การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทอง
โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบออนไลน์และออฟไลน์
ON-LINE AND OFF-LINE NIR SPECTROSCOPY FOR MEASURING TOTAL SOLUBLE SOLIDS OF DURIAN(*DURIO ZIBETHINUS* CV MONTHONG)

กฤษณะพล ลี่ไพฑูรย์

KRITSANAPHON LEEPAITOON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-100-165

การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทอง โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบออนไลน์และออฟไลน์

ON-LINE AND OFF-LINE NIR SPECTROSCOPY FOR MEASURING TOTAL SOLUBLE SOLIDS OF DURIAN(*DURIO ZIBETHINUS* CV MONTHONG)

กฤษณะพล ลี่ไพฑูรย์

KRITSANAPHON LEEPAITOON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-100-165

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ON-LINE AND OFF-LINE NIR SPECTROSCOPY FOR MEASURING TOTAL SOLUBLE SOLIDS OF DURIAN(*DURIO ZIBETHINUS* CV MONTHONG)

KRITSANAPHON LEEPAITOON

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

KMITL-2018-EN-M-100-165

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2018
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT’S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบออนไลน์และออฟไลน์
นักศึกษา	นาย กฤษณะพล ลี่ไพฑูรย์
รหัสนักศึกษา	60601135
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์

บทคัดย่อ

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ทำลายตัวอย่าง และในการส่งออกทุเรียนแช่แข็ง ควรวัดค่าความหวานของเนื้อทุเรียน เพื่อตรวจสอบว่าเนื้อทุเรียนได้คุณภาพตามที่ต้องการแล้วหรือไม่ แต่การวัดค่าความหวานโดยวิธีดั้งเดิมเป็นวิธีตรวจสอบโดยทำลายตัวอย่าง ดังนั้นจึงนำเทคนิค NIR spectroscopy มาทำนายค่าความหวานของเนื้อทุเรียนทั้งแบบออนไลน์และออฟไลน์ ในการสแกนแบบออนไลน์ทุเรียนจะถูกส่งมาทางสายพานลำเลียงสำหรับการสแกนโดยใช้เครื่อง AvaSpec-ULS2048 ทำการวัดในแบบดูดซับคลื่น การสแกนแบบออฟไลน์โดยใช้เครื่อง FT-NIR Spectrometer ทำการวัดในแบบดูดซับคลื่น หลังจากสแกนแบบออนไลน์ และออฟไลน์ นำตัวอย่างที่สแกนไปวัดค่าความหวานโดยวัดจากปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ แล้วจึงนำสเปกตรัมที่สแกนทั้งแบบออนไลน์ และ ออฟไลน์ มาทำแบบจำลองกับค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่วัดได้โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Partial least squares regression) ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองแบบออนไลน์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.70 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสองของการทำนาย (Root Mean Squared Error of Prediction; RMSEP) เท่ากับ 4.0% Brix ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เท่ากับ 0.4% Brix และ อัตราส่วนของพิสัยควอร์ไทล์ต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (ratio of performance to inter-quartile range; RPIQ) เท่ากับ 2.18 และผลที่ได้จากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างแบบจำลองแบบออฟไลน์ คือ ค่า R^2 เท่ากับ 0.81 ค่า RPIQ เท่ากับ 3.90 RMSEP เท่ากับ 3.27 % Brix และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เท่ากับ -0.529 % Brix

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	On-line and Off-line NIR Spectroscopy for Measuring Total Soluble Solids of Durian (*Durio zibethinus* cv Monthong)
Student	Mr. Kritsanaphon Leepaitoon
Student ID.	60601135
Degree	Master of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Panmanas Sirisomboon

ABSTRACT

The near infrared (NIR) spectroscopy technique is a rapid sample analysis without damaging the sample and in the export of frozen durian, the sweetness of Durian meat should be measured to check whether the meat is qualified or not. However, the traditional method of measuring sweetness is a destructive method. Therefore, NIR spectroscopy technique was used to predict the sweetness of durian meat both online and offline. In online scanning, durian meat was conveyed through the conveyor belt for scanning using the. AvaSpec-ULS2048 spectrometer in the absorption mode. The offline scanning used the FT-NIR spectrometer in absorption mode. After scanning online and offline, the scanned samples were measured for the sweetness which was done by measuring the total soluble solids (TSS) content. Then online and offline scanned spectra and the TSS content were used for model development using partial least squares regression. (Ratio of SEP to the SD, RPD) เท่ากับ 1.85 The result of the online modeling provided a coefficient of determination (R^2) of 0.70, the root mean square error of the prediction (RMSEP) of 4.0% Brix, the bias of 0.4% Brix, and the ratio of performance to inter-quartile range (RPIQ) of 2.18. For offline modeling, the R^2 was 0.81, RPIQ was 3.90, RMSEP was 3.27 % Brix and the bias was -0.529 % Brix.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้ และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ทุกท่านที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

กฤษณะพล ลี่ไพฑูรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.......... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.......... III

กิตติกรรมประกาศ.......... IV

สารบัญ.......... V

สารบัญตาราง.......... VII

สารบัญรูปภาพ.......... VIII

บทที่ 1 บทนำ.......... 1

1.1 บทนำ.......... 1

1.2 วัตถุประสงค์.......... 2

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.......... 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.......... 2

1.5 ขั้นตอนการศึกษา.......... 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.......... 5

2.1 ทุเรียน.......... 5

2.2 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ หรือค่าความหวาน.......... 7

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งด้วยเครื่อง Refractometer.......... 7

2.4 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี NIRs.......... 9

2.5 เครื่องมือ NIR Spectrometer.......... 10

2.6 การจัดการข้อมูลสเปกตรัมเบื้องต้น.......... 13

2.7 การสร้างแบบจำลอง Calibration และการพิสูจน์แบบจำลอง Validation.... 15

2.8 การทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายสมบัติที่.......... 18
ต้องการวัดโดยวิธีทางสถิติ..........

2.9 ประโยชน์ของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.......... 21

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.......... 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การทดลอง........ 24

3.1 การทดลองเบื้องต้น........ 24

3.2 การทดลองเพื่อสร้างแบบจำลอง........ 29

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล........ 31

บทที่ 4 ผลการทดลอง........ 33

4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น........ 33

4.2 ผลการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลอง........ 33

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง........ 48

5.1 ผลการทดลองเบื้องต้น........ 48

5.2 ผลการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลอง........ 48

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป........ 49

เอกสารอ้างอิง........ 50

ภาคผนวก........ 53

ภาคผนวก ก. แผนการดำเนินงานวิจัย........ 54

ภาคผนวก ข. ข้อมูลจากการทดลอง และผลการวิเคราะห์ข้อมูล........ 56

ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่........ 120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่... .... หน้า

2.1 คุณค่าทางอาหารของทุเรียน 100 กรัม... 6

2.2 การแบ่งช่วงของรังสีอินฟราเรด.. 9

2.3 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานที่ความยาวคลื่นต่างๆ.. 10

2.4 การแปลงความหมายของค่า R และ R^2 18

2.5 การอธิบายผลของค่า RPD.. 20

4.1 ค่า repeatability และ reproducibility ของการสแกนแบบออนไลน์ และออฟไลน์...
และค่าการวัดการอ้างอิง และ R^2_{max}.. 33

4.2 การสั่นสะเทือนของพันธะที่แสดงในสเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนการสแกนแบบ
ออนไลน์... 34

4.3 ค่าสถิติของข้อมูลชุด Calibration และ Validation ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเนียร์
อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้การสแกน
แบบออนไลน์... 34

4.4 ผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS ของแบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบ
ออนไลน์สำหรับการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS)............................ 37

4.5 ช่วงคลื่นที่มีความสำคัญจากกราฟ Regression coefficient plot และ X-loading... 39
weight plotของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าประมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้.

4.6 การสั่นสะเทือนของพันธะของพีคในสเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนการสแกนแบบ 40
ออฟไลน์.

4.7 ค่าสถิติของข้อมูลชุด Calibration และ Validation ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเนียร์ 41
อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้การสแกน
แบบออฟไลน์...

4.8 ผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS ของแบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบ 44
ออฟไลน์สำหรับการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้(TSS)

4.9 ช่วงคลื่นที่มีความสำคัญจากกราฟ Regression coefficient plot และ X-loading 46
weight plot ของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าประมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้..

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่.. หน้า

1.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา.. 4

2.1 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนในการสแกนแบบออนไลน์.. 10

2.2 การสแกนตัวอย่างด้วยเครื่อง Spectrometer แบบต่างๆ... 12

2.3 NIR สเปกตรัมของมือคน : วัดแบบการสะท้อนแบบแพร่... 14

3.1 เครื่อง UV-VIS-NIR spectrometer (AvaSpec-ULS2048-USB2-VA-50,.................. 24
AVANTES, Netherlands)..

3.3 เครื่อง FT-NIR(MPA FT-NIR, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany)............ 25

3.1 การสแกนด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrometer และการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR.. 26

3.2 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเครื่อง pen refractometer........................ 27

3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น.. 28

3.4 การสแกนด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrometer และการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR.. 30

3.5 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเครื่อง pen refractometer........................ 31

3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการทอลองเพื่อสร้างแบบจำลอง.. 32

4.1 กราฟสเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างเนื้อทุเรียนสแกนแบบออนไลน์จำนวน 152 ตัวอย่าง.. 34

4.2 ค่าสถิติความถี่ของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จากการวัดด้วยวิธีอ้างอิง............... 35
สำหรับตัวอย่างชุด calibration และชุด validation การสแกนแบบออนไลน์..............

4.3 การเปรียบเทียบค่าที่ทำนายโดยแบบจำลองของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบ 36
ออนไลน์กับค่าที่วัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุด Calibration..

4.4 การเปรียบเทียบค่าที่ทำนายโดยแบบจำลองของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบ 36
ออนไลน์กับค่าที่วัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุด Validation..

4.5 กราฟ Regression coefficient plot ของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าปริมาณ 38
ของแข็งที่ละลายน้ำได้แบบออนไลน์..

4.6 กราฟ X-loading weight plot ของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าปริมาณ......... 38
ของแข็งที่ละลายน้ำได้แบบออนไลน์..

4.7 กราฟสเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างเนื้อทุเรียนสแกนแบบออฟไลน์จำนวน 269 ตัวอย่าง.. 40

4.8 ค่าสถิติความถี่ของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จากการวัดด้วยวิธีอ้างอิง............... 42
สำหรับตัวอย่างชุด calibration และชุด validation การสแกนแบบออฟไลน์.............

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

4.9 การเปรียบเทียบค่าที่ทำนายโดยแบบจำลองของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบออฟไลน์กับค่าที่วัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุด Calibration... 43

4.10 การเปรียบเทียบค่าที่ทำนายโดยแบบจำลองของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบออฟไลน์กับค่าที่วัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุด Validation... 43

4.11 กราฟ Regression coefficient plot ของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้แบบออฟไลน์.. 45

4.12 กราฟ X-loading weight plot ของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้แบบออฟไลน์.. 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำ

ทุเรียนเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย ในปี 2560 ประเทศไทยส่งออกทุเรียนแช่แข็งเป็นมูลค่า 2255 ล้านบาท [1] เนื่องจากทุเรียนไทยมีรสชาติและคุณภาพดี ทำให้ผู้บริโภคในต่างประเทศให้การยอมรับ ในช่วงระยะเวลาการเก็บเกี่ยวผู้ส่งออกทุเรียนมักจะประสบปัญหาการส่งออกทุเรียนอ่อนและไม่ได้คุณภาพความหวานตามที่ต้องการ ทำให้ตลาดส่งออกเกิดความเสียหาย ปัญหานี้เกิดจากความผิดพลาดในการคัดเลือกทุเรียนที่มีความแก่ที่ไม่เหมาะสมซึ่งทำให้ไม่ได้ความหวานตามต้องการในปัจจุบันการเก็บทุเรียนแก่และการคัดแยกความหวานของทุเรียนต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามวิธีที่ใช้พิจารณาโดยเกษตรกรมีโอกาสทำให้เกิดความผิดพลาดในการคัดเลือกได้ ในการส่งออกเนื้อทุเรียนแช่แข็งจะมีการปอกเปลือกทุเรียนออกจนหมดจนเหลือเพียงเนื้อทุเรียนเท่านั้น ทำให้การคัดแยกความสุกแก่และความหวานของเนื้อทุเรียนทำได้ง่ายขึ้น เพราะทำการคัดแยกได้จากเนื้อทุเรียนโดยตรง ซึ่งสามารถคัดแยกเนื้อทุเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เนื่องจากทุเรียนที่มีความสุกแก่และความหวานเหมาะสมคัดแยกได้ยากหากดูจากภายนอก เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคโนโลยีที่มีความรวดเร็ว ถูกต้อง และแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้หลายคุณสมบัติและหลายองค์ประกอบ และไม่มีการใช้สารเคมีในการทดลอง [2] และเป็นวิธีที่สามารถใช้ประเมินคุณภาพผลผลิตที่เป็นอินทรีย์สาร เช่น ความหวาน โปรตีน เป็นต้น [3] มีงานวิจัยที่ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีโดยการวัดการดูดซับแสงโดยหาความสัมพันธ์กับความหวาน [4] เป็นงานวิจัยที่ศึกษาหาความหวานของทุเรียนโดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี โดยมีผลการศึกษาดังนี้ r^2 = 0. 55 และ RMSEP =1.63°Brix ทั้งนี้วิธีอ้างอิงใช้รีแฟรคโตมิเตอร์แบบดิจิทัล โดยใช้เนื้อทุเรียน 1 ส่วน กับน้ำ 3 ส่วนผสมให้เข้ากันแล้วจึงนำมาปั่นด้วยเครื่องปั่นที่ความเร็วรอบ 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาทีแล้วจึงนำไปวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์นำค่าที่ได้มาคูณด้วย 4 จะได้ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของทุเรียน นอกจากนี้น้ำตาลเป็นตัวบ่งบอกความหวานของผลไม้ เนื่องจากน้ำตาลเป็นของแข็งที่สามารถละลายในน้ำได้น้ำตาลจึงมีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ในการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จะมีความสัมพันธ์กับค่าความหวานของผลไม้

ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาการตรวจสอบคุณภาพความหวานของเนื้อทุเรียนโดยวัดจากปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้แบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีโดยวัดการดูดกลืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นเนียร์อินฟราเรดของเนื้อทุเรียนเพื่อนำมาพัฒนาสร้างโมเดลในการตรวจสอบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียนสำหรับการแก้ปัญหาการคัดแยกความหวานของเนื้อทุเรียนก่อนแช่แข็ง

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการประเมินปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองทั้งแบบออนไลน์และออฟไลน์ โดยการสร้างแบบจำลอง

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ใช้ทุเรียนพันธุ์หมอนทองเท่านั้น จากจังหวัดชุมพร และจังหวัดนครศรีธรรมราช ใช้ช่วงอายุที่มีขายตามท้องตลาด

2. การวิจัยจะใช้ความยาวช่วงคลื่นเนียร์อินฟราเรดระหว่าง 800 – 2,500 นาโนเมตร โดยการสแกนแบบออนไลน์จะใช้ความยาวช่วงคลื่นเนียร์อินฟราเรดระหว่าง 800-1,000 นาโนเมตร และการสแกนแบบออฟไลน์จะใช้ความยาวช่วงคลื่นเนียร์อินฟราเรดระหว่าง 800-2,500 นาโนเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีวัดและประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ของเนื้อทุเรียนบนสายการผลิตในอุตสาหกรรมได้ ทำให้ลดระยะเวลา ลดค่าใช้จ่ายในการวัดคุณภาพของตัวอย่าง ไม่ใช้สารเคมีและตัวอย่างสามารถนำกลับมาบริโภคได้ ทำให้ลดต้นทุนในการผลิตและผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพที่สม่ำเสมอมากขึ้น

2. สามารถนำเทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีมาใช้วัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียน มาตรวจสอบความหวานของเนื้อทุเรียน ทำให้ผู้บริโภคได้รับผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาข้อมูลปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และกระบวนการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จากเนื้อทุเรียน

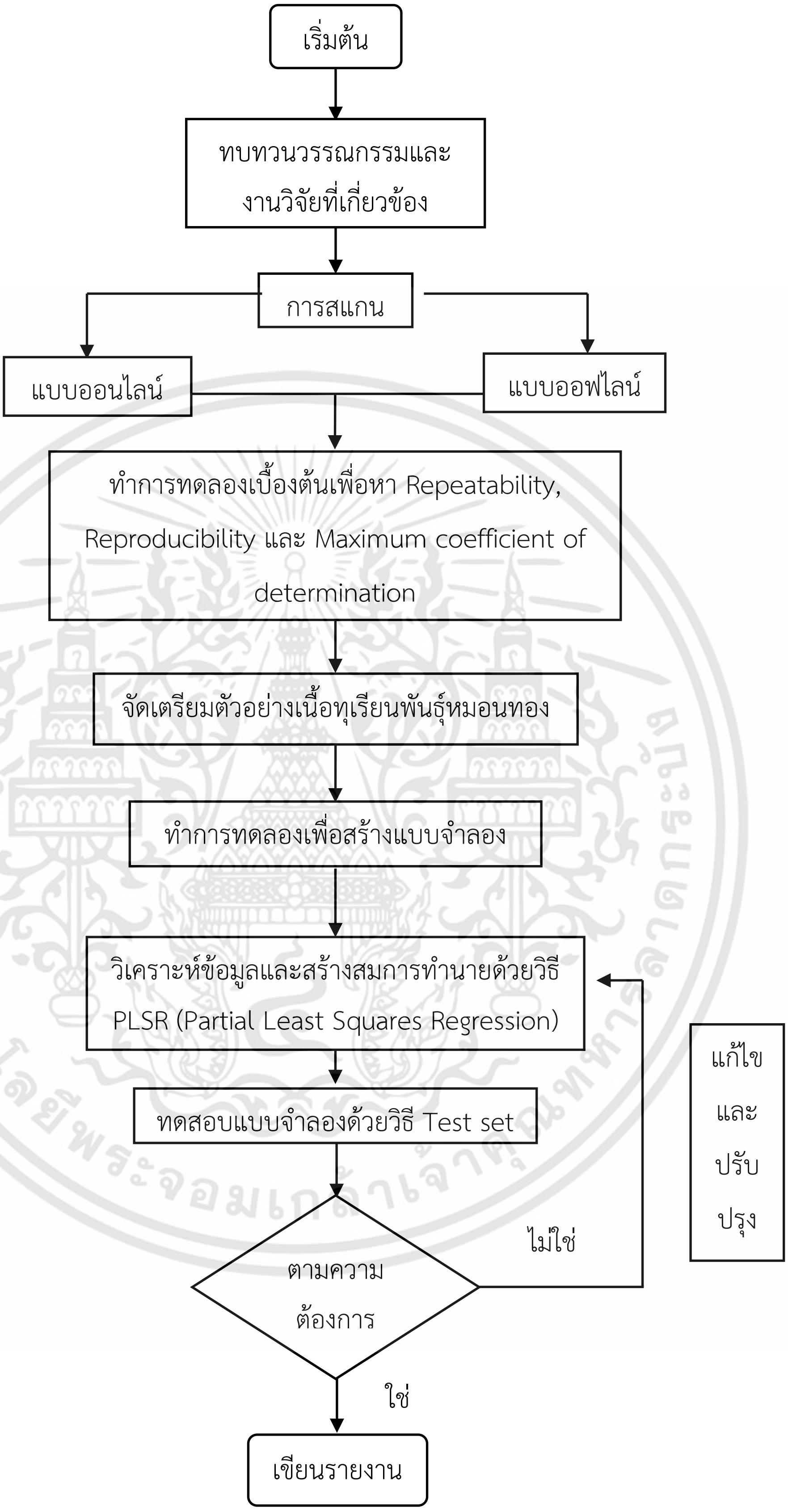
2. ทดสอบโดยใช้ทุเรียนพันธุ์หมอนทองทั้งหมด 269 ตัวอย่าง เก็บข้อมูลสเปกตรัมที่ช่วงความยาวคลื่น 800 – 2500 nm วิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียนโดยใช้ Pen Refractometer

3. นำข้อมูลทั้งหมดมาสร้างสมการพรีดิกชัน ของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทอง และข้อมูลเชิงแสงของเนียร์อินฟราเรด ด้วยวิธีทาง Chemometric แบบ Partial least squares regression

4. ทดสอบแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียน โดยใช้ตัวอย่างชุดทดสอบ พิจารณาจาก Coefficient of determination (R^2) Standard error of prediction (SEP) Bias และ ratio of performance to inter-quartile range (RPIQ)

5. สรุป เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์ และเขียนบทความวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทุเรียน

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของทุเรียน [5]

ทุเรียน มีชื่อ สามัญว่า “Durian” และมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Durio zibethinus Merr.*

ลำต้น ต้นทุเรียนมีอายุยาวถึงประมาณ 150 ปี ลำต้นสูง 20-40 เมตร หรือมากกว่านั้น ลำต้นประธาน มีลักษณะตรง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลำต้นประมาณ 50-120 เซนติเมตร ทรงพุ่มมีลักษณะแน่น ขนาดของทรงพุ่มจะเท่ากับ 2/3 ของความสูงลำต้น

ราก ต้นทุเรียนที่เพาะจากเมล็ดจะมีราก 2 ชนิด คือ รากแก้วที่งอกออกมาจากแกนกลางของโคนต้น และ รากขแนงที่เกิดอยู่ติดกับรากแก้วอีก 1 หรือมากกว่า 1 ราก ส่วนต้นทุเรียนที่ปลูกจากกิ่งตอน ไม่มีรากแก้ว แต่มีรากขแนงเป็นจำนวนมาก รากขแนงบางรากอยู่กระจาย และหยั่งลึกลงไปในดินทำหน้าที่เหมือนรากแก้ว ส่วนรากที่ตื้นจะเป็นตัวทำหน้าที่ดูดน้ำและอาหาร โดยปกติแล้วรากของต้นทุเรียนจะไม่หยั่งลึกลงไปในดินมาก แต่จะอยู่บริเวณผิวดิน

ใบ ทุเรียนจะเป็นใบเดี่ยวเรียงสลับ ใบมีรูปร่างแบบหอกยาว หรือรูปไข่กลับ ฐานใบมนหรือกลม ปลายใบแหลมค่อนข้างมาก ส่วนที่แหลมยาว 0.5-2 เซนติเมตร ขอบใบเรียบสีเขียวเข้ม หลังใบเรียบมีผิวเป็นมัน ท้องใบมีสีเหลืองทองมีขนอ่อนๆ สีขาวหรือน้ำตาลแดงปกคลุมเต็มไปหมด ขนาดใบกว้าง 2.5-9 เซนติเมตร และยาว 6-25 เซนติเมตร เส้นกลางใบด้านล่างจะเด่นชัด เส้นใบมีจำนวน 10-20 คู่ ปลายเส้นใบจะไม่อยู่ชิดถึงขอบใบ ก้านใบหนา ส่วนที่อยู่ใกล้กับแผ่นใบจะมีขนาดใหญ่ มีเกล็ดสีทองแดงหุ้มอยู่ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15-0.35 เซนติเมตร และยาว 1.5-3 เซนติเมตร

ดอก ทุเรียนมีลักษณะดอกเป็นดอกสมบูรณ์เพศมีเกสรตัวผู้และตัวเมียอยู่ในดอกเดียวกัน ดอกมีขนาดใหญ่ เส้นผ่าศูนย์กลาง 5-7 เซนติเมตร ดอกเกิดเป็นกลุ่มๆละ 3-50 ดอก มีลักษณะห้อยหัวลง ก้านดอกหนา มีความยาว 2-4 เซนติเมตร มีเกล็ดสีน้ำตาลแดงหรือเหลืองทองปกคลุมอยู่ ดอกตูมรูปร่างกลมหรือไข่ ปลายกลมหรือทู่หรือเกือบกลม ชั้นนอกสุดจะมีชั้นกลีบรองดอกสีเขียวอ่อน 2 อัน มีขนอ่อนปกคลุมอยู่ ขนาดยาว 1.5-2.5 เซนติเมตร ชั้นกลีบรองดอกจะห่อหุ้มดอกตูมไว้สนิท เมื่อดอกบานชั้นกลีบรองดอกจะปริออกตามยาวเป็น 2-4 แถว กลีบเลี้ยงมี 4-6 กลีบ มีส่วนโคนเชื่อมติดกันและแยกที่ส่วนปลายเล็กน้อย กลีบเลี้ยงด้านนอกมีเกล็ดสีเหลืองทองปกคลุมหนาแน่น ส่วนด้านในมีขนอ่อนสั้นๆ ปกคลุมอยู่ที่ฐาน มีต่อมน้ำหวานสีส้ม รูปร่างกลีบเลี้ยงอาจเป็นรูปไข่ยาว มนหรือแหลม ลักษณะตั้งตรง ขนาดความกว้าง 1-2 เซนติเมตร กลีบดอกมี 4-5 อัน รูปร่างคล้ายช้อน สีเหลืองอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลเป็นผลเดี่ยวมีขนาดใหญ่ มีก้านผลห้อยหัวลง รูปร่างแตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของพันธุ์ อาจมีรูปทรงกลม รูปไข่ รูปไข่ยาว อาจมีก้นแหลมหรือก้นมน เส้นผ่าศูนย์กลาง 13-15 เซนติเมตร ความยาว 15-30 เซนติเมตร ผลมี 5 พู เมื่อแก่จะแตกออกตามความยาวของสันพู ด้านนอกผลมีหนาม สีเหลืองหรือเขียวอมเหลือง หนามมีลักษณะหยาบ รูปทรงสามเหลี่ยมปิรามิด ปลายแหลมค่อนข้างคม ถัดจากก้านผล จะเป็นปลิง คือ สิ่งที่อยู่ถัดออกมาจากต้น เมื่อทุเรียนแก่ปลิงจะหลุดออกจากก้านผล เนื้อทุเรียนเป็นส่วนที่รับประทานได้ เจริญมาจากก้านไข่ และเยื่อหุ้ม ผนังรังไข่ด้านนอก อาจมีลักษณะหยาบหรือละเอียด สีเหลืองอ่อน

เมล็ด มีรูปร่างคล้ายหัวใจ มีขนาดใหญ่หรือมีขนาดเล็กก็ได้ เปลือกหุ้มเมล็ดมีผิวเป็นสีน้ำตาลอ่อน เมื่อผ่าเมล็ดออกมาจะพบคัพภะที่มีสีขาวอยู่ข้างในเมล็ด

ในปัจจุบันทุเรียนที่นิยมปลูกมากที่สุด คือ ทุเรียนพันธุ์หมอนทอง โดยทุเรียนพันธุ์หมอนทองจะมีราคาดีกว่าพันธุ์ชะนี ปลูกง่าย โตเร็ว มีผลขนาดใหญ่ยาวประมาณ 30 เซนติเมตร เนื้อหนา สีเนื้อเหลืองอ่อน รสหวานมัน เมล็ดค่อนข้างเล็ก

นอกจากนี้เนื้อของทุเรียนยังมีคุณค่าทางอาหารที่สูง เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และแร่ธาตุต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายโดยจะแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางอาหารของทุเรียน 100 กรัม [6]

คุณค่าทางอาหาร	ปริมาณ	หน่วย
พลังงาน	144	แคลอรี่
โปรตีน	25	กรัม
แป้งและน้ำตาล	30.4	กรัม
แคลเซียม	9	มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	0.44	มิลลิกรัม
เหล็ก	0.9	มิลลิกรัม
วิตามินเอ	30	ยูนิต
ไทอมีน	0.24	มิลลิกรัม
โรโบฟลาวิน	0.2	มิลลิกรัม
ไนซิน	0.7	มิลลิกรัม
แอสคอบิคแอซิด	24	มิลลิกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 อายุการเก็บเกี่ยวทุเรียน

ลักษณะผลของทุเรียนแก่สามารถดูได้จาก สีเปลือกจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาล ก้านผลจะมีสีเข้มขึ้น ปลายหนามจะแห้งเป็นสีน้ำตาล โดยทุเรียนพันธุ์หมอนทองใช้อายุตั้งแต่ดอกบานจนถึงวันผลแก่พร้อมที่เก็บเกี่ยวได้ประมาณ 140-150 วัน [5]

2.2 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ หรือค่าความหวาน

ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (total soluble solid, TSS) หมายถึง ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดใช้บ่งชี้ความเข้มข้นของอาหารเหลว เช่น น้ำเชื่อม น้ำผลไม้เข้มข้น ของแข็งที่ละลายได้ในน้ำคั้นจาก ผัก ผลไม้ เป็นผลรวมของของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ได้แก่ น้ำตาลชนิดต่างๆ เช่น น้ำตาลซูโครส น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลฟรักโทส กรดอินทรีย์ เช่น กรดซิตริก กรดแล็กทิก และแร่ธาตุต่างๆ สามารถใช้ เป็นดัชนีวัดความแก่อ่อน (maturity index) ของผักผลไม้ [7]

