

รายงานการวิจัย

การประเมินคุณภาพของผลสับปะรดด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด

Evaluation of quality in pineapple by near infrared spectroscopy

1. ผศ.ดร.สนธิสุข ชีระชัยชยุติ
2. รศ.ดร.อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล
3. นางวารุณี ชนะแพสย์

RCH
SB
375
81927
ผ.1

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....119884
วัน, เดือน, ปี 23 ส.ค. 2555

b. 12579013
i.

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะอุตสาหกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ การประเมินคุณภาพของผลสับปะรดด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรด
Evaluation of quality in pineapple by near infrared spectroscopy

แหล่งเงิน ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปี 2554 จำนวนเงิน 198,560 บาท

ระยะเวลาการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2553 ถึง กันยายน 2554

นายสนธิสุข ชีระชัยชยุติ สาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โทรศัพท์ 0866047978

บทคัดย่อ

สับปะรด (*Ananas comosus* L.) พันธุ์ปัตตาเวีย ('Pattawia' variety) เป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย อัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรด (B/A) เป็นดัชนีบอกลักษณะคุณภาพของสับปะรด ดังนั้นการตรวจสอบ B/A แบบไม่ทำลายจึงมีความต้องการต่ออุตสาหกรรมแปรรูป สับปะรด เทคนิคการดูดกลืนแสงช่วงใกล้อินฟราเรดแบบทะลุผ่านในช่วงความยาวคลื่น 665-955 นาโนเมตร ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนาย B/A โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยบางส่วนโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดหรือ partial least squares regression (PLSR) จากข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น แบบทะลุผ่านของผลสับปะรดที่ผ่านกระบวนการ pretreatment ด้วยวิธี Smoothing (Savitzky-Golay) ร่วมกับ standard normal variate transformation (SNV) และ first derivative differentiation (Savitzky-Golay) จากกลุ่มสับปะรดสำหรับการสร้างสมการ (calibration set) จำนวน 106 ตัวอย่าง และทดสอบสมการโดยกลุ่มสำหรับการทำนาย (prediction set) จำนวน 53 ตัวอย่าง ได้ผล correlation coefficient (R) เท่ากับ 0.801 และค่าของความผิดพลาดจากการทำนายหรือ Root mean square error of prediction (RMSEP) เท่ากับ 2.795 จากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่า เทคนิคการดูดกลืนแสงช่วงใกล้อินฟราเรดแบบทะลุผ่านมีศักยภาพที่จะสามารถนำไปใช้เพื่อทำนาย B/A ของผลสับปะรดแบบไม่ทำลายได้

คำสำคัญ: สับปะรด; ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด; ค่าความเป็นกรด; แสงใกล้อินฟราเรด

Abstract

Pineapple [*Ananas comosus* (L.) Merr.], 'Pattawia' variety, is one of the most important commercial fruit of Thailand. Ratio of total soluble solids and acidity (B/A) is an index of quality for pineapple. Therefore nondestructive evaluation of B/A is required for pineapple industries. Short wavelength Near Infrared (SW-NIR) spectroscopy in the range of 665-955 nm was used to establish a model for prediction of B/A by partial least squares regression (PLSR). A calibration model was obtained from transmittance absorbance spectra of 106 pineapples from calibration set with preprocessing by smoothing (Savitzky-Golay), standard normal variate transformation (SNV) and first derivative differentiation (Savitzky-Golay). 53 pineapples from prediction set were used to test a model. Results showed that correlation coefficient (R) and root mean square error of prediction (RMSEP) were 0.801 and 2.795 respectively. This study demonstrates that NIR transmittance spectroscopy is potentially a useful nondestructive method that can be used to predict B/A in intact pineapples.

Keywords: Pineapple; Total soluble solids; Acidity; Near infrared

กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ จนทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสิ้นได้ด้วยดี และต้องขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวัดค่าการดูดกลืนพลังงานแสงด้วยเครื่อง NIR Spectrometer

