หลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูล โรงงาน).....	51
4.36 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูล โรงงาน.....	51
4.37 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูล โรงงาน.....	52
4.38 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูล โรงงาน.....	52
4.39 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูล โรงงาน.....	53
4.40 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูล โรงงาน.....	53
4.41 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูล โรงงาน.....	54
4.42 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูล โรงงาน.....	54
4.43 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูล โรงงาน.....	55
4.44 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูล โรงงาน.....	55
4.45 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมวด โดยใช้ MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูล โรงงาน (แป้งแห้ง) ที่เป็นสเปกตรัมดิบ.....	56

## ญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ ( ต่อ )

ภาพที่	หน้า
4.46 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดย ใช้ MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง) ที่เป็นสเปกตรัมดิบ.....	56
4.47 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดยใช้ FQA-NIR Gun สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง) ที่เป็นสเปกตรัมดิบ.....	57
4.48 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดยใช้ FT-NIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง) ที่ผ่านการทำ First derivative.....	57
4.49 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดยใช้ FT-NIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง) ที่ผ่านการทำ First derivative.....	58
4.50 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้ง โดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)...	58
4.51 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้ง โดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)...	59
4.52 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้ง โดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)...	59
4.53 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง).....	60
4.54 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง).....	60
4.55 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง).....	61
4.56 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง).....	61
4.57 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง).....	62

## สารบัญญภาพ ( ต่อ )

ภาพที่

หน้า

4.58 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง).....	62
4.59 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง).....	63
4.60 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง).....	63
4.61 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง).....	64
4.62 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง).....	64
4.63 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง).....	65
4.64 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง).....	65
4.65 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมวด โดยใช้ MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมวด) ที่เป็นสเปกตรัมดิบ.....	66
4.66 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมวด โดยใช้ MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมวด) ที่เป็นสเปกตรัมดิบ...66	66
4.67 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมวด โดยใช้ FQA-NIR Gun สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมวด) ที่เป็นสเปกตรัมดิบ.....	67
4.68 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมวด โดยใช้ FT-NIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมวด) ที่ผ่านการทำ Straight Line Subtraction.....	67

## สารบัญญภาพ ( ต่อ )

ภาพที่

หน้า

4.69 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดยใช้ FT-NIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมาด) ที่ผ่านการทำ Straight line Subtraction.....	68
4.70 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกน ด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูล โรงงาน (แป้งหมาด).....	68
4.71 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูล โรงงาน (แป้งหมาด)...	69
4.72 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูล โรงงาน (แป้งหมาด)...	69
4.73 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูล โรงงาน (แป้งหมาด).....	70
4.74 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูล โรงงาน (แป้งหมาด).....	70
4.75 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูล โรงงาน (แป้งหมาด).....	71
4.76 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูล โรงงาน (แป้งหมาด).....	71
4.77 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูล โรงงาน (แป้งหมาด).....	72
4.78 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูล โรงงาน (แป้งหมาด).....	72
4.79 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูล โรงงาน (แป้งหมาด).....	73
4.80 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูล โรงงาน (แป้งหมาด).....	73

## สารบัญภาพ ( ต่อ )

ภาพที่	หน้า
4.81 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมาด).....	74
4.82 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมาด).....	74
4.83 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมาด).....	75
4.84 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาดโดยใช้ MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงานที่เป็นสเปกตรัมดิบ.....	75
4.85 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาดโดยใช้ MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงานที่เป็นสเปกตรัมดิบ.....	76
4.86 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาดโดยใช้ FQA-NIR Gun สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงานที่เป็นสเปกตรัมดิบ... 76	76
4.87 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาดโดยใช้ FT-NIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงานที่ผ่านการทำ Min-Max normalization.....	77
4.88 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน.....	77
4.89 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน.....	78
4.90 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน.....	78

## สารบัญภาพ ( ต่อ )

ภาพที่	หน้า
4.91 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและ โรงงาน.....	79
4.92 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและ โรงงาน.....	79
4.93 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและ โรงงาน.....	80
4.94 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูล ในห้องปฏิบัติการและ โรงงาน.....	80
4.95 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูล ในห้องปฏิบัติการและ โรงงาน.....	81
4.96 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกน ด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและ โรงงาน.....	81
4.97 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและ โรงงาน.....	82
4.98 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและ โรงงาน.....	82
4.99 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและ โรงงาน.....	83
4.100 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและ โรงงาน.....	83

## สารบัญภาพ ( ต่อ )

ภาพที่	หน้า
4.101 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน.....	84
4.102 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน.....	84
4.103 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน.....	85



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่มีใช้ประโยชน์ในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ หลายประเภท ทั้งอาหาร อุตสาหกรรมทอผ้า กระดาษ พลังงาน เป็นต้น โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารต้องการแป้งมันสำปะหลังที่มีคุณภาพที่ไม่แปรปรวนมาก เพราะถ้าแปรปรวนมากจะทำให้ต้องปรับสูตรการแปรรูปตลอดเวลา สำหรับปริมาณความชื้นของแป้งมันสำปะหลัง ความชื้นจะต้องไม่เกิน 12% เพราะจะมีผลต่อการเข้าทำลายของโรคและแมลงเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานาน (ข้อมูลจากการสอบถามผู้ประกอบการ โรงงาน แป้งมันแสงเพชร จำกัด 84 หมู่ที่ 5 ชัยภูมิ-นครสวรรค์ ตำบลหนองบัวระเหว อำเภอหนองบัวระเหว จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย)

การควบคุมคุณภาพแป้งสาลีโดยเฉพาะความชื้นต้องการเครื่องมือการวิเคราะห์ทางเคมีที่ช่วยให้สามารถได้รับผลในระดับวินาที ปัจจุบันโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังวัดความชื้นของแป้งหามาโดยใช้ infrared moisture analyzer ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 10-30 นาที ขึ้นกับความชื้นเริ่มต้น หากสามารถวัดความชื้นในสายการผลิตที่เวลาจริง (real time) โดยใช้เวลาในการวัดในหน่วยวินาที นอกจากจะสามารถรู้คุณภาพของแป้งหามาขณะนั้นแล้วยังสามารถนำข้อมูลความชื้นมาใช้ในการควบคุมระบบผลิตลมร้อนในการทำแห้งแป้งหามาอีกด้วย โดยจะใช้ค่าความชื้นกำหนดอุณหภูมิของลมร้อนให้เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดพลังงาน

เทคนิค NIR Spectroscopy (NIRS) เป็นเทคนิคที่ง่าย รวดเร็ว ไม่ใช้สารเคมี ไม่ทำลายตัวอย่าง มีประสิทธิภาพในการประเมินค่าความชื้น โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 800 – 2500 nm ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการวัดตัวอย่างและรู้ผลรวดเร็วภายใน 2-3 วินาที ดังนั้น NIRS จึงมีศักยภาพสูง ช่วยให้สามารถลดระยะเวลาและวิธีการให้สั้นลงได้ โดยไม่ต้องใช้สารเคมี เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในการนำมาใช้ประเมินสมบัติความชื้น จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจที่จะในการนำไปใช้ประโยชน์ในโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังต่อไป ดังนั้นจึงศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดปริมาณความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหามาโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดปริมาณความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหามาโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
2. เพื่อแนวทางในการใช้ข้อมูลที่ได้ในควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนในกระบวนการทำแห้งแป้งหามาในโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังต่อไป

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการวิจัยโดยส่วนตัวอย่างเฉพาะที่โรงงานแป้งมันแสงเพชร จำกัด 84 หมู่ที่ 5 ชัยภูมิ-นครสวรรค์ ตำบลหนองบัวระเหว อำเภอหนองบัวระเหวจังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เทคนิคการวัดการตรวจวัดปริมาณความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหามาโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
2. โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังสามารถนำเทคนิคที่ได้ไปใช้ในการวัดความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหามาได้
3. ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจวัดปริมาณความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหามาโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อกำหนดแนวทางในการติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนในกระบวนการทำแห้งแป้งหามาในโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังต่อไป

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ

1. ศึกษาการวัดสมบัติความชื้นของตัวอย่างแป้งมันสำปะหลัง ด้วยวิธีมาตรฐานตามโรงงานอุตสาหกรรม
2. ศึกษาวิธี NIR spectroscopy เกี่ยวกับการสแกนด้วย NIR spectrometer และการสร้างแบบจำลอง ทั้งในห้องปฏิบัติการและโรงงาน
3. เตรียมตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังในห้องปฏิบัติการ
4. นำตัวอย่างแป้งมันสำปะหลัง หลังจากเตรียมทันทีเข้าสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany), เครื่อง MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) และ เครื่อง FQA-NIR Gun (Fantec, Japan)
5. นำตัวอย่างที่ผ่านการสแกนด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี นำไปหาความชื้นโดยวิธีดั้งเดิมอ้างอิงจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยเครื่อง Infrared Moisture Analyzer

6. สร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความชื้น โดยวิธี Partial least square regression (PLSR) และใช้โปรแกรม OPUS version 7.0.129 ทั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นและมีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น
7. เก็บตัวอย่างเป็งมันสำปะหลังหมาดและแห้งในสายการผลิตของโรงงาน
8. ทำซ้ำข้อ 4-6
9. วิเคราะห์ผล
10. สรุปผลและเขียนรายงาน



## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 มันสำปะหลัง [1]

มันสำปะหลังจัดเป็นพืชหัวชนิดหนึ่งมีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Manihotesculenta* Crantz มีชื่อสามัญเรียกหลายชื่อตามภาษาต่างๆ ที่ได้ยืมกันมาก ได้แก่ Cassava, Yuca, Mandioa, Manioc, Tapioca มันสำปะหลังมีแหล่งกำเนิดแถบที่ลุ่มเขตร้อน (Lowland tropics) มีหลักฐานแสดงว่าปลูกกันในโคลัมเบียและเวเนซุเอลา มานานกว่า 3,000 – 7,000 ปีมาแล้วสันนิษฐานว่าแหล่งกำเนิดมันสำปะหลังมี 4 แหล่งด้วยกันคือ 1. แถบประเทศกัวเตมาลาและเม็กซิโก 2. ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของทวีปอเมริกาใต้ 3. ทางทิศตะวันออกของประเทศโบลิเวียและทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศอาร์เจนตินา 4. ทางทิศตะวันออกของประเทศบราซิล

ในทวีปเอเชียมีการนำมันสำปะหลังมาปลูกครั้งแรกที่ประเทศฟิลิปปินส์ในคริสต์ศตวรรษที่ 17 โดยชาวสเปนได้นำมาจากเม็กซิโกและในเวลาต่อมาได้มีการปลูกที่ อินโดนีเซีย และเมื่อ พ.ศ. 2337 ได้มีการนำมันสำปะหลังจาก อัฟริกา มาปลูกที่อินเดียเพื่อใช้ในการทดลอง

##### 2.1.1 ความเป็นมา [1]

สำหรับประเทศไทยไม่มีหลักฐานที่แน่นอนว่ามีการนำมันสำปะหลังเข้ามาปลูกเมื่อใดคาดว่าคงเข้ามาในระยะเดียวกันกับการเข้าสู่ศรีลังกาและฟิลิปปินส์คือประมาณ พ.ศ. 2329–2383 มันสำปะหลังเดิมเรียกกันว่ามันสำโรง มันไม้ ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียกว่ามันต้นเดียว ทางภาคใต้เรียกว่ามันเทศ (แต่เรียกมันเทศว่ามันหลา)

มันสำปะหลังเป็นพืชอาหารที่สำคัญเป็นอันดับ 5 ของโลกรองจากข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าว และมันฝรั่ง เป็นพืชอาหารที่สำคัญของประเทศในเขตร้อน โดยเฉพาะประเทศต่างๆ ในทวีปอัฟริกาและทวีปอเมริกาใต้ ในทวีปเอเชียประเทศอินโดนีเซียและอินเดียมีการบริโภคมันสำปะหลังกันเป็นจำนวนมาก ปริมาณผลผลิตที่ได้ในแต่ละปีร้อยละ 60 ใช้เป็นอาหารของมนุษย์ ร้อยละ 27.5 ใช้ทำเป็นอาหารสัตว์ และร้อยละ 12.5 ใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ

มันสำปะหลังเป็นพืชที่ทำรายได้ให้เกษตรกรมากเป็นอันดับที่ 4 รองจากยางพารา อ้อย และข้าว ผลผลิตมันสำปะหลัง ภายในประเทศนำไปใช้ทำมันเส้นและมันอัดเม็ดร้อยละ 45-50 ใช้แปรรูปเป็นแป้งร้อยละ 50-55 ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังออกมากที่สุดในโลก ประเทศไทยส่งผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังในรูปของมันอัดเม็ดไปขายมากที่สุดคือ ประเทศในกลุ่มประชาคมยุโรป (เนเธอร์แลนด์ สเปน เยอรมัน โปรตุเกส) เกาหลีใต้และญี่ปุ่น ส่วนในรูปของแป้งมันสำปะหลัง ประเทศญี่ปุ่นสั่งซื้อ มากที่สุด รองลงมาคือฮ่องกง สหรัฐอเมริกา มาเลเซีย สิงคโปร์ และได้หวัน

## 2.1.2 การเก็บเกี่ยว [2]

มันสำปะหลังเป็นพืชที่ไม่จำกัดอายุการเก็บเกี่ยวแต่ควรเก็บเกี่ยวเมื่ออายุครบ 8 เดือนขึ้นไป อายุเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมคือ 12 เดือน หลังจากเก็บเกี่ยวแล้วควรรีบส่งโรงงานโดยเร็ว ไม่ควรทิ้งเกิน 4 วันเพราะหัวมันจะเน่าเสีย

## 2.1.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปริมาณแป้ง [2]

1. พันธุ์มันสำปะหลังแต่ละพันธุ์มีเปอร์เซ็นต์เปอร์เซ็นต์แป้งในหัวไม่เท่ากัน พันธุ์ระยอง 90 มีเปอร์เซ็นต์เปอร์เซ็นต์แป้งที่สูงที่สุด รองลงมาคือพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 ระยอง 5 ระยอง 72 และระยอง 60 ตามลำดับ

2. ฤดู ช่วงฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-มีนาคม) เดือนพฤศจิกายน ความชื้นในดินเริ่มน้อยลงต้นมันสำปะหลังหยุดการเจริญเติบโต ทั้งใบ น้ำในหัวมีน้อยเปอร์เซ็นต์เปอร์เซ็นต์แป้งจึงสูงจนถึงฤดูฝน (เมษายน - ตุลาคม) เดือนเมษายน อากาศร้อนจัดและเริ่มมีฝน มันสำปะหลังใช้พลังงานมากเพื่อการหายใจ และสร้างใบใหม่แป้งที่สะสมไว้ในหัวจึงถูกนำไปใช้ทำให้เปอร์เซ็นต์เปอร์เซ็นต์แป้งลดลง

3. อายุ เมื่อเก็บเกี่ยวในเดือนเดียวกันอายุ 8-12 เดือน จะมีเปอร์เซ็นต์เปอร์เซ็นต์แป้งไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ถ้าต้นมันสำปะหลังมีอายุมากขึ้น 16-18 เดือน หัวจะมีขนาดใหญ่ บริเวณตรงกลางของหัวจะฝ่อหรือมีน้ำมาก เปอร์เซ็นต์เปอร์เซ็นต์แป้งในหัวจึงต่ำ

4. การตัดต้นก่อนเก็บเกี่ยว เมื่อมีการตัดต้นมันสำปะหลัง โดยยังไม่เก็บเกี่ยวมันสำปะหลังจะมีการแตกยอดและใบใหม่ จึงดึงแป้งที่สะสมในหัวมันไปใช้ทำให้เปอร์เซ็นต์เปอร์เซ็นต์แป้งลดลงอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะในราย 2 เดือนแรกหลังการตัดต้นไป ต่อเมื่อเข้าเดือนที่ 3 มีใบมากพอแล้วจะสังเคราะห์แสงสร้างแป้งไปสะสมที่หัว ได้อีกครั้งหนึ่ง

5. ระยะเวลาหลังเก็บเกี่ยว หลังจากขุดหัวมันสำปะหลังแล้วควรรีบนำส่งโรงงานทันทีในระยะ 2 วันแรก หัวมันยังไม่เน่าเสียและเปอร์เซ็นต์เปอร์เซ็นต์แป้งในหัวยังไม่ลดลงแต่ถ้าปล่อยทิ้งไว้เกิน 4 วัน หัวมันสำปะหลังจะเน่าเสียมากและเปอร์เซ็นต์เปอร์เซ็นต์แป้งในหัวจะลดลง

## 2.1.4 อุตสาหกรรมการแปรรูปมันสำปะหลัง

ข้อมูลได้จากการสอบถามผู้ประกอบการ โรงงาน แป้งมันแสงเพชร จำกัด 84 หมู่ที่ 5 ชัยภูมิ-นครสวรรค์ ตำบลหนองบัวระเหว อำเภอหนองบัวระเหว จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบ มีดังนี้

1. เครื่องร่อนทราย (Sieving and Washing) เป็นการชำระล้างทรายและหินที่ติดมากับมันสำปะหลัง ก่อนที่จะนำเข้าสู่กระบวนการผลิต โดยใช้รถแทรกเตอร์ขนถ่ายมันสำปะหลังลงบนสายพาน เพื่อเข้าสู่เครื่องร่อนทราย หัวมันสำปะหลังดังกล่าว จะถูกส่งผ่านกระบวนการร่อนเปลือก และล้างทำความสะอาด นอกจากนี้ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตจะถูกส่งไปยังระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน

2. เครื่องโม่ห้วมัน (Raspig) หลังจากมันสำปะหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้ว ห้วมันสำปะหลัง จะถูกนำเข้าสู่เครื่อง โม่ห้วมัน โดยมันสำปะหลังจะถูกสับเป็นชิ้นเล็กๆ ผสมรวมกับน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตก่อนที่ จะถูกส่งไปยังเครื่องแยกกาก

3. เครื่องแยกกากหยาบ (Coarse Extractor) เครื่องแยกกากจะทำการแยกกากมันสำปะหลังที่ "ไม่ได้" ใช้ใน กระบวนการผลิตออกจากน้ำแป้ง โดยน้ำแป้งที่ได้จากเครื่อง โม่ห้วมัน จะมาผ่านเครื่องแยกกากหยาบ 2 ครั้ง กาก หยาบที่ได้จากกระบวนการผลิตนี้จะถูกส่งต่อไปยังโรงอัดกาก

4. เครื่องแยกกากละเอียด (Fine Extractor) น้ำแป้งภายหลังจากผ่านเครื่องแยกกากหยาบ มาแล้วนั้น ยังมีเยื่อ ของมันสำปะหลังหรือกากอ่อนรวมอยู่ในน้ำแป้ง ซึ่งจะค้ำให้น้ำแป้งที่ได้มีคุณภาพไม่ดี ดังนั้นน้ำแป้งภายหลังจากผ่าน เครื่องแยกกากหยาบมาแล้วจะถูกนำมาผ่านเครื่องแยกกากละเอียดอีกครั้งหนึ่ง

5. น้ำแป้ง ที่ผ่านกระบวนการแยกกากละเอียด จะถูกนำมาปรับความเข้มข้น และความบริสุทธิ์ โดยการผ่าน เครื่องแยกน้ำ (Separator)

6. เครื่องสกัดแป้ง (Centrifugal) น้ำแป้งที่ได้จะไหลเข้าสู่เครื่องสกัดแป้ง ซึ่งจะทำการแปรสภาพน้ำแป้งเป็น แป้งหยาบ โดยแป้งหยาบจะถูกส่งเข้าไปใน 2 กระบวนการผลิตคือ การผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบ

7. เครื่องอบแห้ง (Flash Drying) แป้งหยาบจะถูกลำเลียงตามสายพานเข้าสู่เครื่องอบแห้ง เพื่อผ่านลมร้อน ทำ ใ้แป้งหยาบมีความชื้นลดลง จากนั้นก็จะทำให้เย็นลง แล้วส่งผ่านไปตามไซโลไปยังเครื่องร่อนแป้ง ซึ่งปัจจุบัน เครื่องอบแห้งใ้ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง

8. เครื่องร่อนแป้ง (Siever) แป้งที่ผ่านเครื่องอบแห้งมานั้น จะถูกนำมาผ่านเครื่องร่อนแป้ง เพื่อคัดขนาดเม็ด แป้ง ใ้ได้ขนาดตามที่ต้องการ

9. บรรจุก้อนแป้งที่ผลิตได้จะถูกนำมาบรรจุใส่ถุง



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบ

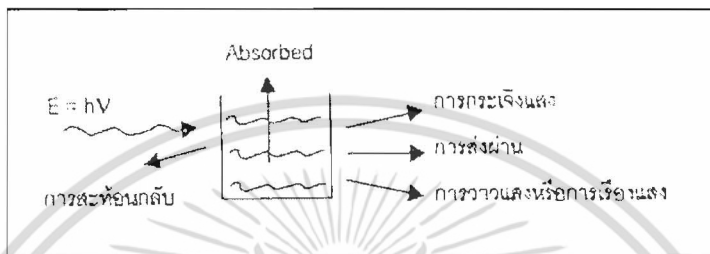
## 2.2 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (NIR Spectroscopy) [3]

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near infrared spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการอันตรกิริยา (Interaction) เมื่อคลื่นเนียร์อินฟราเรด (ความยาวคลื่นระหว่าง 700-2500 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 ปกติเป็นหลอดทังสเตนฮาโลเจน (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) เป็นวิธีที่ง่ายต่อการจัดวางตัวอย่างเมื่อแสงส่องไปยังวัตถุแล้วแพร่ลงไปบนเนื้อวัตถุบางส่วนแล้วสะท้อนกลับขึ้นมาสู่ตัวตรวจวัด บางทีเรียกว่า การสะท้อนแบบแพร่ (Diffused reflectance) โดยมีแหล่งแสงและตัวตรวจวัดอยู่ด้านล่าง ในปัจจุบันเนื่องจากมีความสะดวกในการใช้สายไฟเบอร์ออปติก การวัดสะท้อนจากวัตถุจึงเป็นแบบ Interactance ซึ่งมีสายไฟเบอร์ออปติกที่เป็นตัวนำคลื่นที่สะท้อนจากวัตถุกลับไปยังตัวตรวจวัด ซึ่งอยู่ใกล้กัน เรียกว่า Interactance-Reflectance ได้ วิธีส่องผ่านคลื่นไปในตัวอย่าง ก่อนที่จะรับแสงที่ผ่านออกมาไปวิเคราะห์ เรียกว่า วิธีส่องผ่าน (Transmittance) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กับของเหลว นอกจากนี้ยังสามารถใช้กับของแข็ง เช่น กรณีของผลไม้ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ FQA NIR GUN ซึ่งปกติเป็นแบบสะท้อนให้เป็นวิธีส่องผ่าน โดยใช้ Gold cup นอกจากนี้ยังมีการวัดแบบส่องผ่านสะท้อน (Transflectance) เป็นการส่งคลื่นผ่านตัวอย่าง ซึ่งโดยปกติเป็นของเหลวที่อยู่ในภาชนะที่ทำด้วยอะลูมิเนียมที่มีความลึกลงๆ เมื่อคลื่นกระทบพื้นอะลูมิเนียมจะสะท้อนผ่านตัวอย่างขึ้นมาเข้าสู่ตัวตรวจวัด

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

### 2.3 หลักการพื้นฐานของเครื่อง Near Infrared Spectroscopy [3]

หลักการของสเปกโทรสโกปี คือ เมื่อลำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ จะมีแสงบางส่วนที่จะถูกดูดกลืน (absorbed) บางส่วนผ่านทะลุออกไป (transmitted) บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ (reflected) บางส่วนเกิดการวาวแสงหรือการเรืองแสง (fluorescence or phosphorescence) และบางส่วนอาจเกิดการกระเจิงแสง (scattered) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2.2 การกระทำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารต่างๆ

สเปกโทรสโกปีมีกฎของการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กฎ คือ

1. กฎของแลมเบิร์ต(Lambert's law) กล่าวว่า “เมื่อแสงสีเดียว (monochromatic light) คือ แสงความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว (homogeneous) เป็นสัดส่วนของความเข้มแสงที่ถูกตัวกลางดูดกลืนไว้ โดยไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงเริ่มต้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน” (วิชย์ รวีตระกูลและคณะ, 2527 อ้างโดย อภิดุลย์แก้วกับทอง, 2555)
2. กฎของเบียร์ (Beer's law) กล่าวว่า “เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียวสัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางดูดกลืนไว้จะแปรโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น” (วิชย์ รวีตระกูลและคณะ, 2527 อ้างโดย อภิดุลย์แก้วกับทอง, 2555)

ในทางปฏิบัติปริมาณความเข้มข้นของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่แสงส่องผ่าน จึงต้องรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกันเรียกว่า กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon bc \quad 2.1$$

เนื่องจาก T (Transmittance) เท่ากับ

$$T = \frac{I}{I_0} \quad 2.2$$

เพราะฉะนั้น

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon bc = \log \frac{1}{T} \quad 2.3$$

- เมื่อ  $I$  = ความเข้มของแสงความยาวคลื่นเดียวที่ส่งผ่านออกมา  
 $\epsilon$  = สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง ปกติเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น และอุณหภูมิ  
 $I_0$  = ความเข้มของแสงก่อนผ่านตัวกลางเมื่อ  $b=0$   
 $b$  = ความหนาของตัวกลางในหน่วยเซนติเมตร  
 $c$  = ความเข้มข้นของสารในหน่วย โมล/ลิตร  
 $A$  = ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

โมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์กับช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันเนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างของโมเลกุลต่างกัน นอกจากนี้ในแต่ละโมเลกุลจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นมากกว่า 1 ช่วง เช่น โมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) ที่มีมากในผลิตภัณฑ์อาหาร มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น 4 ช่วง คือ 760, 970, 1450 และ 1940 นาโนเมตร ดังนั้นถ้าทำการทดสอบที่ช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวจะสามารถหาความสัมพันธ์ของน้ำภายในตัวอย่างได้

#### 2.4 การเลือกวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น (Selecting the Data Preprocessing Model Method) [3]

วิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้นเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่สำคัญ ที่มีจุดประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองของสเปกตรัมในทางที่อัลกอริธึม PLS สามารถให้ความสัมพันธ์ที่กระหว่างสเปกตรัมกับข้อมูลความเข้มข้น

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

การใช้งานเป็นการกำจัดปัญหาการขยับขึ้นของเบสไลน์ (Baseline Shift) เชิงเส้น สิ่งเหล่านี้เกิดจาก เช่น จากค่าที่แตกต่างกันของการขยายสัญญาณของดีเทคเตอร์ (Detector Amplification)

- การลบโดยเส้นตรง (Subtraction of a Straight Line): ในแต่ละช่วงความถี่ที่เลือกไว้ เส้นตรงเส้นหนึ่งจะถูกฟิตเส้นสเปกตรัมโดยใช้วิธีวิธี partial least squares (PLS) เส้นตรงเส้นนี้จะถูกลบออกจากสเปกตรัมดังกล่าว

การใช้งานกำจัดปัญหาความเอียงเชิงเส้นของการขยับขึ้นของเบสไลน์

- Vector Normalization: ขั้นแรกสเปกตรัมจะถูกหาค่ากลาง จากนั้นผลรวมของค่ายกกำลังสองของค่า  $Y$  ทั้งหมดจะถูกคำนวณ และสเปกตรัมใดๆจะถูกหารด้วยค่ารากที่สองของผลรวมนี้ สิ่งนี้เรียกว่า vector norm ของสเปกตรัมที่ได้จะเท่ากับ 1เสมอ

การใช้งานในหลักการสเปกตรัมจะประกอบด้วยสองส่วนของข้อมูล คือความสูงของแถบการดูดซับ และโครงสร้าง หลังจากการนอร์มัลไลเซชัน (Normalization) ข้อมูลความสูงจะหายไปมีเพียงโครงสร้างข้อมูลยังคงอยู่ การนอร์มัลไลเซชัน (Normalization)ถูกใช้เพื่อ เช่นการกำจัดผลกระทบของเส้นทางผ่านเชิงแสง (Optical Path Length) ที่แตกต่างกัน ในกรณีของการวัดแบบส่องผ่าน ความยาวของเส้นทางผ่านเชิงแสงทำให้ความสูงของสัญญาณเปลี่ยนแปลง แต่โครงสร้างยังเหมือนเดิม ในทำนองเดียวกันการวัดแบบสะท้อนแบบแพร่จะมีผลกระทบของการรบกวนเนื่องจากความหนาแน่นของวัสดุแตกต่างกันหรือขนาดอนุภาคแตกต่างกัน สิ่งเหล่านี้ก็จะลดลง

- Min-Max-Normalization (สำหรับสเปกตรัมการดูดซับคลื่น): สเปกตรัมจะถูกขยับเชิงเส้นเพื่อให้ค่า Y ที่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับศูนย์ แล้วสเปกตรัมจะถูกขยายเพื่อให้ค่า Y สูงสุดเท่ากับสองหน่วยของการดูดซับคลื่นการใช้งาน เทียบได้กับ Vector Normalization



ภาพที่ 2.3 NIR สเปกตรัมของมือคน; วัดแบบการสะท้อนแบบแพร่

- Multiplicative Scatter Correction ขั้นตอนแรก, สเปกตรัมเฉลี่ยคำนวณจากทุกๆสเปกตรัมของชุดข้อมูล калиเบรชัน แล้วแต่ละสเปกตรัม  $X(i)$  จะถูกแปรเปลี่ยนไปตาม

$$X(i)' = u + v \cdot X(i) \quad 2.4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การใช้งานวิธีการนี้มักจะใช้สำหรับการวัดแบบการสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse reflection)

- อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (First Derivative) คำนวณอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของสเปกตรัม

การใช้งานโดยการคำนวณอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่ง สัญญาณที่มีความชันจะถูกเน้นมากกว่าสัญญาณที่ค่อนข้างแบนราบ วิธีนี้จะถูกใช้เน้นลักษณะที่ชัดเจน แต่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่มีแถบการดูดซับคลื่นที่กว้าง การประยุกต์ใช้ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การประเมินแถบการดูดซับคลื่นที่กว้างนี้มักจะทำในเทคโนโลยี NIR โดยการคำนวณอนุพันธ์ โครงสร้างเหล่านี้จะมีรูปร่างที่สูงชันขึ้น ซึ่งสามารถได้รับการประเมินได้ง่ายขึ้น

เมื่อใช้อนุพันธ์เป็นการจัดการข้อมูลเบื้องต้นจะต้องคำนึงถึงว่าสัญญาณรบกวนจะถูกจัดการเช่นกัน สิ่งนี้จะซ้อนทับบนสเปกตรัมเป็นสิ่งรบกวนเพิ่มเติม และสามารถทำให้สัญญาณของตัวอย่างเลวลง

- อนุพันธ์ที่สอง (Second Derivative) คำนวณอนุพันธ์อันดับสองของสเปกตรัมนั้น

การใช้งานเมื่อเทียบกับอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง แม้โครงสร้างที่ราบเรียบมากๆสามารถประเมินได้ผลการรบกวนของสัญญาณรบกวน ซึ่งโดยทั่วไปมีมากจนทำให้สเปกตรัมถูกวิเคราะห์ในช่วงสเปกตรัมที่จำกัดมากๆ

ภาพที่ 2.3 แสดงให้เห็นอิทธิพลของวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้นแบบต่างๆต่อลักษณะของ NIR-สเปกตรัม (การวัดมือคนด้วยหัววัดไฟเบอร์ออปติก) สเปกตรัมเดิมแสดงให้เห็นการขจัด (Offset) เล็กน้อยของเบสไลน์ เช่นเดียวกับการขยับขึ้น (Drift) การขยับขึ้นนี้สามารถถูกกำจัดโดยการลบออกจากเส้นตรง (Subtraction of a Straight Line) (เส้นประ) และการขจัดถูกกำจัดโดยการ Min-Max Normalization (เส้นจุด) อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของเส้นสเปกตรัมเดิม (เส้นประ-จุด) ถูกขยายเพื่อแสดงให้ดูง่ายและขยับขึ้นสู่ตำแหน่งที่ค่าการดูดซับคลื่นสูง สามารถสังเกตเห็นโครงสร้างที่แหลมขึ้นมาได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมเดิม

วิธีที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับระบบที่จะวิเคราะห์ จากประสบการณ์แสดงให้เห็นว่าในหลายกรณีการลบด้วยเส้นตรงการรบกวนอะไรเช่นสเปกตรัม หรือการทำอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง ได้ผลที่ดีที่สุดในการคาลิเบรชัน ในบางกรณีการใช้วิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้น 2 วิธีรวมกันก็ได้ผลดีที่สุดเช่นกัน บ่อยครั้งที่แบบจำลองแบบต่างๆให้ผลได้ดีเท่าเทียมกันซึ่งโดยทั่วไปควรทดสอบดูหลายๆวิธีเปรียบเทียบกัน

## 2.5 การเลือกจำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสม (Selecting the Appropriate Number of Factors) [3]

ใน PLS regression ข้อมูลสเปกตรัมและข้อมูลความเข้มข้นจะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นรูปแบบของเมทริกซ์และลดลงเป็นแฟกเตอร์จำนวนไม่มาก จำนวนแฟกเตอร์ ในแบบจำลองเคโมเมตริกจะถูกเรียกว่า “rank” การหาจำนวน rank มีความสำคัญกับคุณภาพในการวิเคราะห์

การเลือกจำนวนแฟกเตอร์ที่น้อยเกินไปจะนำไปสู่การอธิบายที่ไม่เพียงพอเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงในข้อมูลสเปกตรัมและความเข้มข้น (“under fitting”) มีเพียงความสัมพันธ์เพียงเล็กน้อย ระหว่างสองชุดข้อมูลและผลจากการวิเคราะห์จากแบบจำลองนี้จะไม่เพียงพอ ถ้าเลือกแฟกเตอร์จำนวนมากเกินไปแบบจำลองจะพยายามที่จะคิดรวมแม้การเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดในชุดข้อมูลเช่นสัญญาณรบกวนในสเปกตรัม (“over fitting”) วิธีนี้ข้อมูลสเปกตรัมที่ไม่เกี่ยวข้องกันตัวอย่างจะถูกรวมอยู่ในแบบจำลอง แบบจำลองเหล่านี้จะมีความผิดพลาดของผลการวิเคราะห์ ดังนั้นทุกแบบจำลอง PLS มีจำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งรับประกันว่ามีความผิดพลาดน้อยที่สุดที่เป็นไปได้ในการวิเคราะห์

มีแนวทางหลายอย่างที่นำไปสู่การหาจำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลอง บางอย่างเป็นค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดของการทำนาย (RMSECV ของการพิสูจน์แบบไขว้หรือ RMSEP ของการพิสูจน์แบบชุดทดสอบ) ต้องมีค่าต่ำสุดจึงจะได้จำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสม ในทางตรงข้ามค่าของสัมประสิทธิ์ของการพิจารณา  $R^2$  มีค่าสูงสุด ดังนั้นจำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองสามารถหาได้อย่างง่ายดาย: ขั้นที่ 1 คำนวณค่า  $R^2$  และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของการทำนาย จากนั้นพล็อตค่าเหล่านี้โดยให้แกนนอนเป็นจำนวนแฟกเตอร์ จำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อมีค่าตามที่กล่าวมามีค่าที่เหมาะสม (น้อยสุด) และ / หรือจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีจำนวนแฟกเตอร์สูงขึ้น ถ้ามีจำนวนแฟกเตอร์ที่มากเกินไปได้ผลการทำนายที่ดีเหมือนกับที่มีจำนวนแฟกเตอร์น้อย จะแนะนำให้เลือกแบบจำลองที่มีจำนวนแฟกเตอร์น้อยสุด

ข้อควรระวังการพิสูจน์วิธีการเป็นไปได้เฉพาะการใช้สเปกตรัมของชุดตัวอย่างที่เป็นอิสระนั่นคือสเปกตรัมต้องไม่เป็นส่วนหนึ่งของชุดข้อมูลคาลิเบรชัน ซึ่งถ้าเป็นการพิสูจน์แบบไขว้ตัวอย่างทั้งหมดที่ถูกวัดแต่ละตัวอย่างจะถูกดึงออกจากชุดคาลิเบรชัน “leave-out spectra” ในกรณีของการพิสูจน์แบบชุดทดสอบตัวอย่างใหม่จะถูกวัดเพื่อเป็นชุดทดสอบ

## 2.6 การสร้างสมการโดยวิธี partial least square regression (PLS-Regression) [3]

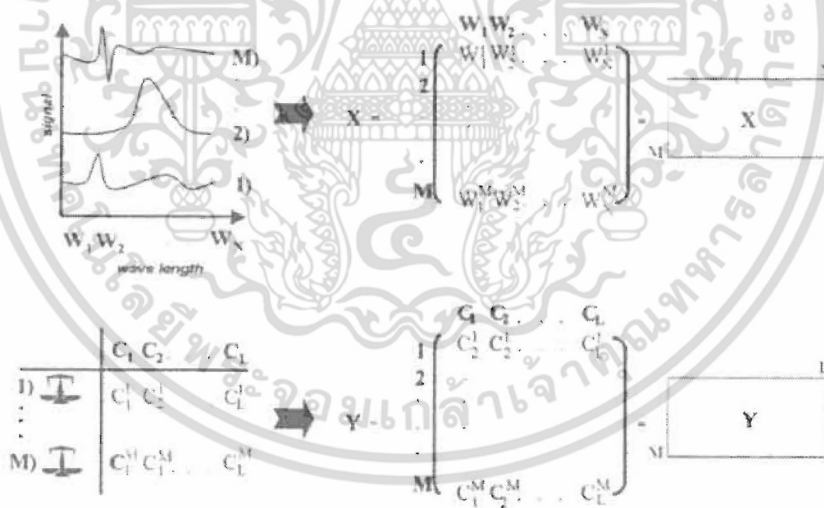
การเปรียบเทียบวิธีการทางเคโมเมตริกที่ใช้ในเคมีวิเคราะห์สามารถพบได้ในอัลกอริทึมของ PLS ถูกสร้างขึ้นเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้มากที่สุด ดังนั้นจะอธิบายวิธีนี้เท่านั้น เนื่องจากขอบเขตและความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ของคำอธิบายทั้งหมดจะไม่ได้แสดงไว้ให้อ่านเพิ่มเติม

เพื่อที่จะทำ PLS-Regression ของระบบใดๆ ข้อมูลของสเปกตรัมของสารต้องถูกเปรียบเทียบกับข้อมูลความเข้มข้นของสารนั้น การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งในโครงสร้างข้อมูลทั้งสองต้องได้รับการยอมรับและมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

สำหรับวัตถุประสงค์นี้จำเป็นต้องวัดตัวอย่างจำนวนมาก สำหรับการแสดงผลทางคณิตศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงทั้งในชุดข้อมูลทั้งสองจะต้องเขียนเมทริกซ์ของข้อมูล และ ไอเกนเวกเตอร์ ของข้อมูลเหล่านั้นจะถูกสร้างขึ้น ไอเกนเวกเตอร์เหล่านี้เรียกว่าแฟกเตอร์หรือองค์ประกอบเบื้องต้น ซึ่งสามารถใช้สำหรับการทำนายความเข้มข้นแทนสเปกตรัมดั้งเดิมเนื่องจากมันมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมดของระบบที่ศึกษา

การลดตัวแปรนี้มีประโยชน์อย่างชัดเจน ข้อมูลที่เกี่ยวข้องเชิงการวิเคราะห์จากชุดข้อมูลขนาดใหญ่ได้ถูกบีบอัดเป็นแฟกเตอร์ซึ่งจะถูกใช้สำหรับการคาลิเบรชัน