น้ำตาล คือสารที่ให้ความหวานที่มีคุณค่าทางโภชนาการ น้ำตาลเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน [8] น้ำตาลมีหลายชนิด เช่น ซูโครส กลูโคส และฟรุกโตส เป็นต้น น้ำตาลที่พบในเนื้อทุเรียนมากที่สุด คือ น้ำตาลซูโครส (ประมาณ 19.4 กรัม ต่อเนื้อทุเรียน 100 กรัม) [9] เนื่องจากน้ำตาลเป็นของแข็งที่สามารถละลายในน้ำได้ ดังนั้น การวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จากปริมาณน้ำตาลในทุเรียนจึงมีความสัมพันธ์กับค่าความหวานของทุเรียน

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งด้วยเครื่อง Refractometer [10]

Refractometer เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร มีประโยชน์ในการใช้วัดค่าความเข้มข้นของสารละลาย เช่น ปริมาณน้ำตาล ในน้ำคั้นจากผลไม้สด น้ำเชื่อม เครื่องดื่ม เช่น ค่าที่ได้มีหน่วยเป็น องศาบริกซ์ (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อน้ำหนัก) การใช้ refractometer วัดน้ำคั้นจากผัก ผลไม้ หรือน้ำผลไม้ เป็นการวัดค่า total soluble solids หรือปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร) เพราะในน้ำผลไม้ ประกอบด้วยน้ำตาลชนิดต่างๆ ซึ่งละลายได้ในน้ำ เช่น กลูโคส (glucose) ฟรักโทส (fructose) ซูโครส (sucrose) นอกจากน้ำตาแล้ว ในน้ำผลไม้ยังมีกรดอินทรีย์ ที่ละลายในน้ำได้ดี เช่น กรดซิตริก (citric acid) กรดมาลิก (malic acid) กรดทาร์ทาริก (tartaric acid) กรดแอมิโน และวิตามินซี ซึ่งค่าที่วัดได้ เป็นค่ารวมของความเข้มข้นน้ำตาลทุกชนิด และกรดอินทรีย์ที่ละลายได้ในน้ำผลไม้นั้น ปริมาณเกลือ มีชื่อรียกว่า Salinity Refractometer มีหน่วยเป็น ความเข้มข้น ppt (part per thousond, ถ้าต้องการค่าเป็น เปอร์เซ็นต์ ให้เอาค่า ptt/10) หรือ ความถ่วงจำเพาะของสารละลายเกลือ ใช้เตรียมน้ำเกลือในอาหารหมักเกลือ (salt curing) วัดความเข้มข้นของเกลือในซีอิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำปลา ปูเค็ม ปริมาณแอลกอฮอล์ ในเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ (alcoholic beverage) มีหน่วยเป็น Alcohol by Volume หรือ % ABV ความหนาแน่นของของเหลว (liquid density) และ ความถ่วงจำเพาะของสารละลาย

เครื่อง Refractometer ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาโดย Dr. Ernst Abbe นักวิทยาศาสตร์ เยอรมัน/ออสเตรีย ในต้นศตวรรษที่ 20 โดยการทำงานของ refractometer เป็นการวัด ดัชนีหักเหของแสง (refractive index) เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งสู่อีกตัวกลางหนึ่ง ทำให้ มุม ความเร็ว (velocity, v) ของแสงแตกต่างกัน และสารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันเมื่อแสงส่องผ่านจะเกิดการหักเหและให้ค่าดัชนีหักเหของแสงต่างกันซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าว จึงนำมาประยุกต์ใช้วัดค่าความเข้มข้นของสารละลายได้ โดยใช้การหักเหของแสงจากปริซึมเพื่ออ่านค่าในสเกล ซึ่งค่าการหักเหของแสงจะแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณน้ำตาลที่อยู่ในตัวอย่างที่ใช้วัดค่า

การวัดค่าดัชนีหักเหของแสง (refractive index) สามารถทำได้ 2 ระบบ คือ

1.วัดด้วยการส่องผ่านของแสง (transparent system)

2.วัดด้วยการสะท้อนของแสง (reflection system)

Hand held refractometer เป็น refractometer ที่มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา พกพาได้ ใช้งานง่าย สะดวก รวดเร็ว นิยมใช้ในอุตสาหกรรม การทำงานของ hand held refractometer อาศัยหลักการหักเหของแสงใช้วัดความเข้มข้นของสารละลาย วิธีการวัดค่าทำได้โดยการหยดสารละลายที่ต้องการทราบค่าบนแผ่นปริซิม ปิดด้วยแผ่นปิด แล้วส่องมองผ่านช่องในที่มีแสง จะมองเห็นเป็นแถบสี ที่อ่านค่าตัวเลขได้ ตามสเกล ที่เครื่องกำหนดไว้ เช่น เป็นเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้น ความเข้มข้นของน้ำตาล น้ำเชื่อม น้ำผลไม้ ที่วัดได้ มีหน่วยเป็น องศาบริกซ์ (Brix) หรือ อาจเป็นค่าความหนาแน่นของเหลว หรือทั้งสองอย่าง ก่อนและหลังการใช้ hand refractometer ควรทำความสะอาดแผ่นปริซึม ซึ่งเป็นบริเวณที่ใช้หยดสารละลายตัวอย่าง ด้วยกระดาษเช็ดเลนส์ ฝุ่นละออง คราบสกปรกบนแผ่นปริซึม มีผลต่อความถูกต้องของค่าที่อ่านได้ สารละลายที่หยดไม่ควรมีฟองอากาศปน ซึ่งอาจจะมีผลต่อค่าที่อ่านได้ค่าที่อ่านได้เป็นค่าที่สัมพันธ์กับความเข้มข้นที่อุณหภูมิที่ระบุไว้ในเครื่องคือ 20 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี NIRs

2.4.1 ทฤษฎีเนียร์อินฟราเรด [11]

เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีหรือ NIR เป็นการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR radiation) กับสสารที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับรังสีเนียร์อินฟราเรดคือ สสารที่โมเลกุลประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจน (X - H) อะตอม X ได้แก่ C, O, N, S ฯลฯ การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว คือการที่โมเลกุลดูดกลืนรังสีเนียร์อินฟราเรดเข้าไป ซึ่งจะมีผลต่อการสั่นของพันธะต่างๆ ในโมเลกุล ระดับการดูดกลืนรังสีเนียร์อินฟราเรดของสสารที่ความยาวคลื่นต่างๆ จะปรากฏในสเปกตรัม NIR เพื่อนำไปประมวลผลในการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพต่อไป

รังสีเนียร์อินฟราเรด หมายถึง รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่จัดอยู่ในรังสีอินฟราเรด (IR radiation) โดยช่วงคลื่นอินฟราเรด สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ อินฟราเรดย่านใกล้ (NIR) อินฟราเรดย่านกลาง (Mid IR) และ อินฟราเรดย่านไกล (Far IR) ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 การแบ่งช่วงของรังสีอินฟราเรด

ช่วง	ความยาวคลื่น(nm)	จำนวนคลื่น(cm^{-1})	ย่านอันตรกิริยา
อินฟราเรดย่านใกล้ (Near IR, NIR)	800-2,500	12,500-4,000	โอเวอร์โทน, คอมบิเนชัน
อินฟราเรดย่านกลาง (Mid IR or fundamental IR)	2,500-25,000	4,000-400	การสั่นแบบพื้นฐาน
อินฟราเรดย่านไกล (Far IR)	25,000-100,000	400-10	การหมุน

รังสีเนียร์อินฟราเรดสามารถแบ่งตามระดับพลังงานได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงคลื่นสั้นเริ่มตั้งแต่ความยาวคลื่น 800-1,100 นาโนเมตร และช่วงคลื่นยาวเริ่มตั้งแต่ความยาวคลื่น 1,100-2,500 นาโนเมตร ช่วงคลื่นสั้นเป็นช่วงที่มีพลังงานสูงสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในเนื้อในตัวอย่างได้ดีโดยทั่วไปสามารถทะลุเข้าไปได้ถึง 1-2 เซนติเมตร มักนิยมใช้ช่วงคลื่นสั้นในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ข้อมูลที่ต้องการอยู่ภายใน ได้แก่ ตัวอย่างประเภทผลไม้มีเปลือกโดยเฉพาะผลไม้เปลือกหนา เช่น มังคุด ส้มเปลือกหนา เป็นต้น รังสีจะผ่านเข้าไปยังเนื้อในทำให้ได้ข้อมูลสเปกตรัมเนื้อในของตัวอย่างสูงสำหรับช่วงคลื่นยาว มีพลังงานต่ำกว่าช่วงคลื่นสั้น สามารถทะลุผ่านได้ไม่เกิน 5 มิลลิเมตรถึง 1 เซนติเมตร เหมาะกับตัวอย่างทั่วไปทั้งของเหลวและของแข็ง ซึ่งตัวอย่างจะถูกบรรจุอยู่ใน cell ที่มีผิวหน้าเรียบ เป็นช่วงที่ให้ข้อมูลทางเคมีมากกว่าช่วงคลื่นสั้นเนื่องจากเป็นช่วงที่แถบโอเวอร์โทนอันดับหนึ่งและคอมบิเนชัน[11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

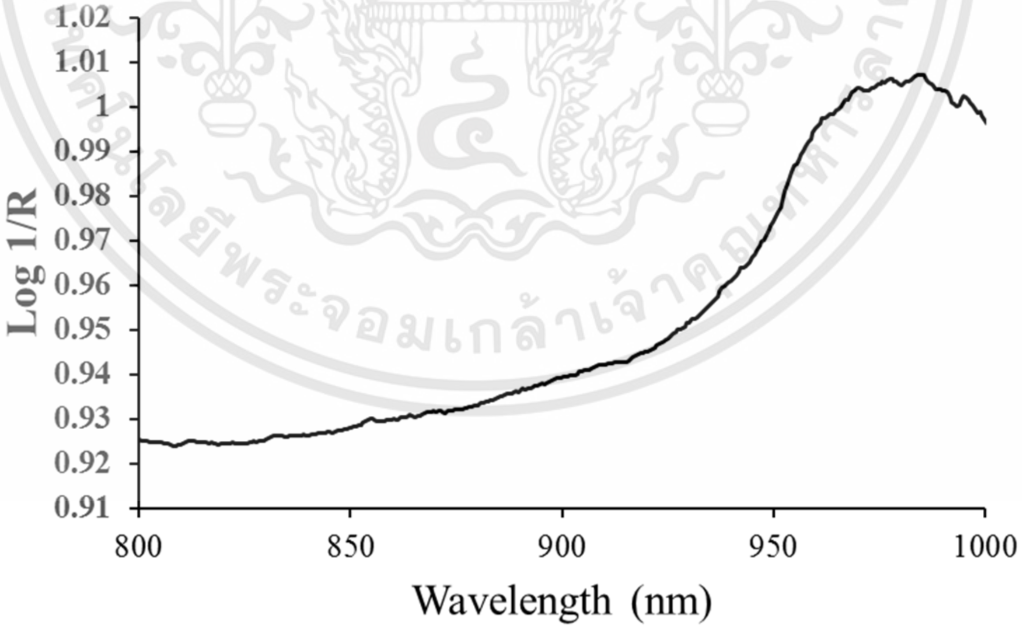
ตารางที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ความยาวคลื่น (nm)	การเปลี่ยนระดับพลังงาน
800 – 1,300	โอเวอร์โทนอันดับสองและสาม, คอมบิเนชัน
1,300 – 1,800	โอเวอร์โทนอันดับหนึ่ง, คอมบิเนชัน
1,800 – 2,500	คอมบิเนชัน

2.5 เครื่องมือ NIR Spectrometer

2.5.1 หลักการของเครื่อง NIR Spectrometer[12]

เครื่อง NIR คือเครื่องที่ใช้แสงที่มีความยาวคลื่นย่านใกล้อินฟราเรด ส่องไปยังสิ่งที่เราต้องการวิเคราะห์ (สารอินทรีย์ เช่น อาหาร หรือวัตถุดิบทางอาหาร) เพื่อให้เกิดการดูดกลืนแสง แล้วมีการเปลี่ยนแปลงของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน C-H, ไนโตรเจนกับไฮโดรเจน N-H และอ๊อกซิเจนกับไฮโดรเจน O-H โดยเกิดการยืด-หด หรือบิด-งอ ในรูปแบบต่างๆ แล้วทำการตรวจวัดคลื่นแสงที่ไม่ถูกดูดกลืน ซึ่งสะท้อนหรือส่องผ่านออกมา โดยสามารถตรวจวัดด้วย Detector แล้วประมวลผลเป็นค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ เกิดเป็นสเปคตรัมที่มีลักษณะเฉพาะตัวในแต่ละตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ลักษณะตัวอย่างดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียนในการสแกนแบบออนไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยหลักการแล้ว NIR เป็น Secondary Method นั่นคือ เป็นเครื่องที่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ที่เป็น Primary Method เป็นตัวอ้างอิง โดยตัวอย่างใดๆ ต้องถูกนำไปวิเคราะห์ทางเคมี (มีค่าทางเคมี) และนำไปสแกนด้วย NIR (ได้ Spectra) เมื่อได้ทั้ง 2 ส่วนมาแล้ว จึงใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ สร้างสมการขึ้นมาจากทั้งค่าทางเคมีและสเปกตรัม แล้วจึงนำสมการที่ได้ ไปทำนายตัวอย่างที่ทราบค่าอีกส่วนหนึ่ง เป็นการยืนยันความถูกต้องของสมการ และเมื่อได้สมการที่ใช้งานได้ ก็เพียงนำสมการนั้นไปใช้ทำนาย Unknown ที่ไม่ทราบค่า ทดแทนการวิเคราะห์ทางเคมี ที่ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่นาน และมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่ามาก

2.5.2 ส่วนประกอบหลักของเครื่องมือ NIR Spectrometer [13]

ส่วนประกอบหลักและการออกแบบเครื่องมือ Spectrometer แต่ละประเภทจะมีความคล้ายคลึงกัน โดย NIR นั้นจะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแสง ตัวเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ ตำแหน่งที่วางตัวอย่าง เครื่องตรวจวัดและบันทึกผล

2.5.2.1 แหล่งกำเนิดรังสีในช่วง NIR นั้นโดยส่วนใหญ่จะใช้หลอดทังสเตนเพราะราคาถูกและใช้งานได้ทันที แล้วใช้ตัวฟิลเตอร์ช่วยกรองแสงในช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการออกเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างร้อนจนเกินไป หรือใช้ LED เป็นแหล่งกำเนิดโดยค่าความยาวคลื่นที่ได้จะขึ้นกับสารที่ใช้ทำตัว LED อย่างไรก็ตามLED ไม่สามารถให้ความยาวคลื่นในช่วง 1700-2500 นาโนเมตรได้ ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมนำไปใช้งาน แต่ก็เหมาะสำหรับเครื่องมือแบบพกพาเพราะต้องการกำลังไฟฟ้าน้อย มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและพลังงานของผลลัพธ์ที่ได้ก็ไม่เพิ่มสูงขึ้นแม้จะมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของแหล่งกำเนิด

2.5.2.2. โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) ช่วยในการกระจายแสงโดยอาศัยเกรตติ้งและควบคุมให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการด้วยช่องผ่านแสงเข้า (Entrance Slit) และช่องผ่านแสงออก(Exit Slit) ตัวอย่างจะมีการดูดกลืน หรือยินยอมให้รังสีทะลุผ่านหรือสะท้อนกลับนั้น ขึ้นกับรูปแบบและองค์ประกอบของตัวอย่าง เช่น ของแข็ง ของเหลว อิมัลชัน สารแขวนลอย เป็นต้น

2.5.2.3. ตำแหน่งที่วางตัวอย่าง จะต้องได้รับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบของการวิเคราะห์และปริมาณของอนุภาคที่ใช้วิเคราะห์ เช่น ถ้วยสำหรับใส่ตัวอย่างจะเหมาะสำหรับตัวอย่างที่เป็นตะกอนแห้งหรือในกรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณมากถ้วยเหล่านี้จะมีการหมุน เป็นต้น เซลล์สำหรับใส่ตัวอย่างเหล่านี้จะต้องทำจากวัสดุที่ยอมให้แสงในช่วง NIR สามารถทะลุผ่านได้ เช่น ควอตซ์หรือแก้ว และมีระยะทางเดินของแสงที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่าง

2.5.2.4. อุปกรณ์สำหรับตรวจวัด (Detector) ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการทาง Photoconductive Effect การเลือกเครื่องตรวจวัดนั้นขึ้นกับช่วงความยาวคลื่นและการออกแบบตัวแปรต่างๆ ของ Spectrometer ซึ่งซิลิกอนจะเหมาะสำหรับแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้และ NIR ช่วงความยาวคลื่นสั้น (400-1100 นาโนเมตร) ในขณะที่ลีดซัลไฟด์หรือเซเลเนียมจะเหมาะสำหรับ NIR ในช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

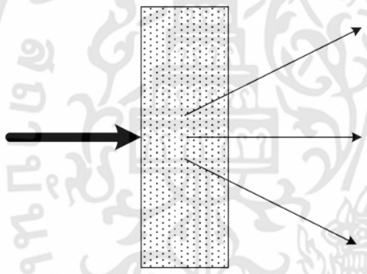
โดยการสแกนตัวอย่างด้วยเครื่อง Spectrometer สามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้ [14]

1. วิธีส่องผ่าน (Transmittance) เป็นการส่องผ่านคลื่นไปในตัวอย่างก่อนที่จะรับแสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่างแล้วทำการวิเคราะห์ วิธีนี้นิยมใช้กับของเหลว ดังภาพที่ 2.2 (ก)

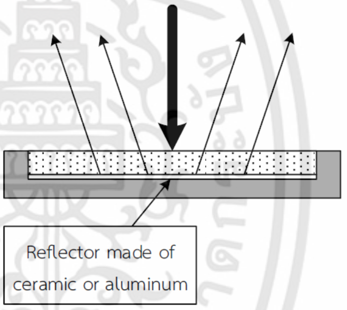
2. วิธีส่องผ่านสะท้อน (Transflectance) เป็นการส่งคลื่นผ่านตัวอย่าง ซึ่งโดยปกติเป็น ของเหลวที่อยู่ในภาชนะที่ทาด้วยอะลูมิเนียมที่มีความลึกน้อยๆ เมื่อคลื่นกระทบพื้นอะลูมิเนียมจะสะท้อนผ่านตัวอย่างขึ้นมาเข้าสู่ตัวตรวจ ดังภาพที่ 2.2 (ข)

3. วิธีสะท้อน (Reflectance) เป็นวิธีที่ง่ายต่อการจัดวางตัวอย่าง เมื่อแสงส่องไปยังวัตถุแล้ว แพร่ลงไปในเนื้อวัตถุบางส่วนแล้วสะท้อนกลับขึ้นมาสู่ตัวตรวจวัด บางทีเรียกว่า การสะท้อนแบบแพร่ (Diffused reflectance) ดังภาพที่ 2.2 (ค)

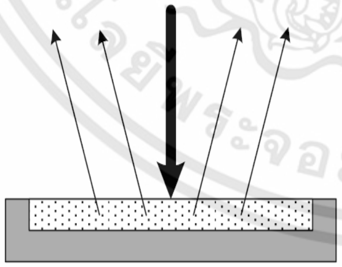
4. Interactance เนื่องจากในปัจจุบันมีความสะดวกในการใช้สาย Fiber Optic (ไฟเบอร์ ออปติค) การวัดสะท้อนจากวัตถุจึงเป็นแบบ Interactance ซึ่งมีสาย Fiber Optic เป็น ตัวนำคลื่นที่สะท้อนจากวัตถุกลับไปยังตัวตรวจวัดซึ่งอยู่ใกล้กัน เรียกว่า Interactance- Reflectance ดังภาพที่ 2.2 (ง)



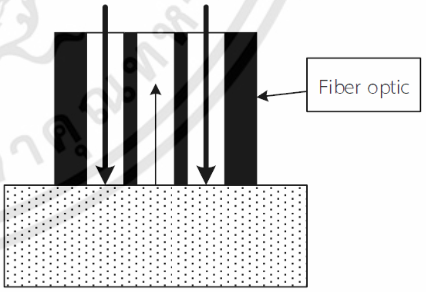
(ก)การสแกนด้วยวิธีส่องผ่าน



(ข)การสแกนด้วยวิธีส่องผ่านสะท้อน



(ค)การสแกนด้วยวิธีสะท้อน



(ง)การสแกนด้วยวิธี Interactance

รูปที่ 2.2 การสแกนตัวอย่างด้วยเครื่อง Spectrometer แบบต่างๆ [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การจัดการข้อมูลสเปกตรัมเบื้องต้น [15]

วิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้นเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่สำคัญ มีจุดประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองของสเปกตรัมในทางที่อัลกอริธึม PLS สามารถให้ความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างสเปกตรัม กับข้อมูลความเข้มข้น

2.6.1 Constant Offset Elimination

การลบโดยค่าคงที่ (Subtraction of a Constant Offset) : สเปกตรัมจะถูกปรับแบบเชิงเส้น เพื่อให้ค่า Y ที่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับศูนย์

การใช้งาน : เป็นการกำจัดปัญหาการขยับขึ้นของเบสไลน์ (Baseline Shift) เชิงเส้น สิ่งเหล่านี้เกิดจากค่าที่แตกต่างกันของการขยายสัญญาณของดีเทคเตอร์ (Detector Amplification)

2.6.2 Straight Line Subtraction

การลบโดยเส้นตรง (Subtraction of a Straight Line) ในแต่ละช่วงความถี่ที่เลือกไว้ เส้นตรง เส้นหนึ่งจะถูกฟิตเส้นสเปกตรัมโดยใช้วิธี Partial Least Squares (PLS) เส้นตรงเส้นนี้จะถูกลบ ออกจากสเปกตรัมดังกล่าว

การใช้งาน : กำจัดปัญหาความเอียงเชิงเส้นของการขยับขึ้นของเบสไลน์

2.6.3 Vector Normalization (SNV)

ขั้นแรกสเปกตรัมจะถูกหาค่ากลาง จากนั้นผลรวมของค่ายกกำลังสองของค่า Y ทั้งหมดจะถูกคำนวณ และสเปกตรัมใดๆ จะถูกหารด้วยค่ารากที่สองของผลรวมนี้ สิ่งที่เรียกว่า Vector norm ของสเปกตรัมที่ได้จะเท่ากับ 1 เสมอ ในหลักการสเปกตรัมจะประกอบด้วยสองส่วนของข้อมูล คือความสูงของแถบการดูดซับและโครงสร้าง หลังจากการนอร์มัลไลเซชั่น (Normalization) ข้อมูลความสูงจะหายไป มีเพียงโครงสร้างข้อมูลยังคงอยู่ การนอร์มัลไลเซชั่น (Normalization) ถูกใช้เพื่อ เช่น การกำจัดผลกระทบของเส้นทางผ่านเชิงแสง (Optical Path Length) ที่แตกต่างกัน ในกรณีของการวัดแบบส่องผ่าน ความยาวของเส้นทางผ่านเชิงแสงทำให้ความสูงของสัญญาณเปลี่ยนแปลง แต่โครงสร้างยังเหมือนเดิม ในทำนองเดียวกันการวัดแบบสะท้อนแบบแพร่จะมีผลกระทบของการรบกวนเนื่องจากความหนาแน่นของวัสดุแตกต่างกันหรือขนาดอนุภาคแตกต่างกัน สิ่งเหล่านี้ก็จะลดลง

2.6.4 Max-Min Normalization

สเปกตรัมจะถูกขยับเชิงเส้นเพื่อให้ค่า Y ที่ต่ำสุดมีค่าเท่ากับศูนย์ แล้วสเปกตรัมจะถูกขยายเพื่อให้ค่า Y สูงสุดเท่ากับสองหน่วยของการดูดซับคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5 Multiplicative Scattering Correction (MSC)

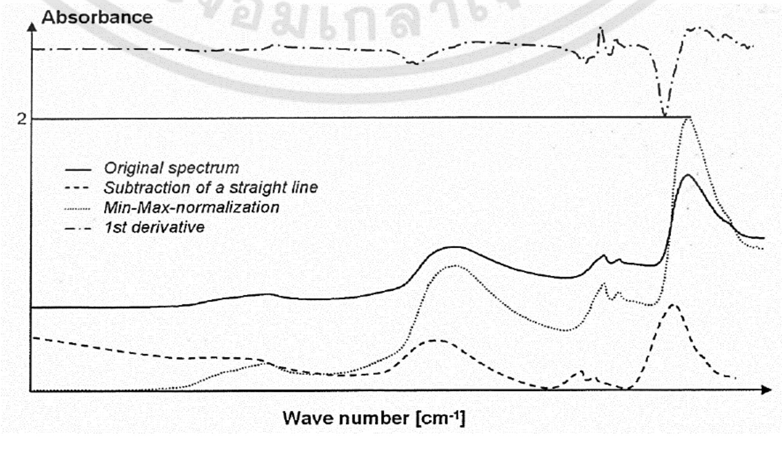
ขั้นตอนแรกสเปกตรัมเฉลี่ยคำนวณจากทุกๆ สเปกตรัมของชุดข้อมูลคาลิเบรชั่น แล้วแต่ละสเปกตรัม X(i) จะถูกแปรเปลี่ยนไปตาม

$$(i)' = u + v \cdot (i) \qquad (2.1)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ u และ v จะถูกเลือก เพื่อให้มีความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงแล้ว X(i) กับสเปกตรัมเฉลี่ยน้อยที่สุด วิธีการนี้มักจะใช้สำหรับการวัดแบบการสะท้อนแบบแพร่ (Diffuse Reflection)

2.6.6 First Derivative (อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง)

คำนวณอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของสเปกตรัม สัญญาณที่มีความชันจะถูกเน้นมากกว่า สัญญาณที่ค่อนข้างแบนราบ วิธีนี้จะถูกใช้เน้นลักษณะที่ชัดเจนแต่มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับโครงสร้างที่มีแถบการดูดซับคลื่นที่กว้าง การประยุกต์ใช้ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการประเมินแถบการดูดซับคลื่นที่กว้างนี้มักจะทำในเทคโนโลยี NIR โดยการคำนวณอนุพันธ์ โครงสร้างเหล่านี้จะมีรูปร่างที่สูงชันขึ้น ซึ่งสามารถได้รับการประเมินได้ง่ายขึ้น เมื่อใช้อนุพันธ์เป็นการจัดการข้อมูลเบื้องต้น จะต้องคำนึงถึงว่าสัญญาณรบกวนจะถูกจัดการเช่นกัน สิ่งนี้จะซ้อนทับบนสเปกตรัมเป็นสิ่งรบกวนเพิ่มเติม และสามารถทำให้สัญญาณของตัวอย่างแย่ลงเมื่อเทียบกับอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง แม้โครงสร้างที่ราบเรียบมากๆ สามารถประเมินได้ผลการรบกวนของสัญญาณรบกวน ซึ่งโดยทั่วไปมีมากจนทำให้สเปกตรัมถูกวิเคราะห์ในช่วงสเปกตรัมที่จำกัดมากๆ ภาพที่ 2.3 แสดงให้เห็นอิทธิพลของวิธีการจัดการข้อมูลเบื้องต้นแบบต่างๆ ต่อลักษณะของ NIR สเปกตรัม (การวัดมือคนด้วยหัววัด Fiber Optic) สเปกตรัมเดิมแสดงให้เห็นการขจัด (Offset) เล็กน้อยของเบสไลน์ เช่นเดียวกับการขยับขึ้น (Shift) การขยับขึ้นนี้สามารถถูกกำจัดโดยการลบออกจากเส้นตรง (Subtraction of a Straight Line) (เส้นประ) และการขจัดถูกกำจัดโดยการ Min-Max Normalization (เส้นจุด) อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของเส้นสเปกตรัมเดิม (เส้นประจุด) ถูกขยายเพื่อแสดงให้ดูง่ายและขยับขึ้นสู่ตำแหน่งที่ค่าการดูดซับคลื่นสูง สามารถสังเกตเห็นโครงสร้างที่แหลมขึ้นมาได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมเดิม



รูปที่ 2.3 NIR สเปกตรัมของมือคน : วัดแบบการสะท้อนแบบแพร่ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.7. อนุพันธ์อันดับที่สอง (Second Derivative)

อนุพันธ์อันดับที่สอง สามารถลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน Y ที่ชัดเจนกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 และแยกพีคสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับกันออกจากกันได้อย่างชัดเจน ทำให้ทราบตำแหน่งความยาวคลื่น แต่สเปกตรัมมีลักษณะหัวกลับลงมาด้านล่าง ดังนั้นการคำนวณการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 จึงเป็นที่นิยมมากกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 โดยการเพิ่มอันดับของอนุพันธ์สูงขึ้น ก็จะได้สเปกตรัมที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นข้อมูลที่ดีในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ แต่การทำอนุพันธ์ที่สูงเกินไปทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณวัดกับสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio)ลดลง เนื่องจากแถบสัญญาณรบกวนมักมีรูปร่างแคบชัน ดังนั้นเมื่อแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์สเปกตรัมที่ได้ของสัญญาณรบกวน จึงมีแอมพลิจูด (amplitude) เด่นชัดมากยิ่งขึ้นจนสามารถรบกวนการวิเคราะห์ได้