บทคัดย่อ

สับปะรด (*Ananas comosus* L.) พันธุ์ปัตตาเวีย ('Pattawia' variety) เป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย อัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรด (B/A) เป็นดัชนีบอกระดับคุณภาพของสับปะรด ดังนั้นการตรวจสอบ B/A แบบไม่ทำลายจึงมีความต้องการต่ออุตสาหกรรมการแปรรูป สับปะรด เทคนิคการดูดกลืนแสงช่วงใกล้อินฟราเรดแบบทะลุผ่านในช่วงความยาวคลื่น 665-955 นาโนเมตร ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนาย B/A โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยบางส่วนโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดหรือ partial least squares regression (PLSR) จากข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น แบบทะลุผ่านของผลสับปะรดที่ผ่านกระบวนการ pretreatment ด้วยวิธี Smoothing (Savitzky-Golay) ร่วมกับ standard normal variate transformation (SNV) และ first derivative differentiation (Savitzky-Golay) จากกลุ่มสับปะรดสำหรับการสร้างสมการ (calibration set) จำนวน 106 ตัวอย่าง และทดสอบสมการโดยกลุ่มสำหรับการทำนาย (prediction set) จำนวน 53 ตัวอย่าง ได้ผล correlation coefficient (R) เท่ากับ 0.801 และค่าของความผิดพลาดจากการทำนายหรือ Root mean square error of prediction (RMSEP) เท่ากับ 2.795 จากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่า เทคนิคการดูดกลืนแสงช่วงใกล้อินฟราเรดแบบทะลุผ่านมีศักยภาพที่จะสามารถนำไปใช้เพื่อทำนาย B/A ของผลสับปะรดแบบไม่ทำลายได้

คำสำคัญ: สับปะรด; ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด; ค่าความเป็นกรด; แสงใกล้อินฟราเรด

Abstract

Pineapple [*Ananas comosus* (L.) Merr.], 'Pattawia' variety, is one of the most important commercial fruit of Thailand. Ratio of total soluble solids and acidity (B/A) is an index of quality for pineapple. Therefore nondestructive evaluation of B/A is required for pineapple industries. Short wavelength Near Infrared (SW-NIR) spectroscopy in the range of 665-955 nm was used to establish a model for prediction of B/A by partial least squares regression (PLSR). A calibration model was obtained from transmittance absorbance spectra of 106 pineapples from calibration set with preprocessing by smoothing (Savitzky-Golay), standard normal variate transformation (SNV) and first derivative differentiation (Savitzky-Golay). 53 pineapples from prediction set were used to test a model. Results showed that correlation coefficient (R) and root mean square error of prediction (RMSEP) were 0.801 and 2.795 respectively. This study demonstrates that NIR transmittance spectroscopy is potentially a useful nondestructive method that can be used to predict B/A in intact pineapples.

Keywords: Pineapple; Total soluble solids; Acidity; Near infrared

สารบัญ

	หน้า
ปก.....	1
กิตติกรรมประกาศ.....	4
บทคัดย่อ.....	5
สารบัญ.....	7
สารบัญตาราง.....	9
สารบัญภาพ.....	10
บทที่ 1 บทนำ.....	11
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	11
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	12
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	13
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.1 ลักษณะทั่วไปของสับปะรด.....	14
2.2 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid).....	17
2.3 การวิเคราะห์ความเป็นกรด (Titratable Acidity).....	17
2.4 ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของแสง.....	18
2.5 หลักการพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้.....	18
2.6 เทคนิคในการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	21
2.7 การปรับแต่ง NIR Spectra ก่อนการวิเคราะห์ (Pretreatment of spectral data).....	22
2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลจาก Near Infrared Spectra.....	26
2.9 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์.....	30
3.2 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด.....	31
3.3 การวัดปริมาณค่าความเป็นกรด.....	31
3.4 การวัด NIR Spectroscopy ของสับปะรด.....	32
3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	33

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	35
4.1 ผลการวัดการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น.....	35
4.2 ผลการวัดค่า TSS และ %TA ของสับปะรด.....	37
4.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	40
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	51
บรรณานุกรม.....	52
ภาคผนวก ก.....	56

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด.....	21
3.1 แสดงสภาพของเครื่อง NIR ที่ใช้ในการวัด.....	34
4.1 ผลการวัดค่า TSS และ TA ของสับประรด.....	38
4.2 ข้อมูลตัวอย่างของสับประรดในกลุ่ม calibration และกลุ่ม prediction.....	39
4.3 เปรียบเทียบผลการสร้างสมการจากสเปกตรัมทั้งหมดและสเปกตรัมเฉลี่ย.....	41
4.4 ข้อมูลผลของการทำ pretreatments ในกลุ่ม calibration เพื่อใช้สร้างสมการ.....	46
4.5 ข้อมูลประสิทธิภาพของสมการที่ใช้ในการทำนายค่า B/A	48
ก.1 ข้อมูลของอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดสับประรด	57