ในกรณีของคาลิเบรชัน PLS ไอเกนเวกเตอร์จะถูกเก็บโดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย แฟกเตอร์ แรกบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงหลักของสเปกตรัม มีความสำคัญที่มากที่สุดสำหรับแบบจำลองคาลิเบรชันและเมื่อจำนวนแฟกเตอร์เพิ่มขึ้นแม้แต่การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในโครงสร้างข้อมูลก็จะถูกบ่งชี้ ซึ่งมีผลสำคัญที่ตามมาของการประเมินสเปกตรัม นั่นคือจำนวนแฟกเตอร์ที่น้อยลงส่วนใหญ่จะบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของโครงสร้างของสเปกตรัม ขณะที่จำนวนแฟกเตอร์ที่สูงขึ้นส่วนใหญ่จะแสดงถึงส่วนที่เป็นสัญญาณรบกวนของสเปกตรัม



ภาพที่ 2.4 ข้อมูลสเปกตรัมและความเข้มข้นในรูปแบบเมทริกซ์

ในตัวอย่างนี้มีตัวอย่างคาลิเบรชัน  $M$  ตัวอย่างที่วัดและ  $N$  ในขั้นตอนที่สอง  $N$  ความยาวคลื่นทั้งหมดของผลสเปกตรัมจะถูกเขียนในแถว  $(M, N)$  เมทริกซ์ เมทริกซ์นี้จะเทียบเท่ากับข้อมูลสเปกตรัมเมทริกซ์  $X$ . ในทางเดียวกันค่าองค์ประกอบทั้งหมด  $L$  จะเขียนลงไปใน  $(M, L)$  เมทริกซ์ของข้อมูลความเข้มข้น

การเลือกจำนวนแฟกเตอร์ที่เหมาะสมเป็นความสำคัญกลางสำหรับคุณภาพของแบบจำลอง PLS ถ้ามีจำนวนแฟกเตอร์น้อยเกินไป โครงสร้างสเปกตรัมจะไม่ถูกรับรู้เพียงพอ regression ที่เกี่ยวข้องจึงไม่สามารถนำไปสู่การผลการวิเคราะห์ที่น่าพอใจ นั่นคือแบบจำลอง “underfitting”

ถ้าจำนวนแฟกเตอร์มีมาก การวิเคราะห์ก็จะไม่ดี เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนเชิงสเปกตรัมหลายส่วนมากเกินไป (Overfitting)

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

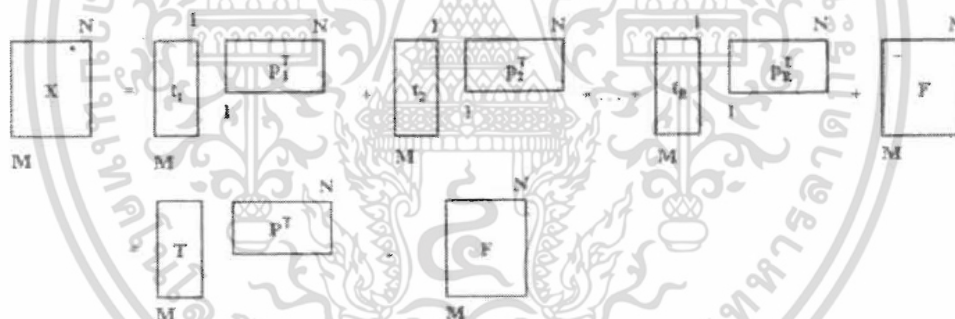
ข้อมูลสเปกตรัม

$$X = t_1 p_1^T + t_2 p_2^T + t_3 p_3^T + \dots + t_R p_R^T + F \quad 2.6$$

ข้อมูลความเข้มข้น

$$Y = t_1 q_1^T + t_2 q_2^T + t_3 q_3^T + \dots + t_R q_R^T + G \quad 2.7$$

ในทุกกรณี score และ loading จะแสดงเป็น vector



ภาพที่ 2.5 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 matrices) ของ ข้อมูลสเปกตรัมและข้อมูลความเข้มข้นตามลำดับ ค่าเหล่านี้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของข้อมูล ซึ่งไม่ได้คำนึงถึงในการสร้างแฟกเตอร์ (factorization)

โดยทั่วไป จำนวนสำหรับค่าการดูดซับที่ได้จากการวัดจะมากกว่าตัวเลขขององค์ประกอบที่แสดงให้เห็น ดังนั้นระบบนี้คือ “over-determined” และจึงสามารถไม่เพียงแต่จะสร้างความสัมพันธ์กับจุดของข้อมูลสเปกตรัมจุดเดียว (เช่น จุดสูงสุดของการคาลิเบรชันแบบตัวแปรเดียว) แต่ยังมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างข้อมูลสเปกตรัมทั้งหมด ข้อมูลชุดคาลิเบรชันด้วยวิธีนี้จะมีค่าข้อมูลที่ได้มากกว่าการคาลิเบรชันด้วยวิธีตัวแปรเดียวมาก นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ที่จะหาตัวแปรที่ผิดปกติในระหว่างการวิเคราะห์และสามารถตัดสินใจได้ว่า

องค์ประกอบของสิ่งรบกวนที่ไม่รู้ค่า ซึ่งไม่มีความสัมพันธ์กับชุดของข้อมูล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมตรงข้ามกับการคาลิเบรชันแบบตัวแปรเดียว เป็นไปได้ที่จะใช้ข้อมูลเชิงสเปกตรัมของด้านข้างของพีค ซึ่งสามารถวิเคราะห์สเปกตรัมได้โดยโครงสร้างของสเปกตรัมเอง ด้วยเหตุนี้แถบการดูดซับที่ซ้อนทับกัน (overlapping bands) สามารถที่จะแยกออกจากกันได้ภายในสเปกตรัม ตรวจจับที่มีความแปรปรวนในรูปร่างของสเปกตรัมน้อย ในทำนองเดียวกันสามารถรับรู้ถึงโครงสร้างของสเปกตรัมบริเวณที่มีสัญญาณรบกวนมากได้ ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงการทำนายความเข้มข้นสารให้แม่นยำ

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

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

อัลกอริทึมที่มีชื่อว่า PLS1 เพียงแค่ นำค่าความเข้มข้นของเพียงหนึ่งองค์ประกอบทางเคมีมาพิจารณา ข้อมูลอื่นๆทั้งหมดจะถูกตีความว่าเป็นสิ่งรบกวน นั่นคือ Y-เมทริกซ์ของข้อมูลความเข้มข้นเป็นเวกเตอร์เดียว ส่วนในอัลกอริทึม PLS2 ความเข้มข้นขององค์ประกอบทุกอย่างในระบบจะถูกนำมาพิจารณาในการคาลิเบรชัน สำหรับการทำนายตัวอย่างใหม่แบบจำลองนี้ นำไปสู่การวิเคราะห์องค์ประกอบทุกอย่างในเวลาเดียวกัน ตรงกันข้ามกับการคาลิเบรชันแบบ PLS1 ข้อมูลทั้งหมดของเมทริกซ์ความเข้มข้นจะถูกนำมาสัมพันธ์กันกับข้อมูลสเปกตรัมเมทริกซ์โดยทั่วไปแล้ว การทำนายแบบ PLS2 จะให้ผลลัพธ์ที่เร็วกว่าการทำนายแบบ PLS1 จากเหตุผลดังกล่าวโดยทั่วไปจึงแนะนำให้ใช้อัลกอริทึม PLS1 ในการวิเคราะห์ระบบที่มีหลายองค์ประกอบ อัลกอริทึมแบบนี้ก็สามารถถูกนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างประสบความสำเร็จในทุกองค์ประกอบ ดังนั้นแบบจำลองที่สำหรับทุกองค์ประกอบที่ต้องการจะถูกสร้างขึ้นเช่นเดียวกับแบบอัลกอริทึม PLS2

## 2.7 ค่าทางสถิติที่ใช้ในการพิจารณาการสร้างความสมการ ปานมนัส ศิริสมบุญ. 2556. [3]

### 2.7.1 สัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R<sup>2</sup>)

แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวนในข้อมูล Y ค่าของ R<sup>2</sup> จะเป็นบวกเสมอเช่น ถ้า R = 0.97 แล้ว R<sup>2</sup> = 0.941 หมายความว่า 94.1% ของความแปรปรวนในข้อมูล X และ 5.9% ของความแปรปรวนในข้อมูล X เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่น เช่นการเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดลองอ้างอิง และอื่นๆ ค่า R<sup>2</sup> เป็นบวกเสมอโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ R ในทางปฏิบัติ R<sup>2</sup> ให้ข้อมูลมากกว่า R และใช้กันมากกว่า R การแปลความหมายของค่า R และ R<sup>2</sup> แสดงดังตารางที่ 1 R<sup>2</sup> คำนวณได้จาก

$$R^2 = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{meas} - Y_i^{pred})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{meas} - \bar{Y})^2} \right] \times 100 \quad 2.8$$

เมื่อ  $Y_i^{meas}$  คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี

$Y_i^{pred}$  คือ ค่าที่ได้จากการทำนายด้วย NIRS

n คือ จำนวนตัวอย่าง

ตารางที่ 2.1 การแปลความหมายของค่า R และ R<sup>2</sup> (Williams, 2007)

R	R <sup>2</sup>	ความหมาย
ถึง +/-0.5	ถึง 0.25	ไม่สามารถใช้ใน NIR calibration
+/-0.51-0.70	0.26-0.49	เป็นความสัมพันธ์ที่ไม่ดีควรหาเหตุผล
+/-0.71-0.80	0.50-0.64	OK สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) อย่างหยาบๆ
+/-0.81-0.90	0.66-0.81	OK สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประมาณค่าอย่างหยาบๆ
+/-0.91-0.95	0.83-0.90	ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่รวมถึงการวิจัย
+/-0.96-0.98	0.92-0.96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่รวมถึงการประกันคุณภาพ
+/-0.99+	0.98+	ดีเยี่ยมใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้

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

Cross-validation สามารถใช้ตัวอย่างชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อการทำการพิสูจน์แบบจำลอง (Validation) สิ่งนี้ทำโดยชักตัวอย่างออกหนึ่งตัวอย่างหรือกลุ่มของหลายตัวอย่างจากชุดสร้างแบบจำลองและสร้างแบบจำลองด้วยตัวอย่างที่เหลืออยู่แล้วทำนายตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไปและบันทึกค่าความผิดพลาดแล้วนำตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไปนั้นกลับมาแล้วชักตัวอย่างอื่นออกไปและทำซ้ำกระบวนการจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองและทำนายจะไม่มีตัวอย่างที่ถูกทำนายถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองซึ่งได้ใช้ในการทำนายถ้าเอาออกเพียงทีละ 1 ตัวอย่างจะเรียกว่า “Full” หรือ “One-out” cross-validation ถ้านำชุดตัวอย่าง (จำนวนหลายตัวอย่าง) ออกจะเรียกว่า “Segmented” cross-validation ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าที่ถูกทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุดสร้างแบบจำลองคือ RMSECV วิธีพิสูจน์นี้เหมาะที่จะใช้กับข้อมูลที่มีจำนวนตัวอย่างน้อยๆ เช่น น้อยกว่า 100 ตัวอย่าง RMSECV คำนวณได้จากสมการ

$$RMSECV = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{meas} - Y_i^{pred})^2} \quad 2.9$$

### 2.7.3 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) กับอัตราส่วนของค่าความผิดพลาดมาตรฐานการทำนาย (SEP) ของข้อมูลของค่าอ้างอิงของชุดทำนาย ค่า SEP ควรต่ำกว่า SD มากๆ ซึ่งอัตราส่วนควรเท่ากับ 5 หรือมากกว่าบางกรณีตัวอย่างมีความสม่ำเสมอมากค่า SD จึงไม่สูงซึ่ง RPD อาจจะไม่สูงดังนั้น RPD เท่ากับ 2.5-3.0 ก็อาจแสดงถึงการวิเคราะห์ที่มีแม่นยำถ้า 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

## 2.7.4 ความผิดพลาด (Bias)

เมื่อทำนายค่าตัวแปรที่ต้องการของข้อมูลในชุดตัวอย่างทดสอบแบบจำลอง (Validation set) ค่าBias หมายถึงความแตกต่างระหว่างค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงและค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและเป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลอง (Calibration model) ในโลกความเป็นจริงของทางการค้าและอุตสาหกรรมBias เป็นหนึ่งในสิ่งที่สำคัญมาก ในทางสถิติBias สามารถเกิดขึ้นได้แม้เมื่อค่าสถิติสัมประสิทธิ์ ความสัมพันธ์และSEP ที่แสดงว่าแบบจำลอง นั้นดีเยี่ยม

## 2.8 ประโยชน์ของเทคนิค NIR

Osborne et al. (1993) [4] อ้างโดย อภิญญา แก้วกับทอง, (2555) ได้กล่าวว่าเครื่องมือแต่ละประเภทต่างก็มีข้อจำกัดในการใช้งาน แต่เครื่อง NIR มีประโยชน์ และข้อดีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ทางเคมี หรือการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น สำหรับการนำเครื่อง NIR ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมีประโยชน์มากมาย เช่น

1. ง่ายต่อการเตรียมตัวอย่าง ไม่จำเป็นต้องชั่งตัวอย่างก่อนนำมาวัดค่า
2. ใช้เวลารวดเร็วในการวัด
3. การตรวจสอบเป็นแบบไม่ทำลาย ทำให้ตัวอย่างที่นำมาตรวจสอบสามารถจำหน่าย ส่งออก หรือบริโภคต่อได้ เป็นการประหยัดต้นทุนของผลิตภัณฑ์อีกทางหนึ่ง
4. ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ลดต้นทุนในการดูแลรักษาสภาพแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี
5. สะดวกต่อการใช้งาน เนื่องจากในการปฏิบัติไม่จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีประสบการณ์ หรือต้องได้รับการฝึกฝน โดยเฉพาะ สามารถปฏิบัติตามคู่มือการใช้งานได้ทันที
6. ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี และเครื่องแก้ว ทำให้สามารถลดต้นทุนในเรื่องสารเคมี และอุปกรณ์เครื่องแก้ว
7. เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับนำไปควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิตซึ่งเป็นประโยชน์เช่นเดียวกับอุตสาหกรรมอื่นที่สามารถประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ได้

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Vesela et al., 2007 ได้ทดลองการหาปริมาณ ไขมัน ในโตรเจนและความชื้นในผงโกโก้โดยใช้การรวมกันของคลื่น Near infrared (NIR) และ Fourier-transform infrared (FTIR) ที่ช่วงคลื่นสเปกตรัม (1100-2500 nm และ 4000-600  $\text{cm}^{-1}$ ) ผงโกโก้ 100 ตัวอย่างถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองในการวัดไขมัน ในโตรเจน และความชื้น ตัวอย่างมีองค์ประกอบต่างๆโดยเฉลี่ยดังนี้ ไขมัน 13.51% ในโตรเจน 3.77% และความชื้น 3.98% ปริมาณไขมันอยู่

ในช่วง 2.42-22.00%, ไนโตรเจน 0.88-4.48% และความชื้น 1.60-7.80% แบบจำลองโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (near-infrared spectroscopy, NIRS) แสดงสมรรถนะ ดังนี้ Relative root mean square error of cross-validation (RMSECV) 7.0% ( $R^2 = 0.96$ ) สำหรับไขมัน, 1.7% ( $R^2 = 0.98$ ) สำหรับไนโตรเจน, และ 5.2% ( $R^2 = 0.94$ ) สำหรับความชื้น สำหรับ FTIR, RMSECV 10.4% ( $R^2 = 0.94$ ) สำหรับไขมัน และ 3.9% ( $R^2 = 0.95$ ) สำหรับไนโตรเจน อย่างไรก็ตามสำหรับความชื้น ไม่ได้สร้างแบบจำลอง บทความนี้สรุปว่า NIRS เป็นขั้นตอนที่แนะนำให้ใช้หาปริมาณไขมัน ไนโตรเจน และความชื้นในผงโกโก้

ในประเทศญี่ปุ่น Kawamura et al., 2003 [6] ศึกษาวิธีการอัตโนมัติในการวัดความชื้นของข้าวเปลือกชื้นและข้าวกล้องชื้น โดยใช้สเปกตรัมแบบ near-infrared (NIR) transmission การสร้างแบบจำลอง Calibration นั้นถูกพัฒนาขึ้นจากสเปกตรัมเดิมในช่วงความยาวคลื่น 825-1075 nm และค่าความชื้นที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองแบบ Partial Least Square (PLS) ได้ coefficients of determination ( $R^2$ ) ของชุดพิสูจน์แบบจำลอง 0.96 และ 0.97 สำหรับข้าวเปลือกชื้นและข้าวกล้องชื้น ตามลำดับ standard errors of prediction (SEP) 0.70 และ 0.50% ผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่า NIRS สามารถนำมาใช้สำหรับการหาความชื้นของข้าวเปลือกชื้นและข้าวกล้องชื้นได้

Miralbes, 2004 [7] วิจัยการใช้เทคโนโลยี NIRS วัดความชื้นของแป้งสาลี โดยนำตัวอย่างแป้งสาลีจากโรงสีต่างๆกันมาวัดสเปกตรัมแบบ NIR transmittance ที่ช่วงคลื่น 850-1048 nm ทุกๆ 2 nm ค่าจากแบบจำลองให้ค่าทำนายค่าความชื้นค่อนข้างดี โดยค่า  $R^2=0.99$  RMSECV=0.13% SEP=0.15 และ RPD (Ratio between standard deviation of prediction set to SEP) = 4.9 ทั้งนี้สรุปได้ว่าการทดสอบตัวอย่างแป้งโดยการส่งผ่าน NIR สามารถให้ข้อมูลทั้งทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของตัวอย่างแป้ง มีศักยภาพที่ดีสำหรับการควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรม

Camps et al., 2011 [8] ได้พัฒนา near-infrared spectroscopy (NIRS) เพื่อตรวจสอบ ความชื้นในแป้งแห้งของใบ Artemisia annua (A. annua) โดยมีตัวอย่าง 60 ตัวอย่างใช้สำหรับสร้างแบบจำลองแบบ PLS และ อีก 40 ตัวอย่างสำหรับพิสูจน์แบบจำลอง แบบจำลองความชื้นทำนายได้แม่นยำมีค่า  $R = 0.99$  RMSECV และ RMSEP 0.8% และ 1.4% ตามลำดับ

Hayashi et al., 2013 [9] ศึกษาการประเมินปริมาณน้ำระหว่างการทำให้แห้งของเมล็ดโรโบฟลาวินโดยวิธีฟลูอิดซ์เบด โดย near infrared (NIR) ที่ช่วงคลื่น 1800-2000 nm และประมาณอัตราการอบแห้งคงที่ พบว่าแบบจำลอง PLS regression ให้ค่า  $R^2$  และ RMSEP เท่ากับ 0.806 และ 1.0549 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้สามารถนำมาใช้ควบคุมกระบวนการได้

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง

##### 3.1.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับความเป็นไปได้ในการตรวจสอบความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (กรณีทดลองในห้องปฏิบัติการ)

ขั้นตอนดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลองเพื่อการวัดความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในห้องปฏิบัติการ

แป้งมันสำปะหลังจากวันที่การผลิตที่ต่างกันไป (11, 12, 13 และ 14 ธันวาคม 2012) ถูกเก็บรวบรวมจากโรงงาน แป้งมันแสงเพชรจำกัดในอำเภอหนองบัวระเหว จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย กลุ่มตัวอย่างที่ถูกนำไปยังศูนย์วิจัยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตัวอย่างแป้งมันสำปะหลัง (25 กรัม) มีการปรับระดับความชื้นให้แตกต่างกันดังนี้ (12.5, 15.75, 19, 22.25, 25.5, 28.75, 32, 35.25, 38.5, 41.75 และ 45%wb) โดยผสมกับน้ำกลั่นปริมาณ  $Q$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.1) ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ เก็บในตู้เย็นเป็นเวลา 24 ชม. หลังจากนั้นนำออกจากตู้เย็น วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง  $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$  ประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่ผสมกับน้ำกลั่นแล้วลงในจานแก้ว (Petri dish) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm เพื่อนำไปสแกนด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด ทั้งนี้ใช้เครื่องชั่งไฟฟ้า (BX300, Shimadzu, Japan ความละเอียด 0.001 g)

$$Q = \left( \frac{W_i(mf - m_i)}{100 - mf} \right) \quad 3.1$$

- เมื่อ  $Q$  = ปริมาณน้ำที่ต้องการ  
 $W_i$  = น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (g)  
 $m_i$  = ความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง (%wb)  
 $mf$  = ความชื้นสุดท้ายของตัวอย่าง (%wb)

### 3.1.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (กรณีตัวอย่างที่โรงงาน)

ขั้นตอนดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการทดลองเพื่อการวัดความชื้น ของแป้งมันสำปะหลังหมาดด้วยเนียร์อินฟราเรดสโกปีในโรงงาน การเก็บตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังจากในสายการผลิตที่ช่วงแป้งหมาดบริเวณสายพานก่อนเข้าเตาอบและบริเวณปล่องหลังจาก cyclone separator ในโรงงาน แป้งมันแสงเพชรจำกัดในอำเภอหนองบัวระเหว จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย โดยบรรจุใส่กล่องพลาสติก แล้วนำไปยังห้องปฏิบัติการของโรงงาน ที่อุณหภูมิห้อง  $25 \pm 1$  °C จากนั้นนำตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังใส่ลงในจานแก้ว (Petri dish) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm เพื่อนำไปสแกนด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด



ภาพที่ 3.3 แป้งมันสำปะหลังที่ถูกเก็บสำหรับการทดลอง

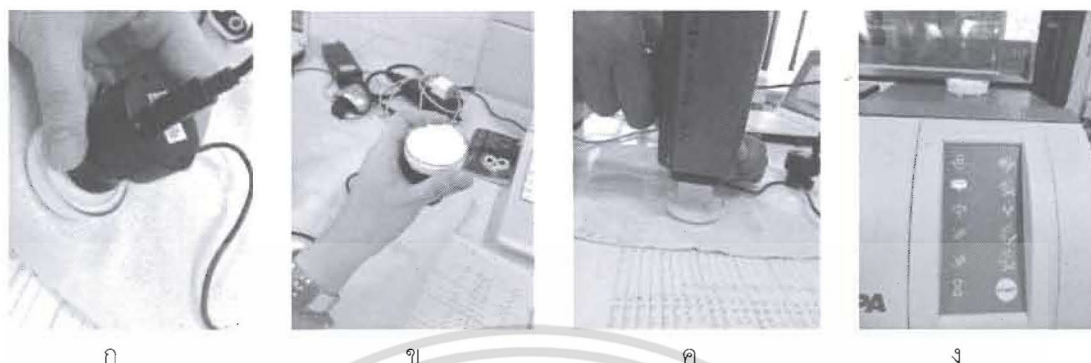
### 3.2 การสแกนด้วยคลื่นเนียร์อินฟราเรด

#### อุปกรณ์

1. เครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany)
2. เครื่อง MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA)
3. เครื่อง FQA-NIR Gun (Fantec, Japan)
4. จานแก้ว (Petri dish) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm

#### วิธีการทดลอง

วัดสเปกตรัมโดยใช้เครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) แบบ reflection mode ที่ช่วงความยาวคลื่น  $12,500-4,000\text{ cm}^{-1}$  ( $800-2500\text{ nm}$ ) ความละเอียดการสแกน  $16\text{ cm}^{-1}$  โดยสแกนผ่านแก้ว ใช้ทองเป็นวัสดุอ้างอิง และเครื่อง MicroNIR spectrometer (JDSU, USA) แบบ reflection mode ที่ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง  $1150-2150\text{ nm}$  ทุกๆ  $7\text{ nm}$  Integrating time  $100\text{ }\mu\text{s}$  (โดยสแกนผ่านแก้ว และสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรง) และเครื่อง FQA-NIR Gun (Fantec, Japan) แบบ interaction mode ที่ช่วงความยาวคลื่น  $600-1100\text{ nm}$  ความละเอียด  $2\text{ nm}$  integration time  $10\text{ ms}$  ใช้ Polystyrene เป็นวัสดุอ้างอิง ที่ระยะ  $5\text{ mm}$  เหนือจากแป้งสแกนที่ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างการสแกนแป้งมันสำปะหลัง ก. MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง ข. MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้ว ค. FQA-NIR Gun ง. FT-NIR spectrometer

### 3.3 การวัดความชื้น

#### อุปกรณ์

1. เครื่อง Infrared Moisture Analyzer (HB43-S Halogen, Mettler Toledo, USA)
2. ถาดอลูมิเนียม (Aluminum sample pan) สำหรับใช้กับเครื่อง Infrared Moisture Analyzer.

#### วิธีการทดลอง

นำตัวอย่างที่ผ่านการสแกนแล้ว 5 g มาวิเคราะห์ความชื้นด้วยเครื่อง moisture analyzer (HB43-S Halogen, Mettler Toledo, Switzerland) ที่อุณหภูมิ 130°C จนน้ำหนักคงที่

### 3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างที่อยู่นอกกลุ่ม

ในการวิเคราะห์ค่าความชื้น จากการทดลองจำเป็นต้องตัดค่าบางส่วนที่มีค่านอกกลุ่ม (Outlier) ออกจากผลการทดลอง ซึ่งอาจเกิดจากตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการทดลอง ซึ่งตัวอย่างที่ผ่านการตรวจสอบค่าด้วยสมการที่ 3.1 แล้วนั้นจะต้องมีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 3$  หากมีค่าอยู่นอกช่วงดังกล่าวนี้ต้องตัดออกจากกลุ่มเพราะเกิดจากตัวอย่างผิดปกติ หรือเกิดจากความผิดพลาดในกระบวนการทดลอง

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

เมื่อ  $X_i$  คือค่าที่หาได้จากวิธีมาตรฐานแต่ละตัวอย่าง

$\bar{X}$  คือค่าเฉลี่ย

$SD$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง

### 3.5 การวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม

การวิเคราะห์สเปกตรัมดั้งเดิม (Raw spectrum) จากวัดค่าการดูดซับคลื่นในช่วงจำนวนคลื่นระหว่าง 12500-4000  $\text{cm}^{-1}$  (800-2500 nm) ด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer เครื่อง MicroNIR Spectrometer (JDSU) (1150-2150 nm) และเครื่อง FQA-NIR Gun (Fruit Quality Analyzer) (600-1100 nm) ของแป้งมันสำปะหลังหมาด จะวิเคราะห์จากแถบการดูดซับคลื่นที่ปรากฏในสเปกตรัม โดยพิจารณาให้สอดคล้องกับองค์ประกอบที่มีในแป้งมันสำปะหลังหมาด

### 3.6 การสร้างสมการในการทำนาย

#### 3.6.1 การสร้างสมการการทำนายสำหรับข้อมูลชุดห้องปฏิบัติการ

การสร้างสมการทำนายทำโดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง (optical data) กับสมบัติ ความชื้น โดยวิธี Partial least square regression (PLSR)

ใช้โปรแกรม OPUS version 7.0.129 ใช้กับข้อมูลที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer 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

และ โปรแกรม The Unscrambler 9.8 ใช้กับข้อมูลที่สแกนด้วยเครื่อง MicroNIR Spectrometer (JDSU) และเครื่อง FQA-NIR Gun (Fruit Quality Analyzer) ทั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น

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), ที่จำนวนคลื่นต่างๆ และยังบันทึกค่า Regression coefficient และ X-loading weight ที่จำนวนคลื่นต่างๆ หรือ ความยาวคลื่นต่างๆ

#### 3.6.2 การสร้างสมการการทำนายสำหรับข้อมูลชุดโรงงาน

การสร้างสมการทำนายทำโดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง (optical data) กับสมบัติ ความชื้น โดยวิธี Partial least square regression (PLSR)

ใช้โปรแกรม OPUS version 7.0.129 ใช้กับข้อมูลที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer 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

สำหรับโปรแกรม The Unscrambler 9.8 ใช้กับข้อมูลที่สแกนด้วยเครื่อง MicroNIR Spectrometer (JDSU) และเครื่อง FQA-NIR Gun (Fruit Quality Analyzer) ทั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นหรือที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นโดยวิธี Savitzky-Golay Smoothing (11 Points), Normalization, Baseline Corrections, First Derivatives (11 Points), Second Derivatives (11 Points), Multiplicative Scatter Correction (MSC), Standard Normal Variate (SNV) และ Detrending

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), ที่จำนวนคลื่นต่างๆ และยังบันทึกค่า Regression coefficient และ X-loading weight ที่จำนวนคลื่นต่างๆ หรือ ความยาวคลื่นต่างๆ

### 3.6.3 การสร้างสมการการทำนายสำหรับข้อมูลชุดห้องปฏิบัติการและโรงงาน

การสร้างสมการทำนายทำโดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง (optical data) กับสมบัติ ความชื้น โดยวิธี Partial least square regression (PLSR)

ใช้โปรแกรม OPUS version 7.0.129 ใช้กับเครื่อง FT-NIR Spectrometer ทั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นหรือที่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น โดยวิธี 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

สำหรับโปรแกรม The Unscrambler 9.8 ใช้กับเครื่อง MicroNIR Spectrometer (JDSU) และเครื่อง FQA-NIR Gun (Fruit Quality Analyzer) ทั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น

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), ที่จำนวนคลื่นต่างๆ และยังบันทึกค่า Regression coefficient และ X-loading weight ที่จำนวนคลื่นต่างๆ หรือ ความยาวคลื่นต่างๆ

### 3.6.4 การสร้างสมการการทำนายสำหรับข้อมูลชุดแป็งแห้งและชุดแป็งหมาดจากข้อมูลของโรงงาน

การสร้างสมการทำนายทำโดยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงแสง (optical data) กับสมบัติ ความชื้น โดยวิธี Partial least square regression (PLSR)

ใช้โปรแกรม OPUS version 7.0.129 ใช้กับข้อมูลที่สแกนด้วยเครื่อง FT-NIR Spectrometer 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 Test set เมื่อได้แบบจำลองจะคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่า root mean square error of estimation (RMSEE) ที่ต่ำที่สุด จากนั้นจะบันทึกค่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination;  $R^2$ ), ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองของการพิสูจน์ (root mean squared error of prediction; RMSEP), ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (bias) และ อัตราส่วนระหว่างค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ratio of standard error of validation to standard deviation; RPD) และยังบันทึกค่า Regression coefficient และ X-loading weight ที่จำนวนคลื่นต่างๆ หรือ ความยาวคลื่นต่างๆ

สำหรับโปรแกรม The Unscrambler 9.8 ใช้กับเครื่อง MicroNIR Spectrometer (JDSU) และเครื่อง FQA-NIR Gun (Fruit Quality Analyzer) ทั้งนี้ใช้ข้อมูลเชิงแสง (สเปกตรัม) ที่ไม่มีการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น การพิสูจน์แบบจำลอง ใช้วิธี 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), ที่จำนวนคลื่นต่างๆ และยังบันทึกค่า Regression coefficient และ X-loading weight ที่จำนวนคลื่นต่างๆ หรือ ความยาวคลื่นต่างๆ

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

### 4.1 ผลการวิเคราะห์ความชื้น

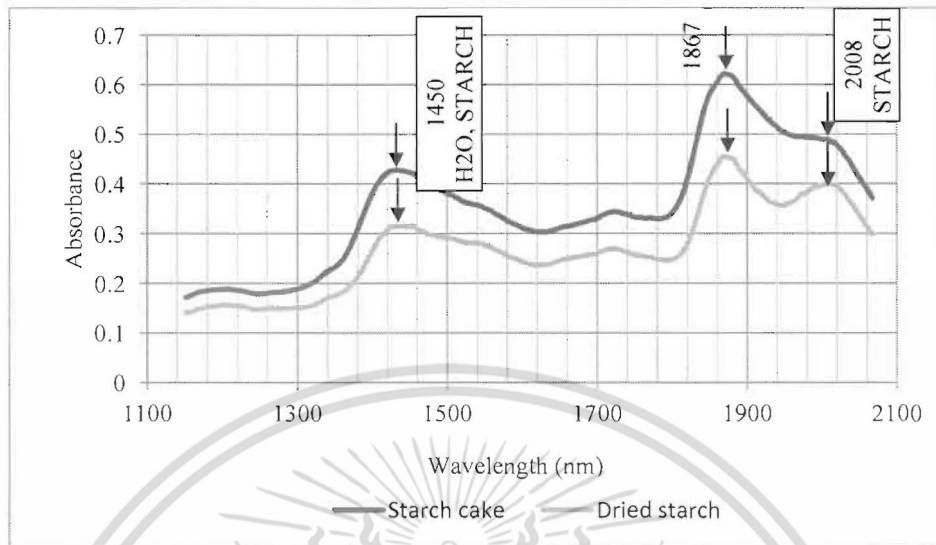
ตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงค่าทางสถิติของปริมาณความชื้น (%wb) ของแป้งมันสำปะหลังที่วัดโดยวิธีมาตรฐานจากการทดลองเป็นข้อมูลของ ห้องปฏิบัติการ, โรงงาน, แป้งแห้งในส่วนของโรงงาน, แป้งหมาดในส่วนของโรงงาน และ ห้องปฏิบัติการรวมกับโรงงาน จากการตรวจสอบค่านอกลู่มพบว่าไม่มีค่านอกลู่ม

ตารางที่ 4.1 ค่าทางสถิติของปริมาณความชื้น (%wb) ของแป้งมันสำปะหลังที่วัดโดยวิธีมาตรฐาน

ชุดข้อมูล	No. of sample	Calibration set				No. of sample	Prediction set			
		Max	Min	Mean	SD		Max	Min	Mean	SD
ห้องปฏิบัติการ	88	44.28	11.64	27.95	10.13					
โรงงาน	128	36.05	12.26	22.59	9.64					
แป้งแห้ง (โรงงาน)	64	13.90	12.26	13.05	0.43	32	13.9	11.92	12.88	0.42
แป้งหมาด (โรงงาน)	64	36.05	28.18	32.14	1.70	31	38.07	30.27	32.44	4.48
ห้องปฏิบัติการ และโรงงาน	216	44.28	11.64	24.77	10.18					

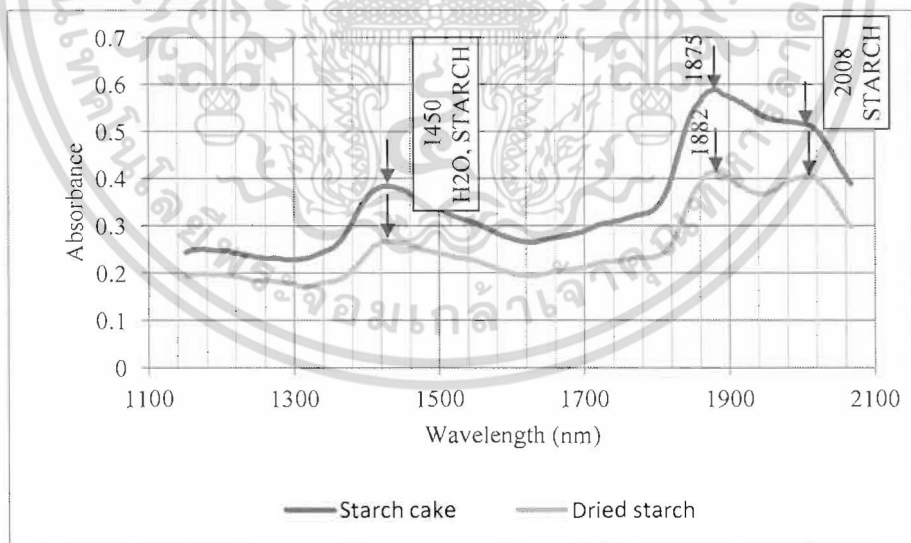
### 4.2 ลักษณะของสเปกตรัม

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลัง จากเครื่อง MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) โดยการสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรง ที่ wavelength ระหว่าง 1100–2050 nm (ภาพที่ 4.1) พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีการดูดซับคลื่นที่ wavelength เดียวกันทั้ง 2 ชนิด คือแป้งหมาดและแป้งแห้ง ได้แก่ 1450, 1867 และ 2000 nm



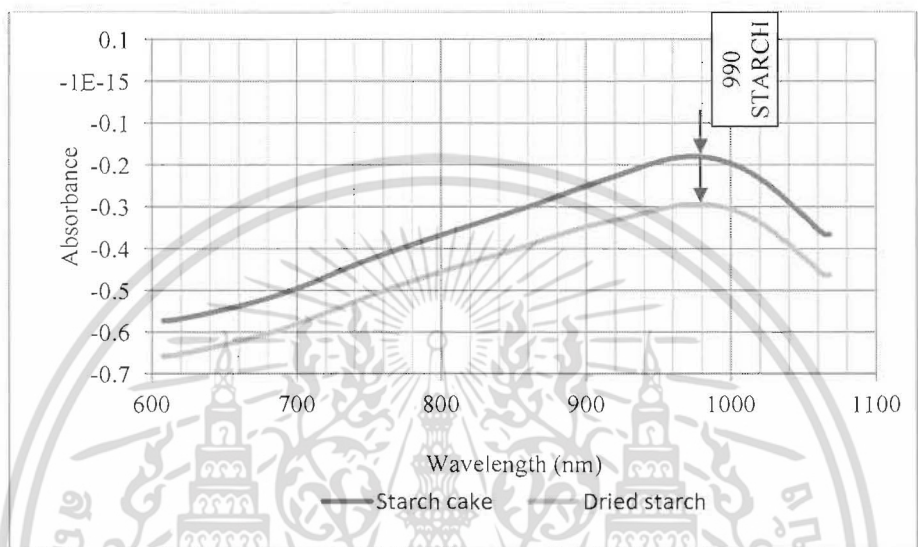
ภาพที่ 4.1 ลักษณะของสเปกตรัมจากเครื่อง MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรง

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลัง จากเครื่อง MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) โดยการสแกนผ่านแก้ว ที่ wavelength ระหว่าง 1100–2050 nm (ภาพที่ 4.2) พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีการดูดซับคลื่นที่ wavelength เดียวกันทั้ง 2 ชนิด คือแป้งหมาดและแป้งแห้ง ได้แก่ 1450 และ 2000 nm



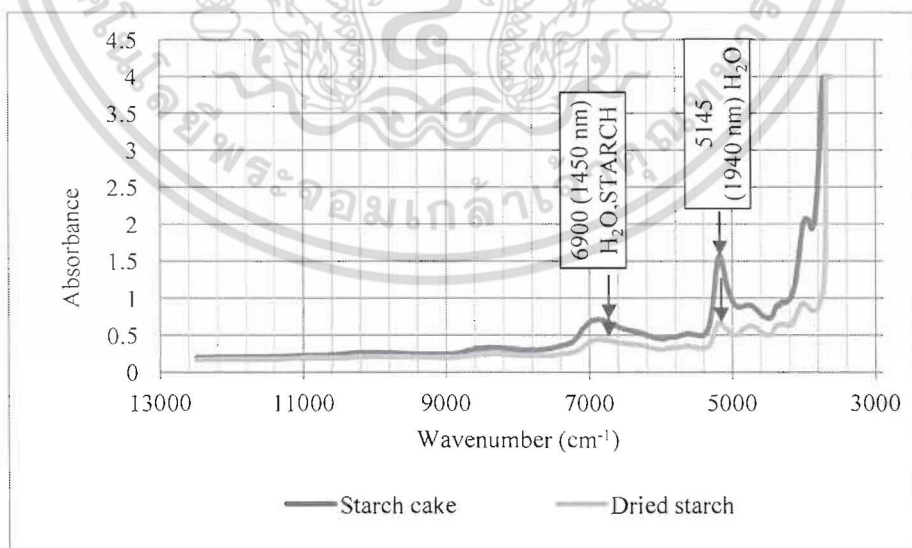
ภาพที่ 4.2 ลักษณะของสเปกตรัมจากเครื่อง MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนผ่านแก้ว