2.7 การสร้างแบบจำลอง Calibration และ การพิสูจน์แบบจำลอง Validation [16]

2.7.1 การสร้างแบบจำลอง Calibration

2.7.1.1 กำหนดตัวแปรอิสระ (Independent variables) และตัวแปรตาม (Dependent variables) ตัวแปรอิสระ (Independent variables) ที่ใช้สร้างแบบจำลองคือ ค่าที่อ่านได้จากสเปกตรัม NIR เช่น ค่า log (1/R) เป็นต้น และตัวแปรตาม (Dependent variables) คือค่าอ้างอิงที่ได้จากการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ เช่น ความชื้นในแป้ง ที่หาด้วยวิธีการ Oven drying method

2.7.1.2 การสร้างแบบจำลอง Calibration ในการสร้างแบบจำลองสิ่งที่สำคัญที่สุด คือ การหาตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตามที่จะทำการวิเคราะห์คุณภาพ การคัดเลือกหาตัวแปรอิสระสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีหลักๆ คือ

1. Wavelength selection เป็นการคัดเลือกตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่จะทำการวิเคราะห์ เทคนิคในการเลือกทำการวิเคราะห์มีหลายเทคนิค เช่น เลือกจากความรู้ความชำนาญ หรือเอกสารอ้างอิงที่บ่งบอกถึงช่วงความยาวคลื่นที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าที่จะทำการวิเคราะห์ หรือ อาจจะใช้เทคนิคทางสถิติในการคัดเลือกความยาวคลื่นที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์ เช่น Multiple regression หรือการสร้าง correlalogram โดยการสร้าง correlalogram เป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกน X และแกน Y เมื่อ แกน X คือความยาวคลื่น และแกน Y คือค่าความสัมพันธ์อย่างง่ายของความสัมพันธ์ระหว่าง optical data ณ ความยาวคลื่นนั้นกับค่าที่วิเคราะห์ที่หามาได้ด้วยวิธีการวัดค่าอ้างอิง ซึ่งช่วยให้นักวิจัยสามารถคัดเลือกความยาวคลื่นที่มีความเป็นไปได้ที่จะสัมพันธ์กับค่าที่วิเคราะห์ ซึ่งสร้างแบบจำลอง Calibration แบบอาศัยหลักวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระ และวิธีการทางสถิติมาช่วยในการสร้างแบบจำลอง ได้แก่ Simple Linear Regression, Multiple Linear Regression

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Simple Linear Regression (SLR) หรือ Single term linear regression สำหรับเทคนิค NIR เป็นการเลือกใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่สัมพันธ์กับค่าที่ต้องการวิเคราะห์เพียงความยาวคลื่นเดียว ซึ่งทำให้ค่า correlation ที่ได้นั้นมีค่าต่ำจึงไม่นิยมนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง calibration

Multiple Linear Regressions (MLR) เป็นวิธีการใช้ตัวแปรอิสระ (X) มากกว่า 1 ตัวในการประมาณค่าตัวแปรตาม (Y) ซึ่งเป็นค่าตัวแปรที่ได้จากวิธีอ้างอิง 1 ตัว จะทำให้แบบจำลองที่ได้ลดความผิดพลาดในการประมาณค่าลงได้ หากทำการพิจารณาในเรื่องของการใช้เทคนิค NIR ในการหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวอย่างก็หมายถึงการพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงที่หลายความยาวคลื่น

2. Full spectrum analysis เป็นวิธีการคัดเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสม (Selective wavelength) จากความยาวคลื่นทั้งหมดที่มีในสเปกตรัมมาสร้างแบบจำลอง calibration ดังวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว บางครั้งอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ถ้ามีการสร้างแบบจำลองที่ไม่ถูกต้อง อาจเกิดปัญหาทำให้ค่าทำนายต่ำกว่าหรือสูงกว่าที่แท้จริง (Over estimation) อันเนื่องมาจากการเกิดความคลาดเคลื่อนจากการสร้างแบบจำลอง (Interference) หรือเกิดปัญหาเมื่อมีจำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายมีน้อย ทำให้ได้สมการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในแบบจำลอง ทำให้ข้อมูลไม่น่าเชื่อถือ (Over fitting) การใช้ข้อมูลทั้งหมดในทุกความยาวคลื่นของสเปกตรัม น่าจะเป็นอีกหนทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างไรก็ตามปัญหาที่มีอยู่ คือการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไป และการใช้วิธีทางสถิติในการจัดกลุ่มแยกประเภทตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกัน และทำการสร้างตัวแปรใหม่ที่เกิดมาจากตัวแปรเดิมจะช่วยทำให้แก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ วิธีทางสถิติที่นิยมใช้ ได้แก่

Principal Components Regression (PCR) การทำ PCR จะเริ่มจากการทำ Principal Components Analysis (PCA) กับข้อมูลที่ได้มาจากข้อมูลของสเปกตรัมเพื่อสร้างองค์ประกอบหรือตัวแปรใหม่ที่เรียกว่า New Factors ก่อน แล้วจึงนำค่าตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่หามาจากวิธีอ้างอิงเพื่อสร้างแบบจำลอง calibration โดยใช้หลักการของ MLR

Principal Components Analysis (PCA) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดจำนวนตัวแปรอิสระในกรณีที่ตัวแปรอิสระมีจำนวนมาก ยกตัวอย่างเช่น วัดค่าการดูดกลืนของสเปกตรัมที่ 700 ความยาวคลื่น จำนวนสเปกตรัมดังกล่าว คือจำนวนของสเปกตรัมอิสระนั่นเอง การลดลงของจำนวนตัวแปรมีวิธีการคือ แบ่งกลุ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเพื่อสร้างตัวแปรขึ้นมาใหม่ เรียกว่า ปัจจัย (factor) หรือ องค์ประกอบของปัจจัยที่สร้างขึ้นอีกนัยหนึ่งก็คือผลรวมของค่าสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นที่มีน้ำหนักแตกต่างกัน Factor จะมีได้หลายปัจจัยโดยแต่ละปัจจัยมีน้ำหนักแตกต่างกัน แต่ค่าสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งประกอบกันเป็นปัจจัยนั้นๆ ปัจจัยแรกจะถูกสร้างขึ้นมาให้สามารถอธิบายความแปรปรวนของค่าสเปกตรัมได้มากที่สุด ปัจจัยที่สองอธิบายความแปรปรวนที่เหลือ ซึ่งทาให้ปัจจัยแต่ละปัจจัยแทบจะไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน (Non-Collinearity) ซึ่งเป็นข้อดีสาหรับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ เมื่อทำการหาปัจจัยเรียบร้อยแล้ว นำปัจจัยที่ได้มาทำ Regression กับค่าทางเคมี โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ทำให้ได้ค่า Chemical Loading หรือ Calibration Coefficient

Partial Least Squares (PLS) Regression เป็นเทคนิคในการลดจำนวนตัวแปร เช่นเดียวกับวิธี PCR กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมจะเป็นอิสระจากกระบวนการทำสมการถดถอยของสมการทำนาย ซึ่งใน PLS ทั้งสองกระบวนการจะถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกัน โดยมีการนำค่าองค์ประกอบทางเคมีมาคิดในกระบวนการหาปัจจัยด้วย ซึ่ง Kasemsamran, 2005 [17] ได้อธิบายถึง PLS ว่าเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบตัวแปรหลายตัวแปร โดยการสร้างปัจจัยแบบสมการเชิงเส้นตรงจากข้อมูลของสเปกตรัมเริ่มต้น และนำปัจจัยที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการถดถอย โดยปัจจัยที่ได้จากการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีสถิติ PLS ต้องสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล และเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกัน โดยวัตถุประสงค์ของ PLS คือต้องการลดจำนวนข้อมูลสเปกตรัม ให้ได้เฉพาะข้อมูลสเปกตรัมที่มีความสำคัญกับการทำนายค่าทางเคมีที่สนใจเท่านั้น เพื่อให้สามารถประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น

2.7.2 การพิสูจน์แบบจำลอง Validation

หลังจากที่ได้สร้างแบบจำลองแล้ว ต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองนั้น ก่อนนำไปใช้งานจริง ซึ่งการทดสอบแบบจำลองที่นิยมมี 2 วิธี คือ

1) Full Cross Validation เป็นการทดสอบแบบจำลองภายใน ความหมายคือ ตัวอย่างที่นำมาทดสอบแบบจำลอง เป็นตัวอย่างชุดมาตรฐานทั้งหมด ที่ใช้สร้างแบบจำลองประเมินค่าทางเคมีนั่นเอง มีขั้นตอนดังนี้

1. ตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน
2. ใช้ตัวอย่างมาตรฐานที่เหลือทำการสร้างแบบจำลอง
3. นำแบบจำลองที่ได้ประเมินค่าทางเคมีของตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 ที่ตัดออก
4. ใส่ตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 1 กลับคืนเข้าไป
5. ตัดตัวอย่างมาตรฐานตัวที่ 2 ออกจากชุดตัวอย่างมาตรฐาน
6. ทำขั้นตอนข้างต้น จนครบทุกตัวอย่าง

จากนั้นทำการหาค่า Root Mean Square Error of Cross Validation (RMSECV)

2) Test set validation วิธีนี้จะทดสอบแบบจำลองแบบภายนอก โดยการเตรียมตัวอย่างชุดใหม่มาทำการวิเคราะห์ในสภาวะการทดลอง เช่นเดียวกับชุดตัวอย่างมาตรฐาน เรียกชุดตัวอย่างที่นำมาทดลองแบบจำลองนี้ว่า ชุดทดสอบ (Test Set) ตัวแปรอิสระ (X) มากกว่าหนึ่งตัวในการประมาณค่าตัวแปรตาม (Y) สิ่งที่ต้องระวังคือ ปริมาณค่าทางเคมีที่ใช้ทดสอบต้องอยู่ในช่วงมาตรฐาน หลังจากได้สเปกตรัมจากชุดทดสอบก็นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณค่าทางเคมีจากแบบจำลอง จากนั้นดูผลการคำนวณที่ได้จากค่าทางสถิติ ซึ่งค่าทางสถิติที่ควรพิจารณาคือ ค่า Bias ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากวิธี NIR กับค่าที่ได้จากวิธีอ้างอิง และค่า Root Mean Square Error of Prediction (RMSEP) หรือค่า Standard Error of Prediction (SEP)

2.8 การทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายสมบัติที่ต้องการวัดโดยวิธีทางสถิติ [18]

การทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายสมบัติที่ต้องการวัด ทำได้โดยวิธีทางสถิติ โดยคำนวณค่าที่จำเป็นในการประเมินความแม่นยำและความถูกต้องของแบบจำลอง (Williams, 2007) ที่สำคัญได้แก่

2.8.1. สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (Coefficient of correlation, R)

สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R) แสดงระดับซึ่งข้อมูล 2 ชุด (ข้อมูลตัวเลข X และ Y ในที่นี้ข้อมูล X คือข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิง ข้อมูล Y คือข้อมูลจากการวัดด้วยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี) สอดคล้องซึ่งกันและกัน ความสอดคล้องที่สมบูรณ์จะไม่มีความแตกต่างกันเลยระหว่าง 2 ชุดข้อมูล ผลของค่า R จะเท่ากับ 1.00 ในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปไม่ได้ และ X และ Y อาจจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงบวกหรือลบก็ได้

2.8.2. สัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of determination, R^2)

แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูล X ที่สามารถอธิบายโดยความแปรปรวนในข้อมูล Y ค่าของ R^2 จะเป็นบวกเสมอ เช่น ถ้า R = 0.97 แล้ว R^2 = 0.941 หมายความว่า 94.1% ของความแปรปรวนในข้อมูล X และ 5.9% ของความแปรปรวนในข้อมูล X เกิดขึ้นจากตัวแปรอื่น เช่นการเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดลองอ้างอิง และอื่นๆ ค่า R^2 เป็นบวกเสมอโดยไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของ R ในทางปฏิบัติ R^2 ให้ข้อมูลมากกว่า R และใช้กันมากกว่า R การแปลความหมายของค่า R และ R^2 แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การแปลความหมายของค่า R และ R^2 [19]

R	R^2	**ความหมาย**
ถึง +/-0.5	ถึง 0.25	ไม่สามารถใช้ใน NIR calibration
+/-0.51-0.70	0.26-0.49	เป็นความสัมพันธ์ที่ไม่ดี ควรหาเหตุผล
+/-0.71-0.80	0.50-0.64	OK สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) แบบหยาบๆ
+/-0.81-0.90	0.66-0.81	OK สำหรับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และการประเมินค่าแบบหยาบๆ
+/-0.91-0.95	0.83-0.90	ใช้ด้วยความระมัดระวังในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่รวมถึงการวิจัย
+/-0.96-0.98	0.92-0.96	ใช้ในการประยุกต์ใช้ส่วนใหญ่ รวมถึงการประกันคุณภาพ
+/-0.99+	0.98+	ดีเยี่ยม ใช้ได้กับทุกการประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3. ความผิดพลาดมาตรฐานของการจำลอง (Standard error of calibration, SEC)

SEC คือ ค่า SD ของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงในชุดตัวอย่างที่ใช้สร้างแบบจำลอง (Calibration set) ถ้าใช้ MLR จะพบว่า R และ SEC จะดีขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรต้นมากขึ้น สิ่งนี้เรียกว่า over-fitting ของข้อมูล ตามหลักค่า SEP (ดูข้อ 2.8.5) ควรจะสูงกว่า SEC เสมอ

2.8.4. ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการทำ Cross-validation (Standard error of cross-validation, SECV)

Cross-validation สามารถใช้ตัวอย่างชุดเดียวกันกับที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อการทำการพิสูจน์แบบจำลอง (Validation) สิ่งนี้ทำโดยชักตัวอย่างออกหนึ่งตัวอย่างหรือกลุ่มของหลายตัวอย่างจากชุดสร้างแบบจำลองและสร้างแบบจำลองด้วยตัวอย่างที่เหลืออยู่ แล้วทำนายตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไปและบันทึกค่าความคลาดเคลื่อน แล้วนำตัวอย่างที่ถูกกำจัดออกไปนั้นกลับมาแล้วชักตัวอย่างอื่นออกไปและทำซ้ำกระบวนการจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองและทำนาย จะไม่มีตัวอย่างที่ถูกทำนายถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลองซึ่งได้ใช้ในการทำนาย ถ้าเอาออกเพียงทีละ 1 ตัวอย่างจะเรียกว่า "Full" หรือ "One-out" cross-validation ถ้านำชุดตัวอย่าง (จำนวนหลายตัวอย่าง) ออกจะเรียกว่า "Segmented" cross-validation ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าที่ถูกทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุดสร้างแบบจำลอง คือ SECV วิธีพิสูจน์นี้เหมาะที่จะใช้กับข้อมูลที่มีจำนวนตัวอย่างน้อยๆ เช่น น้อยกว่า 100 ตัวอย่าง

2.8.5. ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการทำนาย (Standard error of prediction, SEP หรือ SEV)

SEP ย่อมาจาก Standard error of prediction หรือ Standard error of performance แสดงสมรรถนะของการทำนาย บางครั้งใช้เทอม SEV (Standard error of validation) SEP เป็นค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิง ซึ่งไม่เหมือนกับ RMSEP (Root mean square of the prediction) ซึ่งจะอธิบายต่อไปโดย SEP ไม่เกี่ยวข้องกับ Bias ค่า SEP คำนวณจากผลการทำนายของชุดตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง ชุดตัวอย่างนี้เรียกว่า ชุดทำนาย (Prediction set)

2.8.6. ความคลาดเคลื่อน (Bias)

เมื่อทำนายค่าตัวแปรที่ต้องการของข้อมูลในชุดตัวอย่างทดสอบแบบจำลอง (Validation set) ค่า Bias หมายถึงความแตกต่างระหว่างค่าจากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงและค่าที่ทำนายโดยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและเป็นการวัดความแม่นยำโดยรวมของแบบจำลอง (Calibration model) ในโลกความเป็นจริงของทางการค้าและอุตสาหกรรม Bias เป็นหนึ่งในสิ่งที่สำคัญมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางสถิติ Bias สามารถเกิดขึ้นได้แม้เมื่อค่าสถิติสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และ SEP ที่แสดงว่าแบบจำลอง นั้นดีเยี่ยม

2.8.7. ค่าเฉลี่ยกำลังสองของการทำนาย (Root mean square of the prediction, RMSEP)

RMSEP เป็นค่าที่แสดงประสิทธิภาพของแบบจำลอง การคำนวณค่า RMSEP ได้รวมค่า Bias ไว้ด้วย ถ้าไม่มีค่า bias ค่า SEP และ RMSEP จะมีค่าเท่ากัน มีการใช้ RMSEP มากกว่า SEP แต่การรายงานผลโดยใช้ SEP กับ Bias แสดงถึงความแม่นยำของการทำนายได้ดี เนื่องจากRMSEP เกี่ยวข้องกับ Bias แต่ไม่ได้แสดงขนาดและเครื่องหมาย

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

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

2.8.9. อัตราส่วนระหว่าง SEP กับช่วงข้อมูล (Ratio of the SEP to the range, RER)

RER คือ อัตราส่วนของช่วงกว้างของข้อมูลอ้างอิงของชุดทำนาย ต่อ SEP ค่า RER ควรจะสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตารางที่ 2.5 แสดงการอธิบายผลของค่า RPD และ RER

ตารางที่ 2.5 การอธิบายผลของค่า RPD[19]

RPD	**ความหมาย**	**การประยุกต์ใช้**
0.0-1.9	ไม่ดีเลย	ไม่แนะนำ
2.0-2.4	ไม่ดี	ใช้คัดเลือก(แบ่งกลุ่ม)แบบหยาบๆ
2.5-2.9	พอใช้	ใช้คัดเลือก(แบ่งกลุ่ม)ได้
3.0-3.4	ดี	ใช้ควบคุมคุณภาพได้
3.5-4.0	ดีมาก	ใช้ควบคุมกระบวนการได้
4.1+	ดีเยี่ยม	ได้ทุกการประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.10. อัตราส่วนของพิสัยควอร์ไทล์ต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (ratio of performance to inter-quartile range; RPIQ)[20]

1) สำหรับแบบจำลองที่สร้างด้วยวิธี cross validation สามารถหาค่า RPIQ ได้จากสมการ

$$\mathrm{RPIQ} = \frac{Q_3 - Q_1}{\mathrm{RMSECV}} \quad (2.2)$$

เมื่อ RPIQ = อัตราส่วนของพิสัยควอร์ไทล์ต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการพิสูจน์แบบไขว้

Q_3 = ค่าทำนายที่ควอร์ไทล์ที่ 3

Q_1 = ค่าทำนายที่ควอร์ไทล์ที่ 1

RMSECV = ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการพิสูจน์แบบไขว้

2) สำหรับแบบจำลองที่สร้างด้วยวิธี test set สามารถหาค่า RPIQ ได้จากสมการ

$$\mathrm{RPIQ} = \frac{Q_3 - Q_1}{\mathrm{RMSEP}} \quad (2.3)$$

เมื่อ RPIQ = อัตราส่วนของพิสัยควอร์ไทล์ต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการพิสูจน์แบบไขว้

Q_3 = ค่าทำนายที่ควอร์ไทล์ที่ 3

Q_1 = ค่าทำนายที่ควอร์ไทล์ที่ 1

RMSEP = ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย

ในการใช้อัตราส่วนของพิสัยควอร์ไทล์ต่อค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ควรใช้ในกรณีที่ความถี่ของชุดข้อมูลส่วนมากไม่ได้กระจายแบบปกติโดยชุดข้อมูลจะมีแนวโน้มของความถี่กระจายไปทางด้านซ้าย หรือด้านขวา

2.9 ประโยชน์ของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี [21]

ประโยชน์จากการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี มีข้อดีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ทางเคมี หรือการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่นๆ สำหรับการนำเครื่อง NIR มาประยุกต์ใช้มากมาย เช่น

1. เป็นวิธีการทดสอบที่ไม่ทำลายตัวอย่าง รวมทั้งวิธีการเตรียมตัวอย่างที่ง่ายไม่ยุ่งยาก และใช้ตัวอย่างปริมาณที่น้อย
2. เป็นวิธีที่วิเคราะห์ได้รวดเร็ว ประหยัดเวลา แม่นยำ และเชื่อถือได้
3. เป็นวิธีที่ไม่ใช้สารเคมีจึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ในการวัดสเปกตรัมแต่ละครั้งสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อทำนายค่าต่างๆได้หลายค่าในเวลาเดียวกัน

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Onsawai and Sirisomboon [4] ศึกษาหาความหวานของทุเรียนโดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี โดยมีผลการศึกษาดังนี้ r^2 = 0. 55 และ RMSEP =1.63°Brix ทั้งนี้วิธีอ้างอิงใช้รีแฟรคโตมิเตอร์แบบดิจิทัล โดยใช้เนื้อทุเรียน 1 ส่วน กับน้ำ 3 ส่วนผสมให้เข้ากันแล้วจึงนำมาปั่นด้วยเครื่องปั่นที่ความเร็วรอบ 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาทีแล้วจึงนำไปวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์นำค่าที่ได้มาคูณด้วย 4 จะได้ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของทุเรียน

Chaparro et al. [22] เป็นการวิจัยโดยศึกษาการสแกน ผลมะกอก แบบ ออนไลน์ โดยใช้ diode array spectrometer ติดตั้งอยู่ด้านบนของสายพานลำเลียงเพื่อศึกษาหาค่าระยะโฟกัส และเวลา integration ที่ดีที่สุดในการทดลองโดยมีค่าอยู่ที่ 13 มิลลิเมตร และ 5 วินาที ตามลำดับ

อริยนันท์ และ อนุพันธ์ [23] ศึกษาการประเมินคุณภาพทุเรียนแบบทำลายน้อยที่สุดด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy:NIRS) เพื่อแก้ปัญหาการส่งออกทุเรียนอ่อน โดยใช้ทุเรียนพันธุ์หมอนทองจำนวน 140 ผล ใน 4 ช่วงอายุหลังดอกบานตั้งแต่ 101 วัน จนถึง 122 วัน โดยจะวัดค่าการดูดกลืนแสงที่พูเอกซึ่งผ่านเปลือกให้เรียบเปรียบเทียบกับการวัดค่าการดูดกลืนแสงของเนื้อผลโดยตรง แล้วนำข้อมูลการดูดกลืนแสงและค่าน้ำหนักเนื้อแห้งมาสร้างโมเดลประเมินน้ำหนักเนื้อแห้งด้วยเทคนิค Partial least squares regression (PLSR) ผลการวิเคราะห์พบว่า โมเดลของสเปกตรัมเนื้อผลที่สร้างจาก FT-NIR spectrometer มีความแม่นยำในการประเมินมากกว่าด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r_p) เท่ากับ 0.78 และค่า Root mean square error of prediction(RMSEP) เท่ากับ 3.02% โดยโมเดลที่สร้างจากสเปกตรัมทั้งผลผ่านเปลือกให้ค่า r_p เท่ากับ 0.69 และ RMSEP เท่ากับ 3.57%

อาทิตย์ จันทร์หิรัญ และคณะ [24] ศึกษาเกี่ยวกับการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (°Brix) ผลลองกองด้วยการใช้เทคนิคแสงย่านใกล้อินฟราเรดในช่วงคลื่นสั้น โดยการวัดตัวอย่างแบบใช้วิธีสะท้อนกลับ (Interactance mode) ในช่วงความยาวคลื่น 600-1100 นาโนเมตร และวิธีทะลุผ่าน (Transmittance mode) ในช่วงความยาวคลื่น 650-955 นาโนเมตร ตัวอย่างลองกอง 310 ผล จากนั้นสร้างสมการทดสอบ (Calibration) และสมการทำนาย (Prediction) ด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) พบว่าลองกอง มีสมการทดสอบและสมการทำนายค่า °Brix สเปคตรัมแบบ 2nd Derivative วิธี Transmittance mode มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ดีที่สุด และมีค่า RMSEC ต่ำที่สุด คือ ลองกอง ปีที่ 1 ค่า R คือ 0.935, ปีที่ 2 มีค่า 0.970 และ RMSEC มีค่าต่ำที่สุด คือ ปีที่ 1 มีค่า 0.396 และปีที่ 2 มีค่า 0.386 และเมื่อนำสเปกตรัมปีที่ 1 และปีที่ 2 มา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมกัน มีค่า R ดีที่สุด คือ 0.947 และมีค่า RMSEC ต่ำที่สุด คือ 0.448 จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าเทคนิคการใช้คลื่นสั้นย่านใกล้อินฟราเรดแบบทะลุผ่านและแบบสะท้อนกลับมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (°Brix) แบบไม่ทำลายได้อย่างแม่นยำแต่แบบทะลุผ่านค่อนข้างจะดีกว่าเพราะมีความเข้มแสงที่จะสามารถทะลุทะลวงที่ดี

พิมพ์ใจ สีหะนาม และคณะ [25] ศึกษาความสามารถของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในผลเสาวรสแบบไม่ทำลายโดยน้ำผลเสาวรสสดจำนวน 140 ผล (ชุดสร้างสมการจำนวน 100 ผล และชุดทดสอบสมการจำนวน 40 ผล) มาวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นสั้นของเนียร์อินฟราเรด (800 -1100 นาโนเมตร) ด้วยระบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (interactance) แล้วคำนวณสมการเทียบมาตรฐานโดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) เมื่อนำสมการเทียบมาตรฐานมาใช้ทำนายปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในผลเสาวรสชุดทดสอบสมการ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ของค่าที่ทำนายได้และค่าจริงคือ 0.834 โดยมีค่าความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนาย (standard error of prediction: SEP) เท่ากับ 0.29% และมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยทั้งหมด (bias) เท่ากับ 0.07% นอกจากนี้ค่า residual predictive deviation (RPD) หรือสัดส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในชุดทดสอบสมการ (standard deviation) ต่อค่า SEP มีค่าเท่ากับ 2.4

รณฤทธิ์ ฤทธิรณ และคณะ [26] ทำนายคุณภาพ (ปริมาณความหวานและปริมาณวิตามินซี) แบบไม่ทำลาย ถูกสร้างขึ้นโดยสร้างความสัมพันธ์คุณภาพกับการดูดกลืนพลังงานย่าน Near Infrared (NIR) ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุโดยผลฝรั่งถูกวัดสเปกตรัมด้วยเครื่องสเปคโตรมิเตอร์แบบพกพาสามารถทำนายปริมาณความหวานได้อย่างแม่นยำ ด้วยค่า multiple correlation coefficient (R) = 0.94, Standard Error of Prediction (SEP) = 0.54% และค่าความผิดพลาดเฉลี่ย (Bias) = -0.08%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 การทดลองเบื้องต้น

3.1.1 การเตรียมตัวอย่างของการทดลองเบื้องต้น

3.1.1.1 ตัวอย่างคือ ทุเรียน นำมาจากร้านขายผลไม้ทั่วไป และทำการปอกเปลือกออกจนหมด จนเหลือเพียงเนื้อทุเรียน

3.1.1.2 เก็บตัวอย่างเนื้อทุเรียนไว้ในกล่องพลาสติกปิดก่อนการสแกน

3.1.2 การสแกนของการทดลองเบื้องต้น เพื่อหา Repeatability, reproducibility และ maximum coefficient of determination

3.1.2.1 การสแกนแบบออนไลน์ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrometer (AvaSpec-ULS2048-USB2-VA-50, AVANTES, Netherlands)

อุปกรณ์

1. เครื่อง UV-VIS-NIR spectrometer (AvaSpec-ULS2048-USB2-VA-50, AVANTES, Netherlands)

รูปที่ 3.1 เครื่อง UV-VIS-NIR spectrometer (AvaSpec-ULS2048-USB2-VA-50, AVANTES, Netherlands)

2. สายพานลำเลียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลอง

นำเนื้อทุเรียนมาสแกนแบบออนไลน์บนสายพานลำเลียง ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrometer (AvaSpec-ULS2048-USB2-VA-50, AVANTES, Netherlands) ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 200 - 1100 นาโนเมตร ที่ Integration time เท่ากับ 4.5 มิลลิวินาที และจำนวนซ้ำในการสแกนเท่ากับ 200 ครั้ง โดยใช้การสแกนในโหมด interactance โดยบันทึกค่าเป็นค่า absorbance และสแกน 1 ตัวอย่างจะได้สเปกตรัม 1 สเปกตรัม วัสดุอ้างอิง คือ เทฟลอน

3.1.2.2 การสแกนแบบออฟไลน์ด้วยเครื่อง FT-NIR (MPA FT-NIR, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany)