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ช่วงความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	19
2.2 การกระทำกับสารในแบบต่าง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	20
2.3 ลักษณะการวัดสเปกตรัมแบบต่างๆ.....	22
2.4 ขนาด Segment และ Gap ที่กำหนดในสเปกตรัมเพื่อคำนวณ Derivative.....	24
2.5 สเปกตรัม และ Second derivative ของสเปกตรัม.....	25
2.6 NIR สเปกตรัม ที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect ก่อนการปรับแก้ด้วย MSC.....	26
2.7 NIR สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect หลังการปรับแก้ด้วย MSC.....	26
3.1 สับประรดพันธุ์ปัตตาเวีย.....	30
3.2 แสดงภาพเครื่องมือและส่วนประกอบของเครื่อง NIR ที่ใช้ในการวัด.....	32
3.3 แสดงภาพตำแหน่งในการสแกนของผลสับประรดแต่ละลูก.....	33
4.1 สับประรดที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
4.2 เครื่องมือวัดการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่าน.....	36
4.3 แสดงภาพ Teflon ball ที่ใช้เป็น Reference สำหรับการวัดการดูดกลืนพลังงานแสง.....	36
4.4 แสดงภาพผลสับประรดระหว่างการวัดการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรด.....	37
4.5 แสดงภาพการตรวจคุณภาพภายในของผลสับประรด.....	38
4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับประรดทั้งหมด.....	39
4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับประรดเฉลี่ยแต่ละผล.....	40
4.8 สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นเฉลี่ยของผลสับประรดทั้งหมด.....	41
4.9 สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงเฉลี่ยของกลุ่มสับประรดที่มี TSS แตกต่างกัน.....	42
4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงเฉลี่ยของกลุ่มสับประรดที่มี %Acidity แตกต่างกัน.....	43
4.11 สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงเฉลี่ยของกลุ่มสับประรดที่มี B/A แตกต่างกัน.....	44
4.12 สเปกตรัมเฉลี่ยที่ผ่านการ preprocessing ของสับประรดทั้งหมด.....	45
4.13 สเปกตรัมเฉลี่ยที่ผ่านการ preprocessing ของกลุ่มสับประรดที่มี B/A แตกต่างกัน.....	47
4.14 แสดงความยาวคลื่นที่มีความสำคัญที่ใช้ในการสร้างสมการ.....	49
4.15 แสดงผลการทำนายค่า B/A ในกลุ่มสับประรดที่ใช้สร้างสมการ(calibration set).....	50
4.16 แสดงผลการทำนายค่า B/A ในกลุ่มสับประรดที่ใช้ในการทำนาย (prediction set).....	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

สับปะรด (*Ananas comosus* L.) เป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย สามารถส่งออกในรูปแบบของสับปะรดสดและผลิตภัณฑ์สับปะรดแปรรูป โดยในปี พ.ศ.2551 มีปริมาณการส่งออกรวม 567,570 ตันคิดเป็นมูลค่าการส่งออกสูงถึง 17,136.2 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2552)

สับปะรดเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจำพวกไม้เนื้ออ่อนที่มีอายุหลายปี สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี ปลูกได้ในดินแทบทุกแห่งในประเทศไทย ระยะเวลาเพาะปลูกและเก็บเกี่ยว โดยปกติแล้ว สับปะรดจะทยอยออกสู่ตลาดทั้งปี จัดเป็นพืชทางเลือกที่เกษตรกรไทยสามารถหันมาปลูกได้มากขึ้น ถ้าสามารถยกระดับราคาและปริมาณความต้องการของตลาด (เกตุอร, 2541)

จากการที่ประเทศไทยสามารถปลูกสับปะรดได้เกือบตลอดปี ดังนั้นการเก็บผลสับปะรดก็สามารถทำได้เกือบตลอดทั้งปีเช่นกัน จึงเป็นผลดีต่อเกษตรกรที่จะสามารถมีรายได้ตลอดทั้งปี ถ้าผลผลิตสามารถขายได้ด้วยราคาที่เป็นธรรมและมีความต้องการจากตลาดอย่างสม่ำเสมอ

สับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียเป็นพืชส่งออกอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการแปรรูปในหลายรูปแบบ ได้แก่ สับปะรดกระป๋อง น้ำสับปะรด สับปะรดแช่แข็ง ในจำนวนผลผลิตสับปะรดที่ส่งออกทั้งหมดนั้น สับปะรดกระป๋องเป็นผลิตภัณฑ์สับปะรดที่มีสัดส่วนการส่งออกสูงที่สุดประมาณร้อยละ 70 ของการส่งออกสับปะรดทั้งหมด โดยอุตสาหกรรมสับปะรดกระป๋อง ซึ่งประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออก สับปะรดกระป๋องรายใหญ่ที่สุดของโลก ปัจจุบันโรงงานผลิตสับปะรดกระป๋องทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่รวมกันประมาณ 40 โรง

ระบบตลาดสับปะรดต่างประเทศมี 2 ลักษณะ ดังนี้

- ตลาดสับปะรดแปรรูป ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ สับปะรดกระป๋อง น้ำสับปะรด และสับปะรดอบแห้ง เป็นต้น ตลาดสำคัญได้แก่ เยอรมนี อังกฤษ สเปน เนเธอร์แลนด์ ฝรั่งเศส อิตาลี เบลเยียม สหรัฐอเมริกา และแคนาดา

- ตลาดสับปะรดผลสด ตลาดสำคัญได้แก่ สิงคโปร์ และมาเลเซีย

การที่สับปะรดไม่สามารถทำนายหรือรู้ถึงคุณภาพภายในแบบไม่ทำลายได้ ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณของแข็งละลายได้ต่อความเป็นกรดของผลสับปะรด (Ratio of total soluble solids and acidity) หรือ B/A ทำให้ไม่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค หรือไม่สามารถทำให้ผู้ซื้อ

มั่นใจได้ ดังนั้น การยกระดับราคาของผลผลิตสับปะรดจึงไม่สามารถทำได้หรือทำได้ลำบาก แต่ในทางกลับกันถ้าสามารถตรวจสอบอัตราส่วนของปริมาณของแข็งละลายได้ต่อความเป็นกรดแบบไม่ทำลายได้ จะเป็นการยกระดับคุณภาพของวัตถุดิบและสามารถกำหนดราคาขายได้อย่างเป็นธรรม เกิดความเป็นธรรมทั้งผู้ซื้อและผู้ขาย ผู้ซื้อที่มีความมั่นใจในคุณภาพ ซึ่งเท่ากับสามารถขยายตลาดให้มากขึ้นได้ อันจะเป็นประโยชน์แก่เกษตรกรของประเทศไทยในที่สุด

สำหรับในภาคอุตสาหกรรม ปัจจุบันการตรวจคุณภาพภายใน ได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณของแข็งละลายได้ต่อความเป็นกรดของสับปะรดที่ป้อนเข้าโรงงานจะทำโดยการสุ่มตรวจเพียงบางตัวอย่างจากรถบรรทุก เพื่อเป็นตัวแทนของสับปะรดทั้งหมดบนรถบรรทุกทั้งคัน ซึ่งอาจไม่เป็นธรรมแก่ทั้งเกษตรกรและ โรงงานที่รับซื้อ ถ้าตัวอย่างที่สุ่มไม่ได้เป็นตัวแทนที่แท้จริงของตัวอย่างบนรถบรรทุกทั้งคัน ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสินค้าที่ผลิตและส่งออก

นอกจากนี้ การที่โรงงานไม่สามารถรู้คุณภาพภายในของสับปะรดที่เป็นวัตถุดิบ ได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรด มีผลทำให้ไม่สามารถแบ่งกลุ่มของเนื้อสับปะรดในสายการผลิตที่ลูกค้ามักจะกำหนดความต้องการตามค่าของอัตราส่วนของปริมาณของแข็งละลายได้ต่อความเป็นกรดและกำหนดเป็นข้อมูลของสินค้าที่ต้องการ แต่ทางโรงงานทำได้เพียงแค่การสุ่มตรวจจึงยากต่อการควบคุมคุณภาพและเกิดความผิดพลาดในการกำหนดรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ที่ส่งออก อันเป็นเหตุทำให้มักจะมีปัญหาที่โรงงานส่งสินค้าคุณภาพไม่ตรงตามข้อมูลที่กำหนดตามความต้องการของลูกค้าอยู่เสมอ

ดังนั้น การตรวจสอบคุณภาพภายในของผลสับปะรดแบบไม่ทำลาย ได้แก่ การทำนายอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรด จึงมีความสำคัญและมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการพัฒนาระบบการซื้อขายวัตถุดิบที่เป็นธรรม การผลิตแปรรูปและยกระดับมาตรฐานคุณภาพสินค้าสับปะรดของประเทศไทย อันจะมีผลทำให้ สามารถยกระดับราคา และสามารถขยายตลาดได้มากขึ้น ซึ่งจะมีผลดีต่อผู้ประกอบการธุรกิจส่งออกสับปะรดสดและผลิตภัณฑ์สับปะรดแปรรูปของประเทศไทย และจะส่งผลดีต่อเกษตรกรของประเทศไทยในที่สุดนั่นเอง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อให้ได้สมการความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย