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลัง จากเครื่อง FQA-NIR Gun (Fantec, Japan) ที่ wavelength ระหว่าง 600–1100 nm (ภาพที่ 4.3) พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีการดูดซับคลื่นที่ wavelength เดียวกันทั้ง 2 ชนิด คือแป้งหมักและแป้งแห้ง ที่ 990 nm



ภาพที่ 4.3 ลักษณะของสเปกตรัมจากเครื่อง FQA-NIR Gun (Fantec, Japan)

ในการวิเคราะห์สเปกตรัมเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลัง เครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany) ที่ Wavenumber ระหว่าง 12500–3600  $\text{cm}^{-1}$  (ภาพที่ 4.4) พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีการดูดซับคลื่นที่ wavelength เดียวกันทั้ง 2 ชนิดคือแป้งหมักและแป้งแห้งที่ 6900  $\text{cm}^{-1}$  และ 5145  $\text{cm}^{-1}$  (1450 nm และ 1940 nm)



ภาพที่ 4.4 ลักษณะของสเปกตรัมจากเครื่อง FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany)

#### 4.3 ผลของการทำนายของแบบจำลอง

ผลการทำนายความชื้นในแป้งมันสำปะหลังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงผลการทำนายของแบบจำลอง ค่า  $R^2$  มีค่าอยู่ระหว่าง 27.16 % และ 99.44% โดยเครื่อง FT-NIR Spectrometer ที่ช่วงคลื่น 5400–9400  $\text{cm}^{-1}$  ให้ความสามารถในการทำนายดีที่สุดทั้งในข้อมูลชุดห้องปฏิบัติการ โรงงาน และ ห้องปฏิบัติการและโรงงาน โดยวิธี Partial least squares regression โดยมีจำนวนแฟคเตอร์เท่ากับ 8, 7 และ 6 ตามลำดับ สามารถพยากรณ์ปริมาณความชื้นได้ดีที่สุด โดยมีค่าความผิดพลาดยกกำลังสองเฉลี่ยของการพิสูจน์แบบไขว้ (RMSECV) เท่ากับ 0.75, 0.92 และ 0.91% และ สัมประสิทธิ์การพิจารณา ( $R^2$ ) of 99.44, 99.07 และ 99.19% ตามลำดับ

ภาพที่ 4.5-4.24 จะแสดงค่า Scatter plot, Regression coefficient plot และ X-loading plot สำหรับความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหามาจากชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการ โดยภาพที่ 4.5, 4.6, 4.7, และ 4.8 แสดง Scatter plot ภาพที่ 4.9, 4.13, 4.17, และ 4.21 แสดง Regression coefficient plot สำหรับเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง, เครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้ว, เครื่อง FQA-NIR Gun และเครื่อง FT-NIR spectrometer ตามลำดับ สำหรับ X-loading plot ภาพที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง ภาพที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้ว ภาพที่ 4.18, 4.19 และ 4.20 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง FQA-NIR Gun และภาพที่ 4.22, 4.23 และ 4.24 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง FT-NIR spectrometer

ภาพที่ 4.25-4.44 จะแสดงค่า Scatter plot, Regression coefficient plot และ X-loading plot สำหรับความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหามาจากชุดข้อมูลชุดข้อมูลโรงงาน โดยภาพที่ 4.25, 4.26, 4.27, และ 4.28 แสดง Scatter plot ภาพที่ 4.29, 4.33, 4.37, และ 4.41 แสดง Regression coefficient plot สำหรับเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง, เครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้ว, เครื่อง FQA-NIR Gun และเครื่อง FT-NIR spectrometer ตามลำดับ สำหรับ X-loading plot ภาพที่ 4.30, 4.31 และ 4.32 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง ภาพที่ 4.34, 4.35 และ 4.36 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้ว ภาพที่ 4.38, 4.39 และ 4.40 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง FQA-NIR Gun และภาพที่ 4.42, 4.43 และ 4.44 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง FT-NIR spectrometer

ภาพที่ 4.45-4.64 จะแสดงค่า Scatter plot, Regression coefficient plot และ X-loading plot สำหรับความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหามาจากชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง) โดยภาพที่ 4.45, 4.46, 4.47, 4.48 และ 4.49 แสดง Scatter plot ภาพที่ 4.50, 4.53, 4.56, 4.59 และ 4.62 แสดง Regression coefficient plot สำหรับเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง, เครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้ว, เครื่อง FQA-NIR Gun และเครื่อง FT-NIR spectrometer ตามลำดับ สำหรับ X-loading plot ภาพที่ 4.51 และ 4.52 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง ภาพที่ 4.54 และ 4.55 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนผ่าน

แก้ว ภาพที่ 4.57 และ 4.58 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง FQA-NIR Gun และภาพที่ 4.60, 4.61, 4.63 และ 4.64 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง FT-NIR spectrometer

ภาพที่ 4.65-4.83 จะแสดงค่า Scatter plot, Regression coefficient plot และ X-loading plot สำหรับความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหามาจากชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหามา) โดยภาพที่ 4.65, 4.66, 4.67, 4.68 และ 4.69 แสดง Scatter plot ภาพที่ 4.70, 4.73, 4.76, 4.78 และ 4.81 แสดง Regression coefficient plot สำหรับเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง, เครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้ว, เครื่อง FQA-NIR Gun และเครื่อง FT-NIR spectrometer ตามลำดับ สำหรับ X-loading plot ภาพที่ 4.71 และ 4.72 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง ภาพที่ 4.74 และ 4.75 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้ว ภาพที่ 4.77 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง FQA-NIR Gun และภาพที่ 4.79, 4.80, 4.82 และ 4.83 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง FT-NIR spectrometer

ภาพที่ 4.84-4.103 จะแสดงค่า Scatter plot, Regression coefficient plot และ X-loading plot สำหรับความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหามาจากชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน โดยภาพที่ 4.84, 4.85, 4.86 และ 4.87 แสดง Scatter plot ภาพที่ 4.88, 4.92, 4.96 และ 4.100 แสดง Regression coefficient plot สำหรับเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง, เครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้ว, เครื่อง FQA-NIR Gun และเครื่อง FT-NIR spectrometer ตามลำดับ สำหรับ X-loading plot ภาพที่ 4.89, 4.90 และ 4.91 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง ภาพที่ 4.93, 4.94 และ 4.95 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้ว ภาพที่ 4.97, 4.98 และ 4.99 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง FQA-NIR Gun และภาพที่ 4.101, 4.102 และ 4.103 เป็นชุดข้อมูลจากเครื่อง FT-NIR spectrometer

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่า Regression coefficient ที่สูงที่สุดของแบบจำลองที่ดีที่สุดที่ได้จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ต่างๆของค่าความชื้นในแป้งมันสำปะหลัง พิกของ regression coefficient อยู่ที่ 990, 1450, 1540 และ 2000 nm (FQA-NIR Gun ที่ 990 nm, MicroNIR spectrometer (สแกนผ่านแก้ว) ที่ 1450 และ 2000 nm, MicroNIR spectrometer (สแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรง) ที่ 1540 และ 2000 nm และเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ 1450 และ 1540 nm และค่าการดูดกลืนแสงที่ 990, 1450, 1540 และ 2000 nm เป็นการสันสะท้อนของแป้ง [4]การดูดกลืนแสงของน้ำอยู่ที่ 1450 และ 1940 nm [4]

ตารางที่ 4.2 ผลการทำนายของแบบจำลอง

Spectrometer	Wavelength/ Wavenumber	Data set	Pre treatment	Rank	Calibration set			Prediction set		
					R <sup>2</sup>	RMSECV /RMSEE	-Bias	R <sup>2</sup>	RMSEP	Bias
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรง	1100–2050 nm	Lab	Raw	4	94.31	2.42	0.01			
	1100–2050 nm	Factory	SNV+ DETRENDING	3	97.61	1.49	0.01			
	1100–2050 nm	Dried starch	Raw	10	31.28	0.35	0.00			
	1100–2050 nm	Starch cake	Raw	6	38.49	1.33	0.00			
	1100–2050 nm	Lab and Factory	Raw	5	92.60	2.77	0.00			
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนผ่านแก้ว	1100–2050 nm	Lab	Raw	5	95.70	2.10	0.08			
	1100–2050 nm	Factory	Range normalization	4	97.44	1.54	0.01			
	1100–2050 nm	Dried starch	Raw	7	32.54	0.34	0.00			
	1100–2050 nm	Starch cake	Raw	7	32.06	1.42	0.01			
	1100–2050 nm	Lab and Factory	Raw	6	93.70	2.55	0.00			
FQA-NIR Gun (Fantec, Japan)	600–1050 nm	Lab	Raw	6	81.40	4.38	0.09			
	600–1050 nm	Factory	SNV+ DETRENDING	4	91.45	2.82	0.03			
	600–1050 nm	Dried starch	Raw	9	27.39	0.36	0.00			
	600–1050 nm	Starch cake	Raw	8	27.16	1.45	0.02			
	600–1050 nm	Lab and Factory	Raw	8	83.68	4.11	0.01			
FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany)	5400–9400 cm <sup>-1</sup>	Lab	Min-Max normalization	8	99.44	0.75	0.00			
	4242–4613 cm <sup>-1</sup> 5400–9400 cm <sup>-1</sup>	Factory	Multiplicative Scattering correction	7	99.07	0.92	0.02			
	4242–4613 cm <sup>-1</sup> 7428–9357 cm <sup>-1</sup>	Dried starch	First derivative	6	75.29	0.21	0.00	80.87	0.19	0.05
	6100–9400 cm <sup>-1</sup>	Starch cake	Straight line Subtraction	6	86.05	0.70	0.00	89.70	0.60	0.04
	5400–9400 cm <sup>-1</sup>	Lab and Factory	Min-Max normalization	9	99.19	0.91	0.00			

หมายเหตุ : Bias= Average error, SEP= Standard error of prediction, RMSECV=Root mean square error of estimation, RMSEP= Root mean square error of prediction, Rank=PLS factor, R<sup>2</sup>= Coefficient of determination, cal=Calibration set and val=validation set

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่า Regression coefficient ที่สูงที่สุดของแบบจำลองที่ดีที่สุดที่ได้จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ต่างๆ

Spectrometer	Wavelength (nm)/ Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )	Wavelength (nm) [4]	Bond Vibration [4]	Compound [4]
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนที่ผิวหน้าแป้ง (ห้องปฏิบัติการ)	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนที่ผิวหน้าแป้ง (โรงงาน)	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนที่ผิวหน้าแป้ง (แป้งแห้ง)	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนที่ผิวหน้าแป้ง (แป้งหมาด)	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนที่ผิวหน้าแป้ง (ห้องปฏิบัติการและโรงงาน)	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนผ่านจานแก้ว(ห้องปฏิบัติการ)	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนผ่านจานแก้ว (โรงงาน)	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนผ่านจานแก้ว (แป้งแห้ง)	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนผ่านจานแก้ว (แป้งหมาด)	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนผ่านจานแก้ว (ห้องปฏิบัติการและโรงงาน)	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
FQA-NIR Gun (ห้องปฏิบัติการ)	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
FQA-NIR Gun (โรงงาน)	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
FQA-NIR Gun (แป้งแห้ง)	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
FQA-NIR (แป้งหมาด)	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
FQA-NIR Gun (ห้องปฏิบัติการและโรงงาน)	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
FT-NIR spectrometer (ห้องปฏิบัติการ)	1329/7182	-	-	-
FT-NIR spectrometer (โรงงาน)	1450/6897	1450	O-H str. First overtone	H <sub>2</sub> O, STARCH
FT-NIR spectrometer (แป้งแห้ง)	2231/4482	-	-	-
FT-NIR spectrometer (แป้งหมาด)	1450/6897	1450	O-H str. First overtone	H <sub>2</sub> O, STARCH
FT-NIR spectrometer (ห้องปฏิบัติการและโรงงาน)	1450/6897	1450	O-H str. First overtone	H <sub>2</sub> O, STARCH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

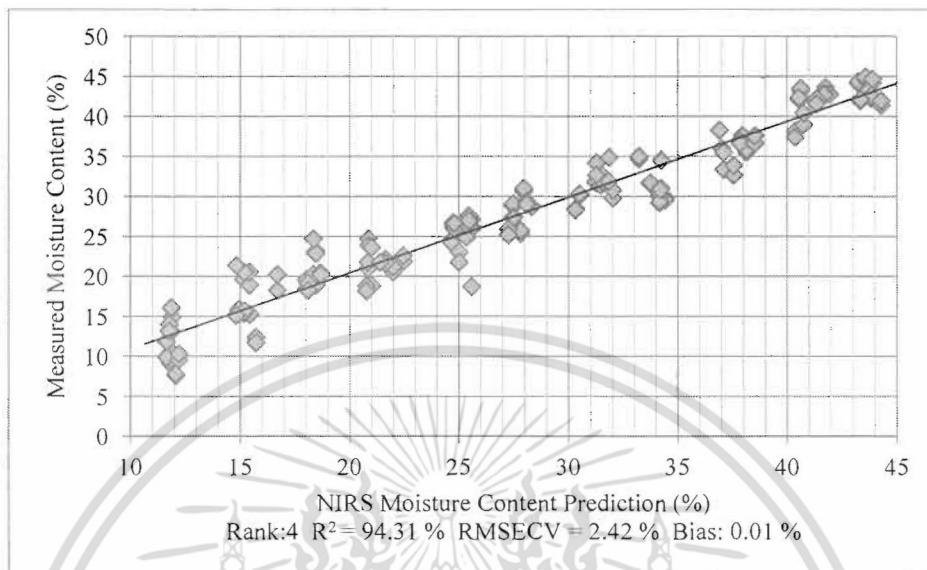
ตารางที่ 4.4 ค่า X-loading weight ที่สูงที่สุดของแฟลคเตอร์ 1-3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดที่ได้จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ต่างๆ

Spectrometer	Factor	Wavelength (nm)/ Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )	Wavelength (nm) [4]	Bond Vibration [4]	Compound [4]
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนที่ผิวหน้าแบ่งโดยตรง (ห้องปฏิบัติการ)	1	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
	2	1940	1940	O -H str. + O-H def.	H <sub>2</sub> O
	3	1698	-	-	-
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนที่ผิวหน้าแบ่งโดยตรง (โรงงาน)	1	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
	2	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
	3	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนที่ผิวหน้าแบ่งโดยตรง (แบ่งแห้ง)	1	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
	2	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนที่ผิวหน้าแบ่งโดยตรง (แบ่งหมาด)	1	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
	2	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนที่ผิวหน้าแบ่งโดยตรง (ห้องปฏิบัติการและโรงงาน)	1	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
	2	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
	3	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนผ่านจานแก้ว (ห้องปฏิบัติการ)	1	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
	2	1940	1940		H <sub>2</sub> O
	3	1232	-	-	-
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนผ่านจานแก้ว (โรงงาน)	1	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
	2	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
	3	1940	1940	O -H str. + O-H def.	H <sub>2</sub> O
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนผ่านจานแก้ว (แบ่งแห้ง)	1	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
	2	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนผ่านจานแก้ว (แบ่งหมาด)	1	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
	2	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) สแกนผ่านจานแก้ว (ห้องปฏิบัติการและโรงงาน)	1	1540	1540	O-H str. overtone	STARCH
	2	2000	2000	2 x O-H def. +C-O def.	STARCH
	3	1940	1940	O -H str. + O-H def.	H <sub>2</sub> O
FQA-NIR Gun (ห้องปฏิบัติการ)	1	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
	2	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
	3	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
FQA-NIR Gun (โรงงาน)	1	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
	2	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
	3	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
FQA-NIR Gun (แบ่งแห้ง)	1	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
	2	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
	3	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
FQA-NIR (แบ่งหมาด)	1	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
	2	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH

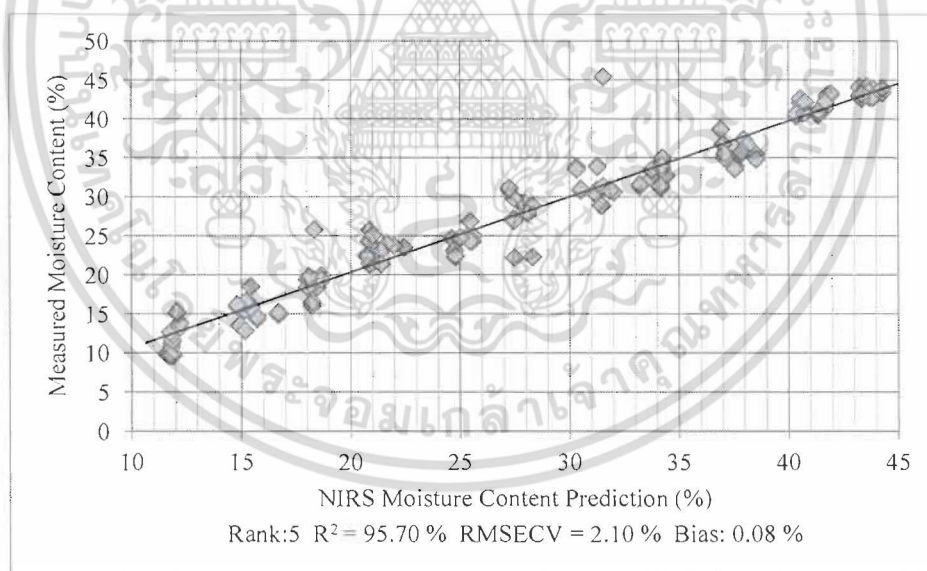
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Spectrometer	Factor	Wavelength (nm)/ Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )	Wavelength (nm) [4]	Bond Vibration [4]	Compound [4]
	3	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
FOA-NIR Gun (ห้องปฏิบัติการและ โรงงาน)	1	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
	2	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
	3	990	990	O-H str. Second overtone	STARCH
FT-NIR spectrometer (ห้องปฏิบัติการ)	1	1450/6897	1450	O-H str. First overtone	H <sub>2</sub> O, STARCH
	2	1450/6897	1450	O-H str. First overtone	H <sub>2</sub> O, STARCH
	3	1450/6897	1450	O-H str. First overtone	H <sub>2</sub> O, STARCH
FT-NIR spectrometer (โรงงาน)	1	1418/7050	-	-	-
	2	1450/6897	1450	O-H str. First overtone	H <sub>2</sub> O, STARCH
	3	1836/5446	-	-	-
FT-NIR spectrometer (แป้งแห้ง)	1	2242/4459	-	-	-
	2	2262/4420	-	-	-
FT-NIR spectrometer (แป้งหมาด)	1	1404/7120	-	-	-
	2	1361/7344	-	-	-
FT-NIR spectrometer (ห้องปฏิบัติการและโรงงาน)	1	1450/6897	1450	O-H str. First overtone	H <sub>2</sub> O, STARCH
	2	1450/6897	1450	O-H str. First overtone	H <sub>2</sub> O, STARCH
	3	1450/6897	1450	O-H str. First overtone	H <sub>2</sub> O, STARCH

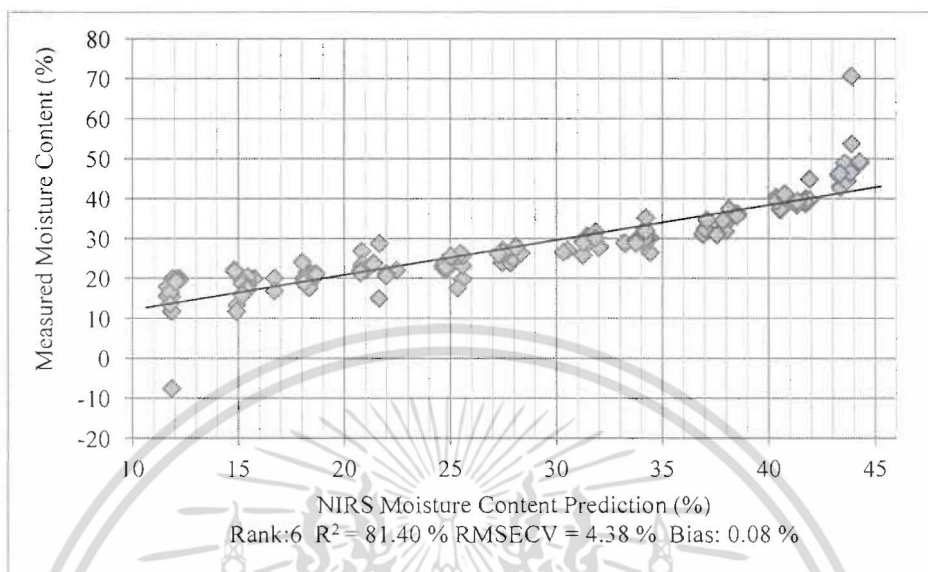
จากตารางที่ 4.4 แสดงค่า X-loading weight ที่สูงที่สุดของแฟกเตอร์ 1-3 ที่สูงที่สุดของแบบจำลองที่ดีที่สุดที่ได้จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ต่างๆของค่าความชื้นในแป้งมันสำปะหลัง พืชของ X-loading weight อยู่ที่ประมาณ 990, 1450, 1540 และ 2000 nm (FOA-NIR Gun ที่ 990 nm, MicroNIR spectrometer (สแกนผ่านแก้ว) ที่ 1450 และ 2000 nm, MicroNIR spectrometer (สแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรง) ที่ 1540 และ 2000 nm และเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ 1450 และ 1540 nm และค่าการดูดกลืนแสงที่ 990, 1450, 1540 และ 2000 nm เป็นการสัมพันธ์ของแป้ง [4] การดูดกลืนแสงของน้ำอยู่ที่ 1450 และ 1940 nm [4]



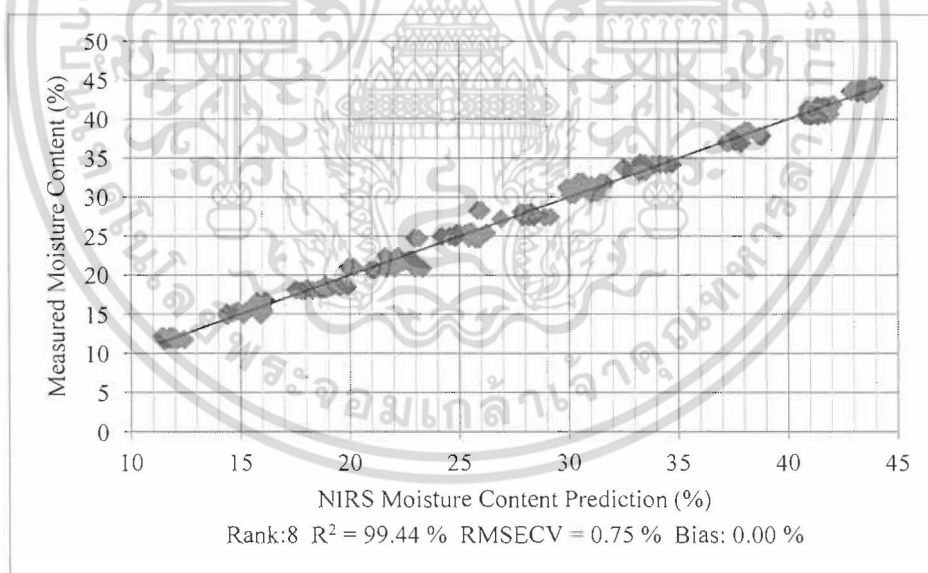
ภาพที่ 4.5 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดยใช้ MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง โดยตรงของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการที่เป็นสเปกตรัมดิบ



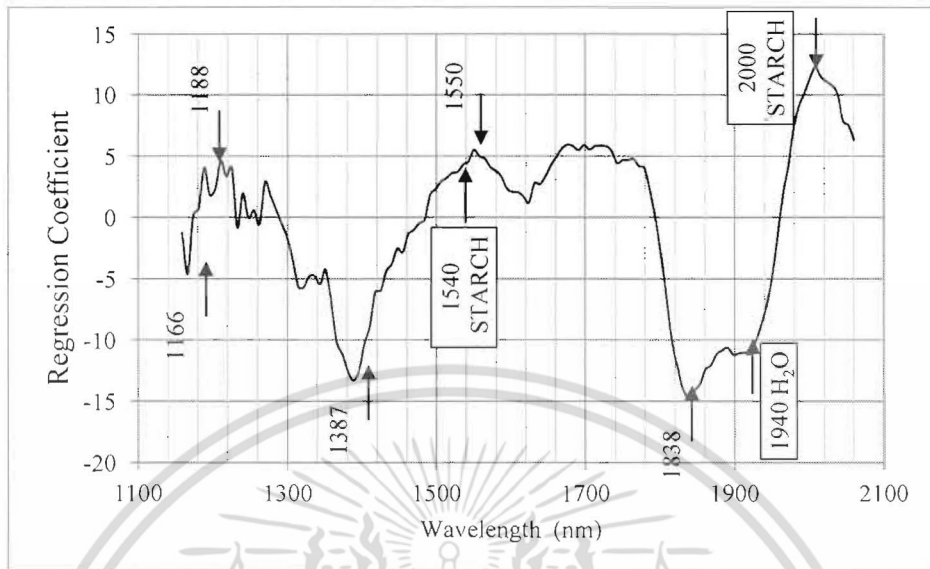
ภาพที่ 4.6 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดยใช้ MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการที่เป็นสเปกตรัมดิบ



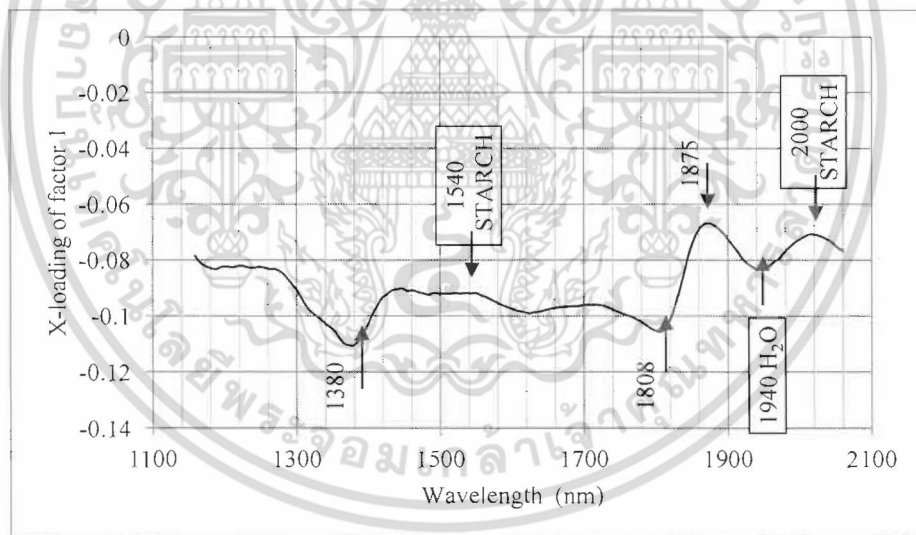
ภาพที่ 4.7 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดย ใช้ FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการที่เป็นสเปกตรัมดิบ



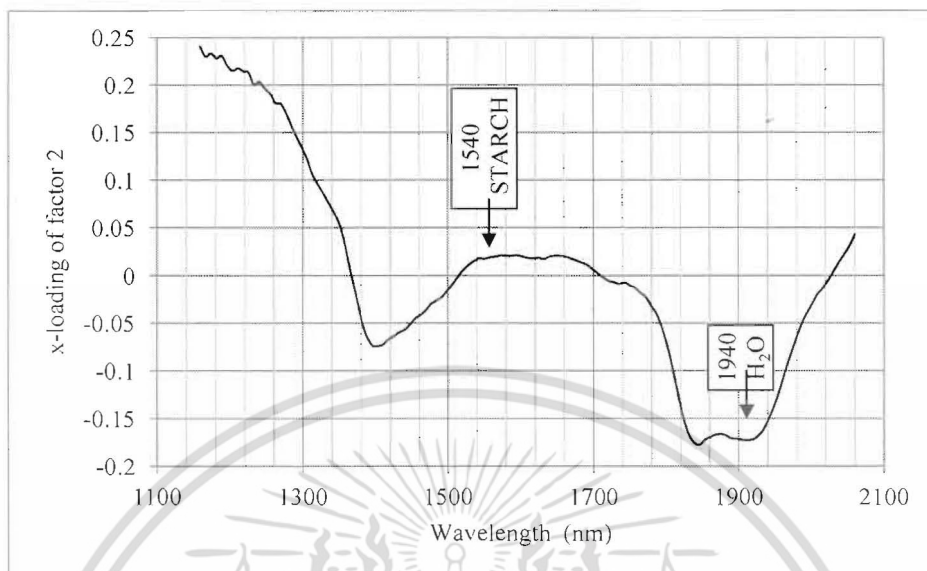
ภาพที่ 4.8 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดย ใช้ FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ ที่ผ่านการทำ Min-Max normalization



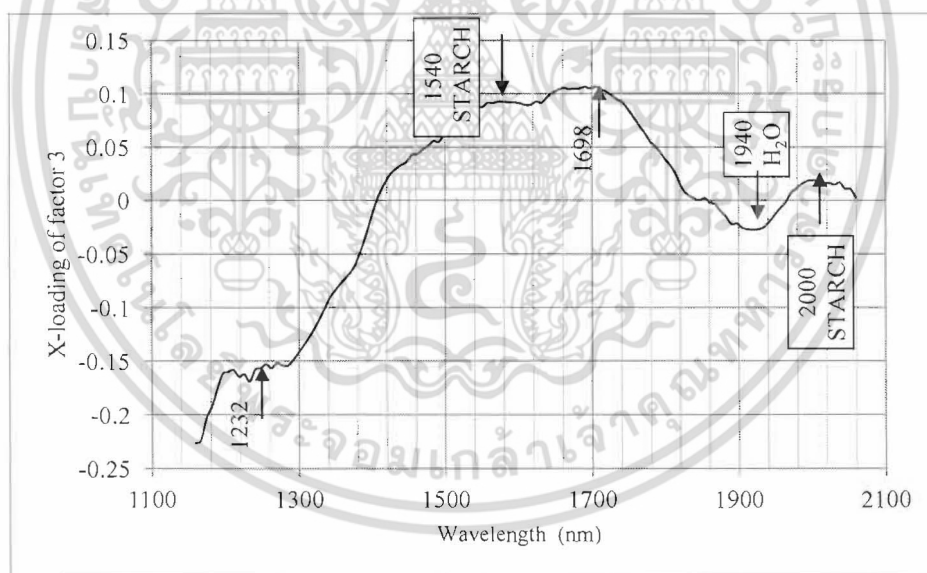
ภาพที่ 4.9 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ



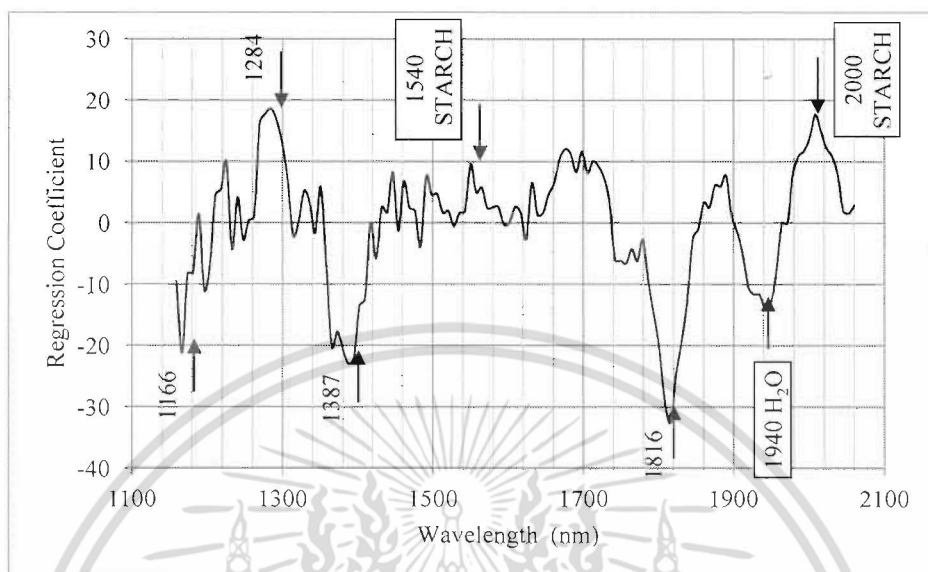
ภาพที่ 4.10 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ



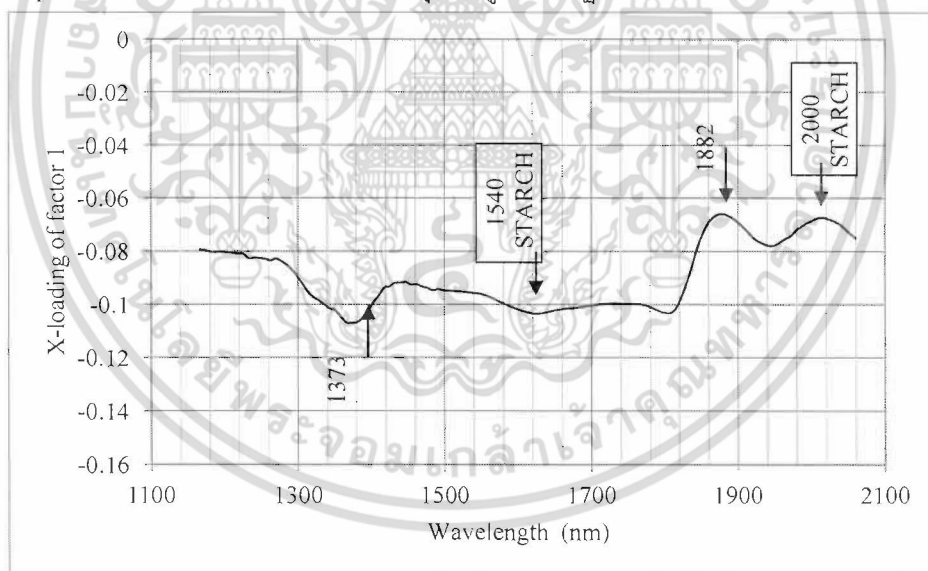
ภาพที่ 4.11 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้ง โดยตรงของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 4.12 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้ง โดยตรงของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ

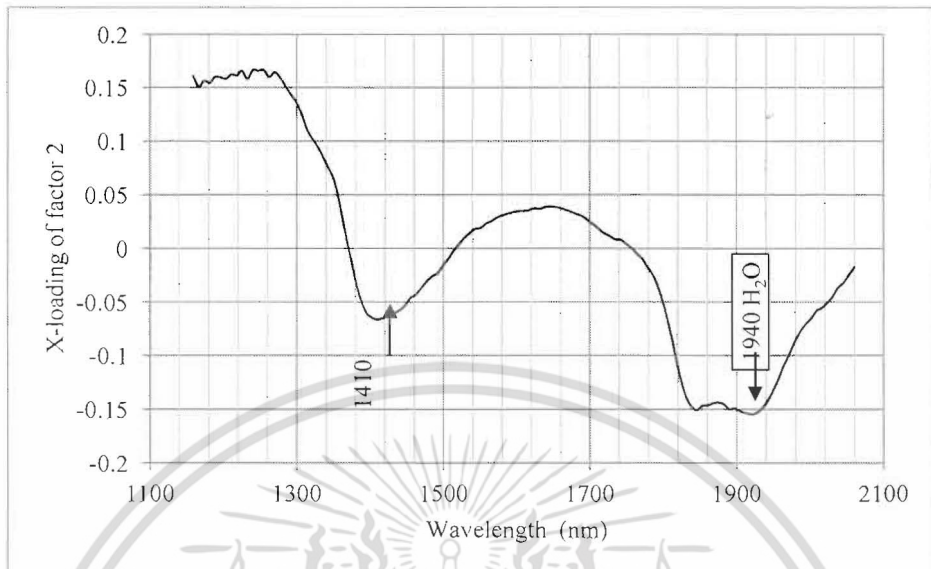


ภาพที่ 4.13 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังขนาดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ

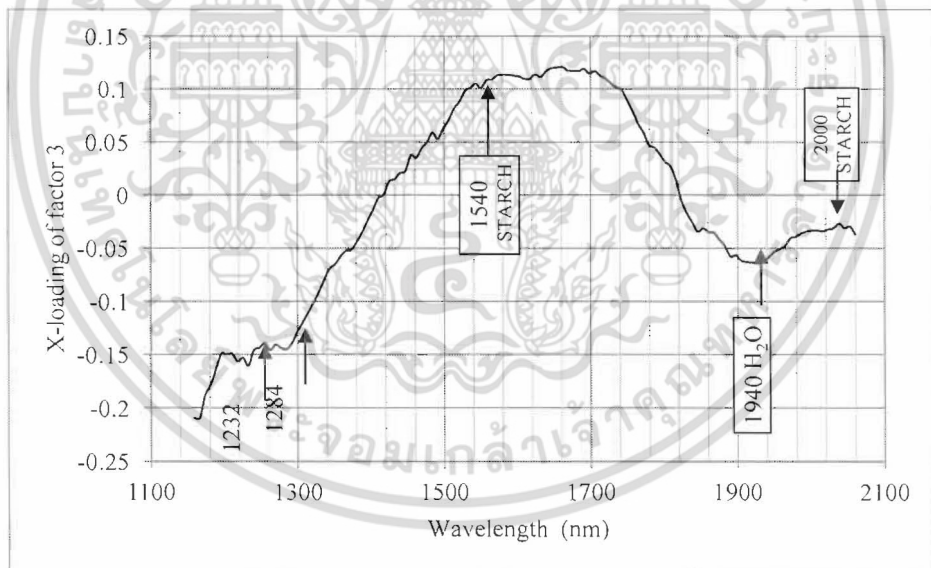


ภาพที่ 4.14 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังขนาดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านงานแก้วของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ

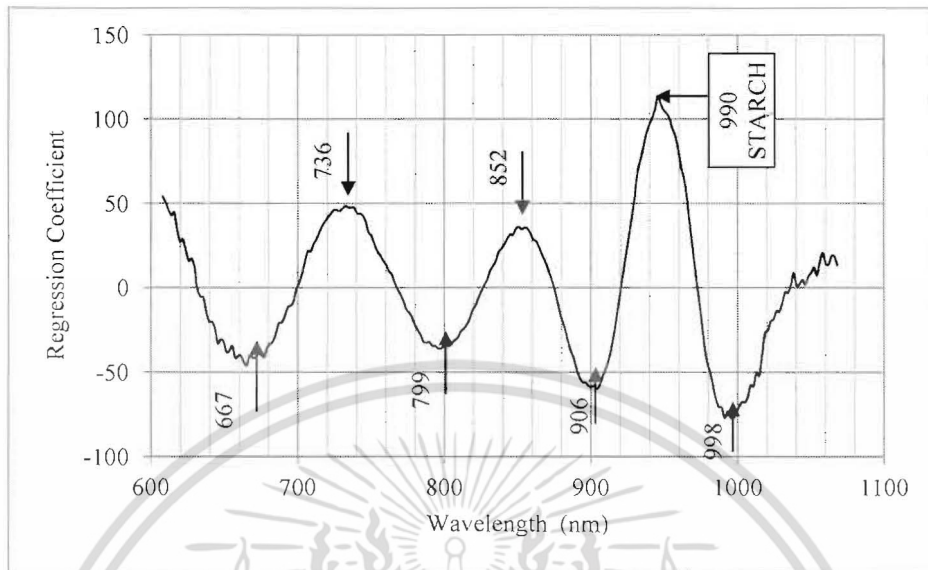
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