อุปกรณ์

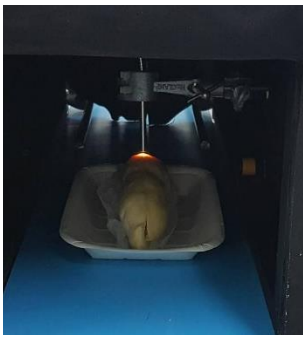
1. เครื่อง FT-NIR(MPA FT-NIR, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany)

รูปที่ 3.2 เครื่อง FT-NIR(MPA FT-NIR, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany)

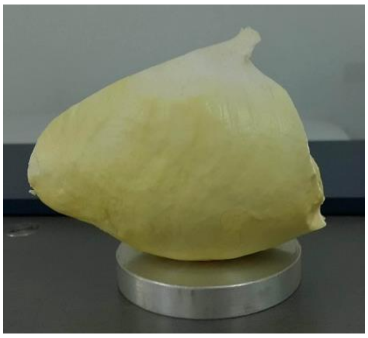
วิธีการทดลอง

นำตัวอย่างเนื้อทุเรียนที่สแกนแบบออนไลน์เสร็จแล้วมาสแกนแบบออฟไลน์ด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA FT-NIR, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany) โดยใช้การสแกนในโหมด diffuse reflectance ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 12500-4000 เซนติเมตร$^{-1}$ (800 - 2500 นาโนเมตร) ที่ความละเอียด 16 เซนติเมตร$^{-1}$ วัสดุที่ใช้อ้างอิง คือ แผ่นทอง และการสแกน 32 ครั้งเฉลี่ยได้ 1 สเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก



ข

รูปที่ 3.3 การสแกนด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrometer (AvaSpec-ULS2048-USB2-VA-50, AVANTES, Netherlands) (ก) และการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR(MPA FT-NIR, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany) (ข)

3.1.3 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

3.1.3.1 การวัดด้วยเครื่อง pen refractometer (PEN-PRO, Measurement Range Brix 0.0 to 85.0%, ATAGO, Japan)

อุปกรณ์

1. เครื่อง pen refractometer (PEN-PRO, Measurement Range Brix 0.0 to 85.0%, ATAGO, Japan)
2. น้ำกลั่น
3. กระดาษทิชชู

วิธีการทดลอง

ทำการ Calibrate เครื่อง pen refractometer (PEN-PRO, Measurement Range Brix 0.0 to 85.0%, ATAGO, Japan) โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัว Calibrate ก่อนการวัด วิธีการวัดคือ นำทุเรียนที่สแกนเสร็จแล้วมาวัดหาค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเครื่อง pen refractometer (PEN-PRO, Measurement Range Brix 0.0 to 85.0%, ATAGO, Japan) สแกนตัวอย่างละ 1 จุด 3 ซ้ำโดยวัด และนำมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ของตัวอย่างนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.4 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเครื่อง pen refractometer (PEN-PRO, Measurement Range Brix 0.0 to 85.0%, ATAGO, Japan)

3.1.4 หาค่า Repeatability, Reproducibility และ Maximum coefficient of determination

Repeatability ของการสแกนด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี คือ การสแกนตัวอย่างในตำแหน่งเดิม 10 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของการดูดซับแสง โดยเลือกมา 3 ความยาวคลื่น (970, 1440, 1900 นาโนเมตร) จาก 10 สเปกตรัม และหาค่าเฉลี่ย

Reproducibility ของการสแกนด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี หาจากการสแกนตัวอย่างเดิม 10 ครั้ง แต่ทำการ reload ทุกครั้งแล้วนำมาหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและทำการเลือกความยาวคลื่นมา 3 ความยาวคลื่น จาก 10 สเปกตรัม และหาค่าเฉลี่ย

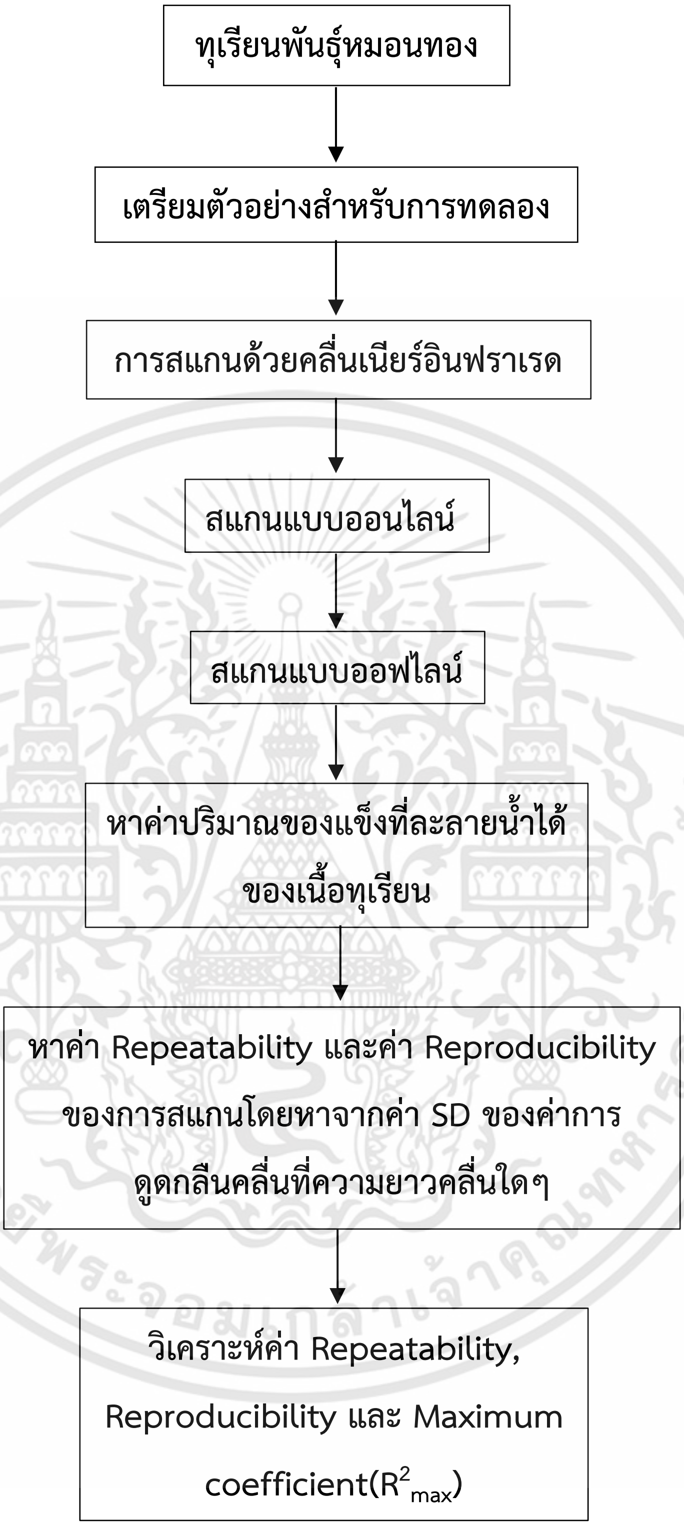
Repeatability of reference method (Rep) เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการทำซ้ำจากการวัดด้วยวิธีการอ้างอิง ค่านี้ถูกกำหนดโดยการคำนวณค่า SD ของความแตกต่างสูงสุดในการทำซ้ำของตัวอย่างเดียวกันของตัวอย่างทั้งหมด

ค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณาสูงสุด (R^2_{max}) เป็น R^2 สูงสุดที่เป็นไปได้สำหรับการทดสอบเมื่อไม่มีความคลาดเคลื่อนจากเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ และมีคลาดเคลื่อนเพียงอย่างเดียวที่เกิดขึ้นจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ สำหรับความถูกต้องของการทดลองในห้องปฏิบัติการ R^2_{max} สามารถคำนวณได้จากสูตรต่อไปนี้

$$R^2_{max} = \frac{SD_y^2 - Rep^2}{SD_y^2} \quad (1)$$

เมื่อ SD^2_y คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลชุด calibration set

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดลองเพื่อสร้างแบบจำลอง

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างของการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลอง

3.2.1.1 ตัวอย่างคือ ทุเรียนพันธุ์หมอนทองจากภาคใต้ในเขตจังหวัดชุมพรและนครศรีธรรมราชของประเทศไทยโดยการสแกนแบบออนไลน์ใช้ตัวอย่างจำนวน 152 ตัวอย่าง (ทดลองวันที่ 18, 21, 25, 27, 28 กันยายน 2560 และ 6, 7 กุมภาพันธ์ 2561) และการสแกนแบบออฟไลน์ใช้ตัวอย่างจำนวน 269 ตัวอย่าง(ทดลองวันที่ 30 มิถุนายน 2560, 5, 26 กรกฎาคม 2560, 7, 21 สิงหาคม 2560, 18, 21, 25, 27, 28 กันยายน 2560 และ 6, 7 กุมภาพันธ์ 2561)

3.2.1.1 นำตัวอย่างที่ได้มาปอกเปลือกจนเหลือแค่เนื้อทุเรียน แล้วนำตัวอย่างมาเก็บในกล่องพลาสติกเป็นภาชนะปิด

3.2.2 การสแกนของการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลอง

3.2.2.1 การสแกนด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrometer (AvaSpec-ULS2048-USB2-VA-50, AVANTES, Netherlands)

อุปกรณ์

1. เครื่อง UV-VIS-NIR spectrometer (AvaSpec-ULS2048-USB2-VA-50, AVANTES, Netherlands)
2. สายพานลำเลียง

วิธีการทดลอง

นำเนื้อทุเรียนมาสแกนแบบออนไลน์บนสายพานลำเลียงเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrometer (AvaSpec-ULS2048-USB2-VA-50, AVANTES, Netherlands) ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 200 - 1100 นาโนเมตร ที่เวลาในการสแกนเท่ากับ 4.5 มิลลิวินาที และจำนวนซ้ำในการสแกนเท่ากับ 200 ครั้ง ระยะห่างจากหัววัดถึงเนื้อทุเรียนห่างประมาณ 1-3 เซนติเมตร โดยใช้การสแกนในโหมด interactance บันทึกค่าเป็นค่า absorbance และสแกน 1 ตัวอย่างจะได้สเปกตรัม 1 สเปกตรัม วัสดุอ้างอิง คือ เทฟลอน

3.2.2.2 การสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA FT-NIR, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany)

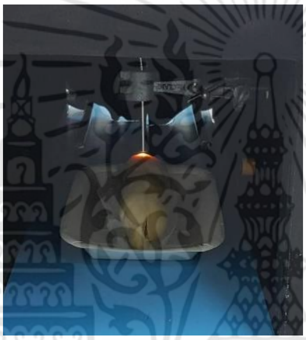
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์

1 เครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA FT-NIR, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany)

วิธีการทดลอง

นำตัวอย่างเนื้อทุเรียนที่สแกนแบบออนไลน์เสร็จแล้วมาสแกนแบบออฟไลน์ด้วยเครื่อง FT-NIR spectrometer (MPA FT-NIR, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany) โดยใช้การสแกนในโหมด diffuse reflectance ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 12500-4000 เซนติเมตร$^{-1}$ (800 - 2500 นาโนเมตร) ที่ความละเอียด 16 เซนติเมตร$^{-1}$ วัสดุที่ใช้อ้างอิง คือ แผ่นทอง และการสแกน 32 ครั้งเฉลี่ยได้ 1 สเปกตรัม


ก

ข

รูปที่ 3.6 การสแกนด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrometer (AvaSpec-ULS2048-USB2-VA-50, AVANTES, Netherlands) (ก) และการสแกนด้วยเครื่อง FT-NIR(MPA FT-NIR, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany) (ข)

3.2.3 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

3.1.3.1 การวัดด้วยเครื่อง pen refractometer (PEN-PRO, Measurement Range Brix 0.0 to 85.0%, ATAGO, Japan)

อุปกรณ์

1. เครื่อง pen refractometer (PEN-PRO, Measurement Range Brix 0.0 to 85.0%, ATAGO, Japan)
2. น้ำกลั่น
3. กระดาษทิชชู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทดลอง

ทำการ Calibrate เครื่อง pen refractometer (PEN-PRO, Measurement Range Brix 0.0 to 85.0%, ATAGO, Japan) โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัว Calibrate ก่อนการวัด วิธีการวัดคือ นำทุเรียนที่สแกนเสร็จแล้วมาวัดหาค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเครื่อง pen refractometer (PEN-PRO, Measurement Range Brix 0.0 to 85.0%, ATAGO, Japan) วัดตัวอย่างละ 3 จุด จุดละ 3 ซ้ำโดยวัด ส่วนหัว ส่วนกลาง และส่วนท้าย ของเนื้อทุเรียน และนำมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ของตัวอย่างนั้น

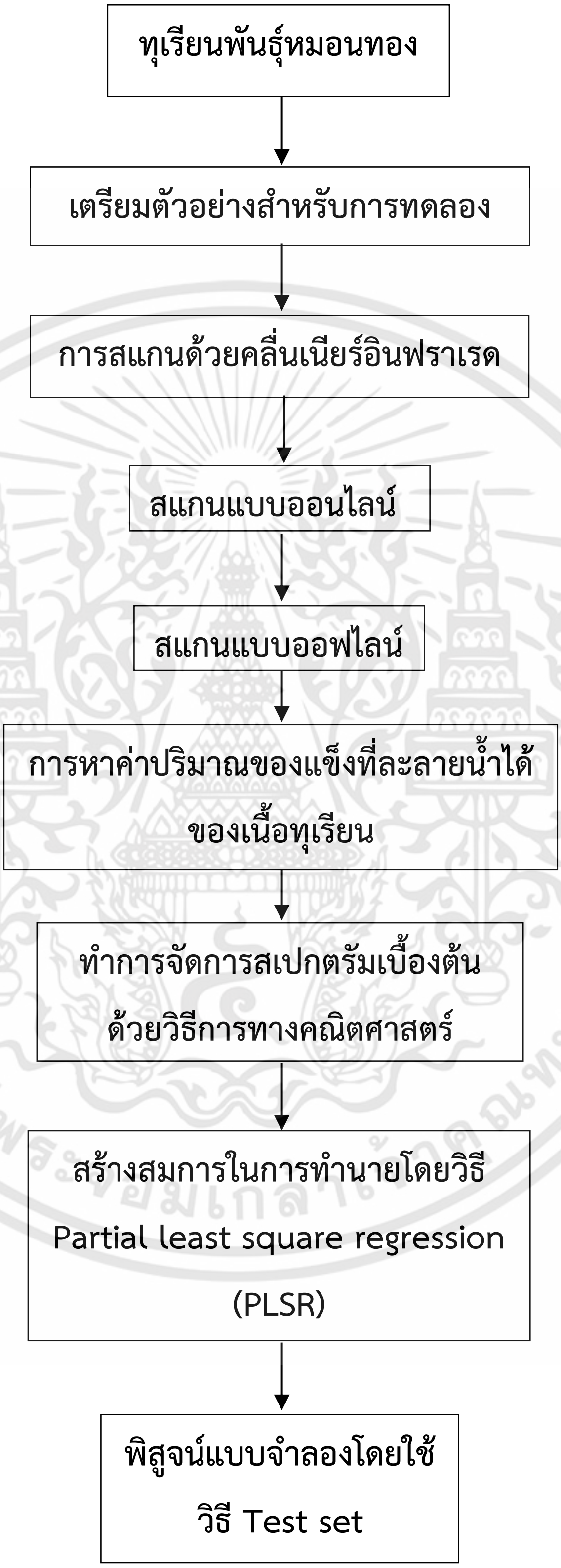
รูปที่ 3.7 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเครื่อง pen refractometer (PEN-PRO, Measurement Range Brix 0.0 to 85.0%, ATAGO, Japan)

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

แบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในเนื้อทุเรียนสร้างด้วยวิธี PLSR (Partial Least Squares Regression) โดยสเปกตรัมที่ใช้มีการจัดการกับสเปกตรัมเบื้องต้นด้วยวิธีการต่างๆ เช่น 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 + vector normalization (SNV) และ first derivative + MSC สมรรถนะการทำงานของแบบจำลองถูกพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณา (Coefficient of Determination; R^2) ,ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสองของการทำนาย (Root Mean Squared Error of Prediction; RMSEP) ,อัตราส่วนระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการทำนายและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Ratio of Standard Error of Validation to Standard Deviation; RPD) และ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (bias) โดยข้อมูลของการสแกนแบบออนไลน์วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม The Unscrambler X (CAMO Software, Norway) และการสแกนแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออฟไลน์วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม OPUS version 7.0 (Bruker, Germany)นำข้อมูลที่ได้มาทำการสร้างกราฟ Regression Coefficient และกราฟ X-loading



รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น (Repeatability, reproducibility และ maximum coefficient of determination)

จากตารางที่ 4.1 เป็นการทดลองเบื้องต้น แสดงค่า repeatability และ reproducibility ของการสแกนด้วยสเปกโตรมิเตอร์แบบออนไลน์เท่ากับ 0.0786 และ 0.0831 สำหรับสเปกโตรมิเตอร์การสแกนแบบออฟไลน์เท่ากับ 0.0044 และ 0.0110 ตามลำดับ ค่า repeatability และ reproducibility ของการสแกนแบบออฟไลน์มีค่าน้อยกว่าการสแกนแบบออนไลน์แสดงว่าการสแกนแบบออฟไลน์มีความแม่นยำมากกว่าการสแกนแบบออนไลน์ แต่ระบบออนไลน์สามารถนำไปใช้ในสายการผลิตของอุตสาหกรรมส่งออกทุเรียนแช่แข็งได้ และค่าrepeatability of reference method มีค่าเท่ากับ 0.2 คือความแม่นยำสูงสุดของวิธีอ้างอิง และค่าสัมประสิทธิ์การพิจารณาสูงสุด (R^2_{max}) เท่ากับ 0.997 แสดงให้เห็นว่าข้อผิดพลาดจากวิธีอ้างอิง มีค่าเพียง 0.3%

ตารางที่ 4.1 ค่า repeatability และ reproducibility ของการสแกนแบบออนไลน์ และออฟไลน์ และค่าการวัดการอ้างอิง และ R^2_{max}

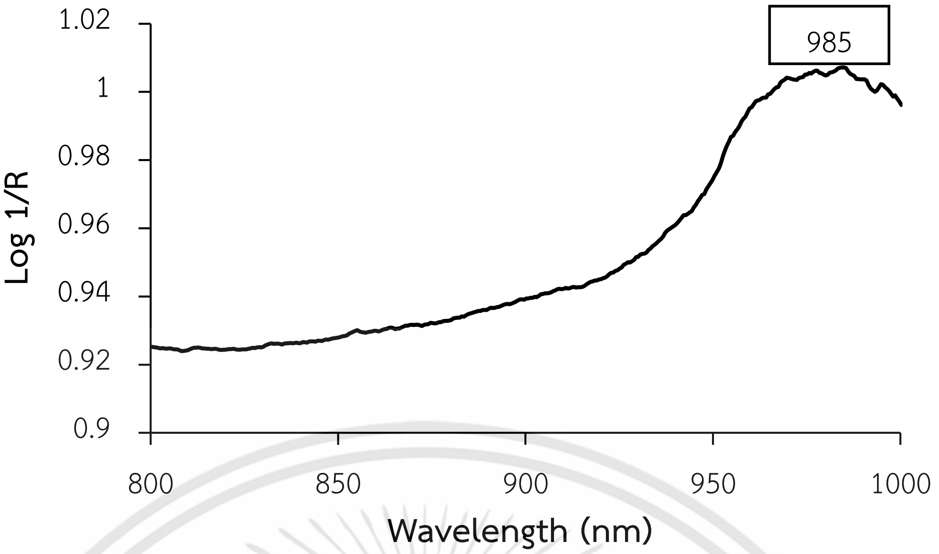
Category	Scanning method		Reference method	
	Repeatability	Reproducibility	Repeatability	R^2_{MAX}
On-line	0.0786	0.0831	0.2	0.997
Off-line	0.0044	0.0110		

4.2 ผลการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลอง

4.2.1 แบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบออนไลน์

จากการทดลองในการสร้างแบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้แบบออนไลน์ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 152 ตัวอย่าง มีสเปกตรัมเฉลี่ยแสดงในรูปที่ 4.1 โดยมีความยาวคลื่นที่สนใจ ได้แก่ความยาวคลื่นที่ 985 นาโนเมตร เป็นการสั่นสะเทือนของพันธะ O-H str. เป็นองค์ประกอบของ H_2O และ Starch ดังแสดงในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กราฟสเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างเนื้อทุเรียนสแกนแบบออนไลน์จำนวน 152 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.2 การสั่นสะเทือนของพันธะที่แสดงในสเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียน

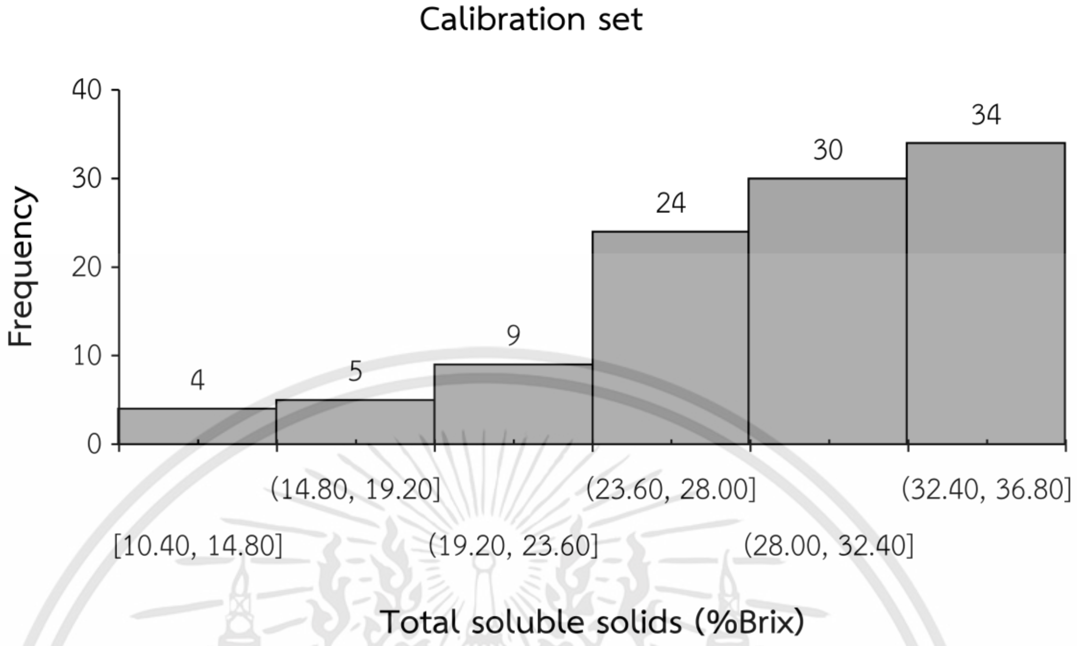
Wavelength (nm)	Wavelength (nm) referred from reference[27]	Bond vibration	Structure
985	970	O-H str. Second overtone	H_2O
985	990	O-H str. Second overtone	Starch

โดยข้อมูลที่นำมาสร้างแบบจำลองถูกแบ่งออกเป็นชุด calibration และชุด validation ในอัตราส่วน 70 : 30 โดยชุด calibration มีจำนวนตัวอย่าง 106 ตัวอย่าง และชุด validation มีจำนวนตัวอย่าง 46 ตัวอย่าง จากตารางที่ 4.3 ชุด calibration มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่ำสุดที่ 8.2%Brix ค่าสูงสุด 36.4%Brix ค่าเฉลี่ย 27.8%Brix และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) 6.48 %Brix และสำหรับข้อมูลชุด validation มีค่าต่ำสุดที่ 10.1%Brix ค่าสูงสุด 35.4% Brix ค่าเฉลี่ย 27.1%Brix และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) 7.49%Brix และช่วงความถี่ของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงสำหรับตัวอย่างชุด calibration และชุด validation แสดงในรูปที่ 4.2(ก) และ 4.2(ข)

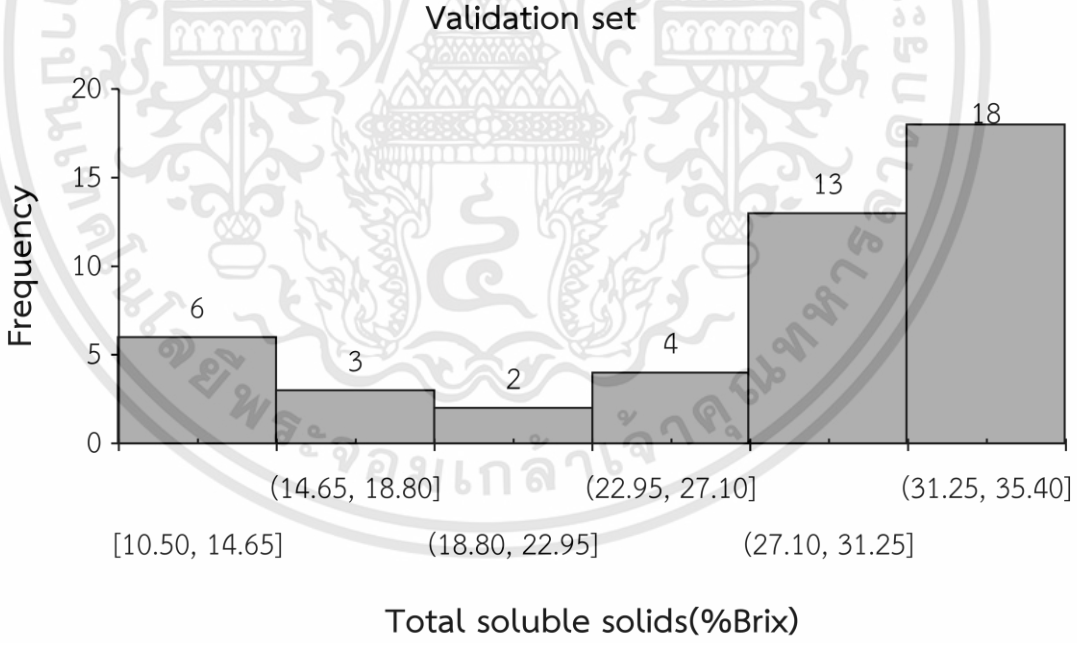
ตารางที่ 4.3 ค่าสถิติของข้อมูลชุด Calibration และ Validation ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

จำนวนตัวอย่าง	ชุดข้อมูล	Min (%Brix)	Max (%Brix)	Mean (%Brix)	SD
106	Calibration	8.2	36.4	27.8	6.48
46	Validation	10.1	35.4	27.1	7.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก

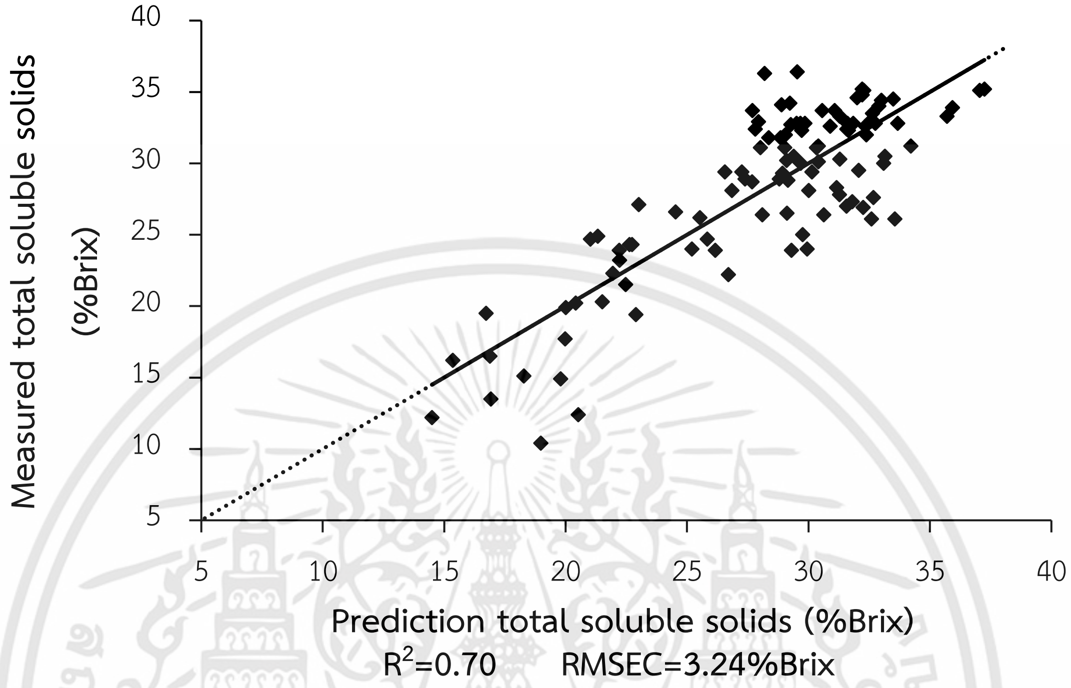


ข

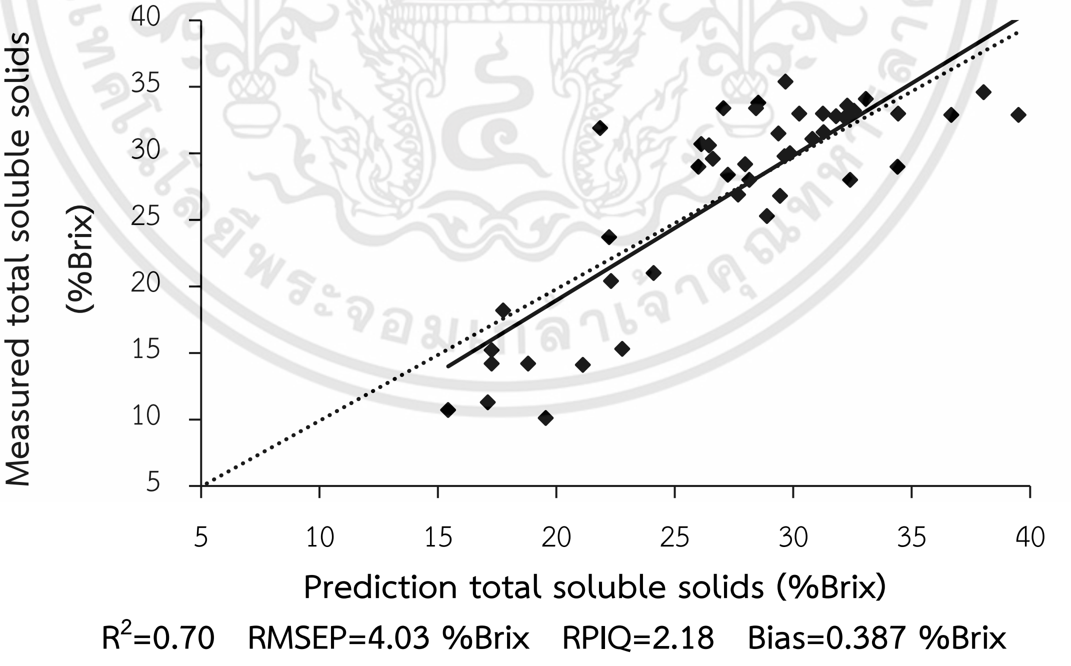
รูปที่ 4.2 ค่าสถิติความถี่ของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงสำหรับตัวอย่างชุด calibration และชุด validation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบค่าที่ทำนายโดยแบบจำลองของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี กับค่าที่วัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุด Calibration สามารถแสดงในรูปที่ 4.3 และของชุด Validation สามารถแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าที่ทำนายโดยแบบจำลองของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบออนไลน์กับค่าที่วัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุด Calibration