1.2.2 เพื่อให้ได้ข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับคัดแยกสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียที่มีคุณภาพแตกต่างกันแบบไม่ทำลาย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาสเปกตรัมของสับประรดพันธุ์ปัตตาเวีย โดยใช้เทคนิคการดูดกลืนพลังงานแสงในย่านความยาวคลื่นที่ใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่าน หาความสัมพันธ์ในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กับอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดของสับประรดพันธุ์ปัตตาเวีย ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดกับการดูดกลืนพลังงานแสงในย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น เพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของสับประรดพันธุ์ปัตตาเวีย และ ทำให้ได้ข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับคัดแยกคุณภาพสับประรดพันธุ์ปัตตาเวีย แบบไม่ทำลาย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้ จะทำให้เราได้ข้อมูลและความสัมพันธ์ของการดูดกลืนพลังงานแสงของ สับประรดพันธุ์ปัตตาเวีย ที่มี อัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดต่างกัน จะทำให้สามารถนำมาประยุกต์เพื่อออกแบบเครื่องมือคัดแยกผลสับประรดที่มีอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดต่างกันได้อันจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับธุรกิจการส่งออกสับประรดสด และสับประรดแปรรูปต่างๆของประเทศไทย ตลอดจนการจำหน่ายผลผลิตสับประรดแก่ผู้บริโภคในประเทศไทยด้วยเช่นกัน ผลจากงานวิจัย จะได้ข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการ ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ และ /หรือ สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการ ออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับคัดแยกสับประรดที่มีอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดต่างกัน โดยที่หากผลงานเป็นไปตามที่คาดหมาย ประเทศไทยอันได้แก่ เกษตรกร ผู้บริโภค ผู้ประกอบการสับประรดสด และ อุตสาหกรรมการ แปรรูปสับประรดที่ส่งออกและจำหน่ายภายในประเทศโดยรวม จะได้รับประโยชน์จากโครงการ เนื่องจากจะทำให้การส่งออก สับประรดไปยังตลาดต่างประเทศมี คุณภาพที่ดี และได้รับการยอมรับมากยิ่งขึ้น ช่วยให้เราค้าส่งออกปรับตัวไปในทางที่ดีขึ้น ลดความเสี่ยงที่จะถูกส่งคืน หรือถูกตัดราคา ก่อให้เกิดการยกระดับอุตสาหกรรมเกษตร เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจสอบคุณภาพผลไม้ในประเทศไทย กล่าวได้ว่าผลการวิจัย จะสามารถ พัฒนาและแก้ปัญหาให้แก่ธุรกิจการส่งออกสับประรดของประเทศไทย จะสามารถถ่ายทอดความรู้ในการผลิตเครื่องแยก สับประรดพันธุ์ปัตตาเวียที่มีอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดต่างกันสู่ภาคธุรกิจเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้จะเป็นองค์ความรู้ในการวิจัยพัฒนาได้ต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สับปะรดจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย เจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อน ทนแล้ง พันธุ์ที่นิยมปลูกกันมาก คือ พันธุ์ปัตตาเวีย ปลูกมาบริเวณ ภาคใต้และภาคตะวันออก เป็นที่ต้องการของโรงงานสับปะรด ประเทศไทยส่งออกสับปะรดได้มากเป็นอันดับหนึ่งของโลก ทำรายได้เข้าสู่ประเทศปีละหลายพันล้านบาท (จินคาร์ สุ, 2541) จากสถิติในปี 25 52 พบว่าประเทศไทยส่งออกสับปะรดในรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆมีปริมาณสูงถึง 0.16 ล้านตัน