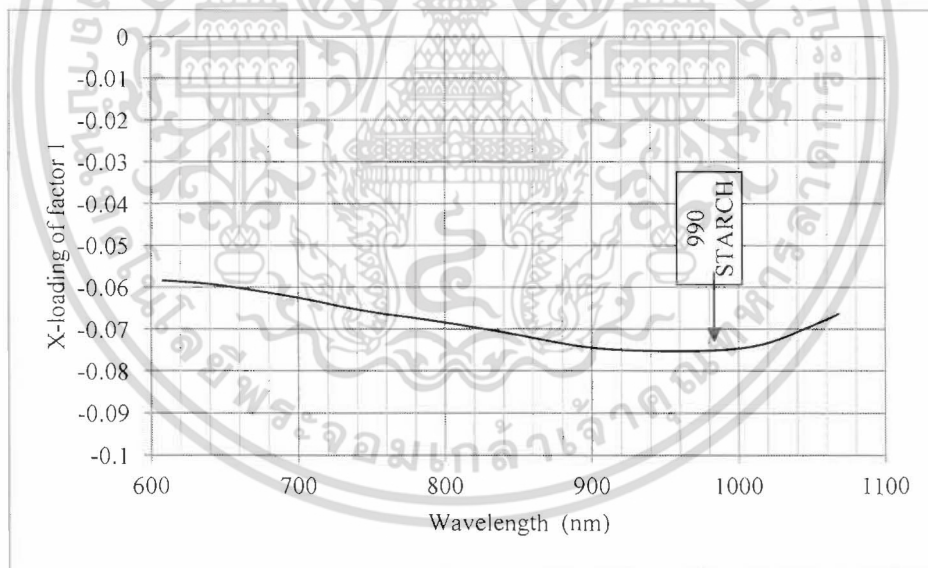
ภาพที่ 4.15 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านงานแก้วของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ



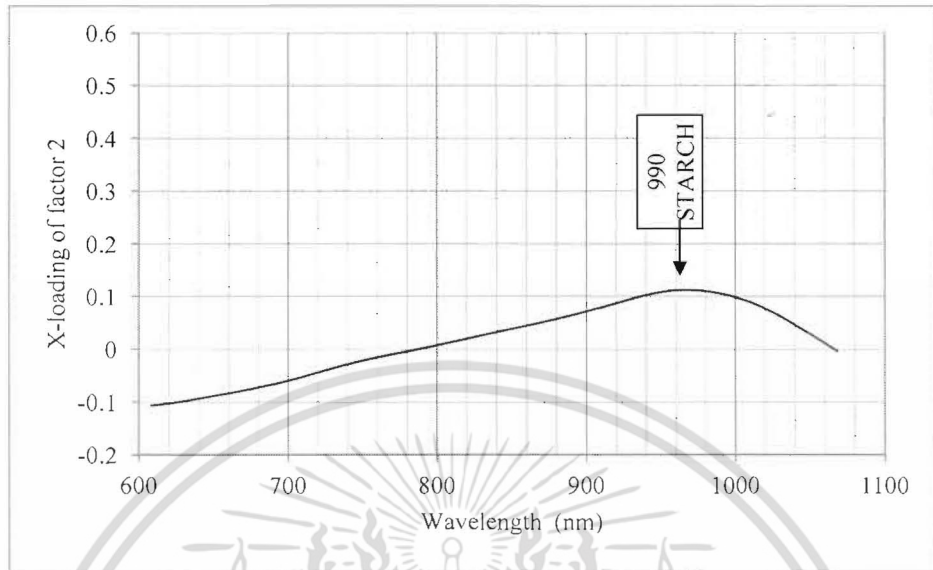
ภาพที่ 4.16 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านงานแก้วของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ



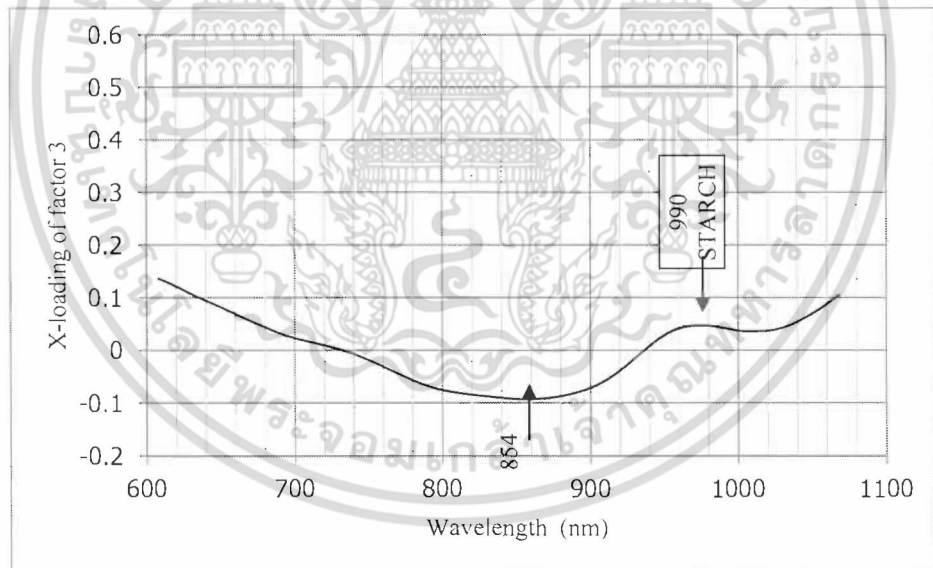
ภาพที่ 4.17 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ



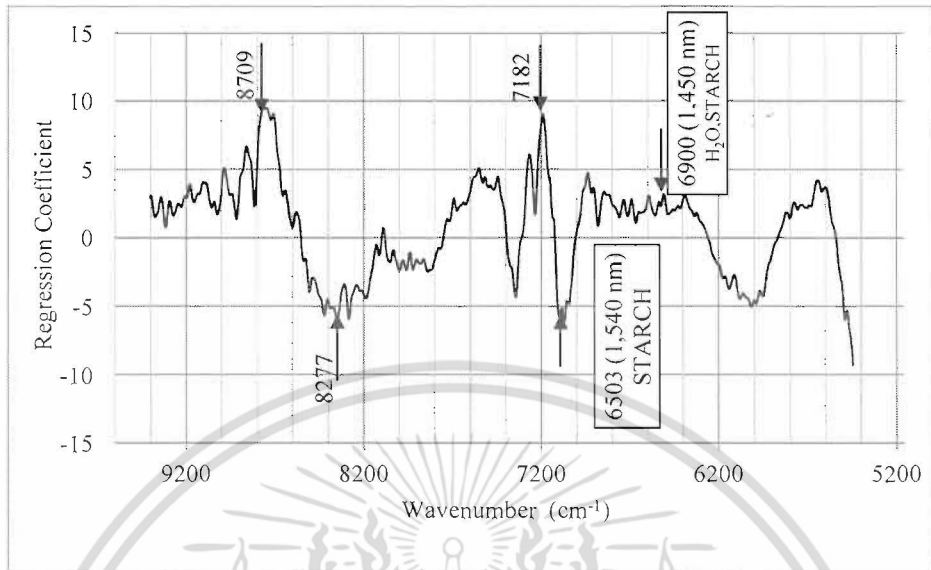
ภาพที่ 4.18 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ



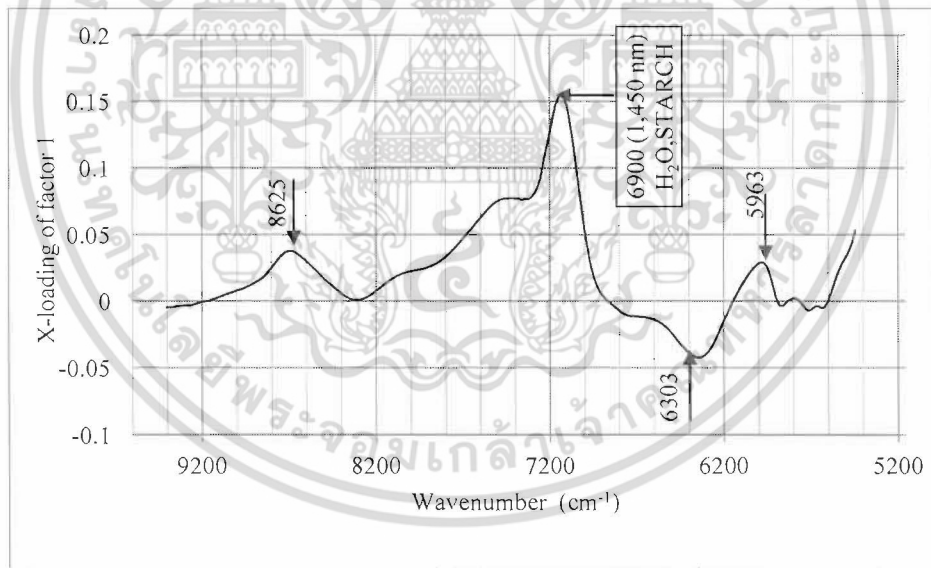
ภาพที่ 4.19 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ



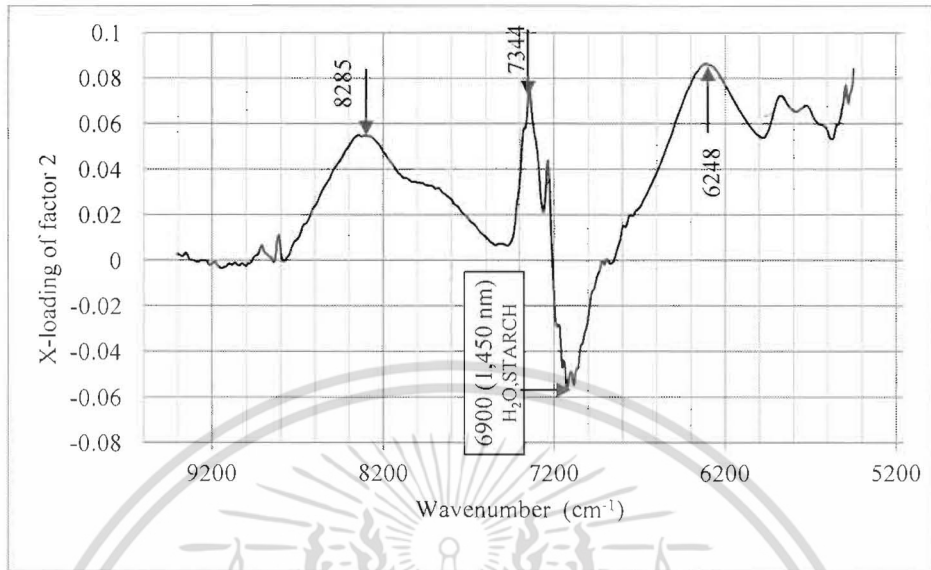
ภาพที่ 4.20 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ



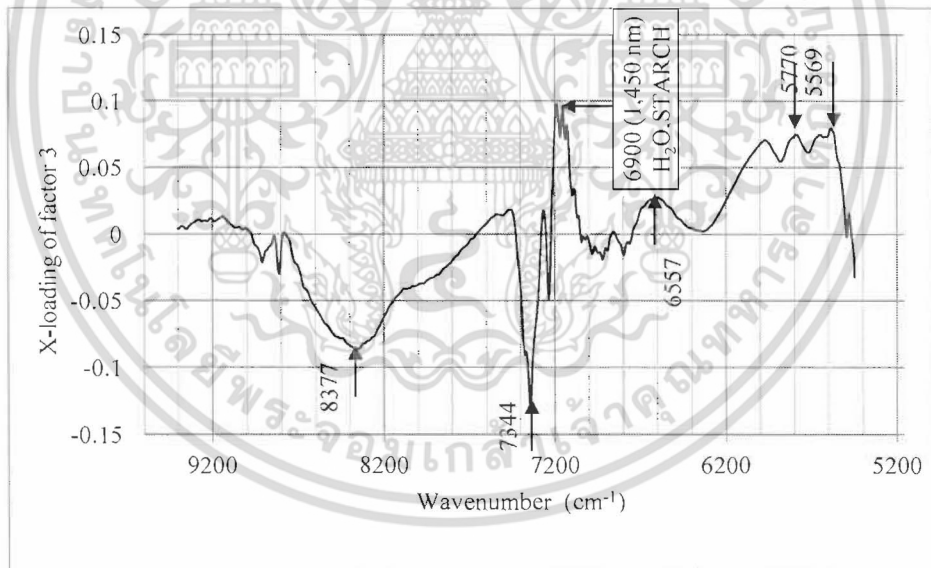
ภาพที่ 4.21 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 4.22 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ

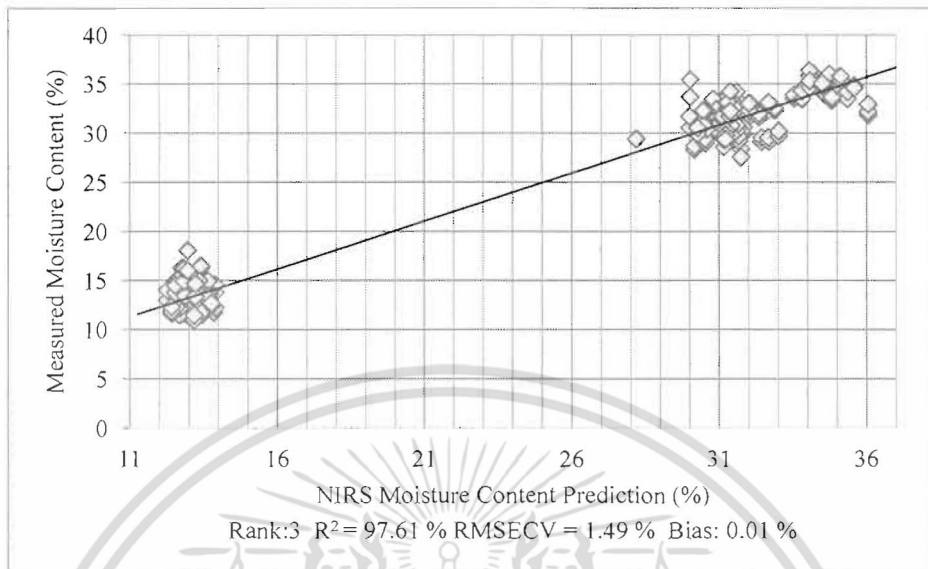


ภาพที่ 4.23 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ

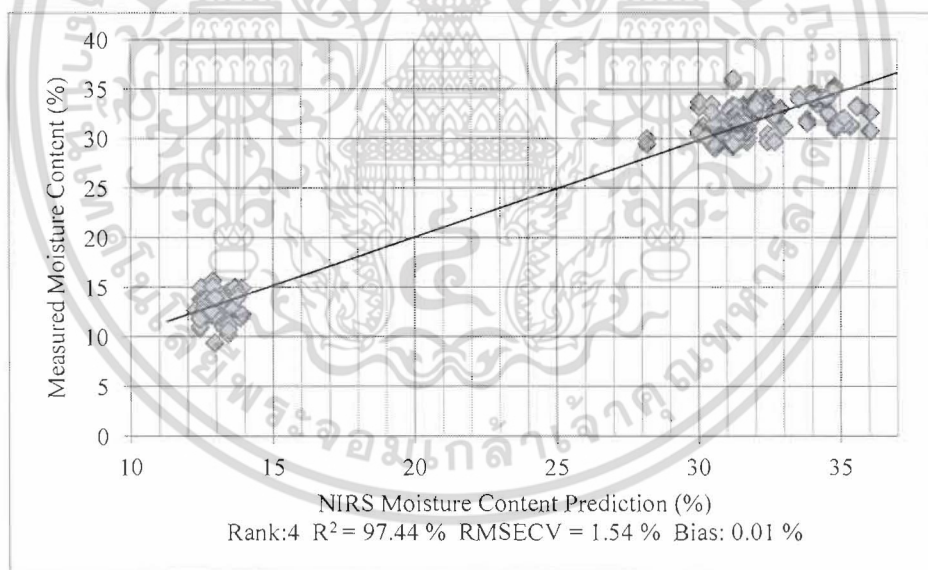


ภาพที่ 4.24 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลห้องปฏิบัติการ

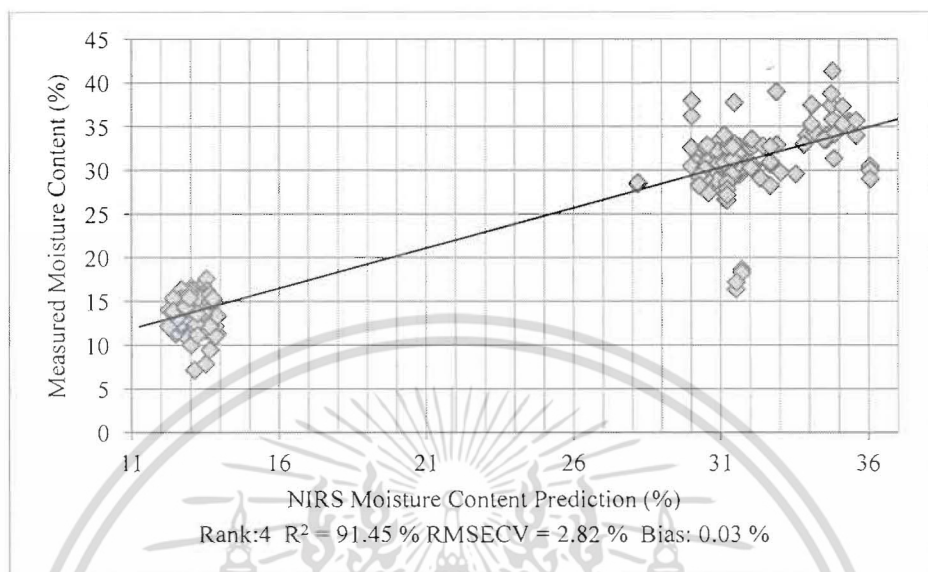
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



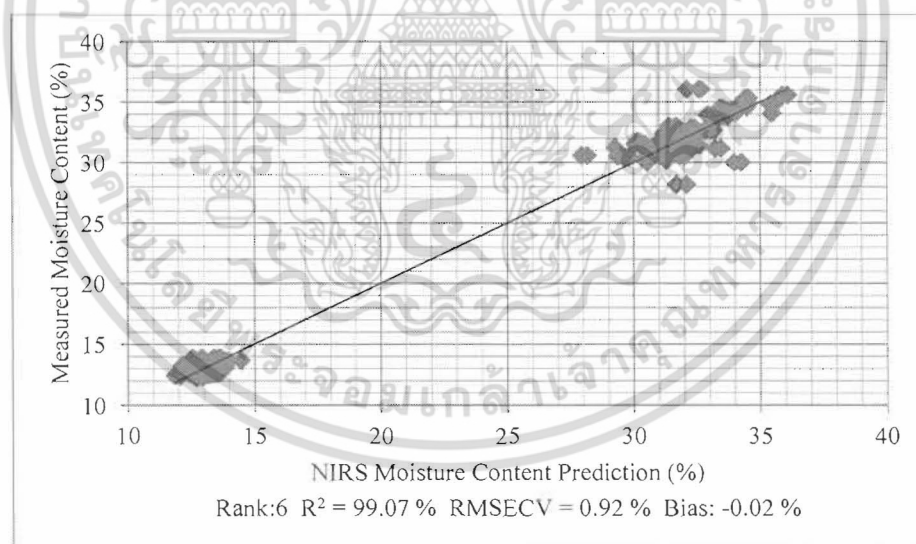
ภาพที่ 4.25 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดย ใช้ MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง โดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน ที่ผ่านการทำ SNV + DETRENDING



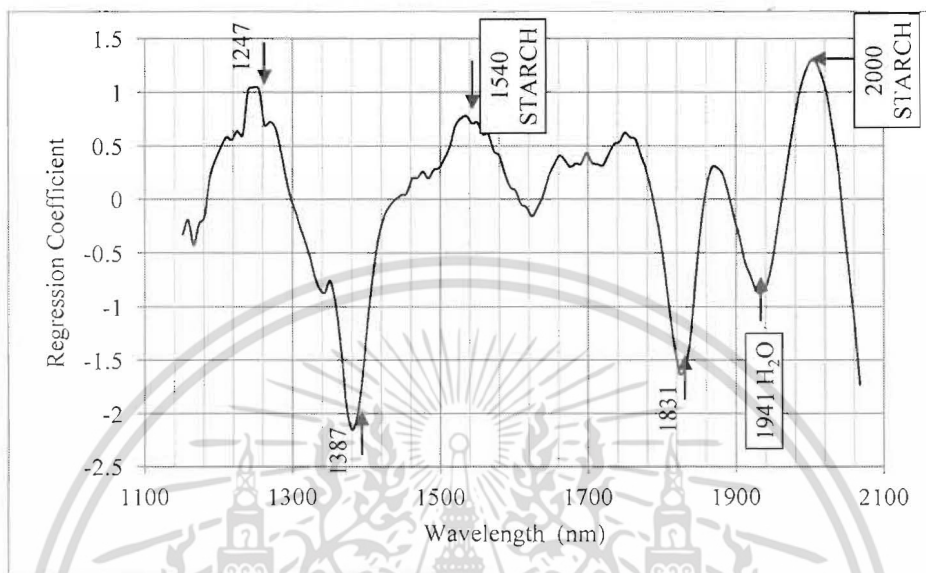
ภาพที่ 4.26 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดย ใช้ MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน ที่ผ่านการทำ Range normalization



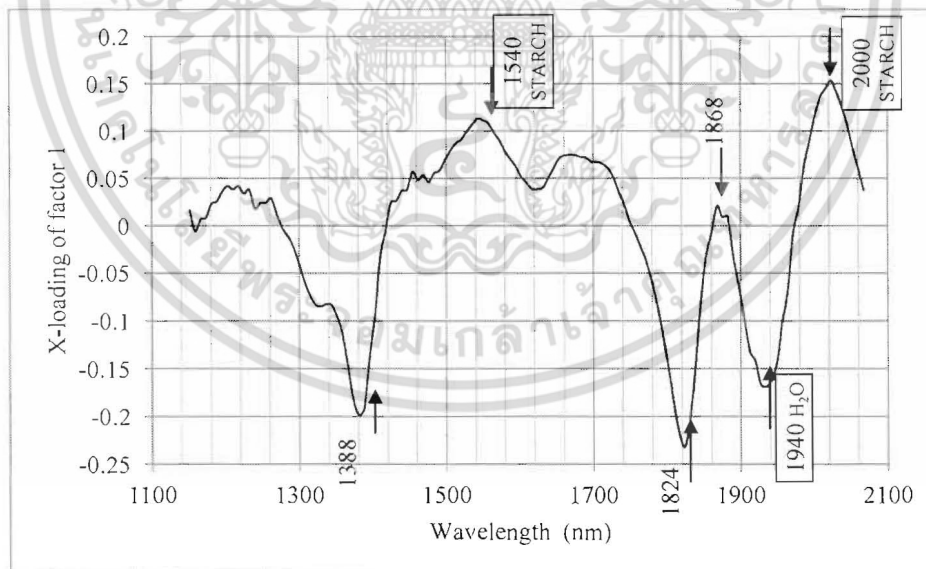
ภาพที่ 4.27 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดยใช้ FQA-NIR Gun สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน ที่ผ่านการทำ SNV + DETRENDING



ภาพที่ 4.28 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดยใช้ FT-NIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน ที่ผ่านการทำ Multiplicative Scattering correction

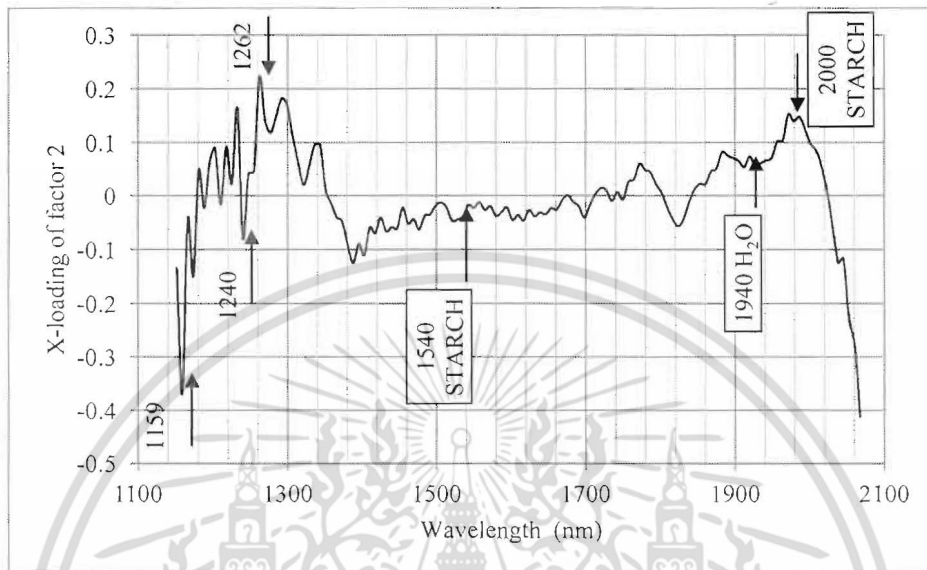


ภาพที่ 4.29 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของหูดข้อมูลโรงงาน

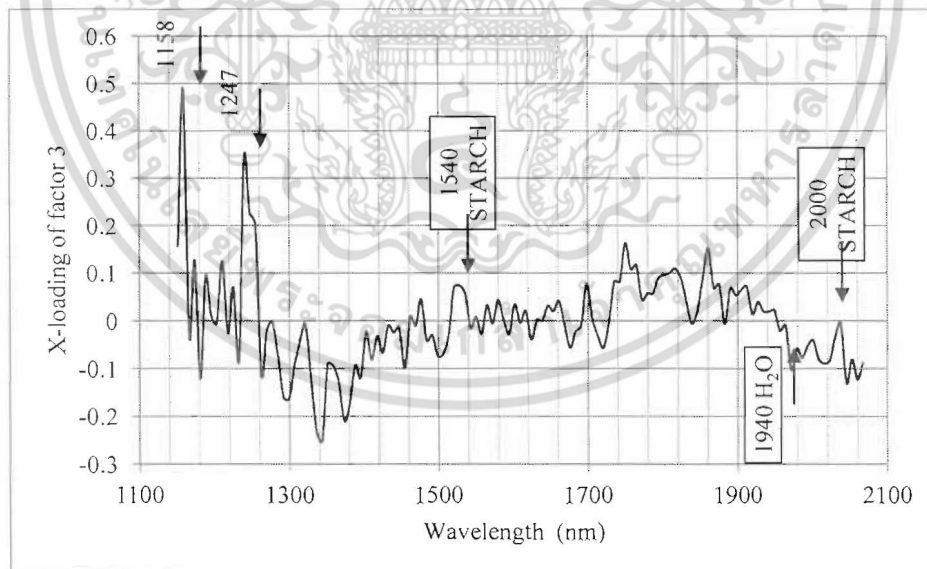


ภาพที่ 4.30 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของหูดข้อมูลโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

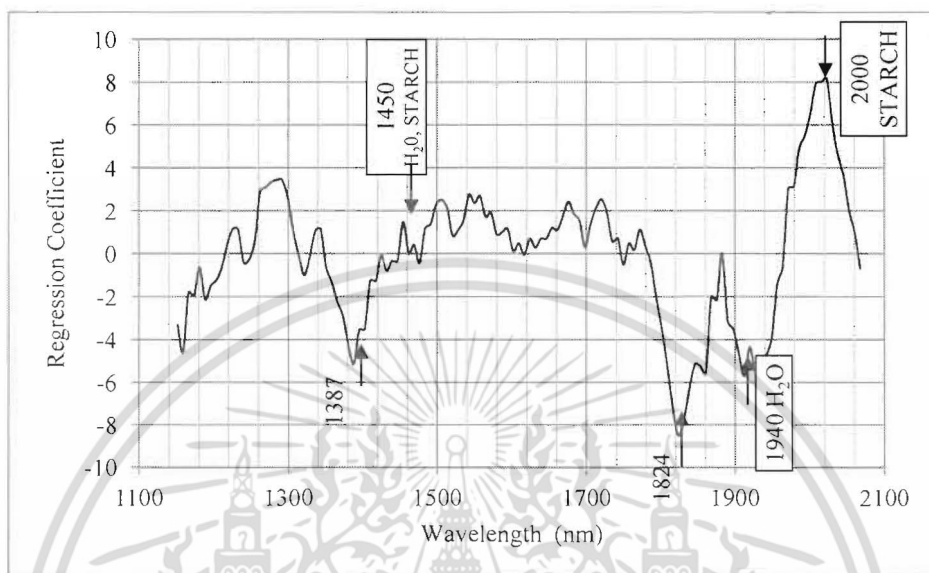


ภาพที่ 4.31 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังขนาดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูล โรงงาน

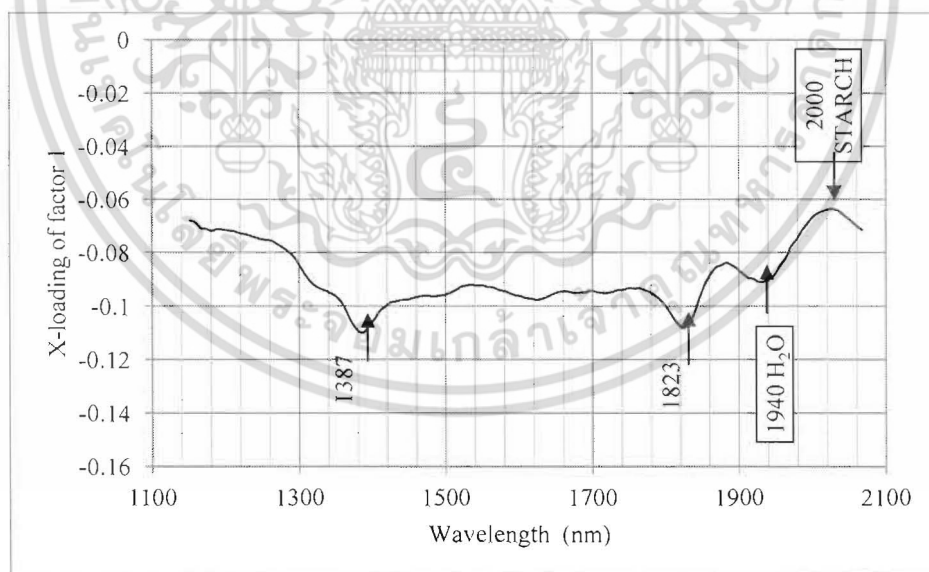


ภาพที่ 4.32 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังขนาดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูล โรงงาน

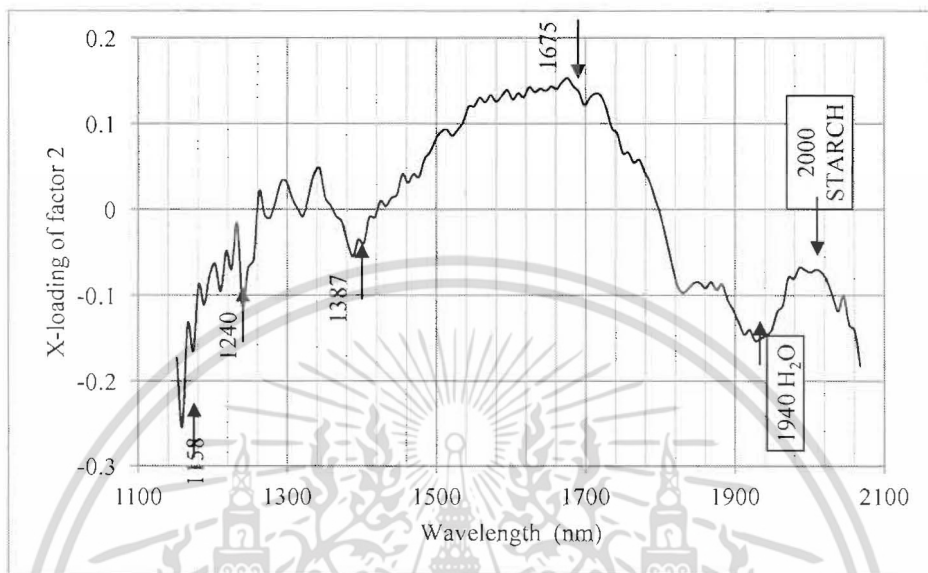
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



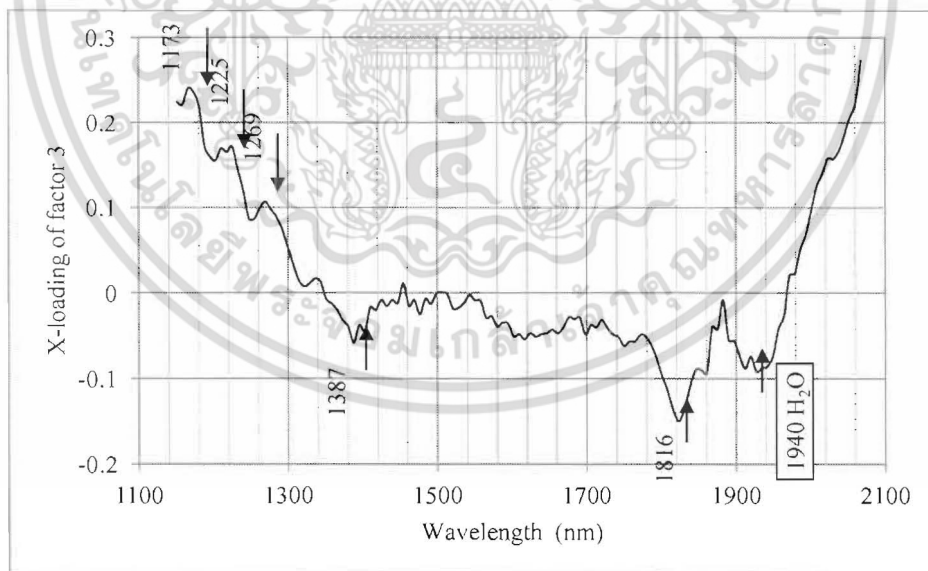
ภาพที่ 4.33 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน



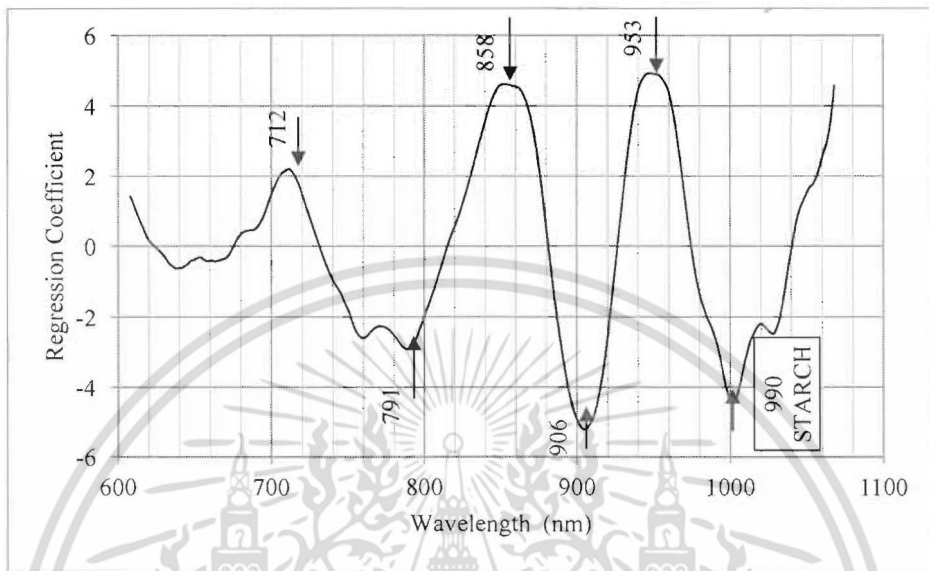
ภาพที่ 4.34 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน



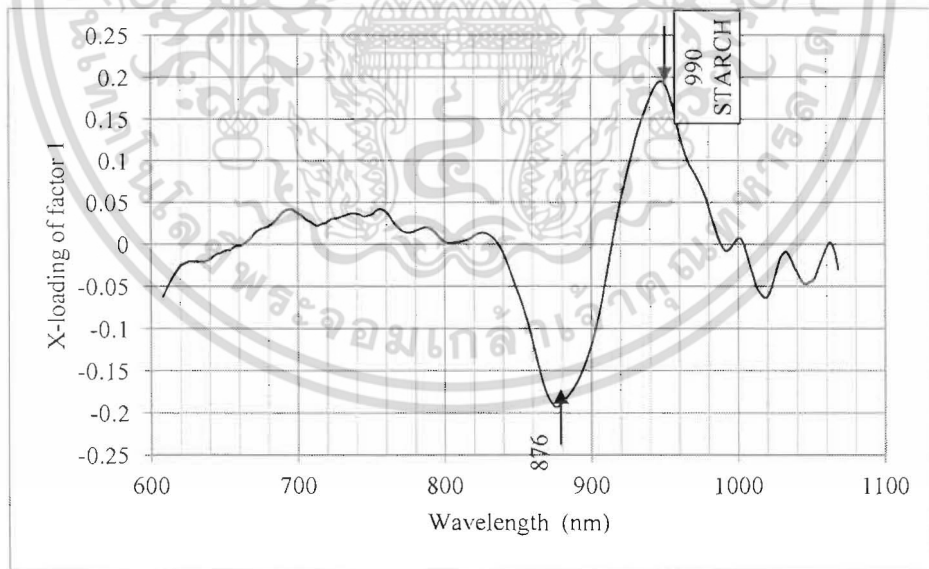
ภาพที่ 4.35 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน



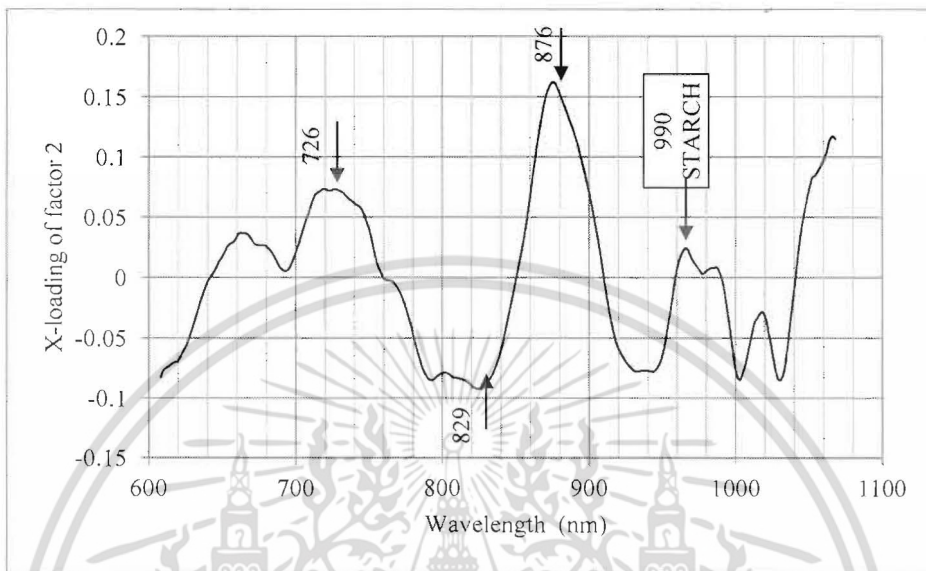
ภาพที่ 4.36 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน



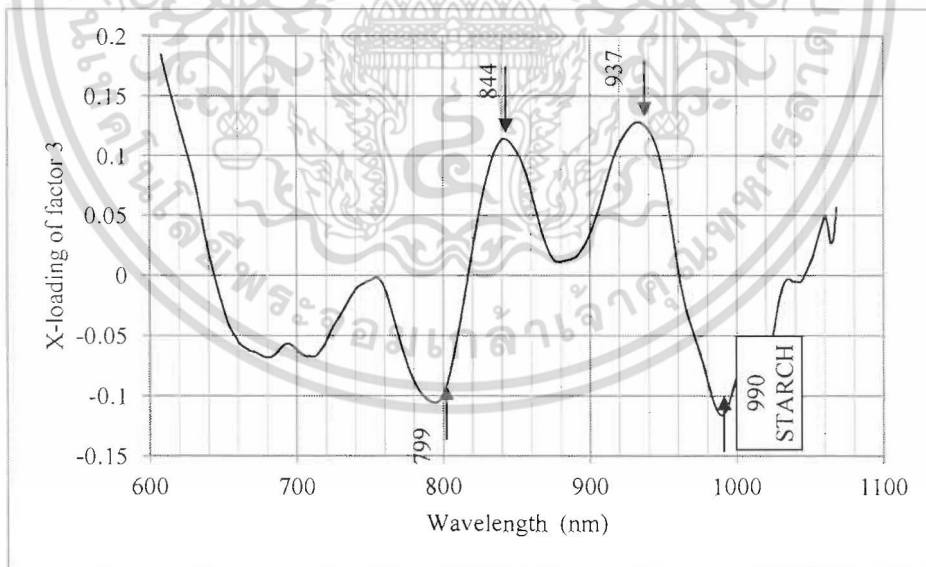
ภาพที่ 4.37 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลโรงงาน



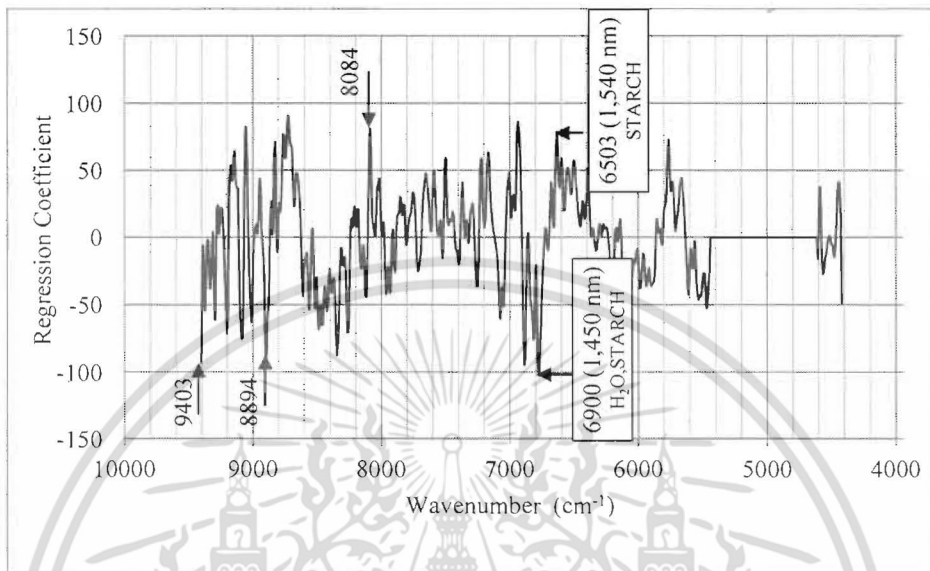
ภาพที่ 4.38 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลโรงงาน



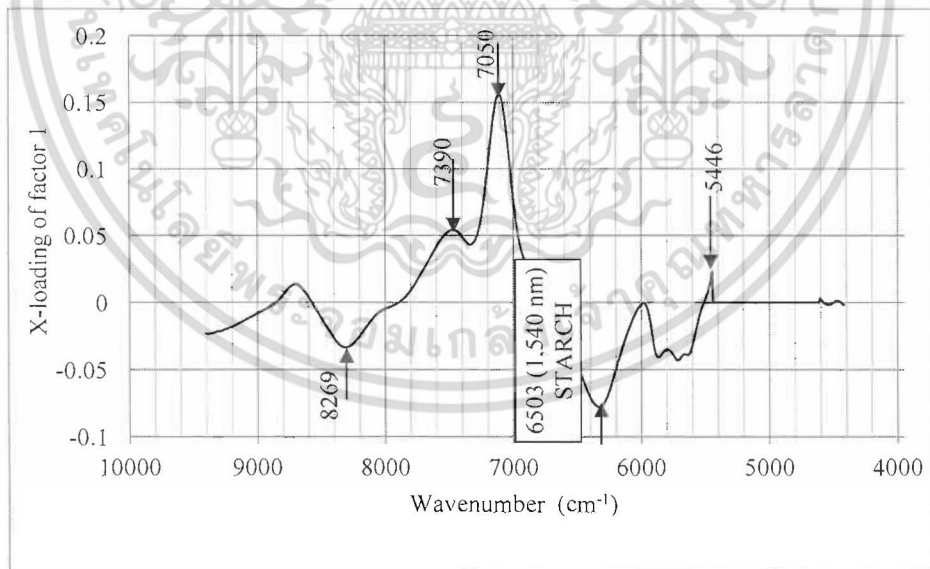
ภาพที่ 4.39 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลโรงงาน



ภาพที่ 4.40 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลโรงงาน

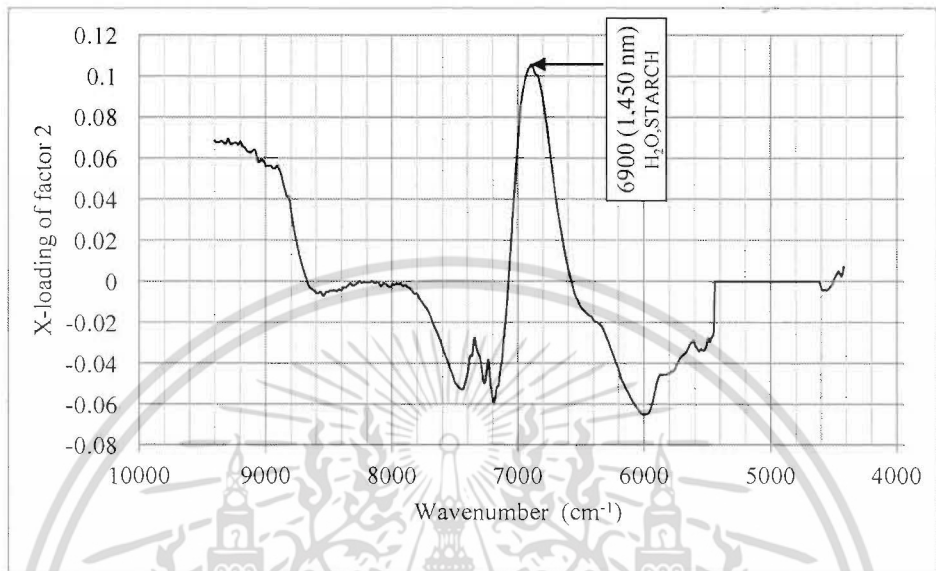


ภาพที่ 4.41 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน

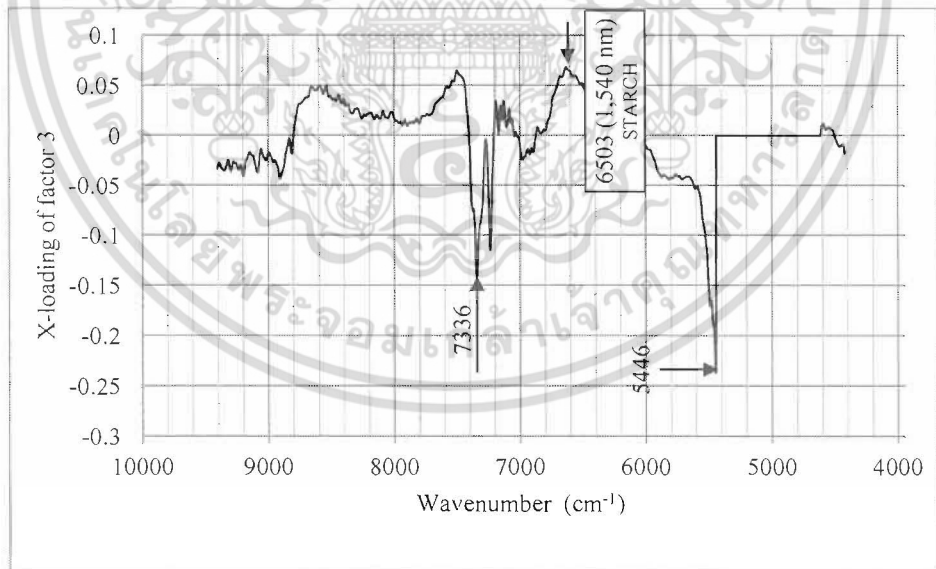


ภาพที่ 4.42 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน

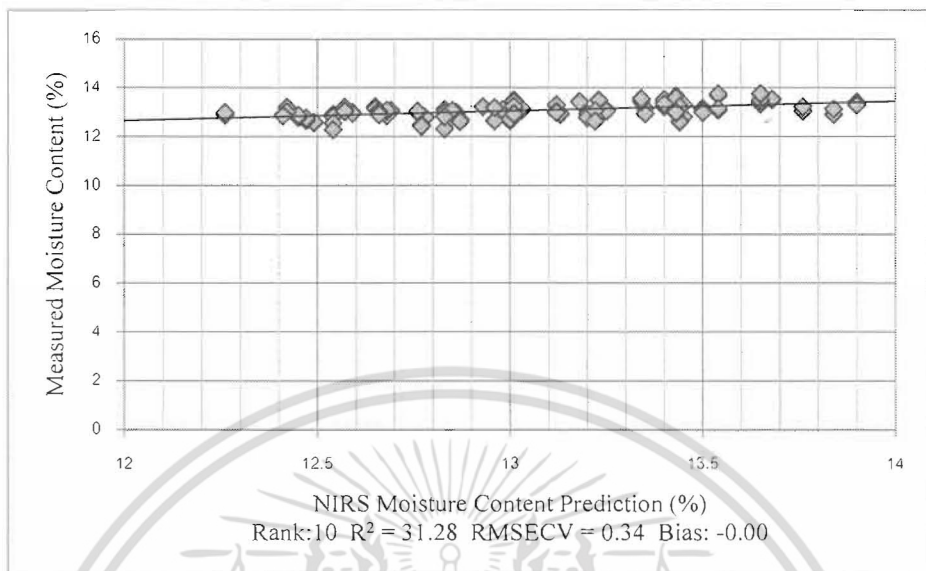
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



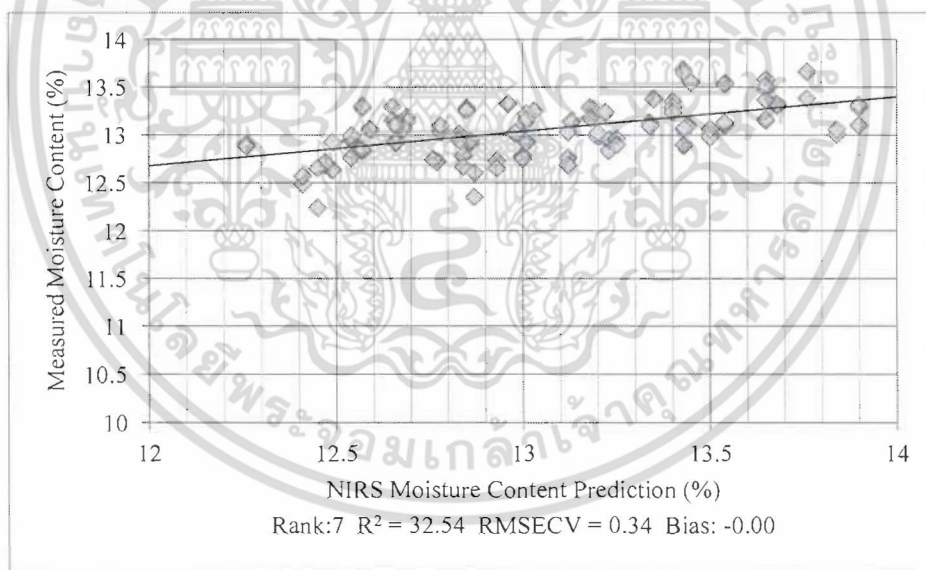
ภาพที่ 4.43 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน



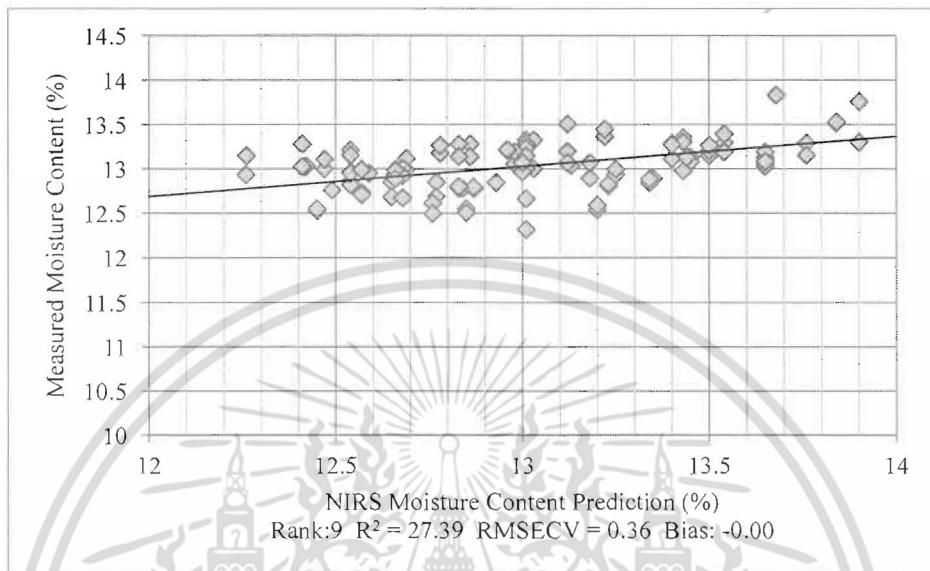
ภาพที่ 4.44 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน



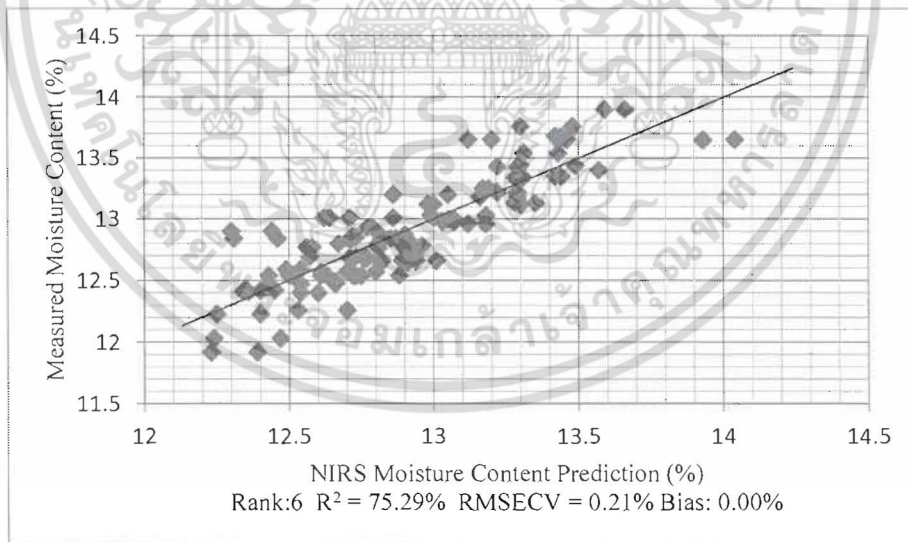
ภาพที่ 4.45 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดย ใช้ MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง โดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง) ที่เป็นสเปกตรัมดิบ



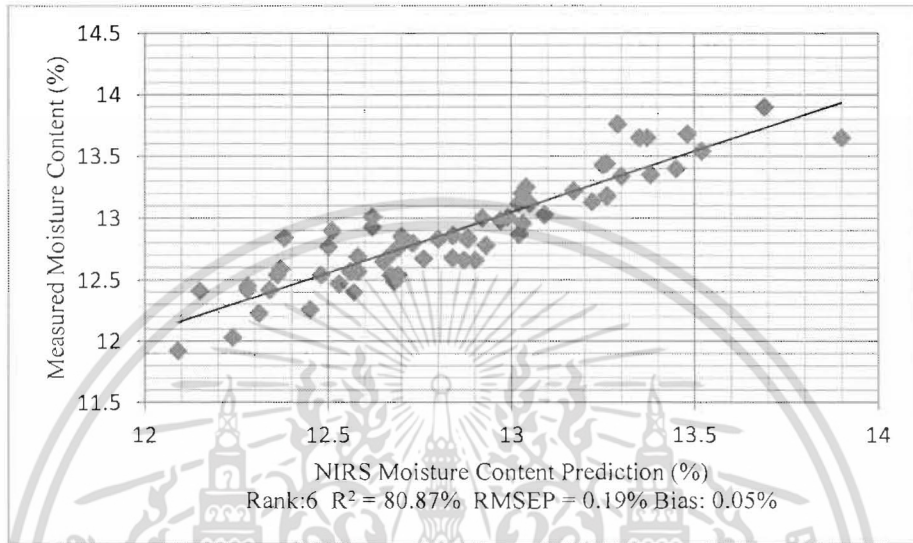
ภาพที่ 4.46 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดย ใช้ MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง) ที่เป็นสเปกตรัมดิบ



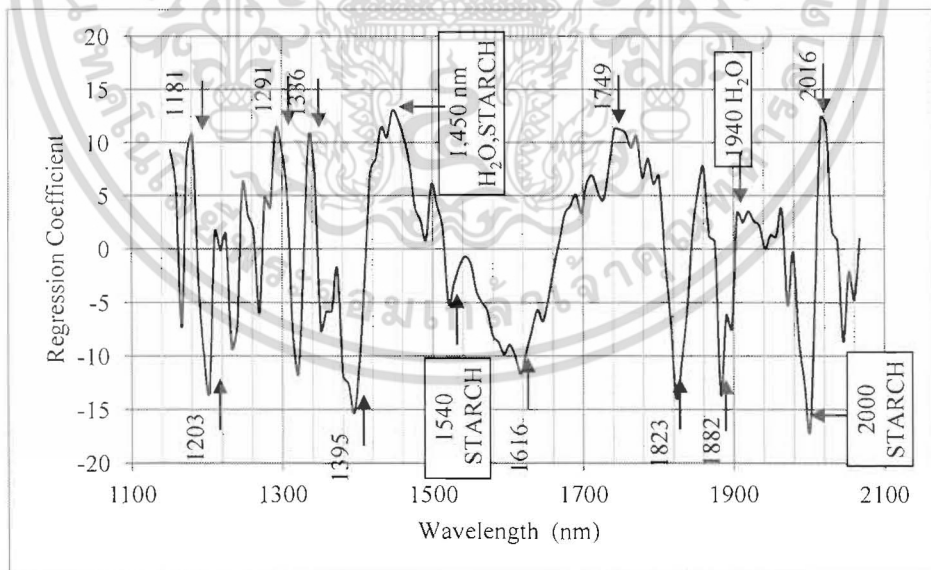
ภาพที่ 4.47 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหาคัด โดยใช้ FQA-NIR Gun สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง) ที่เป็นสเปกตรัมดิบ



ภาพที่ 4.48 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหาคัด โดยใช้ FT-NIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง) ที่ผ่านการทำ First derivative

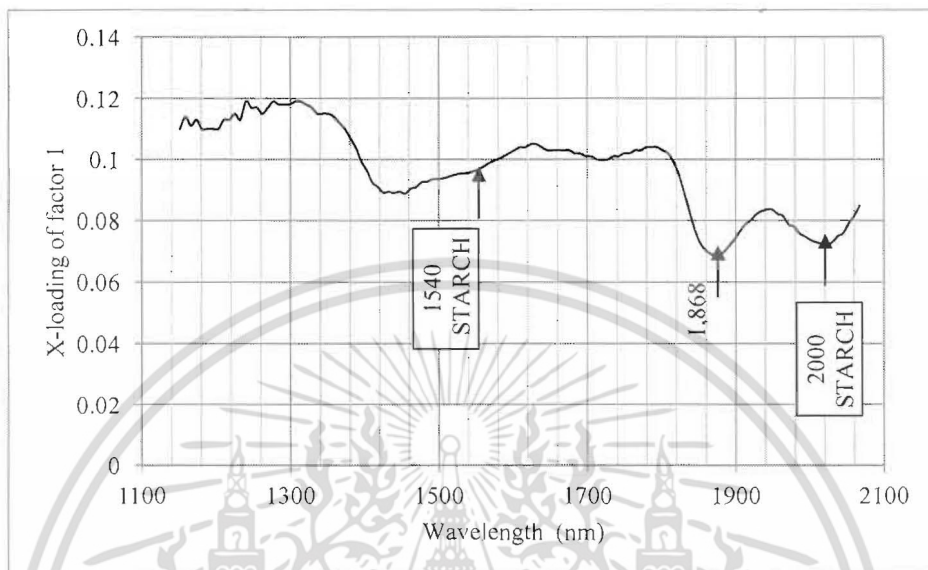


ภาพที่ 4.49 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดยใช้ FT-NIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง) ที่ผ่านการทำ First derivative

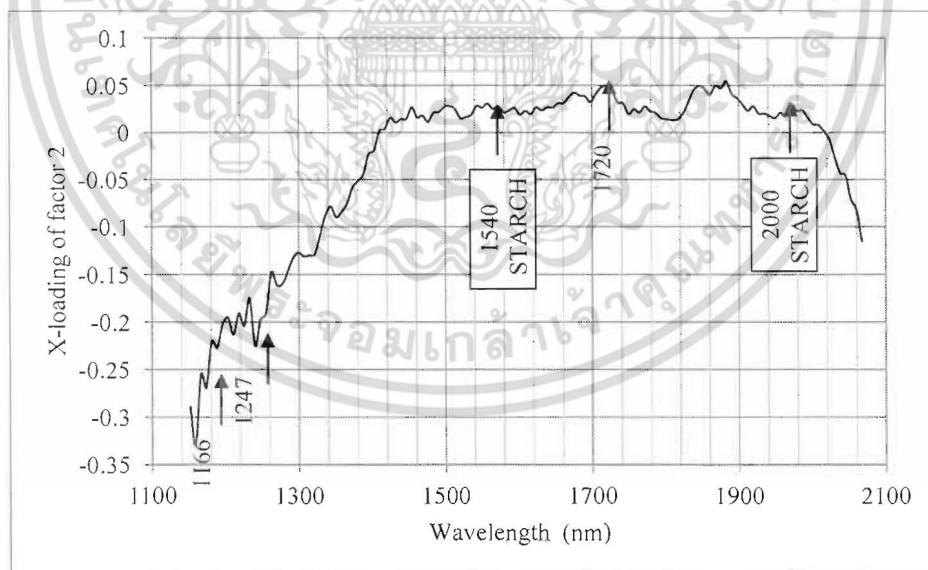


ภาพที่ 4.50 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

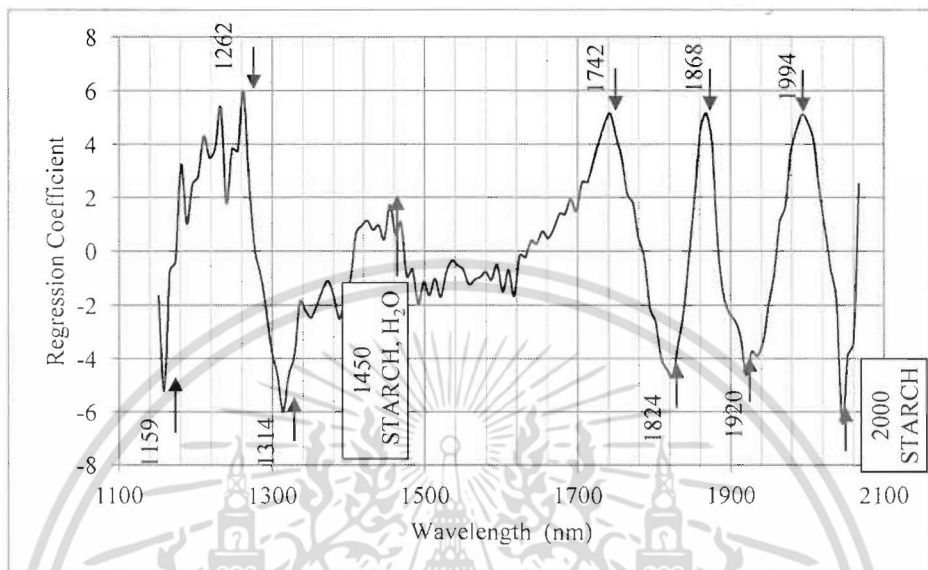


ภาพที่ 4.51 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)

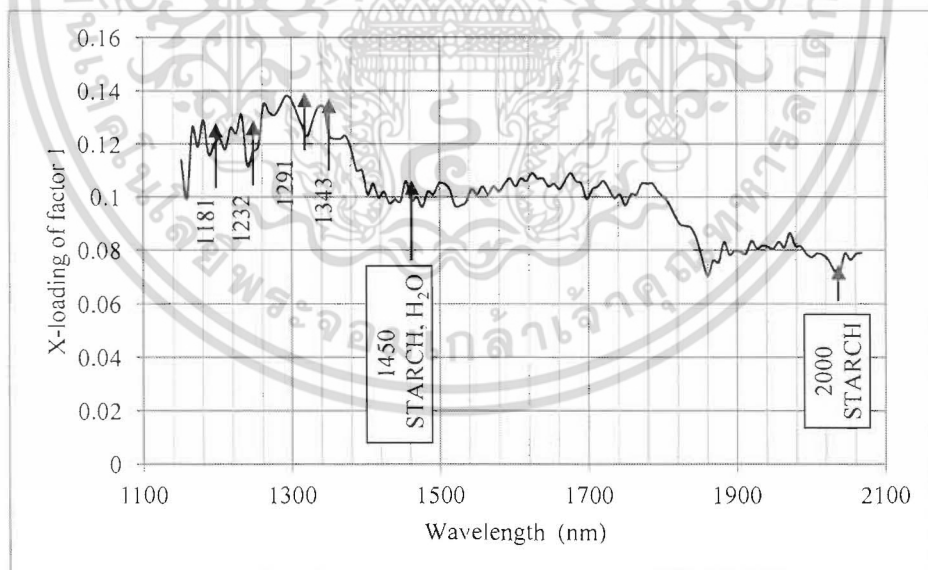


ภาพที่ 4.52 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

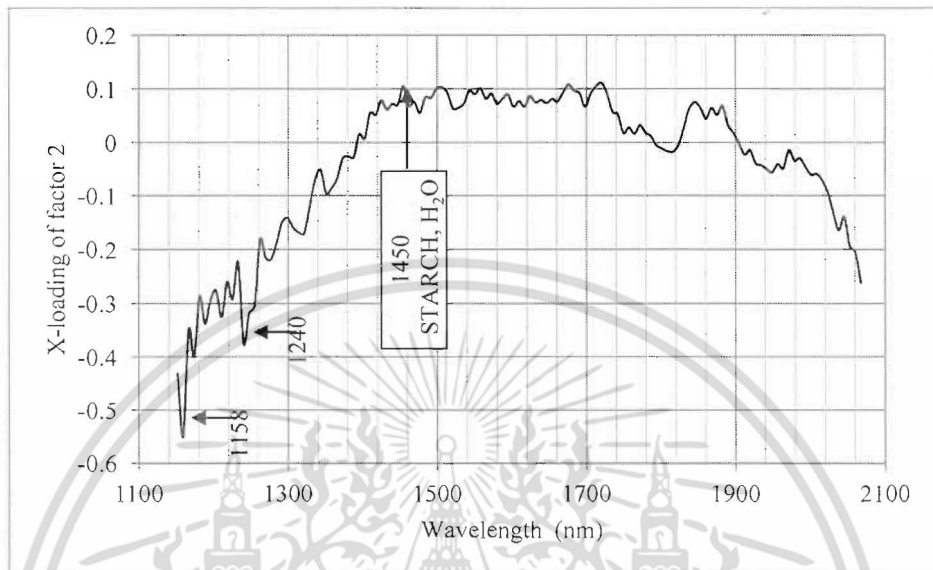


ภาพที่ 4.53 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังขนาดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)

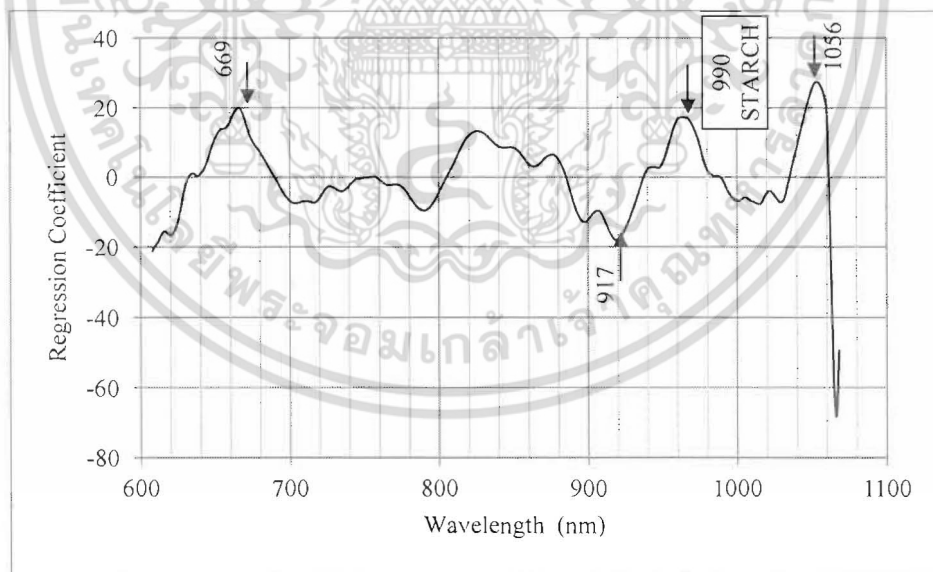


ภาพที่ 4.54 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังขนาดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)

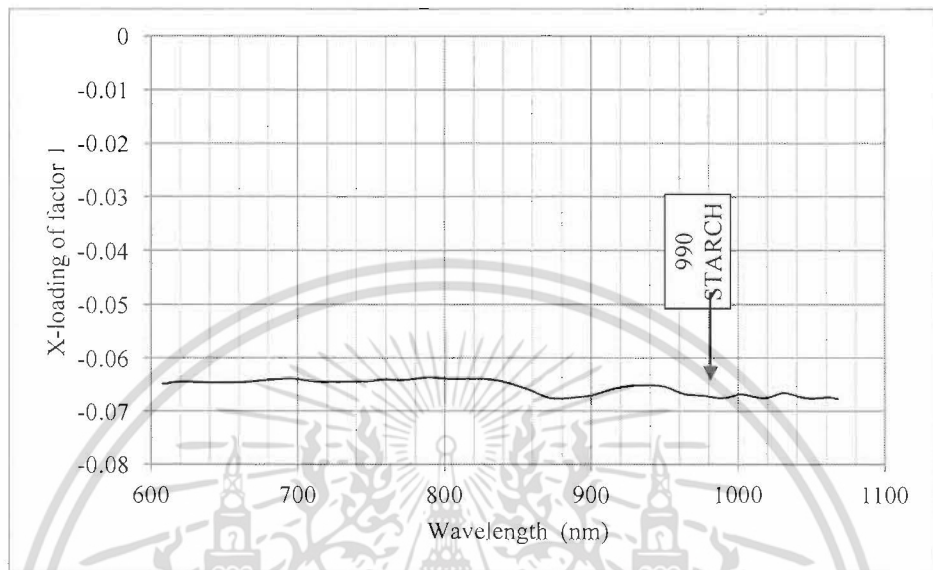
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



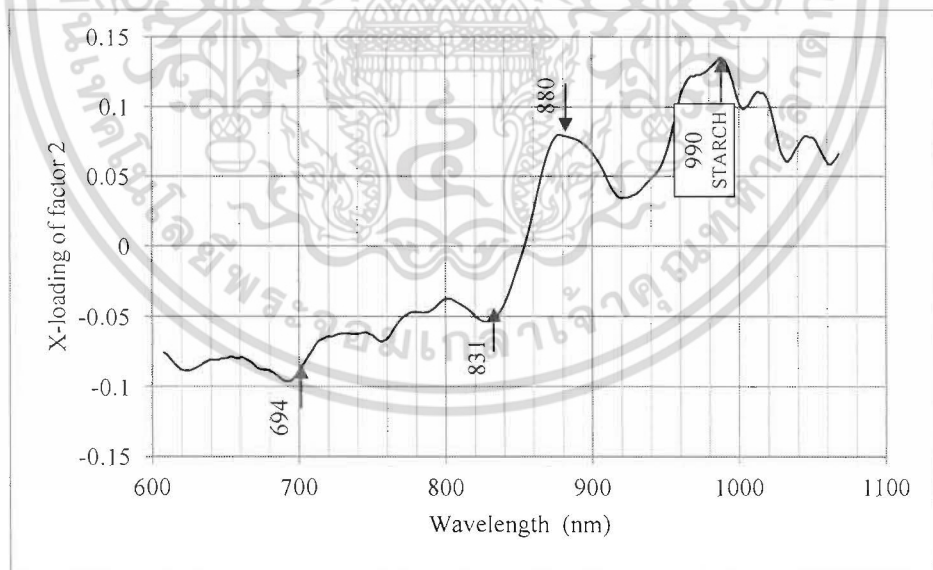
ภาพที่ 4.55 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)



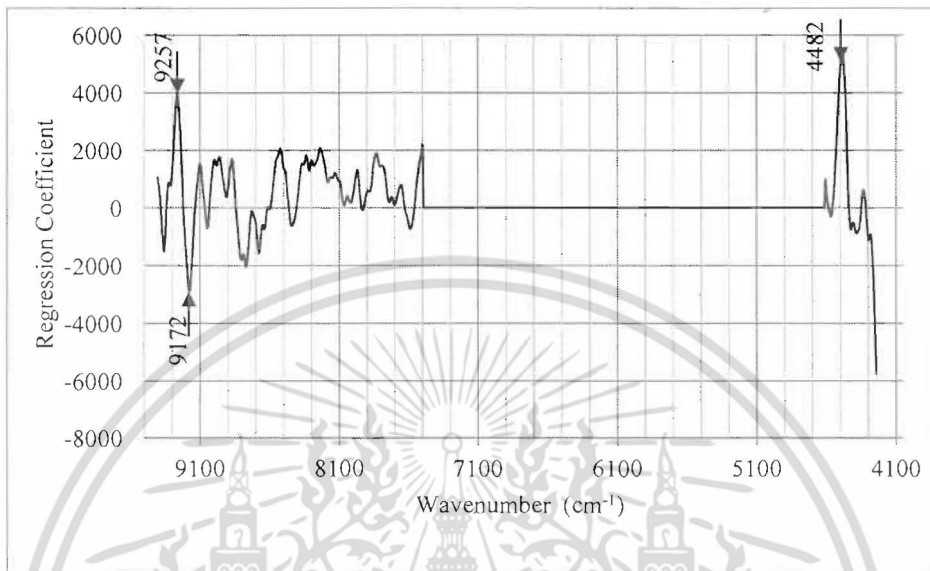
ภาพที่ 4.56 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกน ด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)



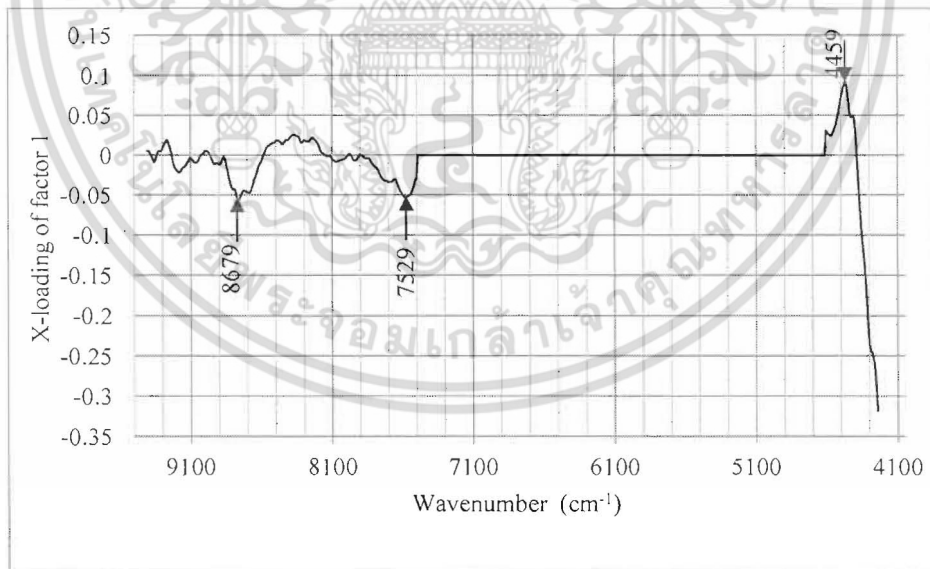
ภาพที่ 4.57 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)



ภาพที่ 4.58 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)

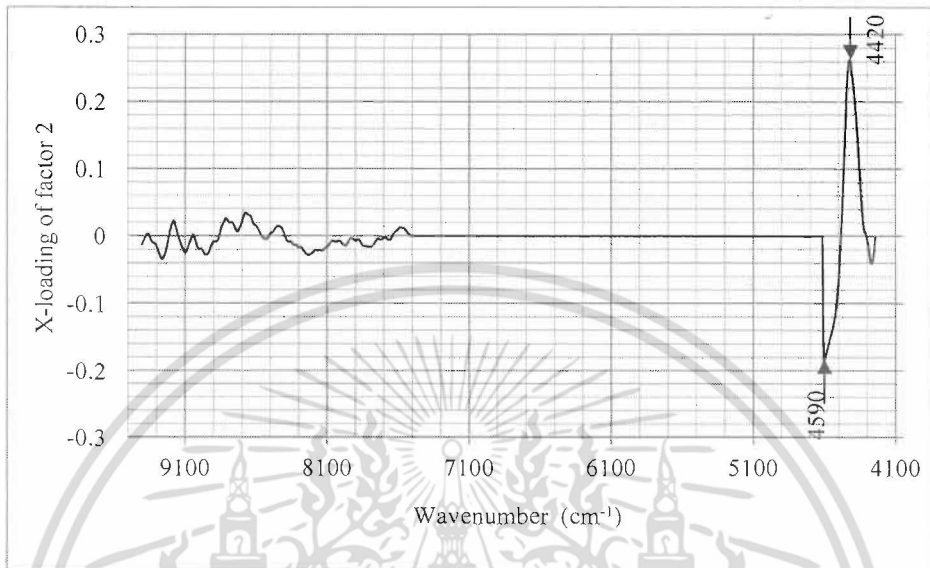


ภาพที่ 4.59 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)