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าที่ทำนายโดยแบบจำลองของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบออนไลน์กับค่าที่วัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุด Validation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

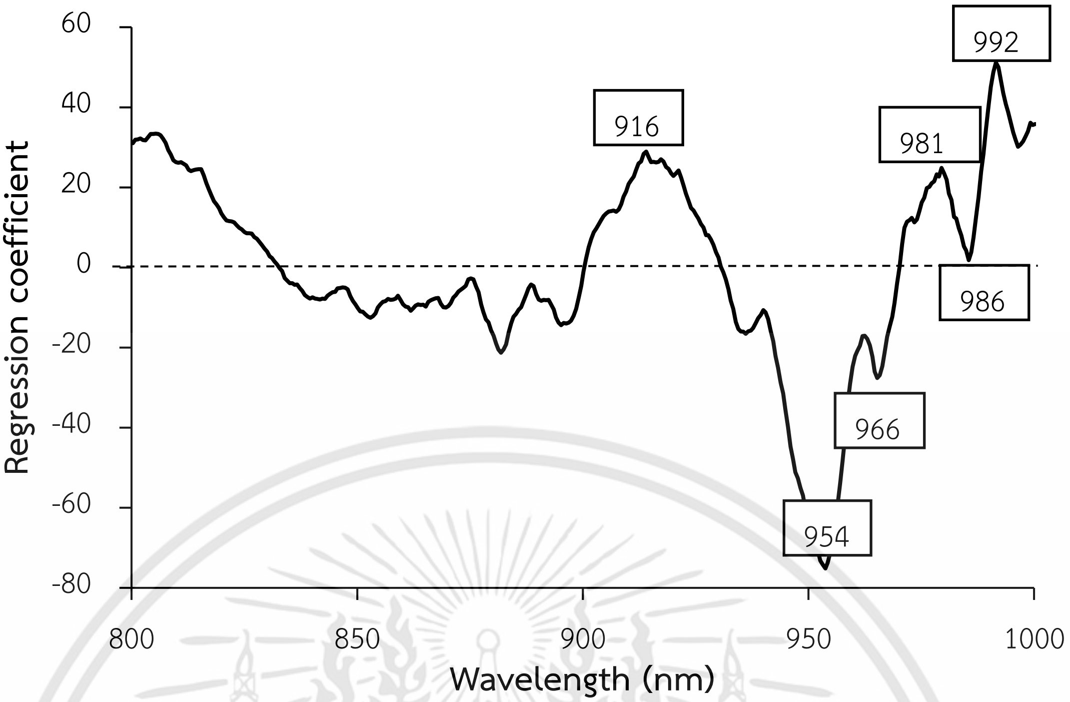
จากตารางที่ 4.4 แสดงผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS ของแบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้(TSS) จะเลือกใช้ช่วงคลื่นที่ 800-1000 นาโนเมตร ใช้ แฟคเตอร์ จำนวน 2 แฟคเตอร์ โดยข้อมูลชุด Calibration มีค่า R^2 เท่ากับ 0.70 ค่า และค่า RMSEC เท่ากับ 3.2% Brix และข้อมูลชุด Validation ค่า R^2 เท่ากับ 0.70 ค่า RMSEP เท่ากับ 4.0% Brix Bias เท่ากับ 0.4% Brix RPD เท่ากับ 1.85 และ RPIQ เท่ากับ 2.18 นำค่า R^2 ของชุด Validation มาแปลความหมายอยู่ในช่วง 0.66-0.81 ได้ความหมายว่ายอมรับได้สำหรับการคัดเลือกและการประเมินค่าอย่างหยาบๆ[18] และนำค่า RPIQ ที่ได้มาเทียบกับ RPD อยู่ในช่วง 2.0-2.4 ได้ความหมายว่าไม่ดี แต่สามารถแบ่งกลุ่มได้แบบหยาบๆ[18]

ตารางที่ 4.4 ผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS ของแบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบออนไลน์สำหรับการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (TSS)

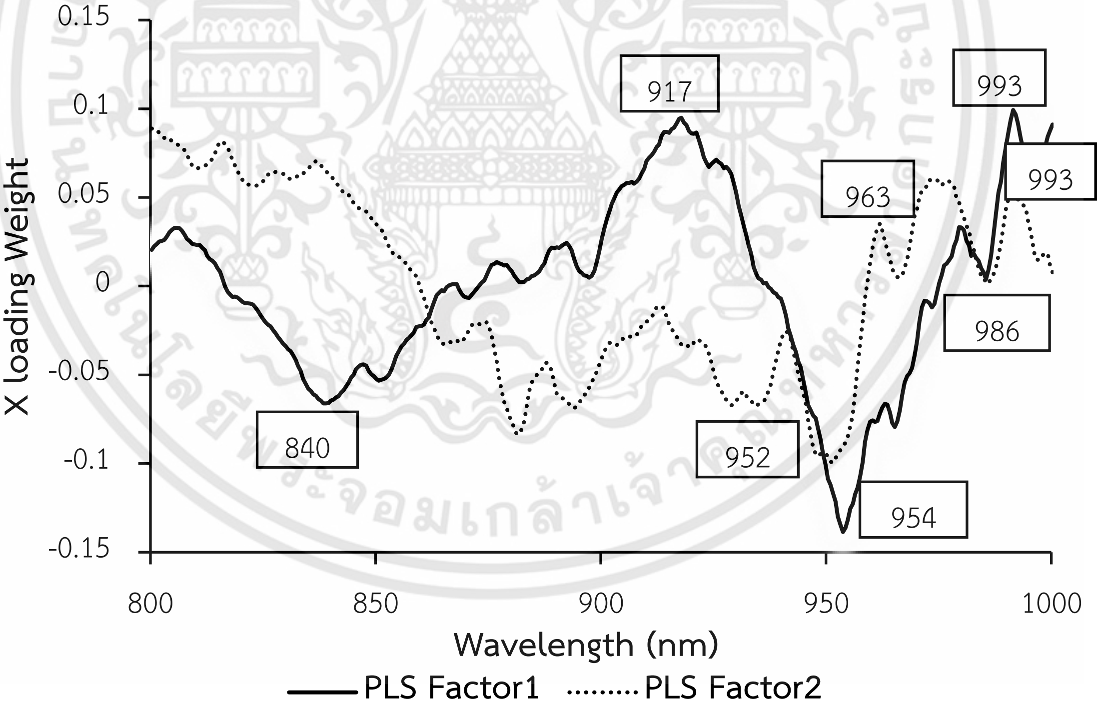
ชุดข้อมูล	Pretreatment	Regions (nm)	PLS Factor	R^2	RMSEC (%Brix)	RPIQ	RMSEP (%Brix)	Bias (%Brix)
Calibration	Smoothing + msc	800-1000	2	0.70	3.2	-	-	-
Validation				0.70	-	2.18	4.0	0.4

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงค่า Regression coefficient และค่า X-loading weight ของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และตารางที่ 4.5 แสดงความยาวคลื่นที่มีค่า Regression coefficient และ X-loading weight สูงโดยค่า Regression coefficient ที่สูงที่สุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 954 นาโนเมตร เป็นการสั่นสะเทือนพันธะทางเคมีของพันธะ O-H str. Second overtone และค่า X-loading weight ที่สูงที่สุดของ PLS แฟคเตอร์ 1 มีการสั่นสะเทือนมากที่สุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 954 นาโนเมตร เป็นการสั่นสะเทือนพันธะทางเคมีของพันธะ O-H str. Second overtone. และค่า X-loading weight ที่สูงที่สุดของ PLS แฟคเตอร์ 2 มีการสั่นสะเทือนมากที่สุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 952 นาโนเมตร เป็นการสั่นสะเทือนพันธะทางเคมีของพันธะ O-H str. Second overtone. ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการสั่นสะเทือนของ O-H มีผลต่อการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟ Regression coefficient plot ของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้แบบออนไลน์



รูปที่ 4.6 กราฟ X-loading weight plot ของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้แบบออนไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ช่วงคลื่นที่มีความสำคัญจากกราฟ Regression coefficient plot และ X-loading weight plotของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าประมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

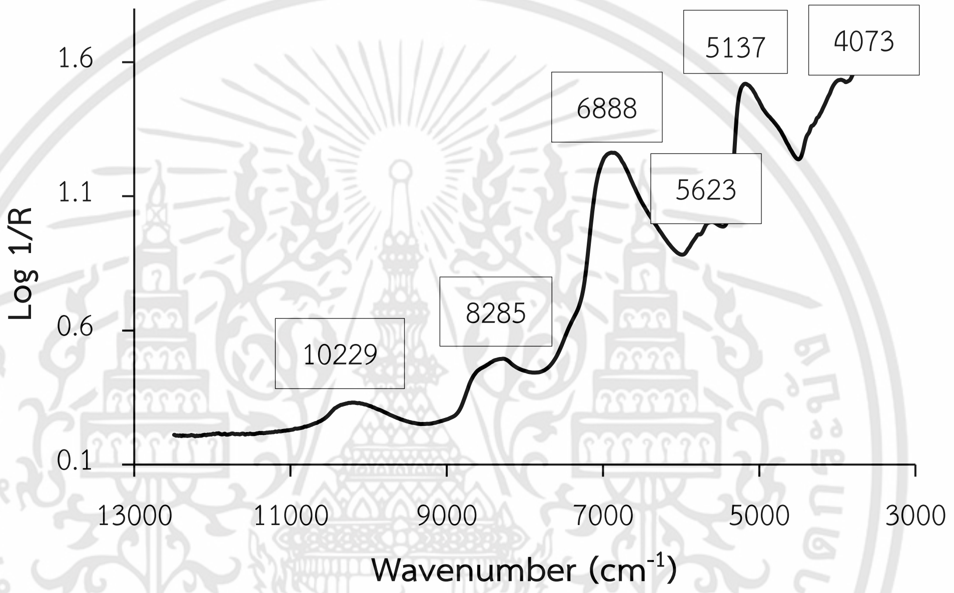
Regression coefficient			
Wavelength (nm)	Wavelength (nm) referred from reference[27]	Bond vibration	Structure
916	913	C-H str. Third overtone	CH_2
954	970	O-H str. Second overtone	ROH, H_2O
966	970	O-H str. Second overtone	ROH, H_2O
981	990	O-H str. Second overtone	Starch
986	990	O-H str. Second overtone	Starch
992	990	O-H str. Second overtone	Starch

X-loading weight				
Wavelength (nm)	Wavelength (nm) referred from reference[27]	PLS latent variable	Bond vibration	Structure
840	840	1	3 x C-H str. 2 x C-C str.	Benzene
917	913	1	C-H str. Third overtone	CH_2
954	970	1	O-H str. Second overtone	ROH, H_2O
986	990	1	O-H str. Second overtone	Starch
993	990	1	O-H str. Second overtone	Starch
952	970	2	O-H str. Second overtone	ROH, H_2O
963	970	2	O-H str. Second overtone	ROH, H_2O
986	990	2	O-H str. Second overtone	Starch
993	990	2	O-H str. Second overtone	Starch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 แบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบออฟไลน์

จากการทดลองในการสร้างแบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเพื่อการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ใช้ตัวอย่างทั้งหมด 269 ตัวอย่าง มีสเปกตรัมเฉลี่ยแสดงในรูปที่ 4.7 โดยมีช่วงคลื่นที่สนใจ ได้แก่ช่วงคลื่นที่ 10229 เซนติเมตร$^{-1}$, 6888 เซนติเมตร$^{-1}$ และ 5230 เซนติเมตร$^{-1}$ โดยช่วงคลื่นที่ 10229 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการสั่นสะเทือนของพันธะ O-H str.ช่วงคลื่นที่ 8285 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการสั่นสะเทือนของพันธะ C-H str. ,ช่วงคลื่นที่ 6888 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการสั่นสะเทือนของพันธะ O-H str. และ ช่วงคลื่นที่ 5230 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการสั่นสะเทือนของพันธะ O-H str. ดังแสดงในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.7 กราฟสเปกตรัมเฉลี่ยของตัวอย่างเนื้อทุเรียนสแกนแบบออฟไลน์จำนวน 269 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4.6 การสั่นสะเทือนของพันธะของพีคในสเปกตรัมเฉลี่ยของเนื้อทุเรียน

Wavenumber (cm^{-1})	Wavelength (nm)	Wavelength (nm) referred from reference[27]	Bond vibration	Structure
10229	977	970	O-H str. Second overtone	ROH, H_2O
8285	1207	1215	C-H str. Second overtone	CH_2
6888	1451	1450	O-H str. First overtone	Starch, H_2O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

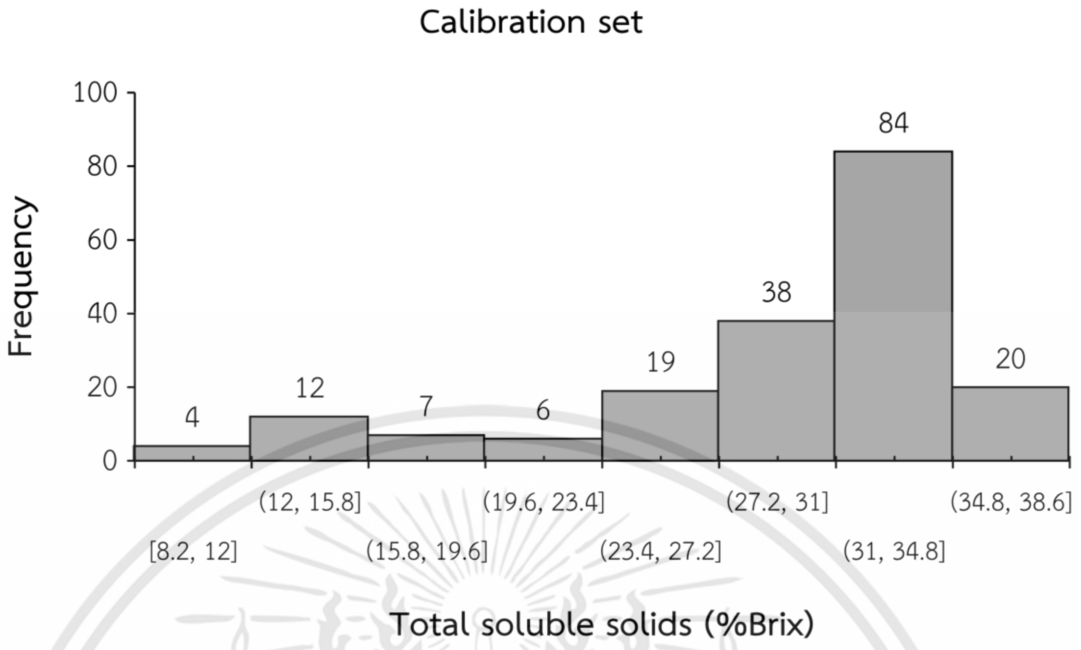
Wavenumber (cm^{-1})	Wavelength (nm)	Wavelength (nm) referred form reference[27]	Bond vibration	Structure
5623	1778	1780	C-H str. First overtone	Cellulose
5137	1947	1940	O-H str. O-H def.	H_2O
4073	2455	2461	C-H str. + C-C str.	Starch

ข้อมูลที่นำมาสร้างแบบจำลองถูกแบ่งออกเป็นชุด calibration และชุด validation ในอัตราส่วน 70 : 30 โดยชุด calibration มีจำนวนตัวอย่าง 181 ตัวอย่าง และชุด validation มีจำนวนตัวอย่าง 78 ตัวอย่าง จากตารางที่ 4.7 ชุด calibration มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ต่ำสุดที่ 8.2%Brix ค่าสูงสุด 38.6%Brix ค่าเฉลี่ย 29.9%Brix และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) 5.85%Brix และสำหรับข้อมูลชุด validation มีค่าต่ำสุดที่ 8.5%Brix ค่าสูงสุด 37.3%Brix ค่าเฉลี่ย 26.4%Brix และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) 7.52%Brix และช่วงความถี่ของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จากการวัดด้วยวิธีมาตรฐานสำหรับตัวอย่างชุด calibration และชุด validation แสดงในรูปที่ 4.8(ก) และ 4.8(ข)

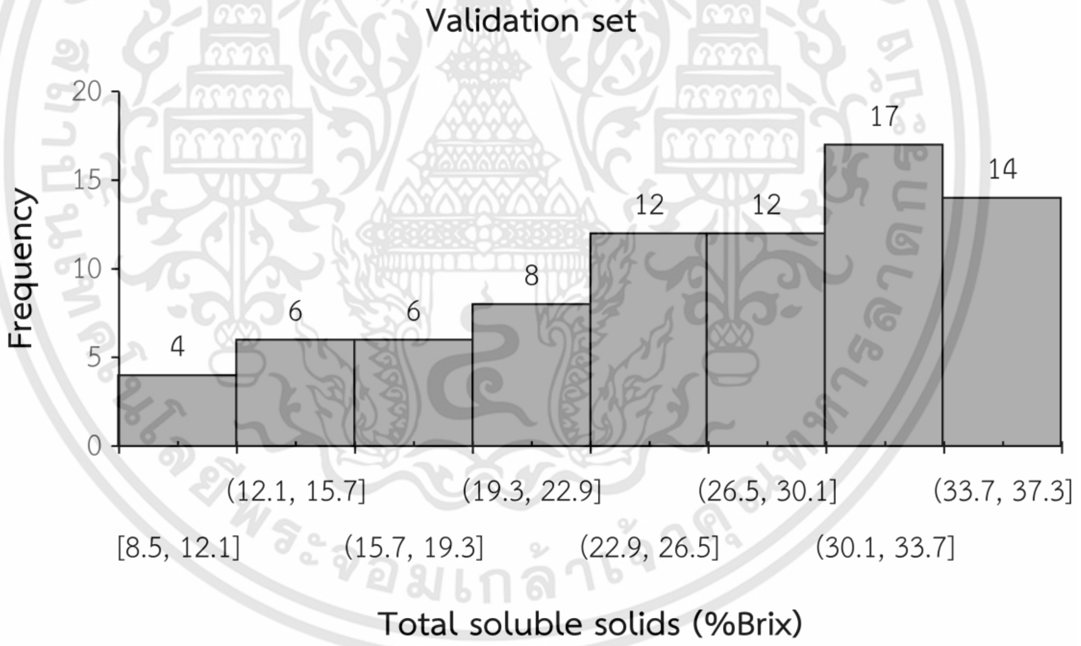
ตารางที่ 4.7 ค่าสถิติของข้อมูลชุด Calibration และ Validation ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

จำนวนตัวอย่าง	ชุดข้อมูล	Min (%Brix)	Max (%Brix)	Mean (%Brix)	SD
190	Calibration	8.2	38.6	29.9	5.85
79	Validation	8.5	37.3	26.4	7.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก

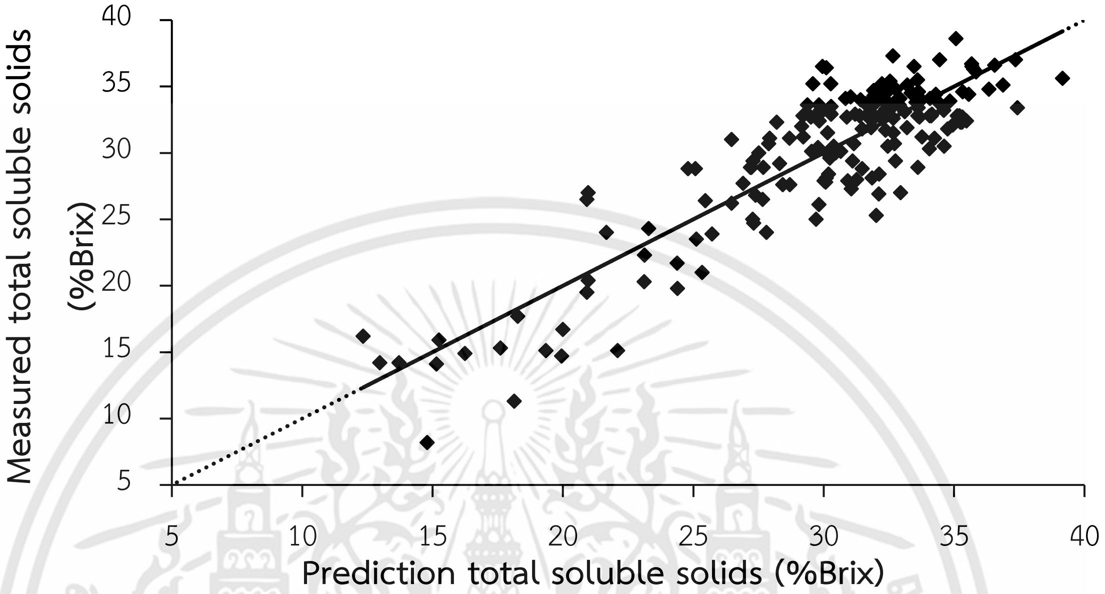


ข

รูปที่ 4.8 ค่าสถิติความถี่ของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้จากการวัดด้วยวิธีอ้างอิงสำหรับตัวอย่างชุด calibration และชุด validation

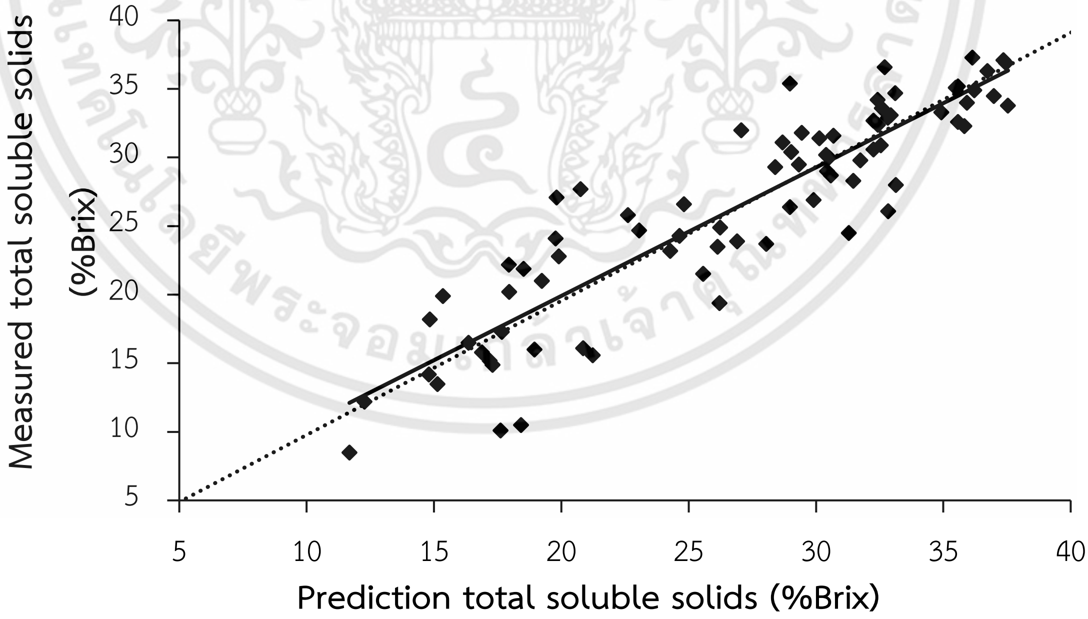
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบค่าที่ทำนายโดยแบบจำลองของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี กับค่าที่วัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุด Calibration สามารถแสดงในรูปที่ 4.9 และของชุด Validation สามารถแสดงในรูปที่ 4.10



R^2=0.77 RMSEC=2.8 %Brix

รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าที่ทำนายโดยแบบจำลองของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบออฟไลน์กับค่าที่วัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุด Calibration



R^2=0.80 RMSEP=3.27 %Brix RPIQ=3.90 Bias=-0.529 %Brix

รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าที่ทำนายโดยแบบจำลองของเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบออฟไลน์กับค่าที่วัดด้วยวิธีอ้างอิงของชุด Validation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

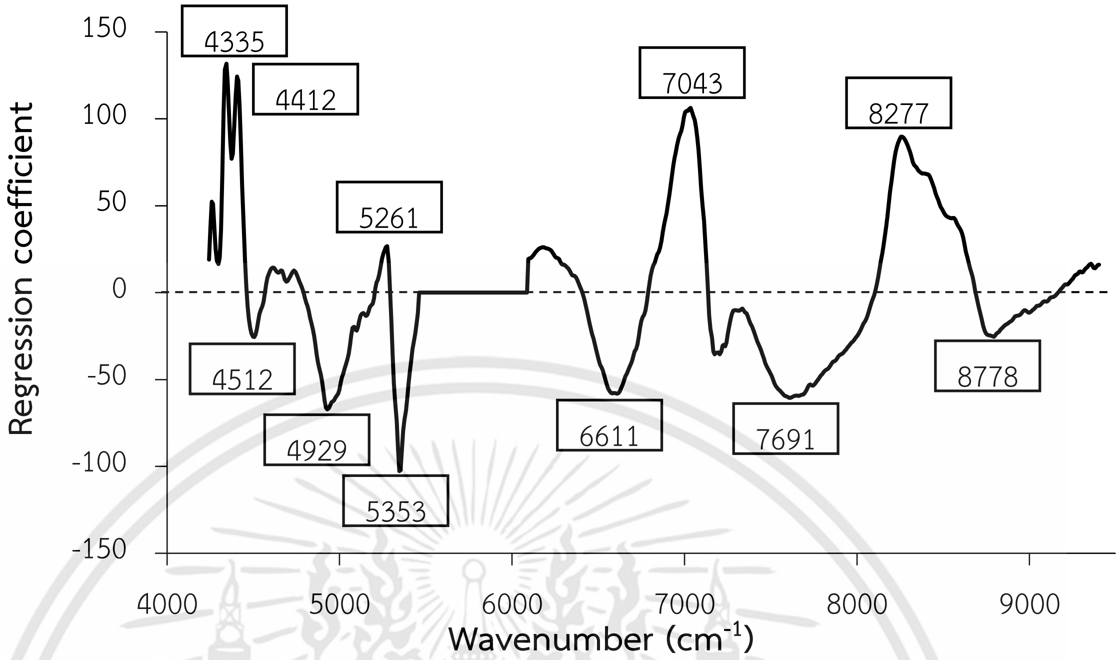
จากตารางที่ 4.8 แสดงผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS ของแบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้(TSS) จะเลือกใช้ช่วงคลื่นที่ 9404-6095 เซนติเมตร$^{-1}$ และ 5454-4243 เซนติเมตร$^{-1}$ใช้ แฟคเตอร์ จำนวน 4 แฟคเตอร์ โดยข้อมูลชุด Calibration มีค่า R^2 เท่ากับ 0.78 ค่า RMSEC เท่ากับ 2.8% Brix และค่า RPD เท่ากับ 2.11 และข้อมูลชุด Validation ค่า R^2 เท่ากับ 0.81 ค่า RMSEP เท่ากับ 3.3% Brix Bias เท่ากับ -0.5% Brix RPD เท่ากับ 2.31 และ RPIQ เท่ากับ 3.90 นำค่า R^2 ของชุด Validation มาแปลความหมายอยู่ในช่วง 0.66-0.81 ได้ความหมายว่ายอมรับได้สำหรับการคัดเลือกและการประเมินค่าอย่างหยาบๆ [18] และนำค่า RPIQ ที่ได้มาเทียบกับตารางการอธิบายความหมายของ RPD อยู่ในช่วง 3.5-4.0 ได้ความหมายว่าดีมาก ใช้ควบคุมกระบวนการได้[18]