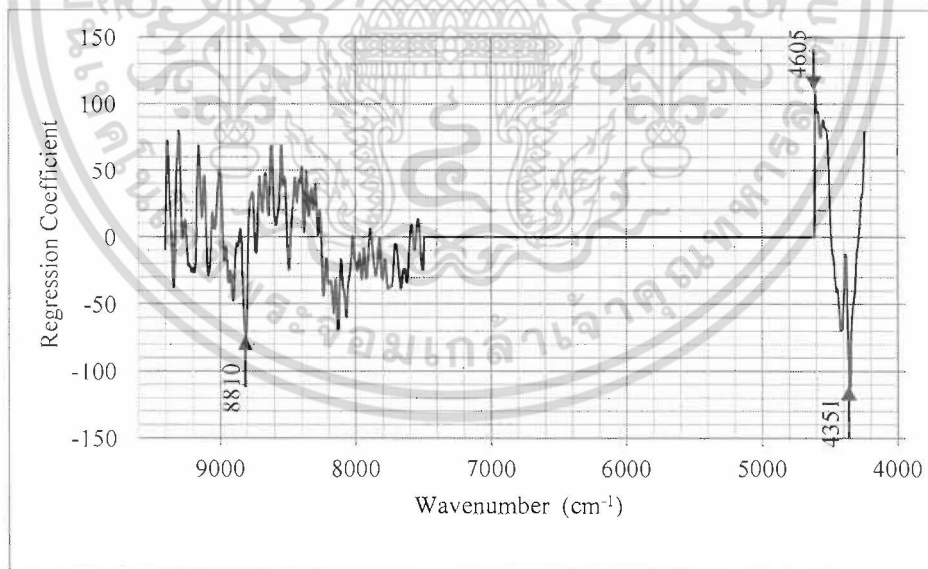


ภาพที่ 4.60 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

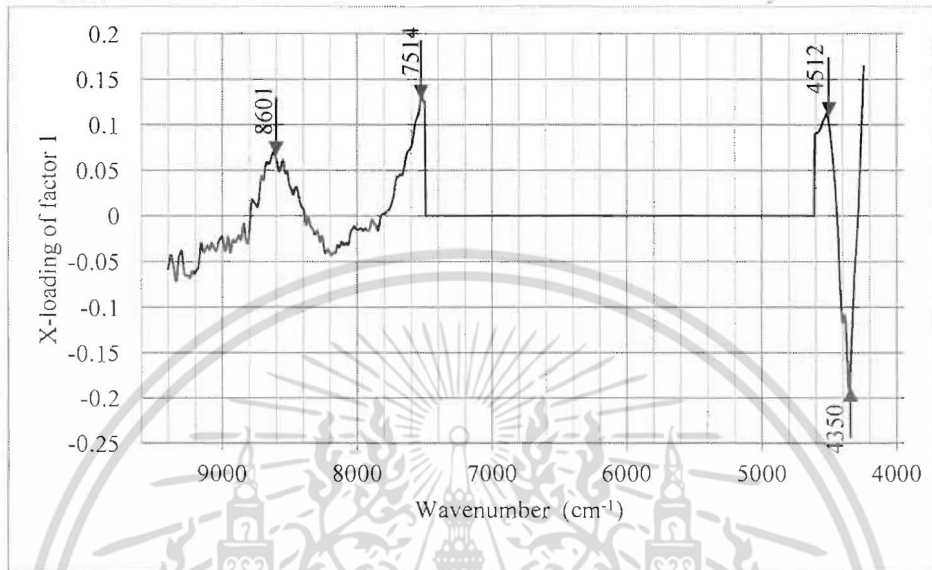


ภาพที่ 4.61 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)

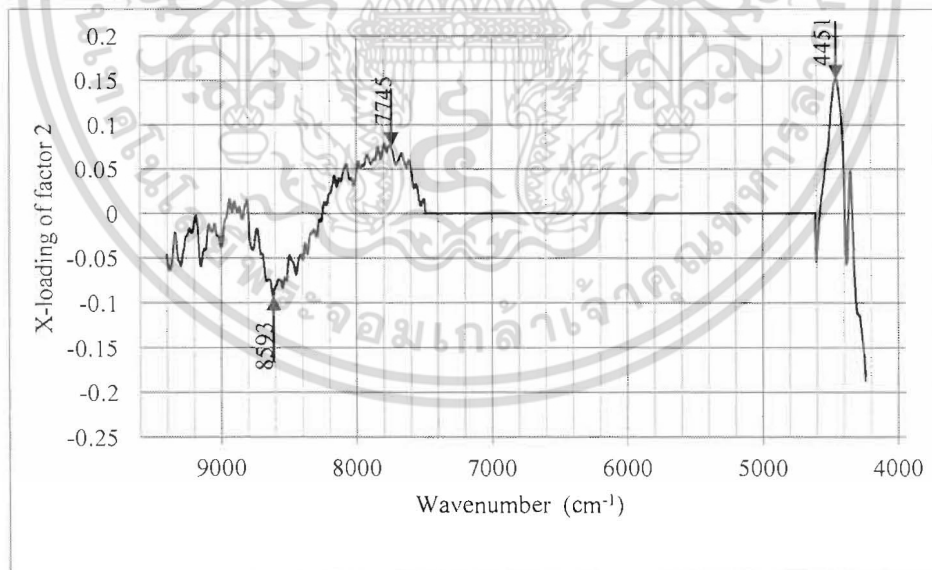


ภาพที่ 4.62 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกน ด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

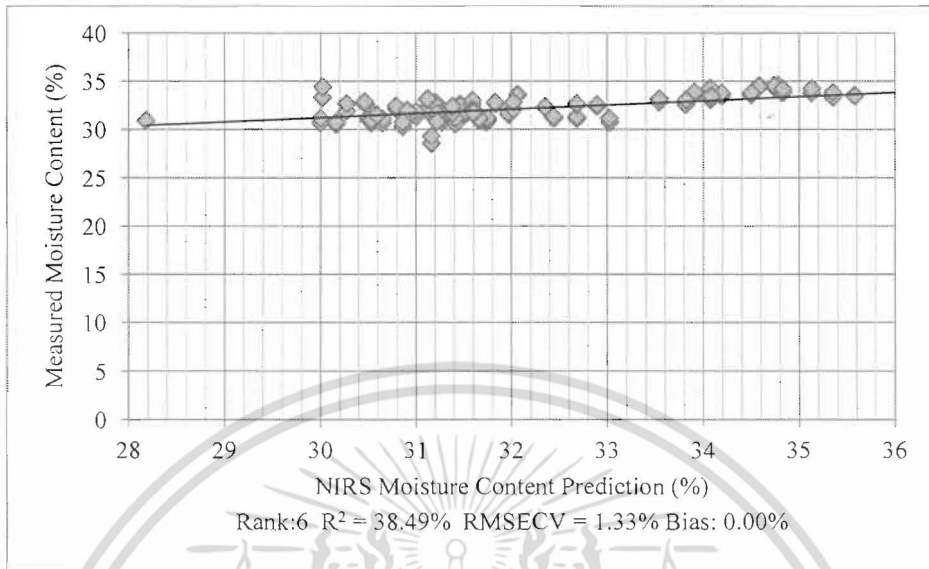


ภาพที่ 4.63 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)

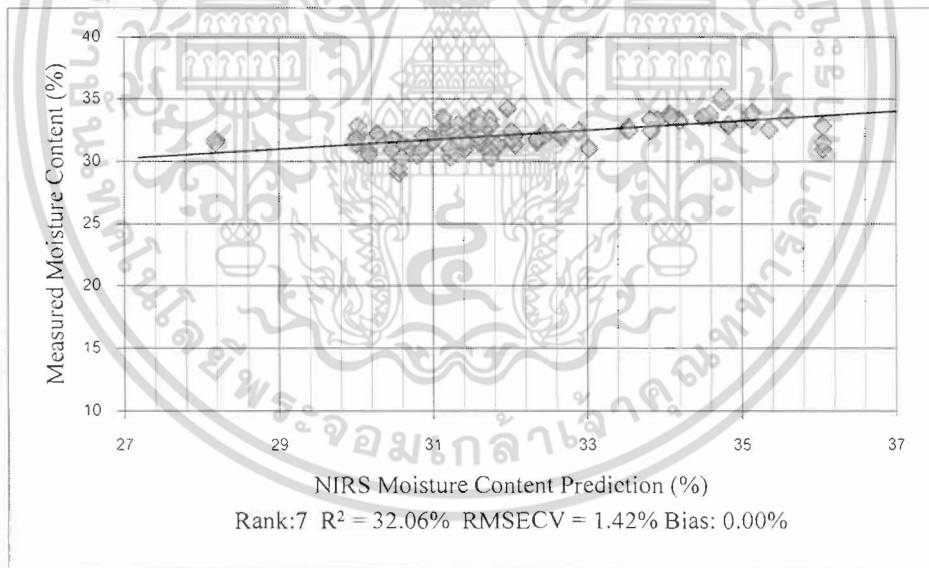


ภาพที่ 4.64 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งแห้ง)

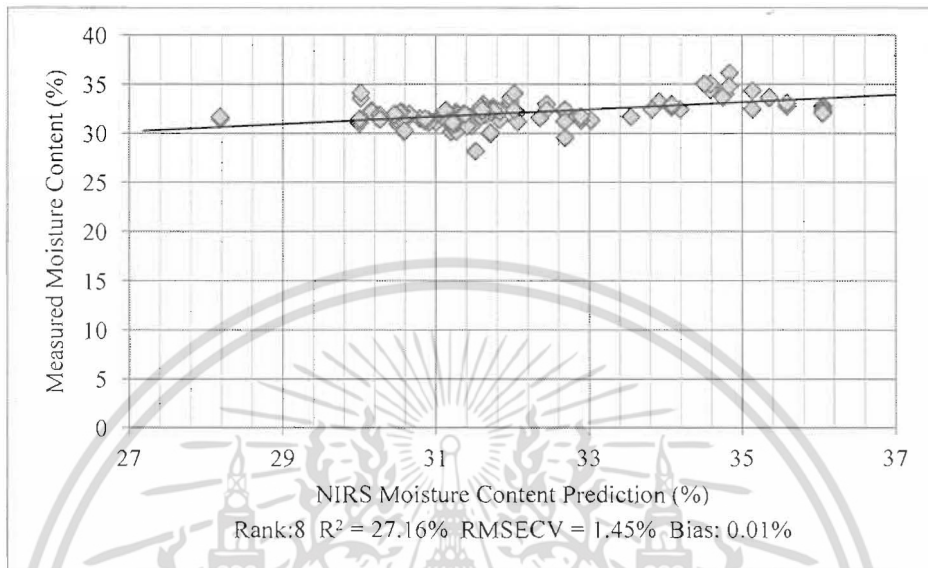
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



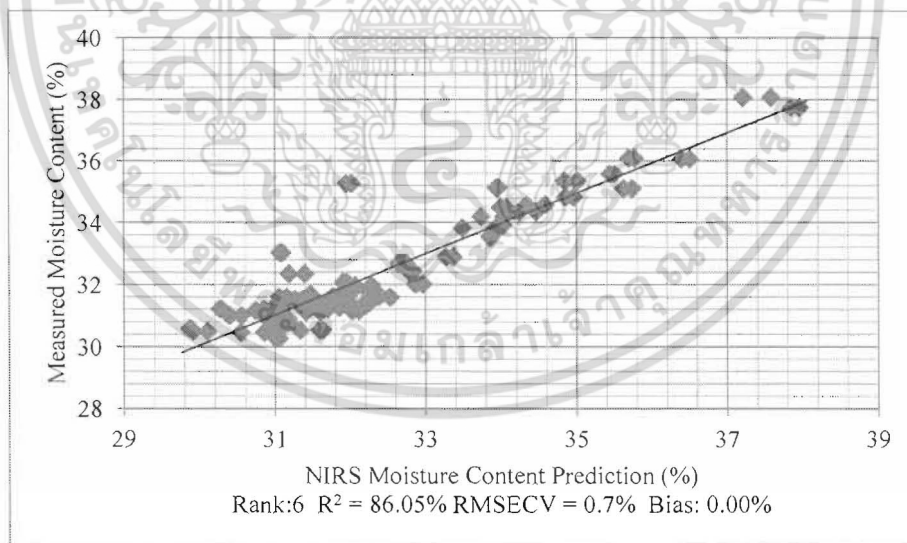
ภาพที่ 4.65 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหาคัด โดยใช้ MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหาคัด) ที่เป็นสเปกตรัมดิบ



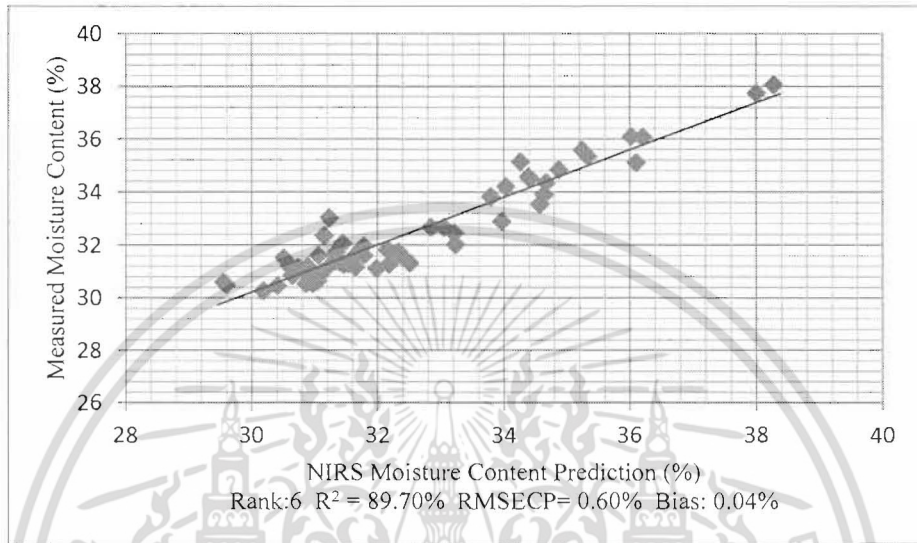
ภาพที่ 4.66 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหาคัด โดยใช้ MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหาคัด) ที่เป็นสเปกตรัมดิบ



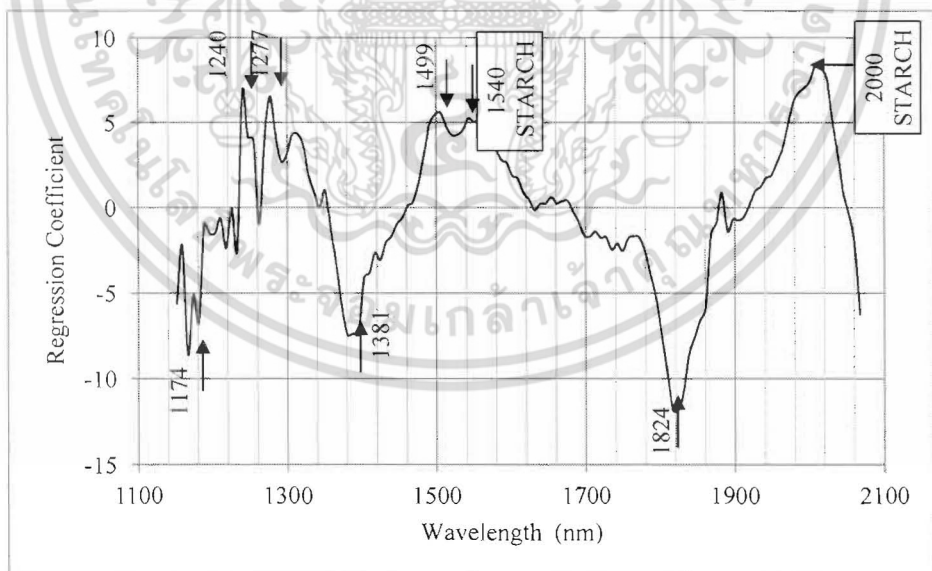
ภาพที่ 4.67 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดย ใช้ FQA-NIR Gun สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมาด) ที่เป็นสเปกตรัมดิบ



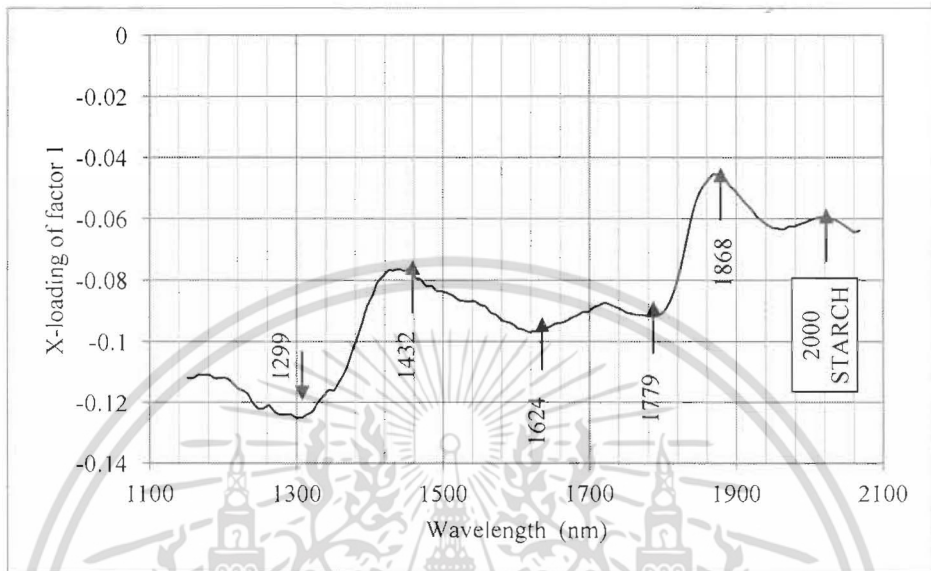
ภาพที่ 4.68 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดย ใช้ FT-NIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมาด) ที่ผ่านการทำ Straight line Subtraction



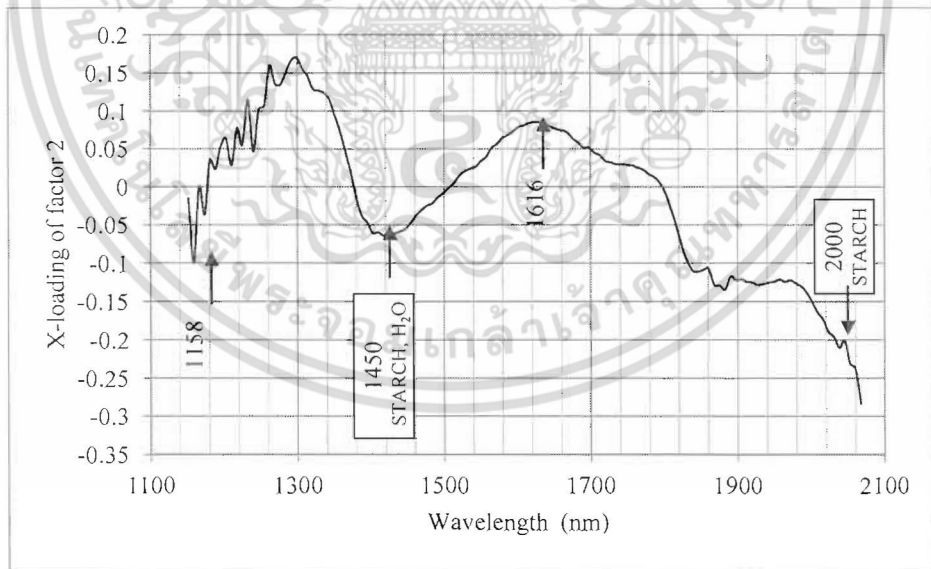
ภาพที่ 4.69 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดย ใช้ FT-NIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมาด) ที่ผ่านการทำ Straight line Subtraction



ภาพที่ 4.70 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาดที่สแกน ด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมาด)

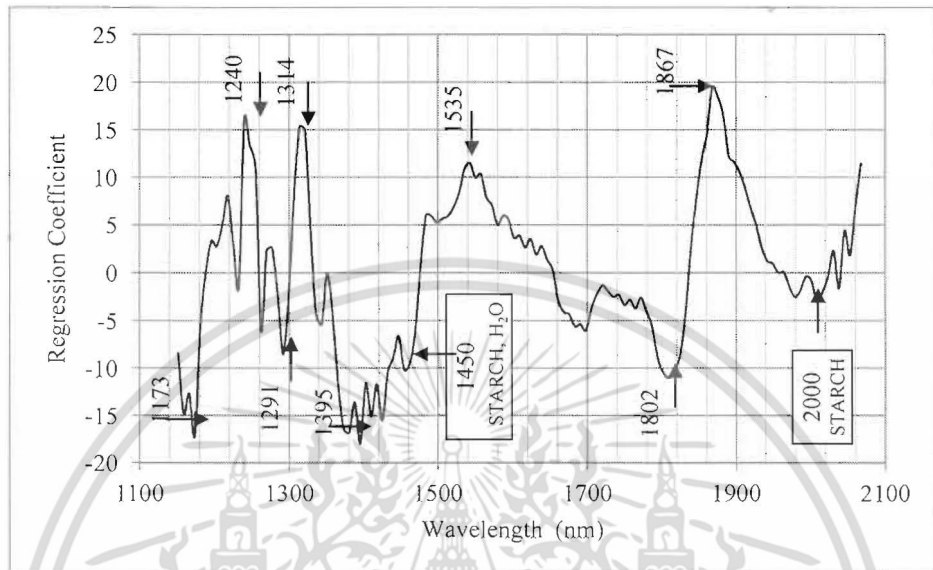


ภาพที่ 4.71 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้ง โดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมวด)

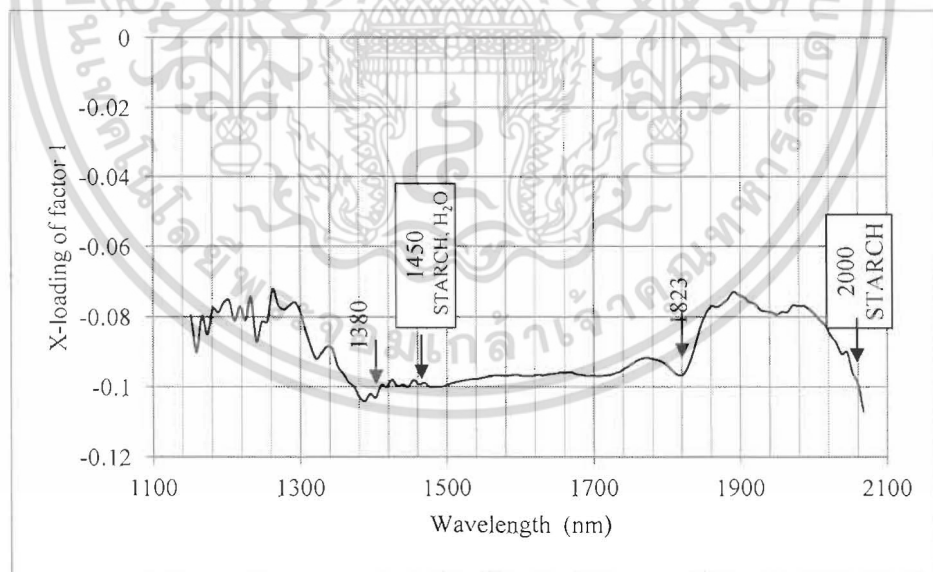


ภาพที่ 4.72 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้ง โดยตรงของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมวด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

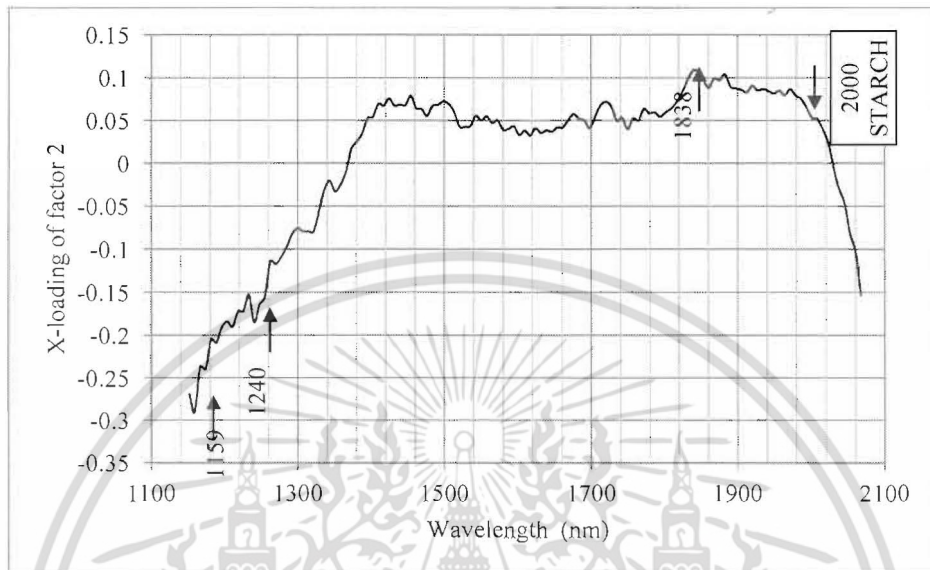


ภาพที่ 4.73 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมวด)

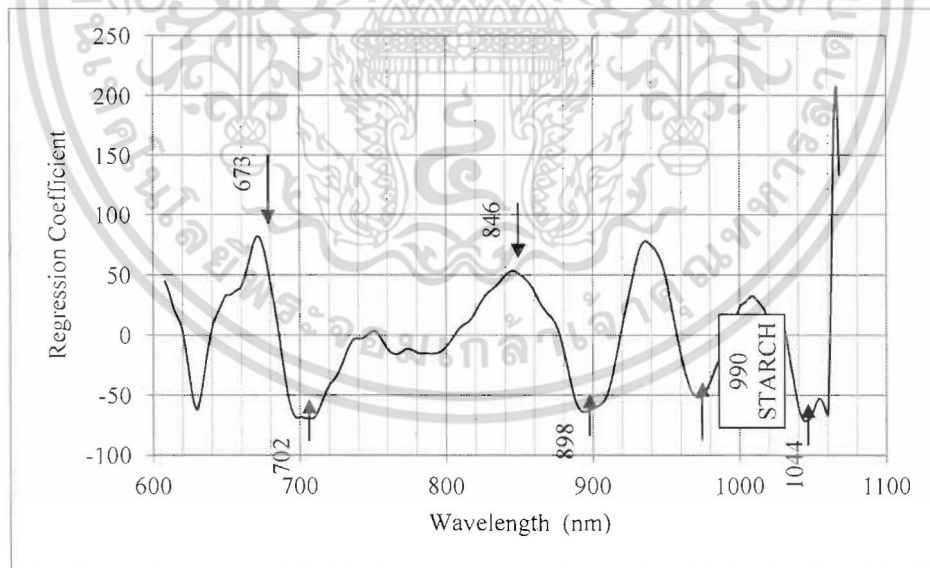


ภาพที่ 4.74 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมวด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

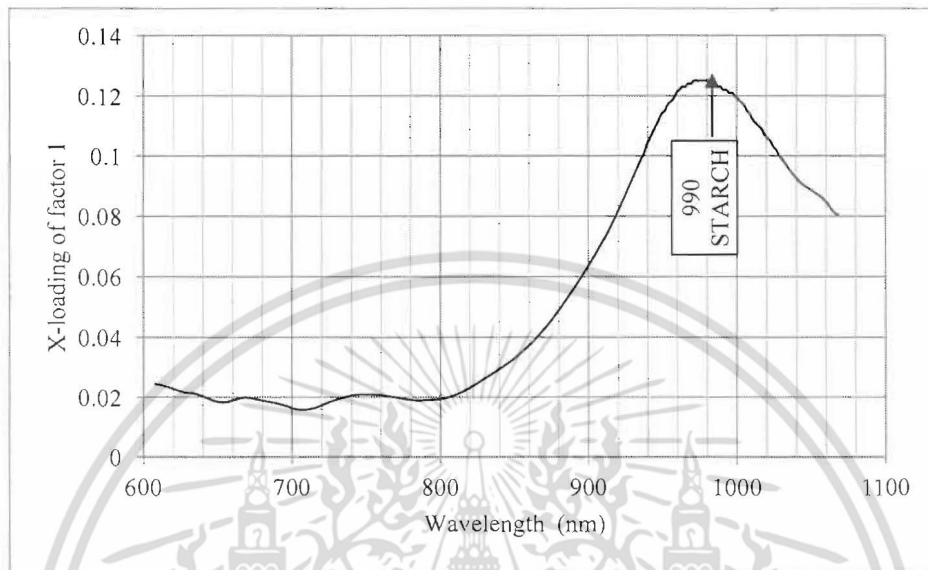


ภาพที่ 4.75 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมัก)

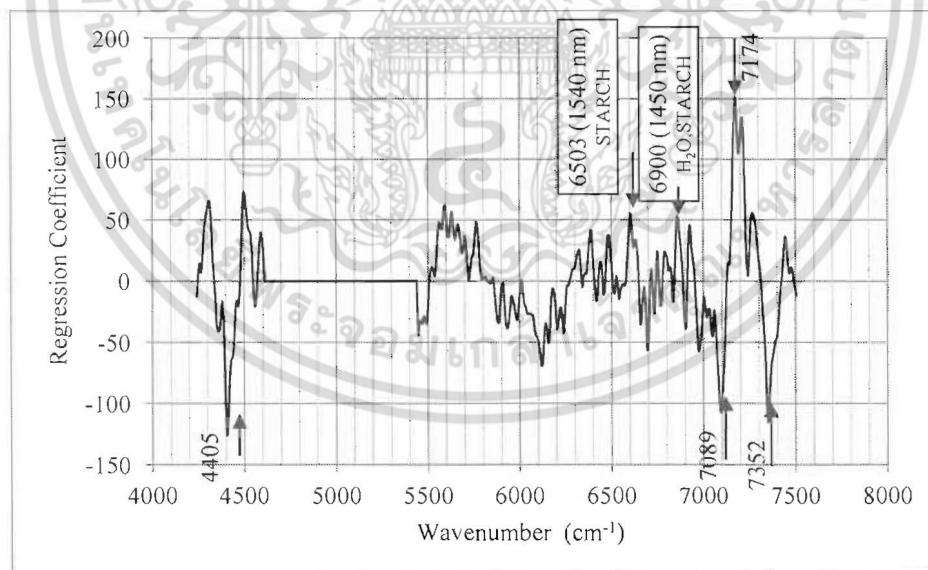


ภาพที่ 4.76 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมัก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

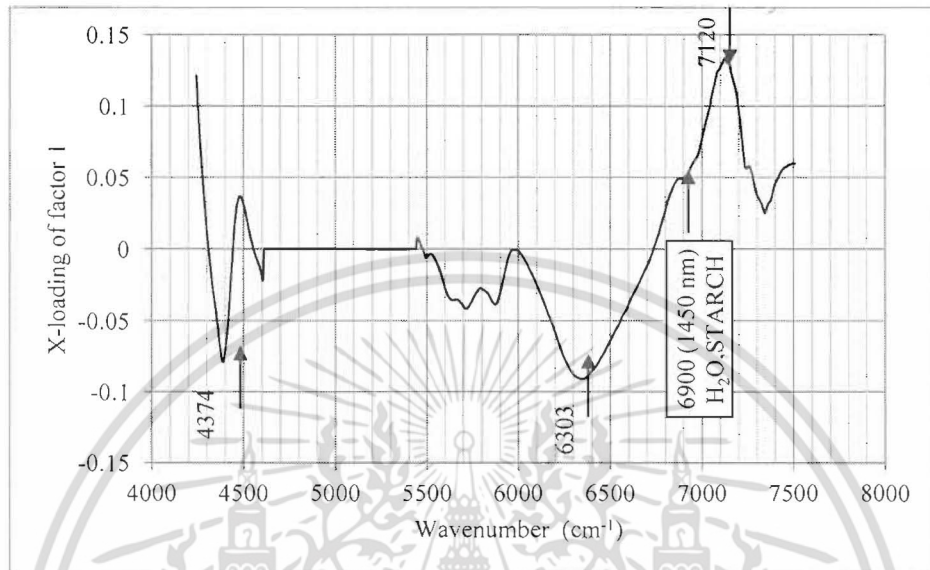


ภาพที่ 4.77 X-loading plot of factor I ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมัก)

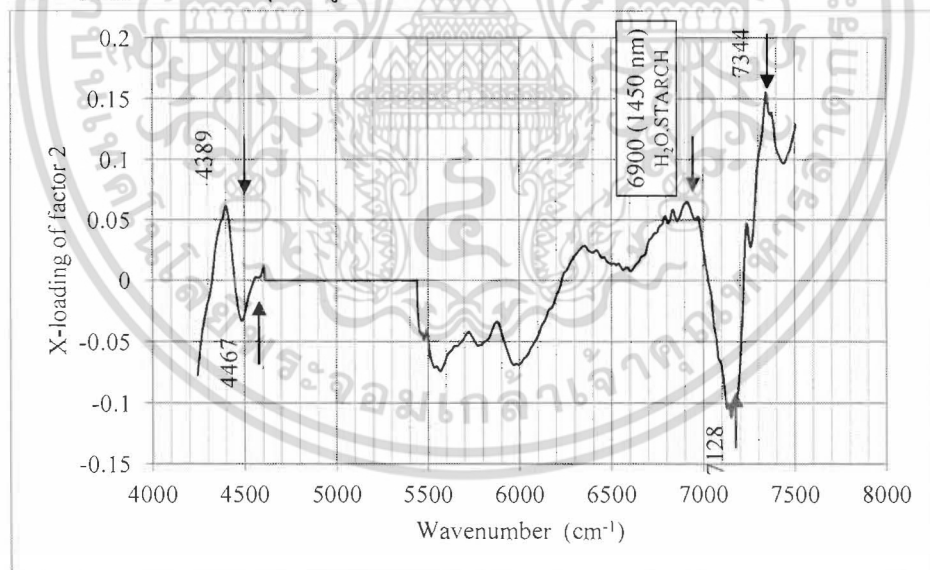


ภาพที่ 4.78 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมัก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

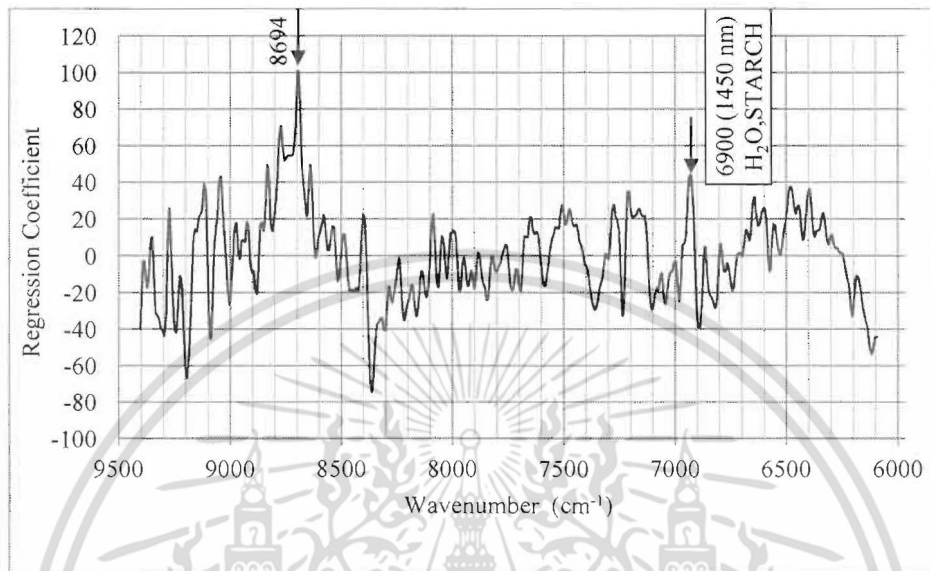


ภาพที่ 4.79 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมวด)

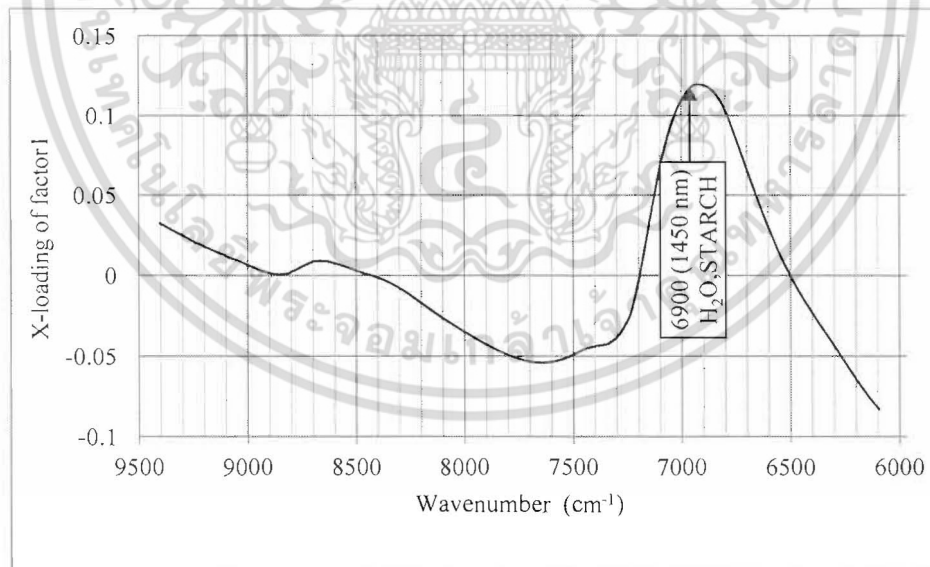


ภาพที่ 4.80 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมวด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

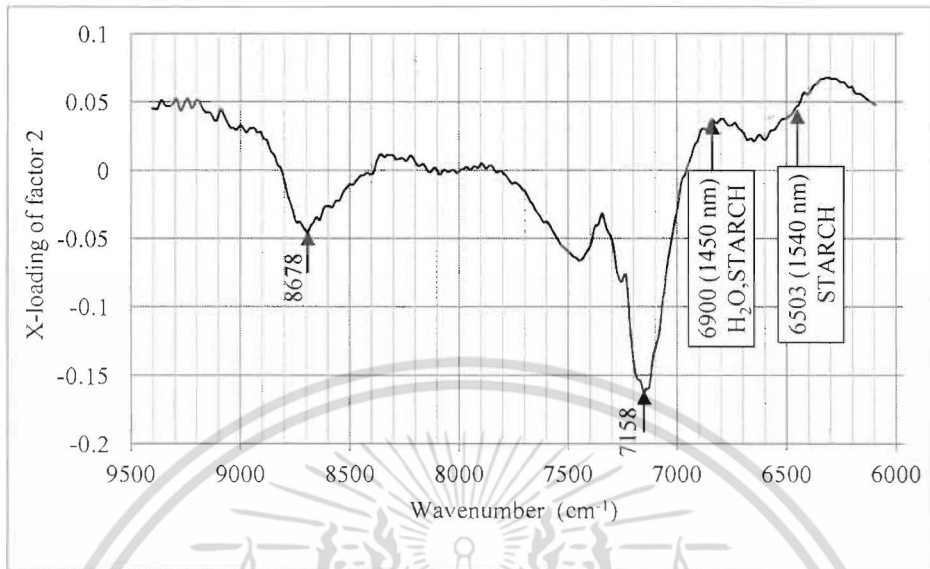


ภาพที่ 4.81 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมวด)

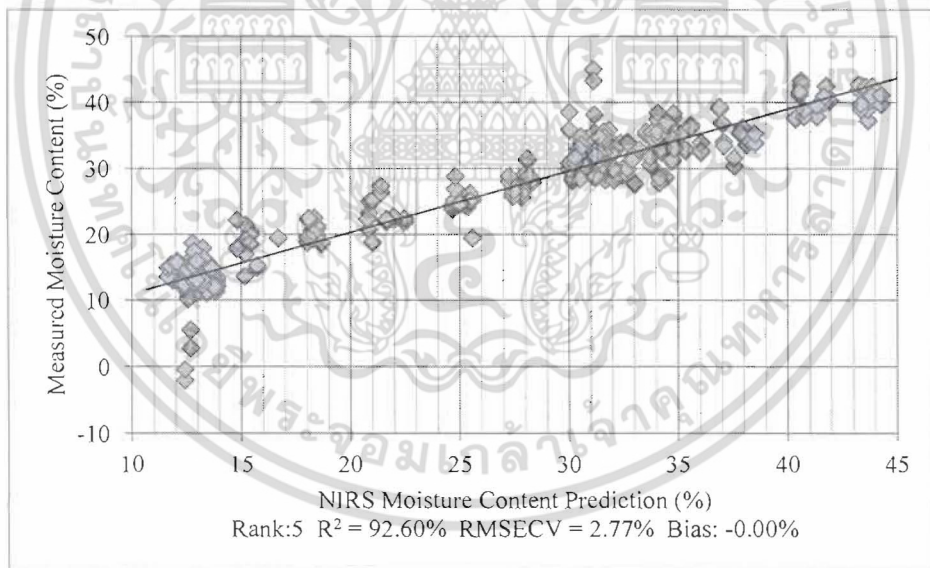


ภาพที่ 4.82 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมวด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

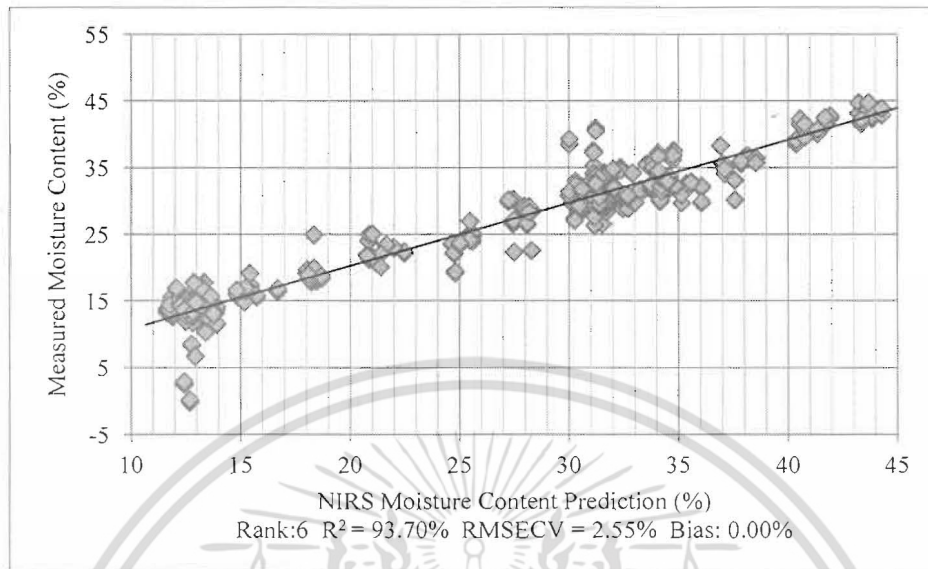


ภาพที่ 4.83 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลโรงงาน (แป้งหมัก)

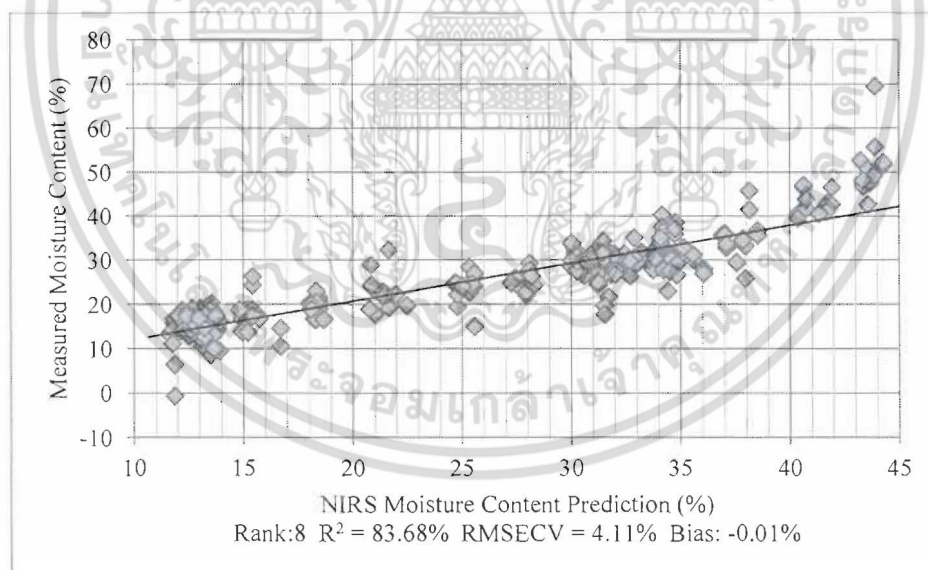


ภาพที่ 4.84 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมัก โดยใช้ MicroNIR spectrometer สแกนที่ผิวหน้าแป้ง โดยตรงของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงานที่เป็นสเปกตรัมดิบ

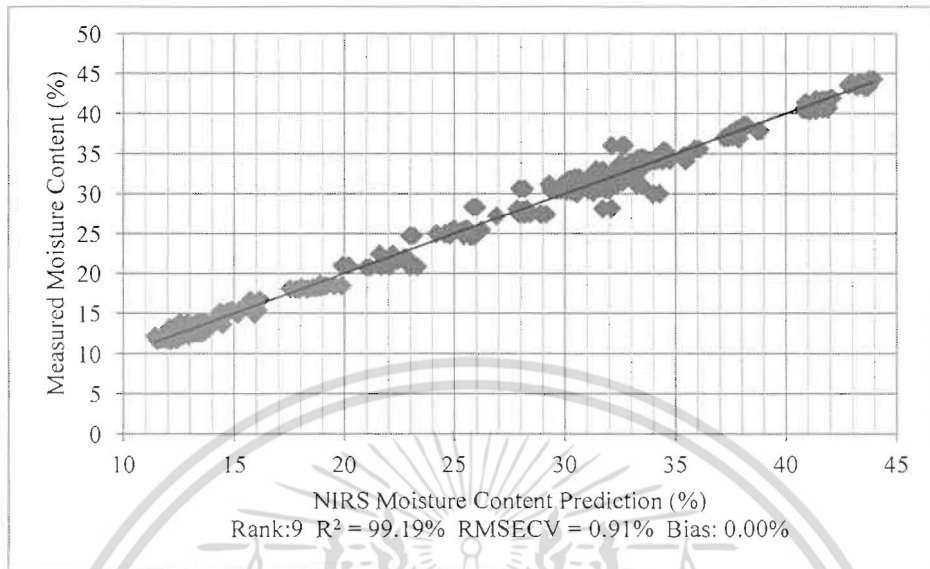
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



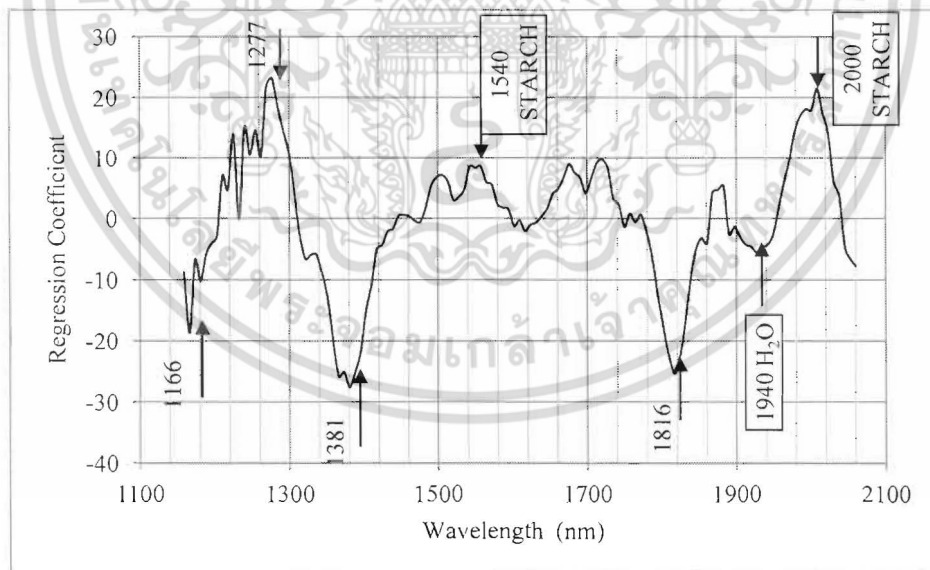
ภาพที่ 4.85 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดย ใช้ MicroNIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงานที่เป็นสเปกตรัมดิบ



ภาพที่ 4.86 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมาด โดย ใช้ FQA-NIR Gun สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงานที่เป็นสเปกตรัมดิบ

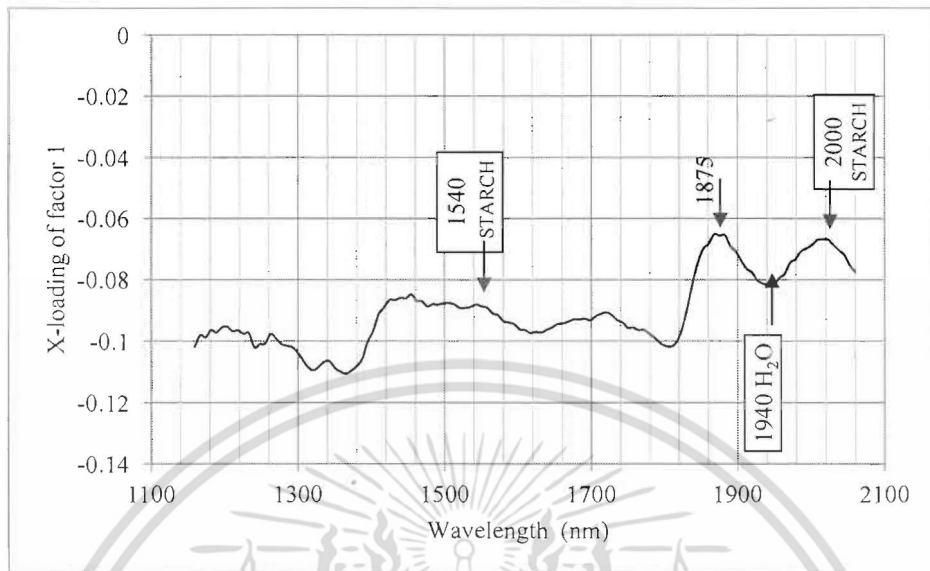


ภาพที่ 4.87 Scatter plot ของข้อมูลอ้างอิง (X) และข้อมูลทำนาย (Y) สำหรับความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมัก โดย  
ใช้ FT-NIR spectrometer สแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงานที่ผ่านการทำ Min-Max  
normalization

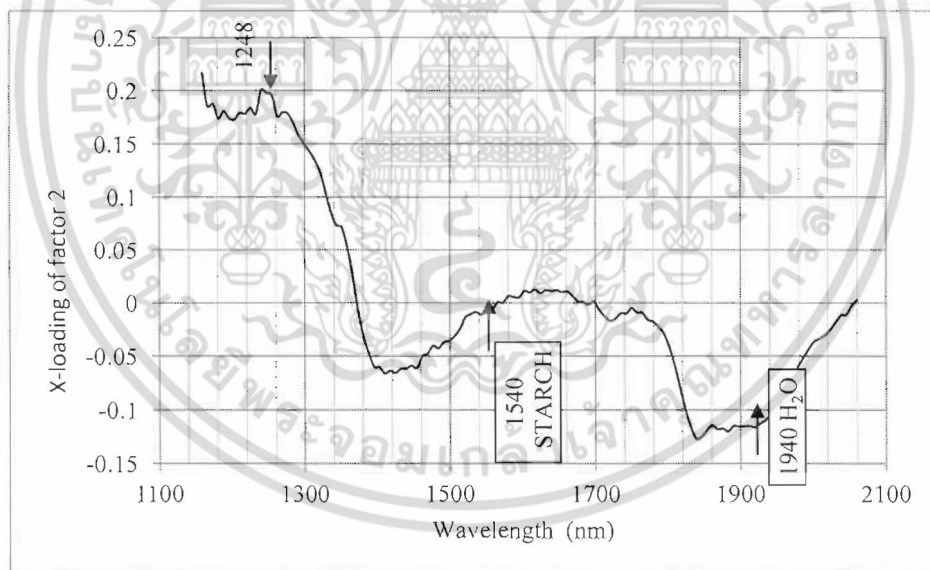


ภาพที่ 4.88 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกน  
ด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

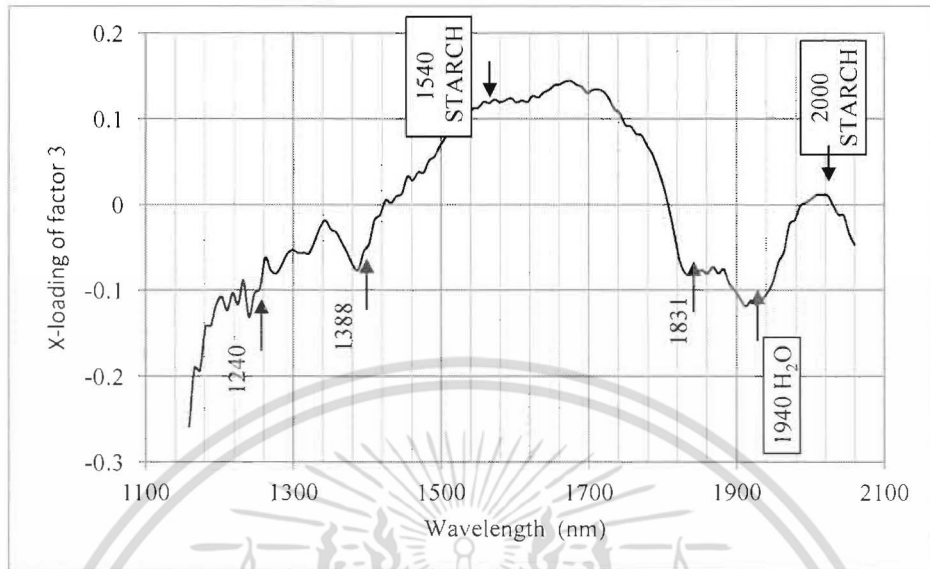


ภาพที่ 4.89 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน

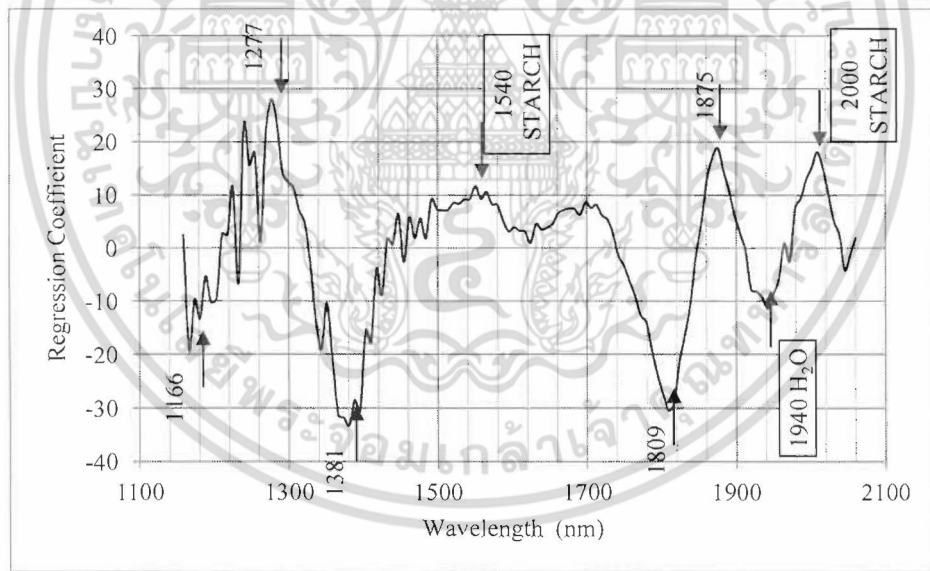


ภาพที่ 4.90 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

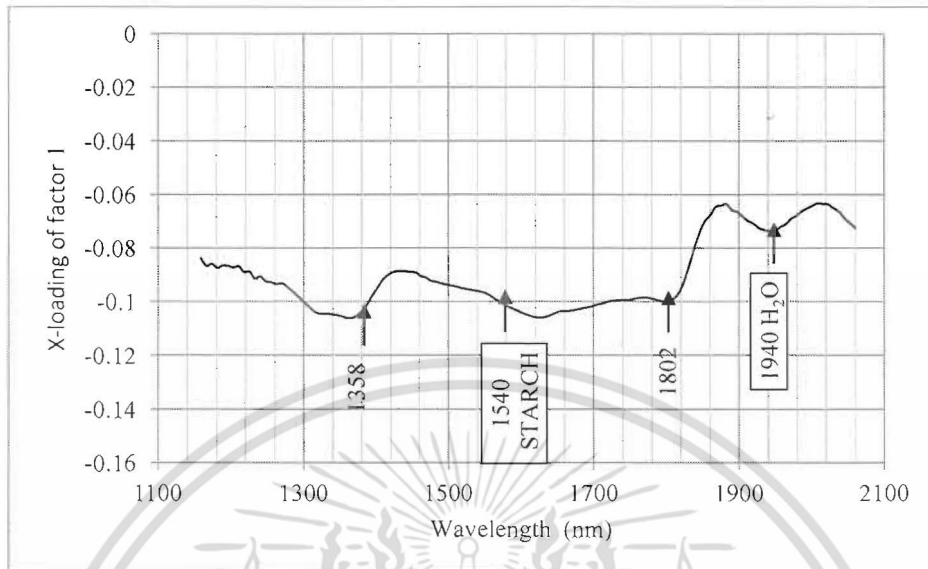


ภาพที่ 4.91 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาคที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนที่ผิวหน้าแป้งโดยตรงของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน

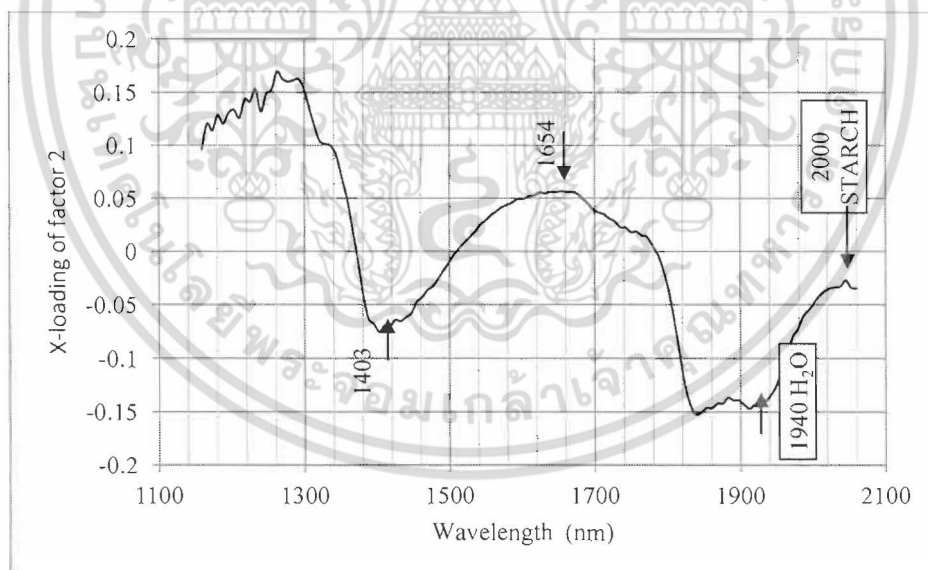


ภาพที่ 4.92 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาคที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านแก้วของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

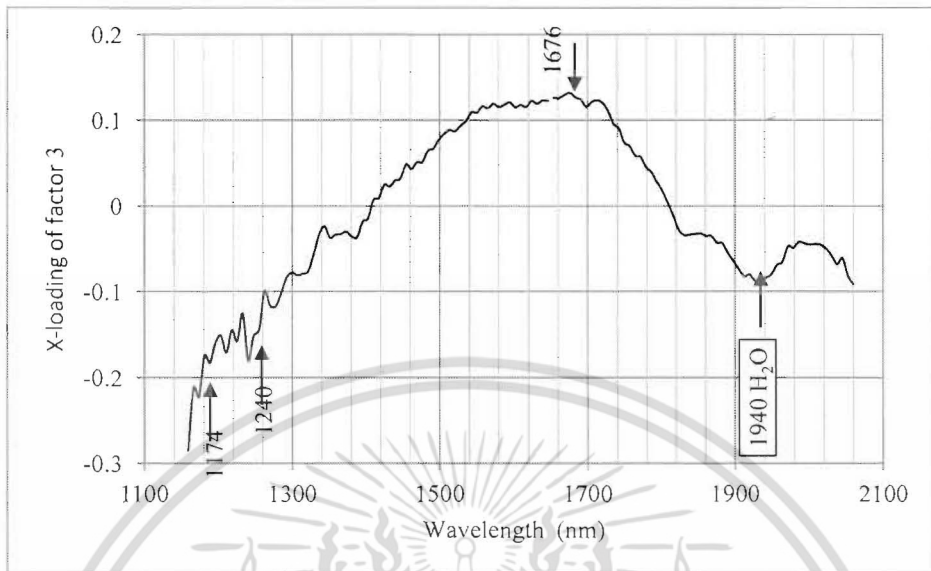


ภาพที่ 4.93 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน

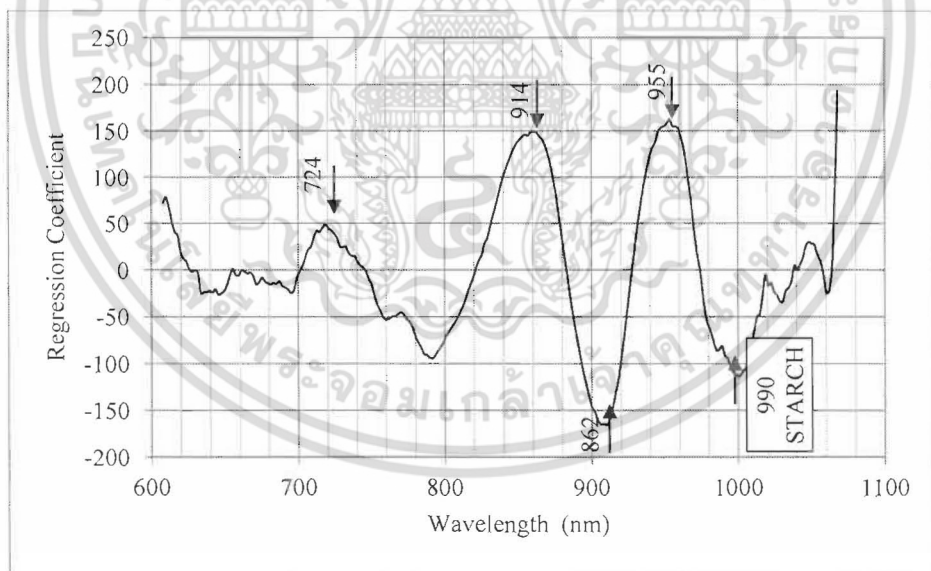


ภาพที่ 4.94 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

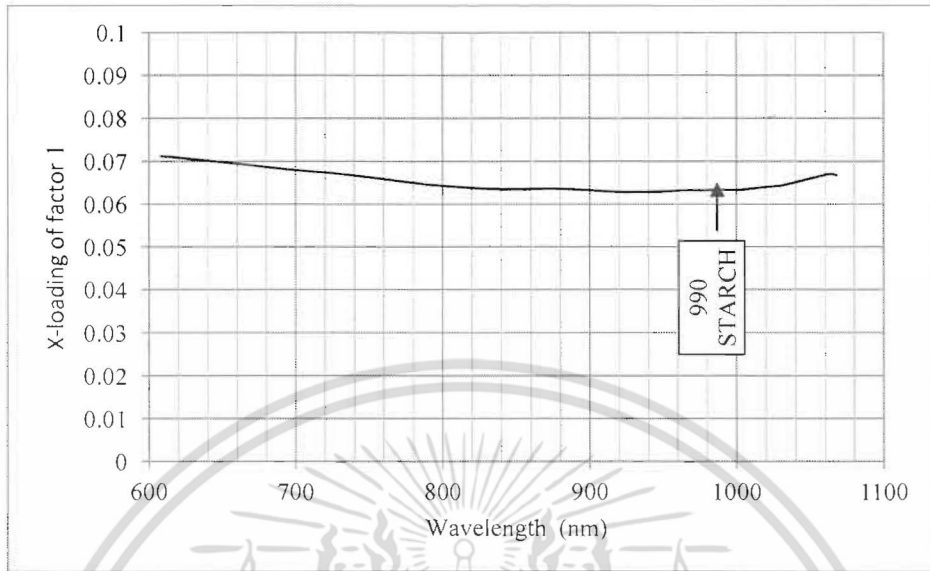


ภาพที่ 4.95 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย MicroNIR spectrometer โดยสแกนผ่านจานแก้วของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน

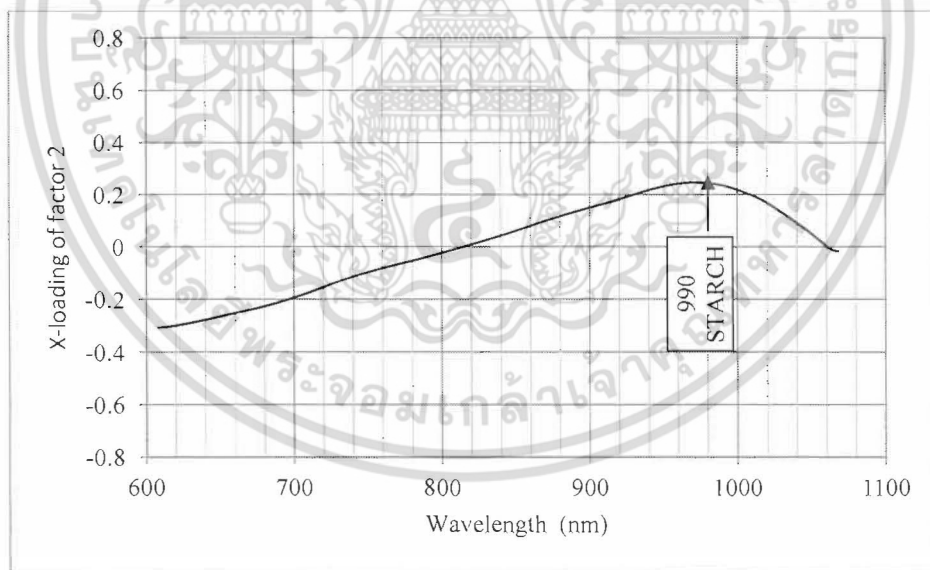


ภาพที่ 4.96 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกน ด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

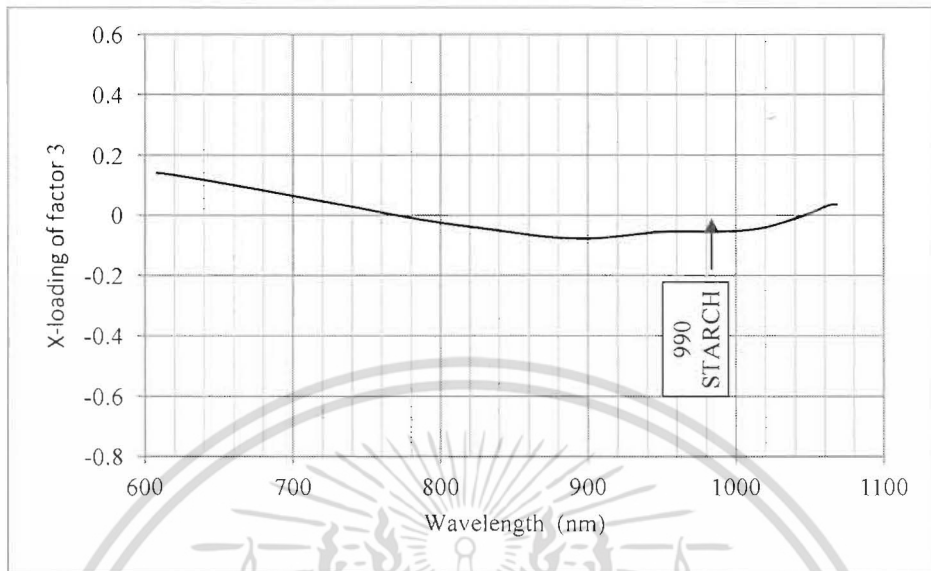


ภาพที่ 4.97 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน

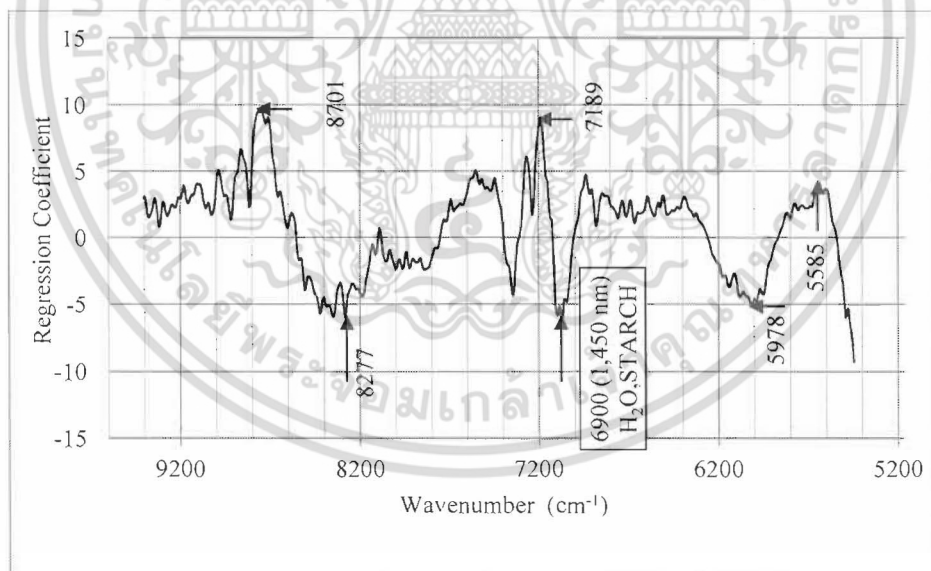


ภาพที่ 4.98 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมวดที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

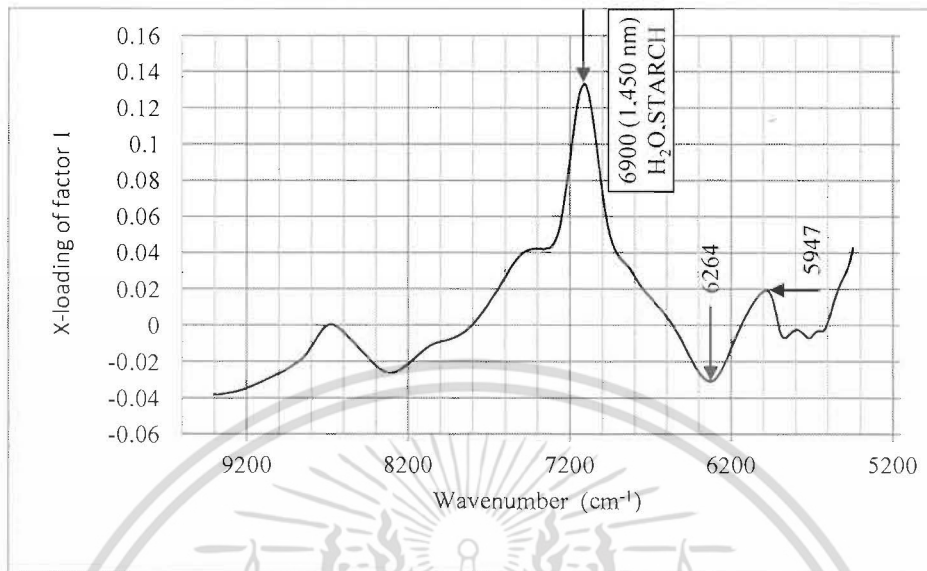


ภาพที่ 4.99 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาคที่ สแกนด้วย FQA-NIR Gun ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและ โรงงาน

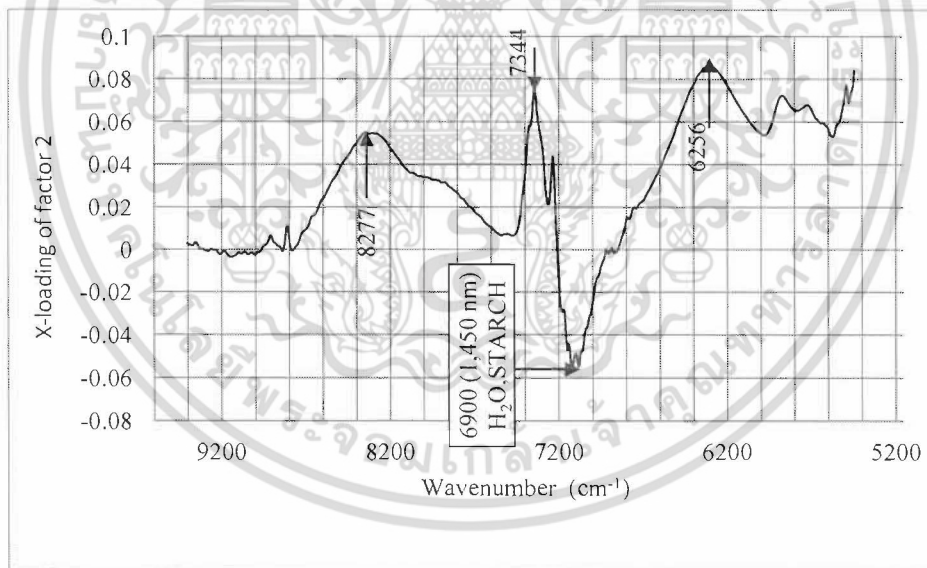


ภาพที่ 4.100 Regression coefficient plots of optimum models สำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมาคที่ สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและ โรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

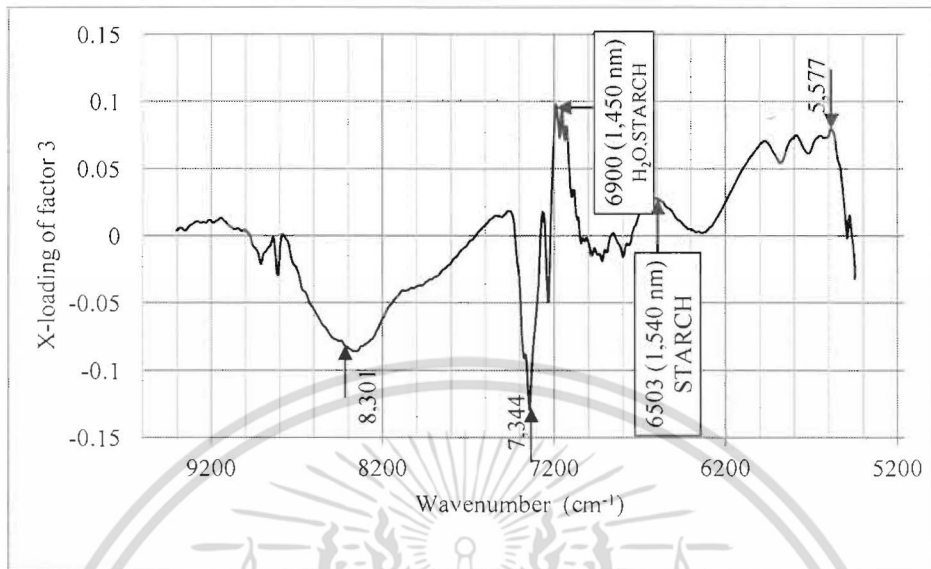


ภาพที่ 4.101 X-loading plot of factor 1 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน



ภาพที่ 4.102 X-loading plot of factor 2 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.103 X-loading plot of factor 3 ของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังหมักที่สแกนด้วย FT-NIR spectrometer ของชุดข้อมูลในห้องปฏิบัติการและโรงงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ลักษณะของสเปกตรัม

จากการสังเกตสเปกตรัมดั้งเดิม (raw spectrum) ที่เกิดจากการดูดกลืนแสงของแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer ที่ช่วง wavenumber  $12,500-4,000\text{ cm}^{-1}$  (800-2500 nm), micro NIR spectrometer ที่ช่วง wavelength 1150-2150 nm และ NIR gun ที่ช่วง wavelength 600-1100 nm พบว่า สเปกตรัมดั้งเดิมเกิดพีคการดูดซับคลื่นของแป้งมันสำปะหลังเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเดียวกันที่ 990, 1540, 1450 และ 2000 nm ซึ่งเป็นแถบการดูดซับคลื่นของแป้ง และที่ 1450, 1940 nm ซึ่งเป็นแถบการดูดซับคลื่นของน้ำ

#### 5.2 สรุปผลการสร้างสมการทำนายค่าความชื้น

ในการทำนายค่าความชื้นของแป้งมันสำปะหลังโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี โดยใช้ข้อมูลชุดห้องปฏิบัติการ, ข้อมูลชุด และ ห้องปฏิบัติการและโรงงาน โดยวิธี Partial least squares regression ที่ได้จากเครื่อง FT-NIR spectrometer พบว่าได้ผลการทำนายที่ดีที่สุด โดยมีจำนวนแฟกเตอร์เท่ากับ 8, 7 และ 6 ตามลำดับ สามารถพยากรณ์ปริมาณความชื้นได้ดีที่สุด root mean square error of cross-validation (RMSECV) เท่ากับ 0.75, 0.92 และ 0.91% และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 99.44, 99.07 และ 99.19% ตามลำดับจาก Williams (2007) ใช้ได้ผลดีเยี่ยมทุกการประยุกต์ใช้งาน

แบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลของโรงงานชุดแป้งแห้งและแป้งหยาบเป็นแบบจำลองที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงโดยให้ค่า root mean square error of prediction (RMSEP) เท่ากับ 0.19 และ 0.60% และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination;  $R^2$ ) เท่ากับ 80.87 และ 89.70% ตามลำดับ

#### 5.3 ผลจาก Regression coefficient plot และ X-loading plot

จาก Regression coefficient plot และ X-loading plot พบว่ากรณีของ MicroNIR Spectrometer และ NIR gun ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่น ช่วงคลื่นยาว (1150-2150 nm) และช่วงคลื่นสั้น (600-1100 nm) ตามลำดับ การดูดซับคลื่นที่ 2000 nm และ 990 nm ตามลำดับเป็นการสั่นสะเทือนของ STARCH มีผลต่อการทำนายปริมาณความชื้นของแป้งมันสำปะหลังสูงที่สุด ในกรณีของ FT-NIR spectrometer ซึ่งใช้ความยาวคลื่นทั้งช่วงคลื่นสั้นและช่วงคลื่นยาว (700-2500 nm) การดูดซับคลื่นที่ 1450 nm ( $6897\text{ cm}^{-1}$ ) ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของ  $\text{H}_2\text{O}$  และ STARCH มีผลต่อการทำนายปริมาณความชื้นของแป้งมันสำปะหลังสูงที่สุด

#### 5.4 ข้อเสนอแนะ

การใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของแป้งแห้งและแป้งหยาบโดยแนะนำให้ใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer ที่ช่วงความยาวคลื่น  $4242-4613\text{ cm}^{-1}$  และ  $7428-9357\text{ cm}^{-1}$

สำหรับแป้งแห้ง และ 6100-9400 cm<sup>-1</sup> สำหรับแป้งหมัด ผลที่ได้ค่อนข้างดีสำหรับการเสนอข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์  
มากสำหรับโรงงานแป้งมันสำปะหลังสำหรับการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีตรวจวัดปริมาณความชื้น  
ในแป้งมันสำปะหลังเพื่อการควบคุมกระบวนการผลิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลผลิตงานวิจัย

ผลงานได้ดำเนินการต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่โรงงานแป้งมันแสงเพชร อ.หนองบัวระเหว จ. ชัยภูมิ และได้รายงานในที่ประชุมวิชาการนานาชาติ 1 เรื่อง ดังเอกสารแนบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Feasibility study for the evaluation of moisture content in tapioca starch cake by near Infrared spectroscopy

Wantanee Phoonphatthanachai

Agricultural Engineering Curriculum, Department of  
Mechanical Engineering,  
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang,  
Bangkok 10520, Thailand.  
drcam\_za@hotmail.de

Panmanas Sirisomboon

Agricultural Engineering Curriculum, Department of  
Mechanical Engineering,  
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang,  
Bangkok 10520, Thailand.  
panmanas@gmail.com

**Abstract**— A feasibility study of rapid predictive method based on near-infrared reflectance (NIR) spectroscopy (NIRS) was developed to measure tapioca starch cake moisture content. The starch cake samples were scanned by FT-NIR spectrometer with the wavenumber 12,500-4,000  $\text{cm}^{-1}$  (800-2500 nm), micro NIR spectrometer with the wavelength of 1150-2150 nm and NIR gun with the wavelength of 600-1100 nm and analyzed for moisture content by infrared moisture analyser. Results of statistical modeling indicated that the NIRS was reasonably accurate in predicting moisture content. The best model was from FT-NIR spectrometer with the root mean square error of cross-validation (RMSECV) of 0.755% and the determination correlation ( $R^2$ ) of 99.44%. The NIR-based protocol developed in this study can be used as the guidance for further application in the tapioca starch factory.