ตารางที่ 4.8 ผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธี PLS ของแบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบออฟไลน์สำหรับการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้(TSS)

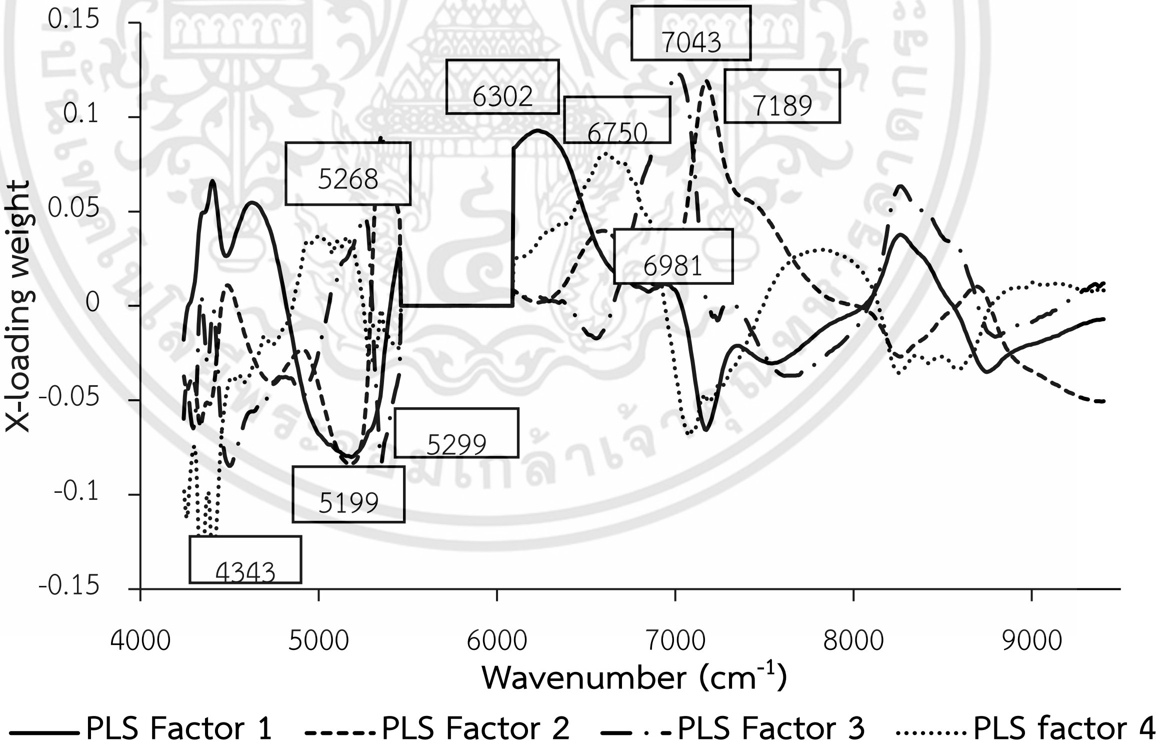
ชุดข้อมูล	Pretreatment	Regions (cm^{-1})	PLS Factor	R^2	RMSEC (%Brix)	RPIQ	RMSEP (%Brix)	Bias (%Brix)
Calibration	SNV	9404-8448 cm^{-1} และ 6102-4243 cm^{-1}	4	0.77	2.8	-	-	-
Validation				0.80	-	3.90	3.3	-0.5

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงค่า Regression coefficient และค่า X-loading weight ของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และตารางที่ 4.9 แสดงจำนวนคลื่นที่มีค่า Regression coefficient และ X-loading weight สูงโดยค่า Regression coefficient ที่สูงที่สุดอยู่ที่จำนวนคลื่น 4335 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการสั่นสะเทือนพันธะทางเคมีของพันธะ C-H str. + C-H def. และค่า X-loading weight ที่สูงที่สุดของ PLS แฟคเตอร์ 1 อยู่ที่ช่วงคลื่น 5199 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการสั่นสะเทือนพันธะทางเคมีของพันธะ C=O str. Second overtone. ค่า X-loading weight ที่สูงที่สุดของ PLS แฟคเตอร์ 2 อยู่ที่จำนวนคลื่น 7189 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการสั่นสะเทือนพันธะทางเคมีของพันธะ 2 x C-H str. + C-H def. ค่า X-loading weight ที่สูงที่สุดของ PLS แฟคเตอร์ 3 อยู่ที่จำนวนคลื่น 7043 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการสั่นสะเทือนพันธะทางเคมีของพันธะ O-H str. First overtone. และค่า X-loading weight ที่สูงที่สุดของ PLS แฟคเตอร์ 4 อยู่ที่จำนวนคลื่น 4343 เซนติเมตร$^{-1}$ เป็นการสั่นสะเทือนพันธะทางเคมีของพันธะ C-H str. + C-H def. ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการสั่นสะเทือนของ O-H, C-H และ C=O มีผลต่อการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟ Regression coefficient plot ของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้แบบออฟไลน์



รูปที่ 4.12 กราฟ X-loading weight plot ของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้แบบออฟไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ช่วงคลื่นที่มีความสำคัญจากกราฟ Regression coefficient plot และ X-loading weight plot ของแบบจำลองสำหรับการประเมินค่าประมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

<table>
<tr><td colspan="6">Regression Coefficient</td></tr>
<tr><td>Wavenumber (cm^{-1})</td><td>Wavelength (nm)</td><td>Wavelength (nm) referred from reference[27]</td><td colspan="2">Bond vibration</td><td>Structure</td></tr>
<tr><td>4335</td><td>2306</td><td>2310</td><td colspan="2">C-H str. + C-H def.</td><td>CH_2</td></tr>
<tr><td>4412</td><td>2266</td><td>2276</td><td colspan="2">O-H str. + C-C str.</td><td>Starch</td></tr>
<tr><td>4512</td><td>2216</td><td>2200</td><td colspan="2">C-H str. + C=O str.</td><td>-CHO</td></tr>
<tr><td>4929</td><td>2028</td><td>2030</td><td colspan="2">C=O str. Second overtone</td><td>$CONH_2$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">5261</td><td rowspan="2">1900</td><td>1900</td><td colspan="2">O-H str. +2 x C-O str.</td><td>Starch</td></tr>
<tr><td>1900</td><td colspan="2">C=O str. Second overtone</td><td>$-CO_2H$</td></tr>
<tr><td>5353</td><td>1686</td><td>1685</td><td colspan="2">C-H str. First overtone</td><td>Aromatic</td></tr>
<tr><td>6611</td><td>1512</td><td>1510</td><td colspan="2">N-H str. First overtone</td><td>Protein</td></tr>
<tr><td>7043</td><td>1419</td><td>1420</td><td colspan="2">O-H str. First overtone</td><td>AroH</td></tr>
<tr><td>7691</td><td>1300</td><td>1360</td><td colspan="2">2 x C-H str. + C-H def.</td><td>CH_3</td></tr>
<tr><td>8277</td><td>1208</td><td>1215</td><td colspan="2">C-H str. Second overtone</td><td>CH_2</td></tr>
<tr><td>8778</td><td>1139</td><td>1143</td><td colspan="2">C-H str. Second overtone</td><td>Aromatic</td></tr>
<tr><td colspan="6">X-loading Weight</td></tr>
<tr><td>Wavenumber (cm^{-1})</td><td>Wavelength (nm)</td><td>Wavelength (nm) referred from reference[27]</td><td>PLS latent variable</td><td>Bond vibration</td><td>Structure</td></tr>
<tr><td>5199</td><td>1923</td><td>1940</td><td>1</td><td>O-H str. + O-H str.</td><td>H_2O</td></tr>
<tr><td>7189</td><td>1391</td><td>1395</td><td>2</td><td>2 x C-H str. + C-H def.</td><td>CH_2</td></tr>
<tr><td>7043</td><td>1419</td><td>1420</td><td>3</td><td>O- H str. First overtone</td><td>ArOH</td></tr>
</table>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X-loading Weight					
Wavenumber (cm^{-1})	Wavelength (nm)	Wavelength (nm) referred from reference[27]	PLS latent variable	Bond vibration	Structure
4343	2302	2310	4	C-H str. + C-H def.	CH_2
6302	1586	1580	1	O-H str. First overtone	Starch, Glucose
6750	1481	1480	4	O-H str. First overtone	Glucose
6981	1432	1440	1	O-H str. First overtone	Sucrose, Starch
5268	1898	1900	3	C=O str. Second overtone.	$-CO_2H$
				O-H str. + 2 x C-O str.	Starch
5299	1887	1900	4	C=O str. Second overtone	$-CO_2H$
				O-H str. + 2 x C-O str.	Starch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 การทดลองเบื้องต้น

5.1.1 Repeatability, Reproducibility และ maximum coefficient of determination (R^2_{max})

จากการทดลองเบื้องต้นโดยการหาค่า repeatability, reproducibility ของการสแกนเนื้อทุเรียนเพื่อวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ของเนื้อทุเรียน การสแกนแบบออฟไลน์จะมีค่าน้อยกว่าการสแกนแบบออนไลน์ แสดงว่าการสแกนแบบออฟไลน์มีค่าความแม่นยำสูงกว่าการสแกนแบบออนไลน์ และค่า maximum coefficient of determination(R^2_{max}) ของเครื่องมือวัดอยู่ที่ 0.997 มีค่าความแม่นยำสูงดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการสร้างแบบจำลองด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์และเครื่องมือวัดของวิธีอ้างอิงสามารถนำไปสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

5.2 การทดลองเพื่อสร้างแบบจำลอง

จากการทดลองพบว่าแบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียน โดยแบบออนไลน์มีลักษณะองค์ประกอบดังนี้ เลือกใช้ช่วงคลื่นที่ 800-1000 นาโนเมตร ใช้ แฟคเตอร์ จำนวน 2 แฟคเตอร์ โดยข้อมูลชุด Calibration มีค่า R^2 เท่ากับ 0.70 ค่า และค่า RMSEC เท่ากับ 3.2% Brix และข้อมูลชุด Validation ค่า R^2 เท่ากับ 0.70 ค่า RMSEP เท่ากับ 4.0% Brix Bias เท่ากับ 0.4% Brix และ RPIQ เท่ากับ 2.18 และแบบออฟไลน์มีองค์ประกอบดังนี้ เลือกใช้ช่วงคลื่นที่ 9404-6095 เซนติเมตร$^{-1}$ และ 5454-4243 เซนติเมตร$^{-1}$ ใช้ แฟคเตอร์ จำนวน 4 แฟคเตอร์ โดยข้อมูลชุด Calibration มีค่า R^2 เท่ากับ 0.78 ค่า RMSEC เท่ากับ 2.8% Brix และค่า RPD เท่ากับ 2.11 และข้อมูลชุด Validation ค่า R^2 เท่ากับ 0.81 ค่า RMSEP เท่ากับ 3.3% Brix Bias เท่ากับ -0.5% Brix และ RPIQ เท่ากับ 3.90 ทั้งแบบออนไลน์ และออฟไลน์ ยอมรับได้สำหรับการคัดเลือกและการประเมินค่าอย่างหยาบๆ เนื่องจากค่า R^2 ของชุด Validation อยู่ในช่วง 0.66-0.81 และค่า RPIQ ของแบบออนไลน์อยู่ในช่วง 2.0-2.4 ได้ความหมายว่าไม่ดีแต่สามารถประเมินค่าได้แบบหยาบๆ และค่า RPIQ ของแบบออฟไลน์อยู่ในช่วง 3.5-4.0 ได้ความหมายว่าดีมากสามารถใช้ควบคุมกระบวนการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

แบบจำลองเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีที่ได้จากการทดลองสำหรับการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้สามารถนำมาคัดเลือกหรือประเมินค่าอย่างหยาบๆได้ หากต้องการให้แบบจำลองนี้ใช้ได้ควรมีการปรับปรุงเพิ่มเติมด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การหาตัวอย่างมาใส่เพิ่มเติม การจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น หรือการตัดตัวอย่างนอกกลุ่มออก เพื่อให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพในการทำนายที่สูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] กระทรวงพาณิชย์ **“ตลาดส่งออกของไทย.”** [ออนไลน์] เข้าได้จาก: http://www.ops3.moc.go.th/infor/menucomth/stru1_export/export_topn_re/report.asp. 2560.

[2] Garrido, A.. “La spectroscopie proche infrarouge: une technologie d´ appui pour un service intégral en alimentation animale. In: Bertrand, D., Dufour, E. (Eds.), La Spectroscopie Infrarouge et ses Applications Analytiques,” **2nd ed. TEC & DOC, París, France,** 2006. p. 473.

[3] จารุวรรณ บางแวก, อรวรรณ จิตต์ธรรม, จารุวัฒน์ พุ่มประเสริฐ. **“การตรวจสอบความสุกแก่ทุเรียนโดยใช้เทคนิค NIR Spectrscopy”.** [ออนไลน์] เข้าได้จาก: https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=www.doa.go.th/pprdo/images/doc/0032.pdf. 2560.

[4] Onsawai, S., Sirisomboon, P., “Determination of dry matter and soluble solids of durian pulp using diffuse reflectance near infrared spectroscopy”. **JOURNAL OF NEAR INFRARED SPECTROSCOPY 23**. 2015., 167-179.

[5] ดร. ชินวัฒน์ ยัพวัฒนพันธ์. **ทุเรียน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์ เอช เอ็ม กรุ๊ป จำกัด 496 2551 .

[6] บรรณ บูรณะชนบท. **สวนทุเรียน.** พิมพ์ครั้งที่ 6. นนทบุรี : ศูนย์ผลิตตำราเกษตรเพื่อชนบท 2542.

[7]Food Network Solution ศูนย์ข้อมูลเครือข่ายอาหารครบวงจร. **“Total Soluble Solids / ของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้”.** [ออนไลน์] เข้าได้จาก : http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0997/total-soluble-solids-%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%82%E0%B9%87%E0%B8%87%E0%B8%97%E0%B8%B1%E0%B9%89%E0%B8%87%E0%B8%AB%E0%B8%A1%E0%B8%94%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B9%84%E0%B8%94%E0%B9%89

[8] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. **“น้ำตาล”** [ออนไลน์] เข้าได้จาก: https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B8%95%E0%B8%B2%E0%B8%A5. 2561.

[9] นันทยา จงใจเทศ. **ปริมาณของน้ำตาลในผลไม้ไทย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี : สำนักงานกิจการโรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร **"Refractometer / มาตรดัชนีหักเห."** [ออนไลน์] เข้าได้จาก : http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0469/refractometer-%E0%B8%A1%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B8%94%E0%B8%B1%E0%B8%8A%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B8%AB%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B9%80%E0%B8%AB. 2561.

[11] วิชัย หฤทัยธนาสันติ์. **เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม.** กรุงเทพ. 2555.

[12] Kongkrich R. **"เครื่อง NIR คืออะไร"** [ออนไลน์] เข้าได้จาก : http://near-infrared.blogspot.com/2013/12/nir.html. 2013.

[13] พรรณทิพย์ ห่อศรีสัมพันธ์. **"NIR Spectrometer เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์สารอินทรีย์"** [ออนไลน์]. เข้าได้จาก : http://nirapplication.blogspot.com/2008/03/nir-spectrometer.html. 2009.

[14] รวิภัทร ลาภเจริญสุข, กรรณพต แก้วสอน, พลนนท์ อ่อนไสว, บัณฑิต ทองสร้อย, นัฐกรณ์ สอนสงวน, สมชาย กลัดสุข, ศิวดล รัตนโอภา, อภิชาติ สมผิว, กิ่งดาว ชนะโชติ และปานมนัส ศิริสมบูรณ์. **"การคาลิเบรชั่นแบบตัวแปรพหุ แนะแนวเชิงปฏิบัติสาหรับการพัฒนาแบบจำลองในเคมีวิเคราะห์."** [ออนไลน์]. เข้าได้จาก : http://www.nirsresearch.com. 2556.

[15] วิชัย ริ้วตระกูล และ และคณะ. **การประยุกต์ สเปกโตรสโคปในเคมีอินทรีย์.** 2527. หน้า 298.

[16] ธงชัย สุวรรณสิชณน์. **"การวิเคราะห์สเปคตรัม NIR ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ Data Analysis of NIR Spectra: Qualitative and Quantitative Analysis."** 2545. หน้า 116 –119.

[17] Nondestructive Quantitative Analysis of biomedical Samples by Near Infrared Spectroscopy with Chemometrics and Development of novel Chemometric Methods for quantitative Analysis. S. Kasemsamran. 2005, Ph. D. Thesis. Kwansei Gakuin University, Japan.

[18] ศูนย์วิจัยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี สำหรับผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร. **"เทคโนโลยีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับผลผลิตเกษตรและอาหาร (ตอนที่ 3)"**. [ออนไลน์]. เข้าได้จาก : http://www.nirsresearch.com. 2560.

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

[20] Pinheiro, E., Ceddia, M., Clingensmith, C., Grunwald, S. and Vasques, G.. 2017. "Prediction of soil physical and chemical properties by visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy in the central amazon." MDPI. 2017(9) : 292-314.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[21] วารุณี ธนะแพสย์. **“สถานการณ์และการใช้ประโยชน์ด้วยเทคนิค NIR ในประเทศไทย : แนวโน้มงานวิจัยในด้านเทคนิค NIR ในความต้องการของอุตสาหกรรมและมาตรฐานคุณภาพของสินค้า”** โครงการสัมนาวิชาการ การควบคุมมาตรฐานของสินค้าทางการเกษตรและอุตสาหกรรมโดยวิธีไม่ทำลาย เพื่อการแข่งขันบนเวทีการค้าโลก. 2550 .หน้า 21-31

[22] Chaparro, L., Baeten, V., Abbas, O., Peña-Rodríguez, F., “On-line analysis of intact olive fruits by vis–NIR spectroscopy: Optimisation of the acquisition parameters”. **Journal of Food Engineering 112(2012).** 2012. 152-157.

[23] อริยนันท์ ตลับนาค, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. “การประเมินความแก่ทุเรียนแบบทำลายน้อยที่สุดด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้”. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 (2560)**. 2560. 9-16.

[24] อาทิตย์ จันทร์หิรัญ, วารุณี ธนะแพสย์, ศุมาพร เกษมสำราญ, จิราพร อนุสรณ์วงศ์ชัย. “การตรวจสอบค่าความหวานผลลองกองด้วยเครื่องวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านใกล้อินฟราเรด”. **ว. วิทย์. กษ. 41(3/1)(พิเศษ) 2553**. 2553. 29-32

[25] พิมพ์ใจ สีหะนาม, พลกฤษณ์ มณีวระ, คาซูฮิโร นากาโน, ดนัย บุณยเกียรติ. “การประเมินปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ในผลเสาวรสด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี”. **วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์ ปีที่ 3 ฉบับพิเศษ 2559.** 2559. 94-101.

[26] รณฤทธิ์ ฤทธิรณ, ปนัดดา ไกรลาศโอฬาร, มัลฐิตา อึ้งพานิช. “การประเมินคุณภาพของผลฝรั่งแบบไม่ทำลายเพื่อการค้าในเชิงพาณิชย์”. **ว. วิทย. กษ. 39 : 3 (พิเศษ) 2551**. 2551. 70-73

[27] Osborne B.G. and Fearn T. **Near infrared spectroscopy in food analysis.** 1st Ed. Longman Science & Technical. UK, Inc. 1986.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

แผนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการทำงาน	**ระยะเวลาดำเนินการ (เดือน)**											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ทบทวนวรรณกรรณและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	*	*										
ทำการทดลองเบื้องต้น หาค่า Repeatability, Reproducibility และ Maximum coefficient (R^2_{max})		*										
เตรียมตัวอย่างและทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียน		*	*	*	*	*	*	*	*			
นำข้อมูลทั้งหมดมาสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียน กับ Optical data โดยวิธีทาง Chemometric แบบ Partial least square regression โดยใช้สเปกตรัมดั้งเดิม หรือสเปกตรัมที่ผ่านวิธีการทางคณิตศาสตร์เบื้องต้น									*	*	*	
สรุปผลและเขียนรายงาน											*	*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลจากการทดลอง และผลการวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลดิบการวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในเนื้อทุเรียน วัดโดย Pen refractometer ในการทดลองเบื้องต้น

Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
	1	2	3	
1	22.7	22.4	22.1	22.4
2	25.9	25.7	25.8	25.8
3	30.3	30.5	30.2	30.2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลดิบการวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในเนื้อทุเรียน วัดโดย Pen refractometer ในการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลองการสแกนแบบออนไลน์

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
18/9/60	1	32.1	26	26.9	28.4
		32	26.3	27	
		31.8	26.5	27	
	2	27.9	22.6	25.4	25.3
		28	22.7	25.4	
		28.1	22.5		
	3	27.7	27.3	29.2	28
		28	27.6	29.2	
		27.9	27.4		
	4	37.9	26.5	22.4	29
		38	26.6	22.6	
		37.9	26.7	22.5	
	5	24.4	26.7	28.9	26.8
		24.7	27.1	29.2	
		24.5	26.5	29.1	
	6	22.9	28.7	33	28.3
		23.9	29	32.9	
		23.3	29.2	32.7	
	7	32.9	32.2	27.9	30.7
		32.1	33.6	26.1	
		32.5	33.1	26.9	
	8	36.3	29.8	25.3	30.5
		36.2	30	25.4	
		36.4	29.7	25.3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	9	30	33	28.5	30.5
		30.2	32.9	28.8	
		29.7	33	28.3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
18/9/60	10	28.6	25.8	26.9	27
		28.4	25.9	27	
		28.3	25.7	26.8	
	11	24.3	33.4	37.9	33
		24.8	33.5	38.3	
		24.4	32.9	37.9	
	12	34.6	30.8	35.8	33.7
		34.4	30.7	36	
		34.1	30.9	36.3	
	13	34.3	29.2	26.2	30
		33.9	29.7	26.4	
		34	29.5	26.8	
	14	32.6	34.1	36.9	34.4
		32.7	33.3	37	
		32.3	33.9	36.7	
	15	35	33.4	31.7	33
		35	33	31.1	
			33.6	30.9	
	16	23.7	25.9	22.8	23.9
		23.6	24.9	23.1	
		23.7	25.5	23	
	17	34.7	31.8	27	31.1
		34.6	31.6	27.1	
		33.4	32.3	27	
	18	37.9	29.8	26.3	31.5
		38.1	30.2	26.2	
		38.4	29.6	26.7	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
18/9/60	19	26.6	32.3	28.6	29.5
		27.1	32.8	29.1	
		26.9	33.2	28.9	
	20	26	30.9	26.4	27.8
		26.1	31.4	26.2	
		26	31.2	26.2	
	21	24	28.1	26.3	26.1
		23.8	28.3	26.2	
		23.7	28.2	26.1	
	22	36.8	32.1	33.7	34.5
		36.5	32.7	34.9	
		36.7	32.7	34.3	
	23	33.3	33.4	33.8	33.4
		33	33.4	32.4	
		33.5		34	
	24	34.1	35.3	36.6	35.2
		33.8	34.6	36.4	
		34.3	35.5	36.5	
	25	35.3	33.9	33.7	34.6
		35.2	34.7	34.5	
		35.4	34.4	34	
	26	26.5	24.8	20.7	24
		26.6	24.6	21.2	
		26.6	24.4	21	
	27	24.3	23	26.8	25
		24	23	27	
		24.2		27.2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
18/9/60	28	29.8	24	27.3	26.9
		29.8	23.9	27.6	
			24.2	28.4	
	29	22.8	29.4	28.4	27.3
		23.2	29.9	29.2	
		23.4	29.8	29.4	
	30	22.5	27.3	23.6	24
		22.7	27.3	23.3	
		22.9		22.7	
	31	26.8	37.6	26.7	30.4
		27.3	37.7	26.6	
		26.4	37.4	26.7	
	32	30.1	29.3	21	27.6
		29.4	29.6	21	
		29.7	30.8		
	33	29.1	25.4	23.9	26.1
		29.4	25	24	
		29.7	24.8	23.8	
	34	26.9	24.6	24.4	25.2
		26.8	24.3	24.3	
		27.2	24.3	24	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
21/9/60	1	36.1	36.5	32.8	35.1
		35.9	36.4	32.1	
		26	36.5	32.5	
	2	34.5	34.9	34.2	34.6
		34.7	34.5	35	
		34.2	35	34.8	
	3	32.9	27.6	26.5	29.3
		33.2	27.3	26.5	
		33.2	27.4		
	4	31.6	35.3	29.9	32.3
		31.9	35.6	29.7	
		31.8	35.1	29.6	
	5	30.2	35.3	35.3	33.5
		29.9	35.1	35.5	
		29.6	35.3	35.1	
	6	28.2	34.2	35.7	32.7
		28.3	34.3	35.5	
		28.2	34.4	35.8	
	7	37.4	34.7	33	35.1
		38	34.6	32.8	
		38	34.7	32.6	
	8	31.3	34.9	27.5	31.2
		31.3	34.5	27.3	
			35	27.5	
	9	35.1	34.2	33.5	34.2
		34.9	34.5	33.3	
		35	34.2	33.3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
21/9/60	10	33.4	35	33.9	34
		33.5	35	34.2	
		33.6		33.6	
	11	33.3	34.9	34.2	34.1
		33.1	35.5	33.8	
		33.3	34.7	34.1	
	12	32.9	35.7	35.5	34.8
		33	36.3	35.6	
		33	35.6	35.4	
	13	33.7	34.3	29.9	32.8
		33.6	34.2	30.3	
		33.3	35	30.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
25/9/60	1	35.7	32.9	30.2	32.9
		35.9	33.2	29.8	
		36.2	32.7	29.8	
	2	25.1	29.8	25.2	26.9
		25.2	30.1	25.6	
		25.1	30.2	25.6	
	3	28.9	29.8	27.8	28.7
		28.9	29.8	27.7	
				28.3	
	4	27	33.5	25	28.4
		27.3	33.1	25.1	
		26.9	32.8	24.9	
	5	28	31.3	27.8	28.9
		28.1	31.3	28.3	
		28.1		28.4	
	6	26.9	28.3	29	28
		27.7	28.2	29	
		27.3	27.7		
	7	28.6	26.5	28.5	27.9
		28.9	26.3	28.7	
		28.6	26.1	28.5	
	8	28.5	32.1	29.6	30
		28.2	32	29.1	
		28.6	32.1	29.5	
	9	28.5	34	31.3	31.1
		28.3	33.2	31.4	
		28.4	33.6	30.8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
25/9/60	10	27.2	33.9	34.4	31.8
		26.9	34.1	34.5	
		26.8	34	34.8	
	11	30.1	33.7	33.5	32.4
		30.6	33.6	32.9	
		30.4	33.7	33.1	
	12	27.4	32.4	26.8	28.8
		27.3	32.5	27	
		26.9	31.8	27	
	13	33.1	32.3	34.7	33.3
		32.7	32.1	35.3	
		32.5	32.3	34.6	
	14	28.5	32.1	29.1	30.3
		29.3	32.7	29.1	
		29.1	32.2		
	15	33.6	31.5	29.8	31.6
		33.1	31.6	29.9	
		33	31.5	30.4	
	16	28.2	31.2	34.2	31.2
		27.9	31	34	
		28	31.8	34.1	
	17	33.5	35	30.4	32.8
		33.9	34.3	29.8	
		33.8	34.6	30	
	18	29	26.8	29	28.1
		27.8	26.8	28.5	
		28		29	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
25/9/60	19	31.7	34.3	36.8	33.6
		32.3	34.3	34.4	
		30.9		34.4	
	20	25.9	30.1	28.6	28.1
		25.7	30	28.2	
		26.1	30.1	27.8	
	21	29	29.6	32.3	30.1
		28.4	29.1	32.2	
		28.5	29.1	32.4	
	22	29.2	39.1	30.6	32.8
		29	39.4	29.3	
		29.3	39	30.2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
27/9/60	1	34.9	31.4	30.4	32
		35.3	31.2	29.4	
		35	31.4	29.4	
	2	33.9	34.7	30.6	33
		33.8	34.9	30.4	
		33.6	34.9	30.5	
	3	32.4	33.7	32.3	32.8
		32.3	33.8		
		31.9	33.8	32.3	
	4	33.5	35.2	32.6	33.7
		33.6	34.8	32.9	
		32.8	35.5	32.1	
	5	33.1	32.5	32.1	32.6
		33.1	32.6	31.8	
			32.8	32.7	
	6	32.9	33.8	33.1	33.3
		32.8	33.7	32.9	
		32.7	34.4	33.2	
	7	30.8	34	34	32.8
		30.9	33.6	33.5	
		30.4	34	34	
	8	28.1	28.5	32.3	30
		28.4	28.5	33	
		28.3		32.7	
	9	31.1	33.1	34.9	32.9
		31.2	32.5	34.6	
		30.9	32.7	34.8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
28/9/60	1	30.9	30.4	30.9	30.6
		29.3	30.5	31.2	
		31.1	30.2	31.2	
	2	32.3	27.4	28.6	29.4
		32	28	28.8	
		32.1	27.6	28.2	
	3	33.5	33.9	34.1	33.8
		33.4	34	34.1	
		33.7	33.8		
	4	32.7	30.4	34.1	32.3
		32.3	30.5	33.5	
		32.7	30.7	33.5	
	5	33.9	33.9	34	33.9
		33.7	34.1	33.8	
		33.8	33.7	33.8	
	6	38.9	38.3	38.1	32.4
		27.3	27	27.2	
		27.3	33.3	34.1	
	7	34.1	34.9	32.1	33.7
		33.9	34.7	32	
		33.7	35	32.8	
	8	34.1	33.1	30.9	33
		34	33.4	30.9	
		34.2	33.3		
	9	32.9	33.4	35.2	33.8
		33.2	33.4	34.5	
		33.2		34.6	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
28/9/60	10	30.9	31.8	32.7	31.9
		30.8	32.1	32.8	
		30.9	32	33.3	
	11	31.7	31	33.2	32
		31.6	31	32.9	
		31.4		32.8	
	12	35.1	33.8	29.7	32.7
		34.2	33.7	29.6	
		34.3	33.7	30	
	13	32.7	35.2	34.3	34.1
		32.4	34.6	34.7	
		33.7	34.9	34.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
6/2/61	1	20.5	21.4	10.2	17.7
		20.7	23.3	10.4	
		20.7	21.3	10.5	
	2	10.9	13.4	11.2	12.4
		10.7	13.5	13.5	
		10.7	13.7	13.4	
	3	10.4	10.1	9.8	10.1
		10.9	9.8	9.8	
		10.4	9.5		
	4	11.2	10.1	14.5	12.2
		11.1	10	16.4	
		10.8	10.1	15.7	
	5	12.4	10.1	12.8	11.3
		12.8	10.2	10.4	
		12.9	10.1	9.7	
	6	11.6	10.6	24.5	14.9
		11.5	10.6	24.5	
		11.3			
	7	12.3	15.5	17.3	15.2
		14.2	15.8	17.6	
		10.5	15.5	17.7	
	8	25.3	21.1	24.4	23.7
		26.7	20.3	24.3	
		25.3	20.9	24.6	
	9	21.3	16.1	18.6	18.2
		20.8	15.5	18.5	
		21	14.6	18.2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
6/2/61	10	10.1	11.1	10.2	10.4
		10	11.2	10.2	
		9.6	11		
	11	36	27.4	24.5	29.4
		36.5	27.1	25.2	
		36.2	27.3	24.2	
	12	23.4	24.6	24.3	24.3
		23.9	24.6	24.6	
		23.8		24.9	
	13	24.9	22	22.1	23.2
		25.9	22.5	22.2	
		25.7	22.1	21	
	14	20.3	20.1	23.1	21
		19.6	19.7	23.3	
		20.2	20.2	22.6	
	15	31.2	27.4	28.3	29.6
		32	28.9	29.3	
		31.9	28.4	28.7	
	16	27.9	26.9	17.4	24.7
		28.2	26.9	17.4	
		28.5			
	17	28.3	24.3	22.4	24.9
		28.1	23.7	22.8	
		28	23.9	22.2	
	18	26.4	31.8	28.9	28.9
		25.5	32	28.8	
		25.7	32.1	28.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
6/2/61	19	18.8	22.8	25.1	22.2
		18.5	23.4	25.2	
		18	22.9	25.1	
	20	24.4	23	27.3	24.7
		24.3	23.1	26.8	
		23.8	22.2	27.6	
	21	18.2	15.4	25.6	19.9
		19.1	15.2	25.9	
		18.6	15.1	26	
	22	12.5	13.9	21.9	15.3
		12.2	13.2	21.2	
		11.4	12.5	19	
	23	15.1	20.7	22.5	19.5
		14.4	22.2	22.2	
		15	21.6	22	
	24	32.1	22.8	17.6	24
		32.4	22.6	16.9	
		32	22.7	16.6	
	25	25.7	16.9	18.2	20.2
		26.5	17.2	17.7	
		25.5	17.3	16.9	
	26	27.6	27.7	35.3	29.8
		28.3	27.6	35.3	
		28.1	28.5		
	27	15.2	13.7	12.1	14.1
		19.7	14.3	12.1	
		19.5	15.8		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
6/2/61	28	30.3	28.3	23.3	27.1
		30.6	27.7	21.7	
		31.5	27.8	22.3	
	29	32	35.2	27.5	31.1
		31.5	34.1	26	
		31.8	34.7	26.7	
	30	8.3	9	8.5	8.5
		8.4	9	8.2	
		8.2		8.3	
	31	8.3	7.7	8.9	8.2
		8.3	7.8	8.3	
			7.8	8.2	
	32	10.4	15.6	17.6	14.2
		10.3	15.6	16.7	
		10.3		17	
	33	18	16.2	14	16.5
		16.9	18.3	14	
		17	17.7		
	34	30	35.5	32.4	32.6
		30.3	35.3	32.6	
		30.5	34.6	32.4	
	35	35.1	35.4	28.8	32.8
		34.1	35.4	29.3	
		34.8		29.3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
7/2/61	1	11.9	10.6	10.1	10.7
		11.1	10.7	10.6	
		11.1	10.3	10.1	
	2	17.3	18.8	23.9	20.3
		17.4	18.8	24.1	
		17.6		24.1	
	3	20.2	21.1	20.1	20.4
		20.6	20.7	20.5	
		19.4	20.9	20.5	
	4	34.1	34.5	27.2	31.8
		34.2	34.2	26.6	
		34.1	34	27.2	
	5	19.4	13.1	7.9	14.2
		19.1	13.1	7.9	
		20	13		
	6	34.5	32.9	31.8	33.2
		33.9	33.5	31.8	
		34.2	33.1		
	7	21.3	15.1	11.4	16.2
		22.3	15.8	11.8	
		22	14.7	11.4	
	8	35.2	36.8	36.7	36.3
		35.2	37.1	36.5	
			36.8	36.4	
	9	36.1	34.3	35.7	35.4
		36.5	34.5	35.3	
		36.5	33.7	36	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
7/2/61	10	28.3	30.8	29.7	29.4
		28.1	30.1	29.5	
		28.5	29.8	29.6	
	11	10.3	18.1	13.5	13.5
		10.4	18.1	13.5	
		10.5		13.4	
	12	30.5	30.9	29	30.2
		30.9	30.8	29.2	
		30.5	31	29.4	
	13	28.4	34.7	36.3	33.4
		28.6	35	36.8	
		28.9	34.7	36.9	
	14	21.9	27.7	23.6	23.9
		21.5	27.7	23.7	
		21.4		23.7	
	15	35.7	32.2	31.4	32.9
		35.8	31.9	31.2	
		35.1	32.1	31.1	
	16	33.1	33.6	31.4	32.8
		33.6	33.9	31.2	
		33.4	33.8	30.9	
	17	35.9	36.3	37.4	36.4
		35.6	36.1	37.2	
		35.9	36.1	37.3	
	18	34.9	33.2	33.6	34
		35.6	32.6	33.4	
		35.6	33.4	33.4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
7/2/61	19	17.7	20.8	19.6	19.4
		17.5	20.8	20.3	
		17.8		20.3	
	20	32.3	33	33.9	32.8
		32.2	32.7	33.6	
		31.7	32.7	33.3	
	21	35.1	33.3	36.7	35.2
		35.6	33.5	36.8	
		35.7	33.7	36.7	
	22	24.1	25.5	30.6	26.6
		24.2	24.6	30.8	
		23.8	25.2	30.7	
	23	14.4	16.9	14.3	15.1
		14	17.5	14	
		14.3	16.3	14.1	
	24	25.8	26.8	26.7	26.4
		26.1	26.9	26.2	
		26.1	26.8	26.4	
	25	31.4	31.1	30.9	31.1
		30.9	31.2	31.8	
		30.8	31.5	30.7	
	27	25.5	21	21	22.3
		25.5	20.6	22	
			20.9	21.8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
7/2/61	28	22.5	18.7	23.5	21.5
		22.1	18.6	23.7	
		22.3	18.7	23.6	
	29	32.9	27.9	31.6	30.7
		32.8	27.6	31.7	
		33	27.4	31.5	
	30	28.6	28	22.1	26.2
		28.2	28.1	22.5	
		28.5	28.1	22	
	31	26.2	26.9	26.4	26.4
		25.8	26.7	26.5	
		26.2	26.3	26.6	
	32	35	33.7	30.8	33
		34.9	33.7	30.5	
		34.9		30.6	
	33	22.7	24.9	25.5	24.3
		22.3	25.2	25	
		22.6	25.5	25.4	
	34	27.1	29.4	30.6	29.2
		27.1	29.7	30.6	
			30.2		
	35	25.1	27.8	26.3	26.5
		25.3	27.5	25.9	
		25.3	28.7	26.7	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลดิบการวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในเนื้อทุเรียน วัดโดย Pen refractometer ในการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลองการสแกนแบบออฟไลน์

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
30/6/60	1	22.5	21.4	24.6	23.5
		21.4	22.7	25.2	
		20.5	22.7	28.2	
	2	15.1	15.5	15.9	16.7
		15.9	15.8	15.6	
		18.2	18.6	19.1	
	3	15.3	18.3	14.3	15.9
		15.4	18.4	13.9	
		15.1	18.8	14	
	4	21.8	19.4	22.4	21.7
		21.5	21.2	24.3	
		20	19.5	25.6	
	5	23.9	24.3	23.8	24.1
		24.5	24.4	23.4	
		24.1	24.5	23.7	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
5/7/60	1	15.6	15.3	16	15.8
		15.5	15.4	14.9	
		15.6	15.9	16.6	
	2	14.5	15.8	14.7	14.7
		14.1	14.5	15.6	
		15	14.4	14.2	
	3	13	14.5	15.8	14.9
		13.2	13.1	15.7	
		14.2	15.4	16.3	
	4	22.7	22.6	20.7	22.2
		22.5	22	22.7	
		22.3	21.4	23	
	5	18.1	17	17.3	17.3
		18	16.5	17.4	
		17.3	16.9	17.6	
	6	22.2	20.1	22.8	21.9
		23.2	22.8	21.1	
		21.7	21.3	22.2	
	7	27.5	26.6	25.9	27
		27.7	27	25.8	
		27.6	26.6	27.2	
	8	28.8	24.4	27.7	26.5
		26.9	23.3	27.4	
		26.2	25.6	27.9	
	9	27.9	27.5	28.8	27.7
		27.6	27.7	28.2	
		27.2	28	27.3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
5/7/60	10	24.5	26.9	24.6	25.8
		25.2	27.3	23.7	
		25.2	27.5	25.4	
	11	21.9	23.6	23.5	22.8
		21.2	23.7	23.3	
		21.6	23	23.7	
	12	17.1	16.5	16.1	16.1
		17.5	15.7	16.2	
		16.3	15.6	15.5	
	13	15.3	16.3	15.1	15.6
		15	16.4	15.5	
		15	16.1	15.8	
	14	15.7	14.8	14.9	15.1
		15.1	14.6	15	
		15.1	15	15.3	
	15	14.9	14	14	14.2
		14.3	14.6	13.6	
		14.4	14.2	14.1	
	16	10.5	10.2	11.3	10.5
		10.6	10.1	11.4	
		10.4	10.2	10.6	
	17	17.8	22.6	24.2	21
		15.9	21	24.3	
		18.3	21.1	23.6	
	18	19.1	20.3	20.2	19.8
		19.3	20.2	20.1	
		19.1	19.9	20.1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
5/7/60	19	16.8	16.4	16.1	16
		16.3	16.1	16	
		15.9	15.7	15.9	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
26/7/60	1	36	37.7	37.2	36.9
		36.2	37.7	37.3	
		36.1		37	
	2	33.7	37.6	35.7	35.6
		33.6	37.5	35.7	
		33.6	37.7		
	3	33.2	37.7	37.7	36.1
		33.1	37.3	37.6	
		32.9	37.8	37.4	
	4	37.9	39.5	32.3	37.1
		38.2	39.2	32.3	
		38.1	39.2		
	5	21.8	33.7	31.2	28.9
		21.9	33.4	31.3	
		22.1	33.5	31.1	
	6	31.9	34.9	32	32.7
		31.4	34.7	31.8	
		31.2	34.8	31.2	
	7	33.6	31.1	31.8	32.3
		33.7	31.4	31.8	
		33.5	31.5		
	8	26.5	32.8	32.6	31.9
		27	32.7	33.1	
		26.6	33.1	33	
	9	36.7	34.7	30.4	33.8
		36.4	34.8	30.3	
		36.5	34.6	30.1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
26/7/60	10	34.7	38.4	38.8	37
		34	38.5	38.8	
		34.5	38.3		
	11	34.6	36	38.9	36.5
		34.5	36	38.3	
		34.6		38.9	
	12	37.8	35.8	38.1	37.3
		37.9	36.1	38.3	
		38.1	35.8	38.2	
	13	31.3	35.5	37.2	34.6
		31.4	35.3	37	
		31.5	35.3	37.1	
	14	33	31.2	27.6	30.7
		32.9	31.3	27.7	
		33.1	31.6	27.5	
	15	31.4	39.2	32.6	34.4
		31.3	39.5	32.8	
		31.1	39.3	32.7	
	16	34.5	33.9	34.3	34.2
		34.3	34	34.3	
		34.5	34		
	17	38.9	36	35	36.6
		38.8	36.3	34.8	
		38.7	36.1	34.6	
	18	34.6	33.2	31.5	33.1
		34.2	33.2	31.6	
		34.4		31.9	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
26/7/60	19	31.8	39.8	34.4	35.2
		32	39.4	34.2	
		31.7	40.1	33.8	
	20	31.8	36.3	35.3	34.4
		31.9	36.6	35.3	
		31.7	36.5		
	21	33.2	33.5	32.3	32.9
		32.8	33.5	32.4	
		33		32.2	
	22	33.8	35.3	33.1	34.1
		33.8	35.4	33	
			35.3	32.9	
	23	30.2	38.1	35.5	34.7
		30.7	38.5	35.5	
		30.6	38.3		
	24	41.4	37.6	30.6	36.5
		41.3	37.7	30.4	
		41.5	37.9	30.8	
	25	33.3	33.5	32	32.7
		33	33.5	31.8	
		32.7		31.8	
	26	36.8	38.6	36.7	37.3
		36.9	37.6	36.1	
		37.2	38.8	37.1	
	27	30.2	34.8	34.8	33.1
		30.3	34.7	34.8	
		30.2	34.9		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
26/7/60	28	30.5	35.2	34.5	33.3
		30.7	35.3	33.9	
		30.4	35.3	34	
	29	35.3	33.2	28.9	32.6
		35.1	33.6	29.3	
		35.1	33.3	29.3	
	30	29.5	34.2	34.6	33.2
		29.5	34.3	34.4	
			34.1	34.9	
	31	35.2	34.7	33.4	34.5
		35.4	34.9	33.6	
		34.9	34.9	33.6	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
7/8/60	1	28.2	34.9	33.8	32.3
		28.5	34.7	33.6	
		28.3	35	33.4	
	2	32.5	37.2	32.2	34.1
		32.4	37.6	32.5	
		32.5	36.9	32.7	
	3	32.3	38.1	34.9	35.2
		32.5	38.4	35.1	
		32.2	37.9	35	
	4	33.3	35.8	33.3	34.3
		33.2	36.1	33.3	
		33.3	36		
	5	32.6	34.3	33.6	33.6
		32.6	34.1	33.9	
			34.1	33.8	
	6	36	33	31.2	33
		35.5	32.7	30.1	
		35.2	32.3	30.7	
	7	36	36.2	33.8	35.4
		36.1	36.4	33.9	
		35.9	36.1	33.8	
	8	26.3	34.7	29.9	30.4
		26.6	34.8	30.2	
		26.2	34.6	30.1	
	9	30	37.5	36.7	34.7
		30.2	37.2	36.8	
		30.2	37.4	36.6	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
7/8/60	10	26.9	34.3	24.4	27.6
		26.6	34.3	23.4	
		26.7		23.9	
	11	28.1	34.6	35.1	32.7
		28.3	34.7	35.3	
		27.9	34.7	35.2	
	12	35	32.2	31.1	32.6
		35	32.4	31.2	
			33.1	30.9	
	13	28.1	32.9	34.5	31.8
		27.8	33	34.5	
		28.2	32.8	34.6	
	14	33.7	29.8	35.3	32.6
		33.6	29.7	35.3	
		33.6	29.5		
	15	34.7	29.7	29.8	31.5
		34.6	29.9	30.2	
		34.4	30.1	30	
	16	40.2	33.7	32.8	35.5
		40.3	33.2	33.7	
		40.2	33.8	32.2	
	17	32.5	30.9	31.1	31.4
		32.3	30.6	31.3	
		32.4	30.4	31	
	18	29.7	31.1	23	27.7
		29.7	31.3	23.9	
			31.2	22.3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
7/8/60	19	30.2	34.4	29.6	33.6
		30	34.5	29.4	
		30.1	34.6	29.5	
	20	34.9	34.9	34.5	34.8
		34.8	34.5	34.8	
		34.9	35.1	34.7	
	21	34.4	32.9	32.3	32.3
		34.6	33.2	32.1	
		34.5	33.1	32.2	
	22	33.9	35.8	31.4	33.8
		33.8	36.1	31.7	
		34.1	36.1	31.3	
	23	33.5	32.8	35.7	34
		33.6	32.9	35.5	
		33.4	32.8	35.4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
21/8/60	1	29.2	31.1	32.6	30.9
		29.4	31	32.4	
		28.8	31.3	32.5	
	2	28.2	33.6	36.8	32.4
		28.1	33.7	36.8	
		28.2	33.6		
	3	29.4	32.4	35	32.1
		29.6	31.9	34.8	
		29.7	31.8	34.6	
	4	38	35.8	31.3	35.5
		37.9	35.7	31.3	
		38.1	35.5		
	5	34.8	33.4	30.9	33.4
		35.2	34.2	31.1	
		35	33.6	30.1	
	6	29.9	28.1	27.8	28.8
		30.1	28.2	28.3	
		30	28.3	28.4	
	7	40.2	37.2	23.8	36.3
		40	36.9	23.9	
		40	37.3	23.9	
	8	28	31.8	23.8	27.9
		28	31.7	23.9	
			31.8	23.9	
	9	35.4	33.3	34.7	34.5
		35.6	33.2	34.8	
		35.5	33.4	34.4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
21/8/60	10	32.5	26.3	32.8	31
		32	26.3	32.9	
		32.3		32.6	
	11	27.4	25	22.5	25
		27.6	25.1	22.3	
		27.6	25.2	22.3	
	12	35.3	36.8	31.3	34.5
		35.4	36.7	31.6	
		35.2	37	31.3	
	13	26.7	29.7	30.3	28.9
		26.6	29.6	30.5	
		26.5	29.8	30.1	
	14	37.5	37	35.9	37
		37.6	36.9	36.3	
		37.5	37.3	36	
	15	35.4	37.2	37.6	36.7
		35.5	37.3	37.1	
		35.6	37.2	37.5	
	16	32.5	34.3	37.6	34.9
		32.8	34.6	37.8	
		32.7	34.1	37.4	
	17	35.3	35.5	30.9	33.7
		35.5	35.5	30.6	
		35.4		31.1	
	18	35.7	32.5	32.4	33.6
		35.2	32.3	32.4	
		35.7	32.2		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
21/8/60	19	35.5	37.6	31.1	34
		33.4	36.9	31	
		33.7	35.8	30.9	
	20	37.8	38.4	34.7	36.6
		37	37.5	34.4	
		37.2	37.1	34.9	
	21	34.8	34.8	33.7	34.1
		33.7	34.6	33.3	
		33.8	34.6	33.2	
	22	30.7	30.2	30.4	30.5
		30.4	31.3	29.3	
		30.2	31.7	30.2	
	23	21.9	23.2	24.2	23.5
		22.3	23.4	24.7	
		22.6	23.6	25.8	
	24	25.5	28.3	32.4	28.8
		25.6	28.6	32.7	
		25.9	28.8	31.9	
	25	31.1	29.3	34.5	31.7
		30.4	29.5	34.5	
		30.2	29.7	35.4	
	26	35.5	33.4	36.1	35.1
		35.9	33.7	36.2	
		35.7	33.3	36.1	
	27	32	33.1	37.5	34.3
		31.9	33.4	37.4	
		31.8	33.8	37.6	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
21/8/60	28	35.6	40.2	33.7	36.5
		35.8	40	34.3	
		35.7	39.7	33.9	
	29	32.1	30.7	26.1	30.1
		31.9	31.9	26.3	
		33	32.2	26.8	
	30	41.6	39.9	35.4	38.6
		40.6	39.6	35.1	
		41.6	39.4	34.2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
18/9/60	1	32.1	26	26.9	28.4
		32	26.3	27	
		31.8	26.5	27	
	2	27.9	22.6	25.4	25.3
		28	22.7	25.4	
		28.1	22.5		
	3	27.7	27.3	29.2	28
		28	27.6	29.2	
		27.9	27.4		
	4	37.9	26.5	22.4	29
		38	26.6	22.6	
		37.9	26.7	22.5	
	5	24.4	26.7	28.9	26.8
		24.7	27.1	29.2	
		24.5	26.5	29.1	
	6	22.9	28.7	33	28.3
		23.9	29	32.9	
		23.3	29.2	32.7	
	7	32.9	32.2	27.9	30.7
		32.1	33.6	26.1	
		32.5	33.1	26.9	
	8	36.3	29.8	25.3	30.5
		36.2	30	25.4	
		36.4	29.7	25.3	
	9	30	33	28.5	30.5
		30.2	32.9	28.8	
		29.7	33	28.3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
18/9/60	10	28.6	25.8	26.9	27
		28.4	25.9	27	
		28.3	25.7	26.8	
	11	24.3	33.4	37.9	33
		24.8	33.5	38.3	
		24.4	32.9	37.9	
	12	34.6	30.8	35.8	33.7
		34.4	30.7	36	
		34.1	30.9	36.3	
	13	34.3	29.2	26.2	30
		33.9	29.7	26.4	
		34	29.5	26.8	
	14	32.6	34.1	36.9	34.4
		32.7	33.3	37	
		32.3	33.9	36.7	
	15	35	33.4	31.7	33
		35	33	31.1	
			33.6	30.9	
	16	23.7	25.9	22.8	23.9
		23.6	24.9	23.1	
		23.7	25.5	23	
	17	34.7	31.8	27	31.1
		34.6	31.6	27.1	
		33.4	32.3	27	
	18	37.9	29.8	26.3	31.5
		38.1	30.2	26.2	
		38.4	29.6	26.7	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
18/9/60	19	26.6	32.3	28.6	29.5
		27.1	32.8	29.1	
		26.9	33.2	28.9	
	20	26	30.9	26.4	27.8
		26.1	31.4	26.2	
		26	31.2	26.2	
	21	24	28.1	26.3	26.1
		23.8	28.3	26.2	
		23.7	28.2	26.1	
	22	36.8	32.1	33.7	34.5
		36.5	32.7	34.9	
		36.7	32.7	34.3	
	23	33.3	33.4	33.8	33.4
		33	33.4	32.4	
		33.5		34	
	24	34.1	35.3	36.6	35.2
		33.8	34.6	36.4	
		34.3	35.5	36.5	
	25	35.3	33.9	33.7	34.6
		35.2	34.7	34.5	
		35.4	34.4	34	
	26	26.5	24.8	20.7	24
		26.6	24.6	21.2	
		26.6	24.4	21	
	27	24.3	23	26.8	25
		24	23	27	
		24.2		27.2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
18/9/60	28	29.8	24	27.3	26.9
		29.8	23.9	27.6	
			24.2	28.4	
	29	22.8	29.4	28.4	27.3
		23.2	29.9	29.2	
		23.4	29.8	29.4	
	30	22.5	27.3	23.6	24
		22.7	27.3	23.3	
		22.9		22.7	
	31	26.8	37.6	26.7	30.4
		27.3	37.7	26.6	
		26.4	37.4	26.7	
	32	30.1	29.3	21	27.6
		29.4	29.6	21	
		29.7	30.8		
	33	29.1	25.4	23.9	26.1
		29.4	25	24	
		29.7	24.8	23.8	
	34	26.9	24.6	24.4	25.2
		26.8	24.3	24.3	
		27.2	24.3	24	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
21/9/60	1	36.1	36.5	32.8	35.1
		35.9	36.4	32.1	
		26	36.5	32.5	
	2	34.5	34.9	34.2	34.6
		34.7	34.5	35	
		34.2	35	34.8	
	3	32.9	27.6	26.5	29.3
		33.2	27.3	26.5	
		33.2	27.4		
	4	31.6	35.3	29.9	32.3
		31.9	35.6	29.7	
		31.8	35.1	29.6	
	5	30.2	35.3	35.3	33.5
		29.9	35.1	35.5	
		29.6	35.3	35.1	
	6	28.2	34.2	35.7	32.7
		28.3	34.3	35.5	
		28.2	34.4	35.8	
	7	37.4	34.7	33	35.1
		38	34.6	32.8	
		38	34.7	32.6	
	8	31.3	34.9	27.5	31.2
		31.3	34.5	27.3	
			35	27.5	
	9	35.1	34.2	33.5	34.2
		34.9	34.5	33.3	
		35	34.2	33.3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
21/9/60	10	33.4	35	33.9	34
		33.5	35	34.2	
		33.6		33.6	
	11	33.3	34.9	34.2	34.1
		33.1	35.5	33.8	
		33.3	34.7	34.1	
	12	32.9	35.7	35.5	34.8
		33	36.3	35.6	
		33	35.6	35.4	
	13	33.7	34.3	29.9	32.8
		33.6	34.2	30.3	
		33.3	35	30.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
25/9/60	1	35.7	32.9	30.2	32.9
		35.9	33.2	29.8	
		36.2	32.7	29.8	
	2	25.1	29.8	25.2	26.9
		25.2	30.1	25.6	
		25.1	30.2	25.6	
	3	28.9	29.8	27.8	28.7
		28.9	29.8	27.7	
				28.3	
	4	27	33.5	25	28.4
		27.3	33.1	25.1	
		26.9	32.8	24.9	
	5	28	31.3	27.8	28.9
		28.1	31.3	28.3	
		28.1		28.4	
	6	26.9	28.3	29	28
		27.7	28.2	29	
		27.3	27.7		
	7	28.6	26.5	28.5	27.9
		28.9	26.3	28.7	
		28.6	26.1	28.5	
	8	28.5	32.1	29.6	30
		28.2	32	29.1	
		28.6	32.1	29.5	
	9	28.5	34	31.3	31.1
		28.3	33.2	31.4	
		28.4	33.6	30.8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
25/9/60	10	27.2	33.9	34.4	31.8
		26.9	34.1	34.5	
		26.8	34	34.8	
	11	30.1	33.7	33.5	32.4
		30.6	33.6	32.9	
		30.4	33.7	33.1	
	12	27.4	32.4	26.8	28.8
		27.3	32.5	27	
		26.9	31.8	27	
	13	33.1	32.3	34.7	33.3
		32.7	32.1	35.3	
		32.5	32.3	34.6	
	14	28.5	32.1	29.1	30.3
		29.3	32.7	29.1	
		29.1	32.2		
	15	33.6	31.5	29.8	31.6
		33.1	31.6	29.9	
		33	31.5	30.4	
	16	28.2	31.2	34.2	31.2
		27.9	31	34	
		28	31.8	34.1	
	17	33.5	35	30.4	32.8
		33.9	34.3	29.8	
		33.8	34.6	30	
	18	29	26.8	29	28.1
		27.8	26.8	28.5	
		28		29	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
25/9/60	19	31.7	34.3	36.8	33.6
		32.3	34.3	34.4	
		30.9		34.4	
	20	25.9	30.1	28.6	28.1
		25.7	30	28.2	
		26.1	30.1	27.8	
	21	29	29.6	32.3	30.1
		28.4	29.1	32.2	
		28.5	29.1	32.4	
	22	29.2	39.1	30.6	32.8
		29	39.4	29.3	
		29.3	39	30.2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
27/9/60	1	34.9	31.4	30.4	32
		35.3	31.2	29.4	
		35	31.4	29.4	
	2	33.9	34.7	30.6	33
		33.8	34.9	30.4	
		33.6	34.9	30.5	
	3	32.4	33.7	32.3	32.8
		32.3	33.8		
		31.9	33.8	32.3	
	4	33.5	35.2	32.6	33.7
		33.6	34.8	32.9	
		32.8	35.5	32.1	
	5	33.1	32.5	32.1	32.6
		33.1	32.6	31.8	
			32.8	32.7	
	6	32.9	33.8	33.1	33.3
		32.8	33.7	32.9	
		32.7	34.4	33.2	
	7	30.8	34	34	32.8
		30.9	33.6	33.5	
		30.4	34	34	
	8	28.1	28.5	32.3	30
		28.4	28.5	33	
		28.3		32.7	
	9	31.1	33.1	34.9	32.9
		31.2	32.5	34.6	
		30.9	32.7	34.8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
28/9/60	1	30.9	30.4	30.9	30.6
		29.3	30.5	31.2	
		31.1	30.2	31.2	
	2	32.3	27.4	28.6	29.4
		32	28	28.8	
		32.1	27.6	28.2	
	3	33.5	33.9	34.1	33.8
		33.4	34	34.1	
		33.7	33.8		
	4	32.7	30.4	34.1	32.3
		32.3	30.5	33.5	
		32.7	30.7	33.5	
	5	33.9	33.9	34	33.9
		33.7	34.1	33.8	
		33.8	33.7	33.8	
	6	38.9	38.3	38.1	32.4
		27.3	27	27.2	
		27.3	33.3	34.1	
	7	34.1	34.9	32.1	33.7
		33.9	34.7	32	
		33.7	35	32.8	
	8	34.1	33.1	30.9	33
		34	33.4	30.9	
		34.2	33.3		
	9	32.9	33.4	35.2	33.8
		33.2	33.4	34.5	
		33.2		34.6	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
28/9/60	10	30.9	31.8	32.7	31.9
		30.8	32.1	32.8	
		30.9	32	33.3	
	11	31.7	31	33.2	32
		31.6	31	32.9	
		31.4		32.8	
	12	35.1	33.8	29.7	32.7
		34.2	33.7	29.6	
		34.3	33.7	30	
	13	32.7	35.2	34.3	34.1
		32.4	34.6	34.7	
		33.7	34.9	34.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
6/2/61	1	20.5	21.4	10.2	17.7
		20.7	23.3	10.4	
		20.7	21.3	10.5	
	2	10.9	13.4	11.2	12.4
		10.7	13.5	13.5	
		10.7	13.7	13.4	
	3	10.4	10.1	9.8	10.1
		10.9	9.8	9.8	
		10.4	9.5		
	4	11.2	10.1	14.5	12.2
		11.1	10	16.4	
		10.8	10.1	15.7	
	5	12.4	10.1	12.8	11.3
		12.8	10.2	10.4	
		12.9	10.1	9.7	
	6	11.6	10.6	24.5	14.9
		11.5	10.6	24.5	
		11.3			
	7	12.3	15.5	17.3	15.2
		14.2	15.8	17.6	
		10.5	15.5	17.7	
	8	25.3	21.1	24.4	23.7
		26.7	20.3	24.3	
		25.3	20.9	24.6	
	9	21.3	16.1	18.6	18.2
		20.8	15.5	18.5	
		21	14.6	18.2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
6/2/61	10	10.1	11.1	10.2	10.4
		10	11.2	10.2	
		9.6	11		
	11	36	27.4	24.5	29.4
		36.5	27.1	25.2	
		36.2	27.3	24.2	
	12	23.4	24.6	24.3	24.3
		23.9	24.6	24.6	
		23.8		24.9	
	13	24.9	22	22.1	23.2
		25.9	22.5	22.2	
		25.7	22.1	21	
	14	20.3	20.1	23.1	21
		19.6	19.7	23.3	
		20.2	20.2	22.6	
	15	31.2	27.4	28.3	29.6
		32	28.9	29.3	
		31.9	28.4	28.7	
	16	27.9	26.9	17.4	24.7
		28.2	26.9	17.4	
		28.5			
	17	28.3	24.3	22.4	24.9
		28.1	23.7	22.8	
		28	23.9	22.2	
	18	26.4	31.8	28.9	28.9
		25.5	32	28.8	
		25.7	32.1	28.5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
6/2/61	19	18.8	22.8	25.1	22.2
		18.5	23.4	25.2	
		18	22.9	25.1	
	20	24.4	23	27.3	24.7
		24.3	23.1	26.8	
		23.8	22.2	27.6	
	21	18.2	15.4	25.6	19.9
		19.1	15.2	25.9	
		18.6	15.1	26	
	22	12.5	13.9	21.9	15.3
		12.2	13.2	21.2	
		11.4	12.5	19	
	23	15.1	20.7	22.5	19.5
		14.4	22.2	22.2	
		15	21.6	22	
	24	32.1	22.8	17.6	24
		32.4	22.6	16.9	
		32	22.7	16.6	
	25	25.7	16.9	18.2	20.2
		26.5	17.2	17.7	
		25.5	17.3	16.9	
	26	27.6	27.7	35.3	29.8
		28.3	27.6	35.3	
		28.1	28.5		
	27	15.2	13.7	12.1	14.1
		19.7	14.3	12.1	
		19.5	15.8		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
6/2/61	28	30.3	28.3	23.3	27.1
		30.6	27.7	21.7	
		31.5	27.8	22.3	
	29	32	35.2	27.5	31.1
		31.5	34.1	26	
		31.8	34.7	26.7	
	30	8.3	9	8.5	8.5
		8.4	9	8.2	
		8.2		8.3	
	31	8.3	7.7	8.9	8.2
		8.3	7.8	8.3	
			7.8	8.2	
	32	10.4	15.6	17.6	14.2
		10.3	15.6	16.7	
		10.3		17	
	33	18	16.2	14	16.5
		16.9	18.3	14	
		17	17.7		
	34	30	35.5	32.4	32.6
		30.3	35.3	32.6	
		30.5	34.6	32.4	
	35	35.1	35.4	28.8	32.8
		34.1	35.4	29.3	
		34.8		29.3	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
7/2/61	1	11.9	10.6	10.1	10.7
		11.1	10.7	10.6	
		11.1	10.3	10.1	
	2	17.3	18.8	23.9	20.3
		17.4	18.8	24.1	
		17.6		24.1	
	3	20.2	21.1	20.1	20.4
		20.6	20.7	20.5	
		19.4	20.9	20.5	
	4	34.1	34.5	27.2	31.8
		34.2	34.2	26.6	
		34.1	34	27.2	
	5	19.4	13.1	7.9	14.2
		19.1	13.1	7.9	
		20	13		
	6	34.5	32.9	31.8	33.2
		33.9	33.5	31.8	
		34.2	33.1		
	7	21.3	15.1	11.4	16.2
		22.3	15.8	11.8	
		22	14.7	11.4	
	8	35.2	36.8	36.7	36.3
		35.2	37.1	36.5	
			36.8	36.4	
	9	36.1	34.3	35.7	35.4
		36.5	34.5	35.3	
		36.5	33.7	36	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
7/2/61	10	28.3	30.8	29.7	29.4
		28.1	30.1	29.5	
		28.5	29.8	29.6	
	11	10.3	18.1	13.5	13.5
		10.4	18.1	13.5	
		10.5		13.4	
	12	30.5	30.9	29	30.2
		30.9	30.8	29.2	
		30.5	31	29.4	
	13	28.4	34.7	36.3	33.4
		28.6	35	36.8	
		28.9	34.7	36.9	
	14	21.9	27.7	23.6	23.9
		21.5	27.7	23.7	
		21.4		23.7	
	15	35.7	32.2	31.4	32.9
		35.8	31.9	31.2	
		35.1	32.1	31.1	
	16	33.1	33.6	31.4	32.8
		33.6	33.9	31.2	
		33.4	33.8	30.9	
	17	35.9	36.3	37.4	36.4
		35.6	36.1	37.2	
		35.9	36.1	37.3	
	18	34.9	33.2	33.6	34
		35.6	32.6	33.4	
		35.6	33.4	33.4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean
		1	2	3	(%Brix)
7/2/61	19	17.7	20.8	19.6	19.4
		17.5	20.8	20.3	
		17.8		20.3	
	20	32.3	33	33.9	32.8
		32.2	32.7	33.6	
		31.7	32.7	33.3	
	21	35.1	33.3	36.7	35.2
		35.6	33.5	36.8	
		35.7	33.7	36.7	
	22	24.1	25.5	30.6	26.6
		24.2	24.6	30.8	
		23.8	25.2	30.7	
	23	14.4	16.9	14.3	15.1
		14	17.5	14	
		14.3	16.3	14.1	
	24	25.8	26.8	26.7	26.4
		26.1	26.9	26.2	
		26.1	26.8	26.4	
	25	31.4	31.1	30.9	31.1
		30.9	31.2	31.8	
		30.8	31.5	30.7	
	27	25.5	21	21	22.3
		25.5	20.6	22	
			20.9	21.8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Sample	Total soluble solids (%Brix)			Mean (%Brix)
		1	2	3	
7/2/61	28	22.5	18.7	23.5	21.5
		22.1	18.6	23.7	
		22.3	18.7	23.6	
	29	32.9	27.9	31.6	30.7
		32.8	27.6	31.7	
		33	27.4	31.5	
	30	28.6	28	22.1	26.2
		28.2	28.1	22.5	
		28.5	28.1	22	
	31	26.2	26.9	26.4	26.4
		25.8	26.7	26.5	
		26.2	26.3	26.6	
	32	35	33.7	30.8	33
		34.9	33.7	30.5	
		34.9		30.6	
	33	22.7	24.9	25.5	24.3
		22.3	25.2	25	
		22.6	25.5	25.4	
	34	27.1	29.4	30.6	29.2
		27.1	29.7	30.6	
			30.2		
	35	25.1	27.8	26.3	26.5
		25.3	27.5	25.9	
		25.3	28.7	26.7	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นของการสแกนแบบออนไลน์ที่ความยาวคลื่น 450-1000 นาโนเมตร