**Keywords**- moisture content, tapioca starch, near Infrared spectroscopy

### I. INTRODUCTION

Starch quality control needs quick analytical tools for measuring moisture content. In routine starch quality, near infrared (NIR) technology allows us to obtain results in a few seconds. There are some studies using the near infrared spectroscopy (NIRS) in measuring moisture content of powder, flour or starch and grain. Vesela et al. [1] reported the calibration model developed from the NIR absorbance spectra (1100-2500 nm) of cocoa powder samples was used for the determination of the content of moisture. The result showed that the relative root mean square error of cross-validation (RMSECV) was 5.2% and determination correlation ( $R^2$ ) of 0.94. Kawamura et al. [2] used an automatic method of NIR transmission to measure moisture of rice. A near-infrared calibration models were developed from the original spectra (825-1075 nm) and reference analysis data. The result of model provided  $R^2$  of 0.96 and 0.97 and standard errors of prediction (SEP) of 0.70 and 0.50% for brown rice and milled rice, respectively. The precision and accuracy of the NIR instrument were found to be sufficiently high to determine moisture [2]. Miralbes [3] developed the model using NIR transmittance spectra from 850 to 1048.2 nm and the result showed a good

performance  $R^2$  of 0.99, RMSECV of 0.13%, SEP of 0.15% and RPD (Ratio between standard deviation of prediction set to SEP) of 4.9. Camps et al. [4], have developed a NIRS technique to determine moisture in flour of dry leaves, *Artemisia annu*, sample and the model accurately predicted moisture with  $R^2$ , RMSECV and root mean square error of prediction (RMSEP) of 0.99, 0.8% and 1.4%, respectively. Hayashi et al. [5], studied to assess the amount of water during the drying of granules in a fluidized bed by NIRS with the wavelength range of 1800-2000 nm. The model provided the  $R^2$  and RMSEP of 0.806 and 1.0549, respectively, showing that this technique can be aided the process control.

However, there is no report on measuring the moisture content in tapioca starch cake by near Infrared spectroscopy. Therefore the objective of this work is to study a feasibility of applying a rapid predictive method based on near-infrared reflectance (NIR) spectroscopy (NIRS) for measuring tapioca starch cake moisture content. This information is very useful in process control for the tapioca flour production factory.

### II. MATERIALS AND METHODS

#### A. Samples

Tapioca starch of different production dates (11, 12, 13 and 14 December 2012) was collected from a factory (Sangpetch tapioca flour Co., Ltd) in Nongbualua-vae district at Chaiyaphum, Thailand. The samples were brought to NIRS research center for agricultural product and food in King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. Tapioca starch samples (25 g each) were adjusted for different levels of moisture content (12.5, 15.75, 19, 22.25, 25.5, 28.75, 32, 35.25, 38.5, 41.75 and 45 %wb) by mixing with distilled water which the amount ( $q$ ) was calculated by Equation (1). The experiment was done in duplicate.

$$q = \left[ \frac{w_i(m_i - m_f)}{100 - m_f} \right] \quad (1)$$

Where  $q$  is the mass of distilled water to be added in g,  $w_i$  is the initial mass of the sample in g,  $m_i$  is the initial moisture

content in %wet basis, and  $m_f$  is the final moisture content in % wet basis.

**B. NIR scanning**

The moisture adjusted tapioca starch sample was put in a Petri dish with a diameter of 15 mm and its spectrum was measured with FT-NIR spectrometer (MPA, Bruker, Germany) in reflection mode on 12,500-4,000  $cm^{-1}$  (800-2500 nm) through glass, MicroNIR spectrometer (JDSU, USA) in reflection mode on 1150-2150 nm (through glass and at the starch surface) and FQA-NIR Gun (Fantec, Japan) in interaction mode on 600-1100 nm at 5 mm above the starch surface. The scanning was done twice per sample.

**C. Moisture measurement**

The moisture content of a 5 g tapioca starch cake sample was analyzed by infrared moisture analyzer (1B43-S Uhalogen, Mettler Toledo, Switzerland) at the temperature of 130°C till constant weight was reached.

**D. Chemometric**

The chemometric software package, The Unscrambler v. 9.8 and OPUS, v. 7.0.129, were used for model creation. The Unscrambler v. 9.8 was used for the optical data from MicroNIR spectrometer and FQA-NIR Gun. In developing the models, the NIR or VIS-NIR spectra were used with no spectral preprocessing. The models were validated by full cross validation method. The optimum model was selected by coefficients of determination ( $R^2$ ), root mean squared error of cross validation (RMSECV), Ratio of standard error of validation to the standard deviation (RPD) and bias.

**III. RESULTS AND DISCUSSION**

Table 1 shows the statistic of the moisture content (% wet basis) of tapioca starch measured by the standard method used in developing prediction model. Table 2 shows the result of partial least square regression models for predicting the moisture content of tapioca starch which the spectrum scanning was done by different spectrometers.

TABLE I. THE STATISTIC OF THE MOISTURE CONTENT (% WET BASIS) OF TAPIOCA STARCH MEASURED BY THE STANDARD METHOD USED IN DEVELOPING PREDICTION MODEL.

Number of samples	Maximum	Minimum	Average	SD
176	44.28	11.64	27.955	10.130

TABLE II. THE RESULT OF PARTIAL LEAST SQUARE REGRESSION FOR PREDICTING THE MOISTURE CONTENT OF TAPIOCA STARCH.

Spectrometer	Wavelength or Wave number range	Factor	$R^2$	RMSECV	Bias
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) Specific	1100-2050 nm	4	94.31	2.422	0.0118
MicroNIR Spectrometer (JDSU, USA) Glass	1100-2050 nm	5	95.70	2.105	0.0819
FQA-NIR Gun (Fantec, Japan)	600-1050 nm	6	81.40	4.380	0.0886
FT-NIR Spectrometer (MPA, Bruker, Germany)	5400-9400 $cm^{-1}$	8	99.44	0.755	0.0029

$R^2$  – Coefficient of determination, RMSECV – Root mean squared error of cross validation, Bias – Average error of prediction

The prediction results of moisture content in tapioca starch showed that the  $R^2$  was between 81.40% and 99.44%. The results on FT-NIR Spectrometer using the wavenumber of 5400-9400  $cm^{-1}$  indicated its highest prediction ability of moisture content in tapioca starch (i.e.,  $R^2 = 99.44\%$ ; RMSECV = 0.755; Bias = 0.0029). The scatter plots (reference data (X) with prediction data (Y)) of moisture content in tapioca starch are shown in Figure 1.

The regression coefficient plots of optimum models for moisture content in tapioca starch are shown in Figure 2. By different spectrometers, the peaks of regression coefficient values were about 990, 1450, 1540 and 2000 nm appeared i.e. FQA-NIR Gun at 990 nm, MicroNIR spectrometer (through glass) at 1450 and 2000 nm, MicroNIR spectrometer (at the starch surface) at 1540 and 2000 nm and FT-NIR spectrometer at 1450 and 1540 nm. The absorbance bands at 990, 1450, 1540 and 2000 nm are the vibration of starch [6]. The absorption peaks of water are at 1190, 1450 and 1940 nm [6]. These bands of starch and water appeared on regression coefficient plots of optimum models for moisture content in tapioca starch.

**IV. CONCLUSIONS**

The NIRS is feasible for analysis of moisture content. Using FT-NIR Spectrometer using the wavenumber of 5400-9400  $cm^{-1}$  is recommended, however MicroNIR Spectrometer in the wavelength range of 1100-2050 nm is also quite good for the propose. This information is very useful for the tapioca starch factory for applying the NIRS technique in the process control.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

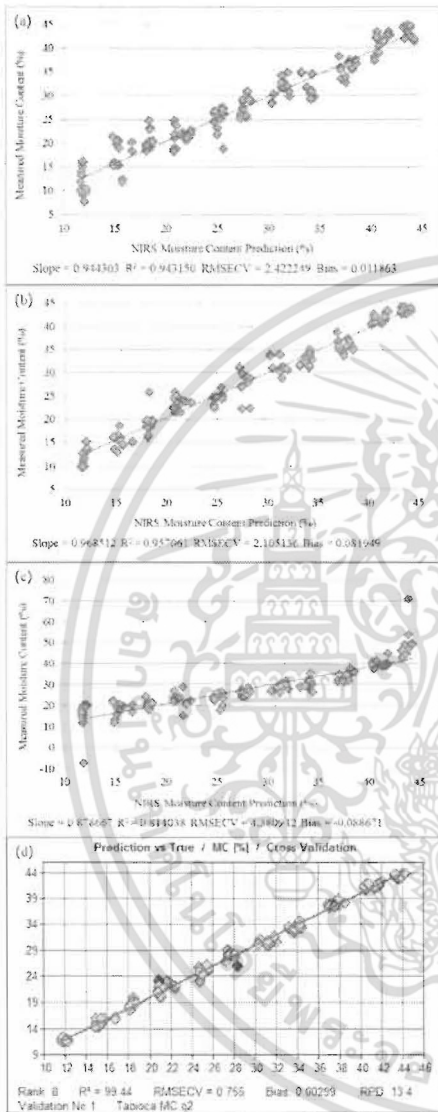


Figure 1. The scatter plots of reference data (X) with prediction data (Y) moisture content in tapioca starch cake (a) MicroNIR spectrometer (at the starch surface); (b) MicroNIR spectrometer (through glass); (c) FQA-NIR Gun; (d) FT-NIR spectrometer.

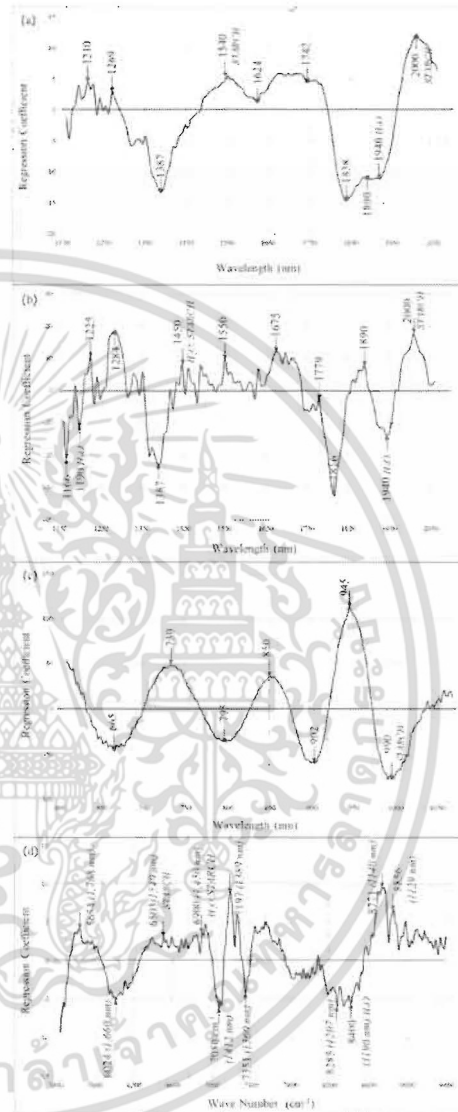


Figure 2. Regression coefficient plots of optimum models for moisture content in tapioca starch cake. (a) MicroNIR spectrometer (at the starch surface); (b) MicroNIR spectrometer (through glass); (c) FQA-NIR Gun; (d) FT-NIR spectrometer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful for Sangpeich tapioca flour Co., Ltd in Nongbuala-vae district at Chaiyaphum, Thailand, for providing samples.

REFERENCES

- [1] Vesela A., Barros A.S., Synytsya A., Delgado I., Čopáková J., Coimbra, M.A. 2007. "Infrared spectroscopy and outer product analysis for quantification of fat, nitrogen, and moisture of cocoa powder." *Analytica Chimica Acta*, 601: 77-86.
- [2] Kawamura S., Natsuga M., Takekuni K., Itoh K., 2003. "Development of an automatic rice-quality inspection system." *Computers and Electronics in Agriculture*, 40: 115-126.
- [3] Miralbes C., 2004. "Quality control in the milling industry using near infrared transmittance spectroscopy." *Food Chemistry of Analytical, Nutritional and Clinical Methods*, 88: 621-628.
- [4] Camps C., Toussiot M., Quennoz M., Simonnet X. 2011. "Determination of artemisinin and moisture content of *Artemisia annua* L. dry powder using a hand-held near infrared spectroscopy device." *J. Near Infrared Spectroscopy*, 19: 191-198.
- [5] Hayashi Y., Sato T., Otsuka M. 2013. "Real-time monitoring of the drying of extruded granules in a fluidized bed using near infrared spectroscopy and kinetic evaluation of the drying process." *J. Near Infrared Spectroscopy*, 21: 107-115.
- [6] Osborne, B.G and Fearn, T. 1986. "Near Infrared Spectroscopy in Food Analysis" Longman Scientific & Technical, New York, USA, 200 p.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] [th.wikipedia.org/wiki/มันสำปะหลัง](http://th.wikipedia.org/wiki/มันสำปะหลัง)
- [2] <http://www.tapiocathai.org/C.html>
- [3] ปานมนัส ศิริสมบุรณ์. 2556. เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตเกษตรและอาหาร. [Online]. Available: [www.nirsresearch.com](http://www.nirsresearch.com).
- [4] B.G. Osborne, T. Fearn and P.H. Hindle. “**Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis**”. Second edition. Longman Singapore Publishers. 1993.
- [5] Vesela A., Barros A.S., Synytsya A., Delgado I., C’opi’kova J., Coimbra M.A. 2007. “Infrared spectroscopy and other product analysis for quantification of fat, nitrogen, and moisture of cocoa powder.” *Analytica Chimica Acta*, 601: 77–86.
- [6] Kawamura S., Natsuga M., Takekura K., Itoh K., 2003. “Development of an automatic rice-quality inspection system.” *Computers and Electronics in Agriculture*, 40: 115-126.
- [7] Miralbes C., 2004. “Quality control in the milling industry using near infrared transmittance spectroscopy.” *Food Chemistry of Analytical, Nutritional and Clinical Methods*, 88: 621–628.
- [8] Camps C., Toussiro M., Quennoz M., Simonnet X. 2011. “Determination of artemisinin and moisture content of *Artemisia annua* L. dry powder using a hand-held near infrared spectroscopy device.” *J. Near Infrared Spectroscopy*, 19: 191–198.
- [9] Hayashi Y., Sato T., Otsuka M. 2013. “Real-time monitoring of the drying of extruded granules in a fluidized bed using near infrared spectroscopy and kinetic evaluation of the drying process.” *J. Near Infrared Spectroscopy*, 21: 107–115.
- [10] ปานมนัส ศิริสมบุรณ์, รวิภัทร ลากเจริญสุข, กรรณพด แก้วสอน, พลนันท อ่อนไสว, บัณฑิต ทองสร้อย, นัฐกรณ์ สอนสงวน, สมชาย กัดสุข, ศิวตล รัตนโอภา, อภิชาติ สมพิวิ และกิ่งดาว ชนะโชติ .2556. “การคาลิเบรชันแบบตัวแปรพหุ เนาะแนวเชิงปฏิบัติสำหรับการพัฒนาแบบจำลองในเคมีวิเคราะห์” <http://www.nirsresearch.com>.
- [11] Williams, P. 2007. “Near-infrared Technology-Getting the Best Out of Light.” PDK Grain, Nanaimo, British Columbia, and Winnipeg, Manitoba, Canada.

ภาคผนวก





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2 รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2557

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ)  แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดปริมาณความชื้นในแป้งมันสำปะหลังหมักโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

(ภาษาอังกฤษ) Feasibility study for the evaluation of moisture content in tapioca starch cake by near Infrared spectroscopy

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ค.) ปานมนัส ศิริสมบุญ.....

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 เดือน เมษายน พ.ศ. 2557 ถึงวันที่ 30 เดือน กันยายน พ.ศ. 2557

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2556 ถึงวันที่ 30 เดือน กันยายน พ.ศ. 2557

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินค่าจ้างงวดเดียวให้ลบบอกที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 60,000 บาท 100 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ค/ว) 11 ธันวาคม 2556

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำนวนตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร ค่าจ้างชั่วคราว	-	-	-
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	-	-	-
ค่าใช้สอย	35,000	35,000	0
ค่าวัสดุ	25,000	25,000	0
ค่าสาธารณูปโภค	-	-	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	-	-	-
<b>รวม</b>	<b>60,000</b>	<b>60,000</b>	<b>0</b>

อยู่ระหว่างการดำเนินการเคลียร์ด้านเอกสารทางการเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ๑๕

(รศ. ดร. ปานมนัส ศรีสมบูรณ์)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

30 กันยายน ..... / 2557.....

(.....)

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน/เจ้าหน้าที่ที่ที่เกี่ยวข้อง

...../.....

หมายเหตุ : นักวิจัยหรือเจ้าหน้าที่การเงินสามารถปรับหรือเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมได้ตามที่ได้ความเหมาะสมและสอดคล้องกับการดำเนินงาน อาทิเช่น นักวิจัยผู้รับทุนอาจมีการค้นคว้าหรือศึกษาเอกสารทางการเงิน หรือใดก็ตามอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นางสาว ปานมนัส สิริสมบูรณ์  
(ภาษาอังกฤษ) Ms. Panmanas Sirisomboon
  2. รหัสประจำตัวนักวิจัยแห่งชาติ 38-50-0171
  3. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 4-1009-00107-43-1
  4. ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์
  5. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้พร้อมเบอร์โทรศัพท์และโทรสาร  
หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
กรุงเทพฯ 10520  
โทรศัพท์ 02-329800 ต่อ 5120, 5008  
โทรสาร 02-33298336
  6. ประวัติการศึกษา  
ปริญญาตรี (พ.ศ.2519 - พ.ศ.2523) วศ.บ. (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ปริญญาโท (พ.ศ.2525 - พ.ศ. 2527) M.Eng. (Farm machinery and management)  
Asian Institute of Technology (Thailand)  
ปริญญาเอก (พ.ศ.2540 - พ.ศ.2544) Ph.D. (Agric. Science) United Graduate School of Kagoshima  
University (Saga University), Japan.
  6. สาขาวิชาที่มีความชำนาญเป็นพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ  
สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของวัสดุเกษตรและอาหาร  
สมบัติทางเนื้อสัมผัสของวัสดุเกษตรและอาหาร  
การตรวจสอบคุณภาพของวัสดุเกษตรและอาหารโดยใช้ Near Infrared Spectroscopy  
เทคโนโลยีการขนถ่ายวัสดุ
- รางวัลงานวิจัยคุณภาพในการประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 6  
ประจำปี 2552 (The 6th Conference of Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus)

สาขาวิศวกรรมศาสตร์

ระดับดีเด่น

ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ และ พัชรีย์ คล้ายมณี

เรื่อง : สมบัติเชิงกายภาพของข้าวโพดหวาน

(Physical Properties of Sweet Corn)

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัยหรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย เป็นต้น
- 7.1 ผู้อำนวยการแผนการวิจัย : ชื่อแผนงานวิจัย
- 7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการวิจัย
1. โครงการ เครื่องเกี่ยวขนาดถั่วเหลือง (ทุนวิจัยกระทรวงวิทยาศาสตร์และสิ่งแวดล่อม)
  2. โครงการ เครื่องคัดแยกถั่วเหลืองฝักสด (ทุนวิจัยเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.)
  3. โครงการ การศึกษาสมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีการส่งออก (ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน โดยพิจารณาโครงการโดยสภาวิจัย 496,280 บาท)
  4. โครงการเครื่องทำน้ำกะทิเข้มข้นแบบที่ระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. 147,000 บาท ปี 2549)
  5. โครงการการออกแบบและพัฒนาเครื่องผลิตเนยแข็งขนาดเล็ก (เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. 152,500 บาท ปี 2550)
  6. โครงการการออกแบบและพัฒนาเครื่องทำไอศกรีมโดยใช้ระบบการทำความเย็นเบื้องต้นที่ความดันสูญญากาศ (เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. 67,060 บาท ปี 2551)
  7. การประเมินดัชนีคุณภาพภายในและภายนอกของส้มโอเพื่อการส่งออกที่ระยะเวลาเก็บรักษาต่างๆ กันด้วยวิธีไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 200,000 บาท ปี 2551)
  8. โครงการเครื่องทำแห้งเนื้อมะพร้าวด้วยความดันสูญญากาศเพื่อการผลิตน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ (เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. 100,000 บาท ปี 2552)
  9. โครงการการวิเคราะห์ค่าปริมาณเนื้อเยื่อแห้งและความหนืดของน้ำยางข้น สำหรับห้องปฏิบัติการในโรงงานด้วยวิธีไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (สกว. ฝ่ายอุตสาหกรรม ในโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา ปี 2552 132,000 บาท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. โครงการเครื่องทำแห้งเนื้อมะพร้าวชูดด้วยความดันสูญญากาศร่วมกับคลื่นอินฟราเรดเพื่อการผลิตน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ (เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. 59,000 บาท ปี 2553)
11. โครงการการวิเคราะห์ปริมาณเนื้อเยื่อแห้งในน้ำยางสดและน้ำยางข้นโดยการวัดที่ต้นยางพาราโดยตรงด้วยวิธีไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2553-2554 โดยพิจารณาโครงการ โดยสภาวิจัย 551,200 บาทและ สกอ. 192,800 บาท)
12. โครงการการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในเนื้อแดงมอดด้วยเทคนิคที่ไม่ทำลายด้วยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2554 โดยพิจารณาโครงการ โดยสภาวิจัย 242,500บาท)
13. โครงการการพัฒนาเทคนิคมาตรฐานการวัดเนื้อสัมผัสข้าวสวยเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมผลิตข้าวสารและข้าวแปรรูป (เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. 72,000 บาท ปี 2555)
14. โครงการการตรวจสอบคุณภาพของส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้ง โดยวิธีแบบไม่ทำลาย ด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy (เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. 72,000 บาท ปี 2555)
15. โครงการเครื่องกะเทาะเปลือกผลและเปลือกเมล็ดสับดูดำ (เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. 72,000 บาท ปี 2555)
16. โครงการการวิเคราะห์สารแกมมาอะมิโนบิวทริกแอซิดหรือสารกาบาในข้าวกล้องงอกด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2555 โดยพิจารณาโครงการ โดยสภาวิจัย 1,207,000บาท)
17. โครงการการจำแนกพันธุ์ข้าวหอมมะลิจากพันธุ์ปลอมปนโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ (เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. 80,000 บาท ปี 2556)
18. โครงการการพัฒนาเทคนิคการวัดปริมาณน้ำมันและสมบัติเชิงความร้อนของชีวมวลโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี: กรณีศึกษา เนื้ออินเมล็ดสับดูดำ (ประจำปี 2556 โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 270,000บาท)
19. โครงการการวิเคราะห์ปริมาณเกลือของปลาซาร์ดินในอุตสาหกรรมผลิตปลาซาร์ดินกระป๋องด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (ประจำปี 2556 ทุนพัฒนานักวิจัย กองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 924,000 บาท)
20. โครงการเทคนิคแบบไม่ทำลายสำหรับการวัดความหนืด ปริมาณความเป็นด่าง และจำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำยางพาราชั้นโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี(โครงการทุนพวอ. ระดับปริญญาโท ประจำปี 2556 300,000 บาท)

21. โครงการการวิเคราะห์ฮีสตามีนและความสดของปลาซาร์ดีนด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี(ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2557โดยพิจารณาโครงการโดยสภาวิจัย 729,000 บาท)

7.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้วที่เกี่ยวข้องกับเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี :

1. โครงการวิจัย เครื่องคัดแยกถั่วเหลืองฝักสด (หัวหน้าโครงการ)

Panmanas Sirisomboon, Yuki Hashimoto and Munehiro Tanaka, 2008. Study on Non-destructive Evaluation Methods for Defect Pods for Green Soybean Processing by Near-Infrared Spectroscopy. Annual Meeting on the Japanese Society of Agricultural Machinery, 27 - 30 March 2008. Miyazaki Kanko Hotel 1-1-1 Matsuyama, Miyazaki-city, Miyazaki-prefecture, Japan.

Panmanas Sirisomboon, Yuki Hashimoto, Munehiro Tanaka. Study on non-destructive evaluation methods for defect pods for green soybean processing by near-infrared spectroscopy Journal of Food Engineering, 93 (4), 502-512 (2009)

2. โครงการวิจัย Study on the relationship between texture and pectin constituents of Japanese pear (ผู้ร่วมวิจัย)

Panmanas Sirisomboon, Munehiro Tanaka, Takayoshi Akinaga and Takayuki Kojima 2001. Evaluation of the texture properties of Japanese pear, Journal of Texture Studies 31. 665-677. (be cited by Thompson A.K.: Fruit ripening conditions. In Fruit and vegetables-harvesting, handling and storage. 2<sup>nd</sup> editions. Blackwell Publishing. UK p. 88 (2003))

Panmanas Sirisomboon, Munehiro Tanaka, Shuji Akinaga and Takayuki Kojima 2001. Relationship between the texture and pectin constituents of Japanese pear, Journal of Texture Studies 31. 679-690.

Panmanas Sirisomboon, Munehiro Tanaka, Shuji Fujita, Takayoshi Akinaga and Takayuki Kojima 2001. A simplified method for the determination of total oxalate soluble pectin content of Japanese pear. Journal of food Composition and Analysis. 14, 14: 83-91.

Takayuki Kojima, Shuji Fujita, Munehiro Tanaka, Panmanas Sirisomboon 2004 Chapter 11, Plant Compounds and Fruit Texture: the Case of Pear. In Texture in Food, Volume 2: Solid Foods, David Kilcast Editor. Woodhead publishing limited. Cambridge, England. 1<sup>st</sup> edition p 259-294.

Panmanas Sirisomboon, Munehiro Tanaka, Shuji Fujita, Takayuki Kojima 2007. Evaluation of pectin constituents of Japanese pear by near infrared spectroscopy, J. Food Engineering 78(2): 701-707.

### 3. โครงการ สบู่ดำ

**Panmanas Sirisomboon**, Prakob Kitchaiya, Teerapong Pholpho and Wiroj Mahuttanyavanitch: Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels, *Biosystems Engineering*, 2007, 97:201-207.

**P. Sirisomboon**, P. Kitchaiya, Physical properties of *Jatropha curcas* L. kernels after heat treatments. *Biosystems Engineering*, 2009, 102 (2), 244-250.

**Panmanas Sirisomboon**, Jetsada Posom, Thermal properties of *Jatropha curcas* L. kernels. *Biosystems Engineering*, 113(4), 402-409.

Jetsada Posom and **Panmanas Sirisomboon**. Development of the technique for measuring of oil content and thermal properties of biomass by non-destructive method using near infrared spectroscopy: case study of *Jatropha curcas* kernels. RRI-MAG Congress I, the Twin Tower, Bangkok, Thailand Thailand during April 3-5, 2014 (in Thai).

Jetsada Posom, Panmanas Sirisomboon, Evaluation of the thermal properties of *Jatropha curcas* L. kernels using near-infrared spectroscopy, *Biosystems Engineering*, 125, 45-53 (2014).

### 4. โครงการตรวจสอบคุณภาพส้มโอโดยไม่ทำลาย

ปานมนัส สิริสมบุญ, จรุงพงษ์ เทียมประทีป, รวิภัทร ลากเจริญสุข, จิตรา คิว้งช้าง. 2551. คุณภาพของเนื้อส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งที่อายุการเก็บเกี่ยวต่างๆ. รายงานการประชุมทางวิชาการและเสนอผลงานวิจัย มหาวิทยาลัยทักษิณครั้งที่ 18 ประจำปี 2551, การวิจัยกับการแก้ปัญหาวิกฤติชาติ 25-26 กันยายน 2551. โรงแรมกรีนเว็ลด์ พาเลซ อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา หน้า 27 (6 หน้า)

ปานมนัส สิริสมบุญ และ รวิภัทร ลากเจริญสุข. 2552. การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของผลส้มโอพันธุ์ขาวน้ำผึ้งระหว่างระยะเวลาการเก็บรักษาต่างๆ. เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการครั้งที่ 47 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ “เกษตรนำไทย : อาหารและพลังงานทดแทนสู่สมดุอย่างยั่งยืน” เล่มที่ 7 สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ 17-20 มีนาคม 2552 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร

Panmanas Sirisomboon, Jitra Duangchang. 2009. Prediction and analysis of peel essential oil of pomelo by NIR spectroscopy. 10<sup>th</sup> International Conference of Thailand Society of Agricultural Engineering on “Innovations of Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind” 1-3 April 2009 , Suranaree Univeristy of Technology, THAILAND.

Panmanas Sirisomboon, Warunee Thanapase, Ravipat Lapcharoensuk 2009. Identification of Different Storage Duration of Pomelo (Kao Num Peung Variety) by Near Infrared Spectroscopy using SIMCA. 10<sup>th</sup>

International Conference of Thailand Society of Agricultural Engineering on “Innovations of Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind” 1-3 April 2009 , Suranaree Univeristy of Technology, THAILAND.

Panmanas Sirisomboon, Charoonpong Theamprateep 2009. Maturity Classification of Kao Nampueng Pomelo Fruit using Visible Range Spectrum. 10<sup>th</sup> International Conference of Thailand Society of Agricultural Engineering on “Innovations of Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind” 1-3 April 2009 , Suranaree Univeristy of Technology, THAILAND.

Panmanas Sirisomboon, Warunee Thanapase, Ravipat Lapcharoensuk. Identification of Different Storage Duration of Pomelo (Kao Num Peung Variety) by Near Infrared Spectroscopy using PLS-DA. The 3<sup>rd</sup> Asian Near Infrared Symposium (ANS2012) Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand; 14-18 May 2012.

P. Sirisomboon and C. Theamprateep, Physicochemical and Textural Properties of Pomelo (*Citrus maxima* Merr. cv. Kao Num Peung) at Preharvest, Postharvest and During the Commercial Harvest Period. *The Philippine Agricultural Scientist*, 95 (1), 43-52 (2012).

P. Sirisomboon, R. Lapchareonsuk, Evaluation of the physicochemical and texture properties of pomelo fruit following storage. *Fruits*, 67 (6), 399-414 (2012).

Panmanas Sirisomboon, Warunee Thanapase, Ravipat Lapcharoensuk. Identification of Different Storage Duration of Pomelo (Kao Num Peung Variety) by Near Infrared Spectroscopy using PLS-DA. The 3<sup>rd</sup> Asian Near Infrared Symposium (ANS2012) Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand; 14-18 May 2012.

## 5. โครงการขยายพารา

ปานมนัส ศิริสมบุญ และวิพันธ์ ชาวบ้านกร่าง 2552. สมบัติเชิงความหนืดของน้ำยางชั้นที่อายุการเก็บรักษาต่าง ๆ. การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 6, 8-9 ธันวาคม 2552.

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม

ปานมนัส ศิริสมบุญ, และ อภิดุสย์ แก้วกับทอง, 2553. ผลของอายุการเก็บรักษาน้ำยางชั้นต่อปริมาณเนื้อยางแห้ง. รายงานการประชุมทางวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11. 6-7 พฤษภาคม 2553. นวัตกรรมทางวิศวกรรมเกษตรเพื่อเศรษฐกิจพอเพียงและชุมชนเข้มแข็ง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม. หน้า 382-385.

**Panmanas SIRISOMBOON** and Apidul KEAWKUPTONG. Evaluation of dry rubber content of concentrated latex by Near-infrared Spectroscopy, The 12th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering “International Conference on Agricultural Engineering” (Novelty, Clean and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sustainable) Chon-Chan Pattaya Resort, Chonburi, Thailand; 31 March-1 April 2011, p 49-1 -49-5.

ปานมนัส ศิริสมบูรณ์, รวิพันธ์ ชาวบ้านกร่างและ อภิดุลย์ แก้วกัณฑ์ทอง, 2554. .การวิเคราะห์ค่าความหนืดและ ปริมาณเนื้อยางแห้งของน้ำยางสดและน้ำยางข้นสำหรับห้องปฏิบัติการในโรงงานด้วยเทคนิคเนียร์ อินฟราเรดสเปคโตรสโคปี วิจัยยางพารา เล่มที่ 6, 297-308.

Panmanas Sirisomboon, Rawiphan Chowbankrang, Phil Williams, Evaluation of apparent viscosity of Para rubber latex by diffuse reflection near infrared spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 66(5), 595-599 (2012).

Tetsuya Inagaki, Panmanas Sirisomboon, Chang Liu, Warunee Thanapase, and Satoru Tsuchikawa, High accuracy in-line prediction and feasibility of on-site nondestructive estimation of Para rubber quality by spectroscopic methods. *Journal of Wood Science*, 59(2), 119-126, 2013.

P. Sirisomboon, A. Kaewkuptong and P. Williams, Feasibility study on the evaluation of the dry rubber content of field and concentrated latex of Para rubber by diffuse reflectance near infrared spectroscopy. *J. Near Infrared Spectrosc.* 21, 81-88 (2013).

Aphichart Sompiw and **Panmanas Sirisomboon**. Nondestructive evaluation technique for viscosity, alkalinity and potassium hydroxide number in concentrated para rubber latex by near infrared spectroscopy. RRI-MAG Congress I, the Twin Tower, Bangkok, Thailand during April 3-5, 2014 (in Thai).

Aphichart Sompiw and **Panmanas Sirisomboon**. Evaluation of Para rubber latex viscosity using shortwave near infrared spectroscopy. The 7th TSAE International conference, Krungsri River Hotel, Ayudhya, Thailand during April 2-4, 2014.

## 6. โครงการข่าว

Areerat Imsil, Ronnarit Rittiron, **Panmanas Sirisomboon** and Varipat Areekul, Classification of Hom Mali rice with different degrees of milling based on physicochemical measurements by principal component analysis. *Kasetsart Journal: Natural Science*, 45(5), 863-873 (2011)

Somchai Kladsuk, **Panmanas Sirisomboon**, Selection of cooking method for cooked rice texture determination and sensory panel training in research work. International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST - 2012) November 21 - 24, 2012, SwissÔtel Le Concorde, Bangkok, Thailand (Paper ID 00136)

Nuttagorn Sonsanguan, **Panmanas Sirisomboon**, Jiraporn Sripinyowanich Jongyingcharoen, Selection of objective test for cooked rice texture determination in research and industrial work. International

Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST - 2012) November 21 - 24, 2012, SwissÔtel Le Concorde, Bangkok, Thailand (Paper ID 00137)

C. Dachoupan **Sirisomboon**, R. Putthang, P. **Sirisomboon**. Application of near infrared spectroscopy to detect aflatoxigenic fungal contamination in rice. *Food Control*, 33(1), 207-214, 2013.

Ravipat Lapcharoensuk and **Panmanas Sirisomboon**. Some physical properties of rice in rice improvement plant. The 7th TSAE International conference, Krungsri River Hotel, Ayudhya, Thailand during April 2-4, 2014.

Kannapot Kaewson and Panmanas Sirisomboon. Feasibility study for evaluation of gamma-aminobutyric acid (GABA) content of germinated brown rice by visible and near infrared spectroscopy. The 7th TSAE International conference, Krungsri River Hotel, Ayudhya, Thailand during April 2-4, 2014.

K. Kaewson and Panmanas Sirisomboon, Determination of the gamma-aminobutyric acid content of germinated brown rice by near infrared spectroscopy, *J. Near Infrared Spectrosc.* 22(1), 45-54 (2014).

#### 7. โครงการมะเขือเทศ

**Panmanas Sirisomboon**, Munehiro Tanaka and Takayuki Kojima, 2008. Intensive Evaluation of Tomato 'Momotaro' Textural Properties. Annual Meeting on the Japanese Society of Agricultural Machinery, 27 - 30 March 2008. Miyazaki Kanko Hotel 1-1-1 Matsuyama, Miyazaki-city, Miyazaki-prefecture, Japan

**Panmanas Sirisomboon**, Munehiro Tanaka, Takayuki Kojima, Evaluation of tomato textural mechanical properties. *Journal of Food Engineering*, 111(4), 618-624, 2012.

**Panmanas Sirisomboon**, Munehiro Tanaka, Takayuki Kojima, Phil Williams, Nondestructive Estimation of Maturity and Textural Properties on Tomato 'Momotaro' by Near Infrared Spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 112(3), 218-226, 2012.

#### 8. ทูเรียน

Phalanon Onsawai and **Panmanas Sirisomboon**. Color and soluble solids content of Durian pulp at different maturity stages. The 7th TSAE International conference, Krungsri River Hotel, Ayudhya, Thailand during April 2-4, 2014.

#### 9. แป้งมันสำปะหลัง

Wantanee Phoonphatthanachai and **Panmanas Sirisomboon**. Feasibility study for the evaluation of moisture content in tapioca starch cake by near Infrared spectroscopy. The 3<sup>rd</sup> International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST 2013), The Sukosol, Bangkok, Thailand during August 21-24,

2013.

## 10. น้ำแกงสำเร็จรูป

Natcha Thitibunjan and **Panmanas Sirisomboon**. Feasibility study on evaluation of salt content of Massaman curry soup using near infrared spectroscopy. The 7th TSAE International conference, Krungsri River Hotel, Ayudhya, Thailand during April 2-4, 2014.

Jutharat Nawayon and **Panmanas Sirisomboon**. Feasibility study on evaluation of total solids of Massaman curry soup using near infrared spectroscopy. The 7th TSAE International conference, Krungsri River Hotel, Ayudhya, Thailand during April 2-4, 2014.

## 11. อื่นๆ

**Panmanas Sirisomboon**, Suppakit Howvimanporn 2009. Determination of soluble solids of honey by near infrared spectroscopy. 10<sup>th</sup> International Conference of Thailand Society of Agricultural Engineering on “Innovations of Agricultural, Food and Renewable Energy Productions for Mankind” 1-3 April 2009 , Suranaree Univeristy of Technology, THAILAND.

**P. Sirisomboon**, W. Thanapase, S. Kasemsumran and S. Howvimanporn 2009. Identification of honey authenticity by NIRS. The 14<sup>th</sup> International Conference on Near Infrared Spectroscopy. NIR 2009 Breaking the Dawn. 7-16 Novemebr 2009, Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand.

**Panmanas SIRISOMBOON**, Sarid CHURCHART. Prediction of soluble solids content in cut watermelons using near infrared Spectroscopy, The 12th Annual Conference of Thai Society of Agricultural Engineering “International Conference on Agricultural Engineering” (Novelty, Clean and Sustainable) Chon-Chan Pattaya Resort, Chonburi, Thailand; 31 March-1 April 2011, p 48-1 -48-5.

7.4 งานวิจัยที่กำลังทำ : ชื่อข้อเสนอการวิจัย แหล่งทุน และสถานภาพในการทำวิจัยว่าได้ทำการวิจัยลุล่วงแล้ว ประมาณร้อยละเท่าใด

ชื่อข้อเสนอการวิจัย	ปีที่รับ ทุน	ระยะเวลา (ปี)	วิจัยลุล่วงแล้ว (ร้อยละ)	แหล่งทุน
เทคนิคแบบไม่ทำลายสำหรับ การวัดความหนืด ปริมาณ ความเป็นด่าง และจำนวน โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ใน	2556	1	95	ทุน พวอ. (สกว.) ระดับ ปริญญาโท ประจำปี 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อข้อเสนอการวิจัย	ปีที่รับ ทุน	ระยะเวลา (ปี)	วิจัยคล่องแล้ว (ร้อยละ)	แหล่งทุน
นํายางพาราชั้นโดยเนียร์ อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี				
การวิเคราะห์ปริมาณเกลือของ ปลาซาร์ดีนในอุตสาหกรรม ผลิตปลาซาร์ดีนกระป๋องด้วย เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปก โทรสโกปี	2556	2	95	ทุนพัฒนานักวิจัยกองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
การวิเคราะห์ฮิสตามีนและ ความสดของปลาซาร์ดีนด้วย เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปก โทรสโกปี	2557	1	100	งบประมาณประจำปี2557 (วช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้