Pretretment	R^2 Calibration	Factor	RMSEC	R^2 Validation	RMSEP	Bias	RPD	SEC	SEP
Raw spectrum	0.5958	2	3.9016	0.6974	4.0786	1.0216	1.8786	3.9206	3.9922
baseline	0.5413	1	4.2158	0.6421	4.436	1.3525	1.7558	4.2366	4.2715
smoothing	0.5958	2	3.9017	0.6975	4.0784	1.0217	1.8788	3.9206	3.9919
1st	0.6094	1	4.0334	0.6648	4.2931	0.6351	1.7471	4.0533	4.2927
2nd	0.6559	2	3.6001	0.6509	4.3808	0.6109	1.7100	3.6184	4.3859
snv	0.5705	1	4.2254	0.7123	3.9774	-0.029	1.8651	4.2451	4.0212
msc	0.4679	1	3.8862	0.6961	4.0879	-0.158	1.8160	3.9058	4.1299
smoothing+snv	0.4732	1	3.8667	0.7147	3.9604	-0.0242	1.8730	3.8662	4.0041
1st+snv	0.3663	1	4.1816	0.4168	5.6626	-0.3804	1.3129	4.2031	5.7122
2nd+snv	0.3822	1	4.9274	0.3091	6.1633	-0.3368	1.2053	4.9515	6.2222
msc+snv	0.4738	1	3.8647	0.2641	6.3808	1.7545	1.2132	3.8842	6.1816
smoothing+msc	0.4674	1	3.8882	0.6955	4.0917	-0.1591	1.8143	3.9078	4.1338
1st+msc	0.4451	1	4.2891	0.4014	5.7368	-0.0083	1.2930	4.3107	5.8002
2nd+msc	0.3722	1	4.6713	0.3226	6.1029	-0.1632	1.2159	4.6953	6.1681

ตารางที่ ข.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นของการสแกนแบบออนไลน์ที่ความยาวคลื่น 700-1000 นาโนเมตร

Pretretment	R^2 Calibration	Factor	RMSEC	R^2 Validation	RMSEP	Bias	RPD	SEC	SEP
Raw spectrum	0.5742	3	3.972	0.4521	8.761	0.5811	0.8855	3.989	8.4693
baseline	0.651	4	3.698	0.7178	3.9386	0.1113	1.8841	3.7165	3.9806
smoothing	0.6855	5	3.3983	0.6746	4.2299	0.1992	1.7556	3.4151	4.2719
1st	0.2665	1	5.5221	0.3305	6.0672	0.8733	1.2355	5.5478	6.0704
2nd	0.2762	1	5.3785	0.0412	7.2604	-0.3301	1.0227	5.4059	7.333
snv	0.6797	3	3.671	0.5496	4.976	0.5457	1.4998	3.6891	5.0006
msc	0.5777	2	4.209	0.4662	5.4141	1.1635	1.4028	4.229	5.3461
smoothing+snv	0.5596	2	4.2983	0.4897	5.2966	1.103	1.4319	4.3196	5.2377
1st+snv	0.4068	1	4.9806	0.3291	6.0735	-0.1227	1.2216	5.0042	6.1393
2nd+snv	0.3526	1	5.1878	0.2833	6.2772	0.025	1.1817	5.2119	6.3465
msc+snv	0.6826	3	3.654	0.5838	4.7838	0.4087	1.5563	3.6719	4.8189
smoothing+msc	0.5542	1	4.1775	0.4344	5.5766	1.4017	1.3743	4.1986	5.4573
1st+msc	0.3719	1	5.1858	0.4056	5.7165	0.0943	1.2978	5.2111	5.7789
2nd+msc	0.2617	1	5.5283	0.0034	64.2206	-8.1327	0.1164	5.551	64.4075

ตารางที่ ข.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์เบื้องต้นของการสแกนแบบออนไลน์ที่ความยาวคลื่น 800-1000 นาโนเมตร

Pretretment	R^2 Calibration	Factor	RMSEC	R^2 Validation	RMSEP	Bias	RPD	SEC	SEP
Raw spectrum	0.7012	4	3.1424	0.6626	4.3071	0.9358	1.7644	3.1576	4.2507
baseline	0.6728	3	3.6879	0.6042	4.6649	-0.1015	1.5905	3.7058	4.7154
smoothing	0.5235	3	4.1842	0.1493	6.8387	2.1316	2.1349	1.1416	6.5698
1st	0.2969	1	5.2691	0.1087	7.0002	-0.2014	1.0601	5.2954	7.0746
2nd	0.2656	1	5.4177	0.0245	7.3234	-0.2905	1.0137	5.4453	7.3985
snv	0.6877	2	3.3704	0.7357	3.812	0.3109	1.9524	3.3868	3.8413
msc	0.688	2	3.3685	0.7355	3.8136	0.3139	1.9518	3.3848	3.8426
smoothing+snv	0.6711	2	3.4342	0.7043	4.0358	0.1883	1.8400	3.4514	4.0759
1st+snv	0.5595	2	4.2923	0.4996	5.2453	0.689	1.4265	4.3127	5.2573
2nd+snv	0.3423	1	5.2285	0.2641	6.3609	0.0737	1.1662	5.2529	6.4308
msc+snv	0.6302	2	4.2536	0.6023	3.7801	0.1884	1.9648	3.4899	3.8171
smoothing+msc	0.7014	2	3.2366	0.7046	4.03	0.3872	1.8492	3.2519	4.0557
1st+msc	0.3063	1	5.3699	0.3778	7.821	0.7886	0.9533	5.395	7.8671
2nd+msc	0.4228	3	4.9351	0.0476	14.6406	-3.7016	0.5236	4.9588	14.3215

ตารางที่ ข.7 การกำหนดสารเคมีในแถบการดูดซับคลื่นเนียร์อินฟราเรดในช่วงคลื่นต่างๆ[25]

Wavelength (nm)	Bond vibration	Structure
713	C-H str. fourth overtone	Benzene
738	O-H str. third overtone	ROH
740	C-H str. fourth overtone	CH_3
746	C-H str. fourth overtone	CH_2
747	O-H str. third overtone	ArOH
760	O-H str. third overtone	H_2O
762	C-H str. fourth overtone	CH_2
779	N-H str. third overtone	RNH_2
790	N-H str. third overtone	$ArNH_2$
806	N-H str. third overtone	RNH_2
808	2 x N-H str. 2 x N-H def.+ 2 x C-N str.	RNHR’
815	N-H str. third overtone	RNHR’
832	2 x N-H str. 2 x N-H def.+ 2 x C-N str.	RNHR’
840	3 x C-H str. + 2 x C-C str.	Benzene
874	C-H str. third overtone	Benzene
880	C-H str. third overtone	$CHCl_3$
900	C-H str. third overtone	CH_3
910	C-H str. third overtone	Protein
913	C-H str. third overtone	CH_2
928	C-H str. third overtone	Oil
938	C-H str. third overtone	CH_2
970	O-H str. second overtone	ROH, H_2O
990	O-H str. second overtone	Starch
1000	O-H str. second overtone	ArOH
1015	2 x C-H str. + 3 x C-H def.	CH_3
1020	2 x N-H str. + 2 x amide I	Protein
1020	N-H str. second overtone	$ArNH_2$
1030	N-H str. second overtone	RNH_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wavelength (nm)	Bond vibration	Structure
1037	2 x C-H str. +2 x C-H def. + $(CH_2)n$	Oil
1053	2 x C-H str. +2 x C-H def. + $(CH_2)n$	CH_{20}
1060	N-H str. second overtone	RNH_2
1080	2 x C-H str. + 2 x C-C str.	Benzene
1097	2 x C-H str. + 2 x C-C str.	Cyclopropane
1143	C-H str. second overtone	Aromatic
1152	C-H str. second overtone	CH_3
1170	C-H str. second overtone	HC=CH
1195	C-H str. second overtone	CH_3
1215	C-H str. second overtone	CH_2
1765	C-H str. first overtone	CH2
1780	C-H str. first overtone	Cellulose
1820	O-H str. + 2 x C-O str.	Cellulose
1900	O-H str. +2 x C-O str.	Starch
1900	C=O str. second overtone	$-CO_2H$
1908	O-H str. first overtone	POH
1920	C=O str. second overtone	CONH
1940	O-H str. +O-H def.	H_2O
1950	C=O str. second overtone	$-CO_2R$
1960	N-H sym. str. +amide II	$CONH_2$
1980	N-H sym. str. +amide II	Protein
2000	2 x O-H def. +C-O def.	Starch
2000	N-H sym. str. +amide II	$CONH_2$, CONHR
2030	C+O str. second overtone	$CONH_2$
2050	N-H sym. str. +amide II	Protein
2050	N-H asym. str. +amide III	$CONH_2$
2080	O-H str. +O-H def.	ROH, sucrose,
2100	2 x O-H def. +2 x C-O str.	Starch
2110	N-H sym. str. +amide III	$CONH_2$, CONH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wavelength (nm)	Bond vibration	Structure
2132	N-H str. +C=O str.	Amino acid
2140	=C-H str. + C=C str.	HC=CH
2150	2 x amide I +amide III	$CONH_2$
2160	2 x amide I +amide III	CONHR
2180	2 x amide I +amide III	Protein
2190	CH_2 asym. str. +C=str.	HC=CH
2200	C-H str. +C=O str.	-CHO
2242	N-H str. +NH; def	Amino acid
2252	O-H str. +O-H def.	Starch
2276	O-H str. + C-C str.	Starch
2280	C-H str. + C-H def.	CH_3
2294	N-H str. +C=O str.	Amino acid
2310	C-H str. + C-H def.	CH_2
2323	C-H str. + C-H def.	CH_2
2336	C-H str. + C-H def.	Cellulose
2347	CH_2 sym. str. += CH_2 def.	$HC=CHCH_2$
2352	C-H def. second overtone	Cellulose
2380	O-H def. second overtone	ROH
2461	C-H str. +C-C str.	Starch
2488	C-H str. + C-C str.	Starch
2500	C-H str. + C-C str.	Starch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Kritsanaphon Leepaitoon and Panmanas Sirisomboon

“Precision Test for Spectral Characteristic of On-line Vis-NIR versus At-line NIR Spectroscopy for Measuring Total Soluble Solids of Durian *(Durio zibethinus cv Monthong)*”

10th International Conference on Agricultural Engineering (TSAE 2017)

7th September – 10th September 2017, Impact arena Muang Thong Thani

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 18 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 10 ประจำปี 2560
The 18th TSAE National Conference and the 10th TSAE International Conference : TSAE 2017

FE007

Precision Test for Spectral Characteristic of On-line Vis-NIR versus At-line NIR Spectroscopy for Measuring Total Soluble Solids of Durian (Durio zibethinus cv Monthong)

Kritsanaphon Leepaitoon[1]*, Panmanas Sirisomboon[1]

[1]*Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.*

Corresponding author: Kritsanaphon Leepaitoon. E-mail: kritkritsanaphon@gmail.com

Abstract

Near Infrared (NIR) Spectroscopy is a quick method for evaluating fruit and vegetable quality. It is important to measure the precision of an instrument before we start experiment for the model development. The main objective of this paper was to determine scanning repeatability and reproducibility of UV-VIS–NIR spectrometer (on-line) and FT-NIR spectrometer (at-line) for measuring total soluble solids of Durian (*Durio zibethinus* cv Monthong) and its corresponding reference method using pen refractometer to measure for comparison. Results shows that the repeatability and reproducibility of on-line scanning spectrometer was 0.0786 and 0.0831, similarly for at-line scanning spectrometer was 0.0044 and 0.0110 repectively. The repeatability of reference method was 0.2. The maximum coefficient of determination (R^2_{MAX}) of reference method is 0.997. This indicated that the error from the reference method was only 0.3%.

Keywords: Precision test, Spectral characteristic, On-line, At-line, Total Soluble Solids, Durian.

1. Introduction

Durian is an important fruit of Thailand. The major durian fields are located in the east and the south. In 2014, Thailand exported 17.143 million tonnes of frozen durian pulp to a value of 1,131 million baht (Office of Agricultural Economics, 2014). Durian exporters are often faced with a problem of exporting unripe durian which not having the required sweetness. This makes export market unrelieable. This problem is due to a faulty selection of unripe durians that do not have the desired sweetness after aging. At present, durian collection requires a lot of experience and expertise which are farmers. Therefore, there is a chance of error in the selection. In the export of frozen durian pulp, durian peels are completely peeled, leaving only the durian pulp that makes it easy to separate the ripeness and sweetness of durian meat, which fairly reduce the unripe problems.

The near infrared (NIR) spectroscopy technique have outstanding capabilities such as fastness, accuracy and precision, the ability to analyze data in multiple properties and multiple components Garrido, 2006) and a method for evaluating the quality of organic compounds such as total soluble solids, protein, etc. Bangwaak et al. (2014) investigated the NIR spectroscopy technique by measuring the absorption of light at the stem of durian and established the relationship with total soluble solids and evaluated the maturity of durian. The results were as follows: r = 0.93 and SEP = 1.58. Onsawai and Sirisomboon, 2015 evaluated durian total soluble solids with NIR spectroscopy which provided r^2 =0.55 and RMSEP =1.63°Brix.

Recently the NIR on-line systems was developed to be used in industry to control qualitative analysis of different types of vegetables or fruit. For example, olive fruits, Chaparro et al. (2012) studied on olive-based on-line scanning of the olive fruits using a diode array spectrometer mounted on the top of the conveyor belt to determine focal distance and integration time. The result found that the suitable focal length and integrating time were 13 mm and 5 s, respectively. The NIR Spectroscopy technique is an interesting way to assess the total soluble solids of Durian pulp online.

For the online NIR spectroscopy process, the precision test for spectral characteristic of on-line NIR spectroscopy for measuring total soluble solids of durian is important. Therefore, this study is interested in investigating precision test for spectral characteristic of on-line VIS-NIR versus at-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

line FT-NIR spectroscopy for measuring total soluble solids of durian (*Durio zibethinus* cv Monthong) by determination of repeatability and reproducibility of scanning the durian pulp on-line and at-line and determination of repeatability of reference method for total soluble solids. This will be useful for the development of on-line NIR spectroscopy protocol.

2. Materials and Methods

2.1 Samples.

The three samples of durian fruits were from an orchard in Chumphon province, Thailand. The fruits were peeled for three lopes of pulp.

2.2 Near Infrared Absorption Measurement.

For online measurement, the durian pulp was sent on the belt conveyor for scanning using AvaSpec-ULS2048 (AvaSpec-ULS2048-USB2-VA-50, AVANTES, Netherlands) in wavelength range of 350-1100 nm with absorbance measurement mode and using spectralon as reference material where one spectrum resulting from one scan on the middle of the durian lope and then take the same sample to measure the absorbance with FT-NIR Spectrometer(MPA FT-NIR, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany) where the absorption was measured at 1 point per 1 area in the wavenumber range of 12500-4000 cm^{-1} (800 - 2500 nm) at 16 cm^{-1} resolution and gold is reference material, where one spectrum resulting from an average of 32 scans.

2.3 Mearsurment of total soluble solids content of durian pulp.

The scanned area of durian pulp was measured for the total soluble solids at 3 consecutively at 1 point the value was read 3 times and then average with a pen refract meter (PEN-PRO, Measurement Range Brix 0.0 to 85.0%, ATAGO, Japan).

2.4 Repeatability, reproducibility and maximum coefficient of determination.

Repeatability of NIR scanning was determined by scanning the same sample in the same location for 10 times, then calculating the standard deviation (SD) of the absorption by selecting 3 wavelengths (970, 1440, 1900 nm) from 10 spectra and averaged.

Reproducibility of NIR scanning was determined by scanning the sample for 10 times, but it was reloaded every time, then the SD of the absorption of the 3 selected wavelengths was calculated and average.

Repeatability of reference method (Rep) is a measure of repeatability from standard measurements. This value was determined by calculating the SD value of the maximum difference in repetition of the same sample of all samples.

R^2_{MAX} is the maximum possible R^2 for testing when no error from the NIR spectrometer and has only the errors occurring from reference method of the laboratory. For laboratory accuracy, R^2_{MAX} can be calculated from the following formula.

$$R^2_{max} = \frac{SD_y^2 - Rep^2}{SD_y^2} \qquad (1)$$

where SD_y^2 is the standard deviation of the calibration set data.

3. Results and Discussion

Table 1 shows the repeatability and reproducibility of on-line scanning spectrometer was 0.0786 and 0.0831, for at-line scanning spectrometer, it was 0.0044 and 0.0110, respectively. The repeatability and reproducilbility of at-line was less than that of the on-line displayed that the scanning in at-line was more effective than the on-line but on-line system capabled to be applied in the industry for frozen durian pulp. The repeatability of reference method was 0.2 indicated the high precision of reference method. The maximum coefficient of determination (R^2_{MAX}) was 0.997. This indicated that the error from the reference method was only 0.3% and the NIR spectroscopy model could be established.

Table 1 repeatability and reproducibility of on-line and at-line scanning spectrometer and reference method and R^2_{MAX}.

Category	Scanning method		Reference method	
	Repeatability	Reproducibility	Repeatability	R^2_{MAX}
On-line	0.0786	0.0831	0.2	0.997
At-line	0.0044	0.0110		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Conclusions

The at-line scanning was more precise than the on-line spectrometer. However, the on-line method could be applied on the belt conveying system of durian pulp in factory. The maximum coefficient of determination (R^2_{MAX}) of reference method in laboratory experiment is 0.997 with an error only of 0.3% was acceptable and indicated that the NIR spectroscopy models for predicting of total soluble solids of durian pulp should be developed.

5. Acknowledgements

Thanks to Near Infrared Spectroscopy Research Center for Agricultural Product and Food (www.nirsresearch.com), the Department of Agricultural Engineering.Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

6. References

Bangwaak, J., Jittham, A., Pumprasert, J., 2014. Durian maturity evaluation using NIR Spectroscopy technique. Available at: https://docs.google.com/viewerng/-viewer?url= www. doa. go. th/ pprdo/ images / doc/ -0032.pdf. Accessed on 17 July 2017.

Chaparro, L., Baeten, V., Abbas, O., Peña-Rodriguez, F., 2012.On-line analysis of intact olive fruits by vis–NIR spectroscopy: Optimisation of the acquisition parameters. Journal of Food Engineering 112(2012), 152-157.

Garrido, A., 2006. La spectroscopie proche infrarouge: une technologie d' appui pour un service intégral en alimentation animale. In: Bertrand, D., Dufour, E. (Eds.), La Spectroscopie Infrarouge et ses Applications Analytiques, 2nd ed. TEC & DOC, Paris, France, p. 473.

Office of Agricultural Economics, 2014. Export statistics: Frozen durian. Available at: http://www.oae.go.th/-fruits/index.php. Accessed on 22 July 2017.

Onsawai, S., Sirisomboon, P., 2015. Determination of dry matter and soluble solids of durian pulp using diffuse reflectance near infrared spectroscopy. JOURNAL OF NEAR INFRARED SPECTROSCOPY 23, 167-179.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นาสกุล	นาย กฤษณะพล ลี่ไพฑูรย์
วัน-เดือน-ปีเกิด	1 มิถุนายน 2538
ที่อยู่	139/1 ม.1 ต.ท่าตะเกียบ อ.ท่าตะเกียบ จ.ฉะเชิงเทรา 24160
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี (พ.ศ.2556 - พ.ศ.2559) วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail	kritkritsanaphon@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้