2.1 ลักษณะทั่วไปของสับปะรด

สับปะรดเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อน การปลูกเป็นการค้าพบกระจายอยู่ทั่วไปในบริเวณระหว่างเส้นรุ้งที่ 30 องศาเหนือ ถึง 30 องศาใต้ แห่ลง ปลูกสับปะรดที่สำคัญของโลกได้แก่ สหภาพแอฟริกาใต้ ไ오วอร์โคสต์ เคนยา เม็กซิโก สหรัฐอเมริกา (ฮาวาย) ออสเตรเลีย ใต้หวัน (ควีนแลนด์) ฟิลิปปินส์ มาเลเซีย อินโดนีเซีย และประเทศไทย เนื่องจากสับปะรดเป็นพืชที่ไม่สามารถทนทานต่อสภาพอุณหภูมิต่ำจนถึงจุดน้ำค้างแข็ง (frost) ได้ พื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมเหมาะสมต่อการปลูกจึงมักจะเป็นบริเวณใกล้ชายทะเล ซึ่งมีระดับอุณหภูมิและความชื้นไม่แปรปรวนมากนัก คือ ไม่ร้อนจัด หนาวจัด หรือมีความชื้นสูงและความชื้นต่ำ แตกต่างกันอย่างมากเหมือนบริเวณที่อยู่ลึกเข้าไปในทวีป (Bartholomew and Kadzimin, 1996)

พันธุ์สับปะรดที่นิยมปลูกกันมากคือพันธุ์ปัตตาเวีย เพราะมีคุณสมบัติเหมาะสมทั้งในการใช้บริโภคผลสด และใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตสับปะรดกระป๋อง การปลูกในแต่ละท้องถิ่น อาจมีการคัดเลือกสายพันธุ์ (clonal selection) ของพันธุ์ปัตตาเวียนี้ไว้ตามลักษณะที่ต้องการ และตั้งเป็นสายพันธุ์ต่างๆกันออกไป ส่วนพันธุ์อื่นๆ นอกเหนือไปจากนี้ ก็มีการปลูกกันอยู่บ้างในบางประเทศหรือบางท้องถิ่น แต่มีปริมาณน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์ปัตตาเวีย

ผลผลิตส่วนใหญ่จะแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์สับปะรดกระป๋องชนิดต่างๆ เช่น สับปะรดแว่น (slice) สับปะรดชิ้นยาว (spear) สับปะรดชิ้นใหญ่ (chunk) สับปะรดชิ้นลิ้ม (tidbits) สับปะรดลูกเต๋า (cube หรือ dice) และน้ำสับปะรด (pineapple juice) เป็นต้น ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ส่วนใหญ่ถูกส่งออกไปจำหน่ายในตลาดโลกประเทศผู้ผลิตสับปะรดที่สำคัญเหล่านี้ บางประเทศจะทำการผลิตและแปรรูปเพื่อใช้บริโภคภายในประเทศหรือบางประเทศจะผลิตเพื่อส่งเป็นสินค้าออกจำหน่ายในตลาดโลกในสัดส่วนที่แตกต่าง

กัน ประเทศที่ผลิตได้ในปริมาณค่อนข้างสูงแต่ใช้บริโภคภายในประเทศเป็นส่วนมากได้แก่ สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย เป็นต้น

2.1.1 พฤกษศาสตร์ของสับปะรด

สับปะรด (*Ananas comosus* (L) Merr.) เป็นพืชในวงศ์ Bromeliaceae แหล่งกำเนิดอยู่ในเขตร้อนของทวีปอเมริกา เมื่อนักเดินเรือชาวตะวันตกไปพบทวีปอเมริกานั้น ได้มีสับปะรดขึ้นแพร่หลายอยู่ทั่วไปในบริเวณนี้แล้ว เชื่อว่าชาวพื้นเมืองที่อยู่ในทวีปอเมริกาได้ทำการเพาะปลูกสับปะรดกันมาเป็นเวลานานแล้ว แหล่งที่เป็นศูนย์กลางความหลากหลายทางพันธุกรรมของสับปะรดมีสองบริเวณคือ บริเวณลุ่มแม่น้ำอะเมซอนระหว่างตอนใต้ของเวเนซุเอลาและตอนเหนือของบราซิลและบริเวณตะวันออกเฉียงใต้ของบราซิล ปารากวัย และตอนเหนือของอาร์เจนตินา (Collins, 1968) แต่แหล่งที่มาของพันธุ์ปัตตาเวีย (Smooth Cayenne) ซึ่งเป็นพันธุ์ที่ปลูกกันแพร่หลายมากที่สุดเชื่อว่าเป็นบริเวณลุ่มแม่น้ำอะเมซอน

พืชในวงศ์ Bromeliaceae นี้แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้สองกลุ่มตามลักษณะถิ่นที่อยู่หรือนิเวศวิทยา คือ 1. พืชที่ขึ้นอยู่บนดินทั่วไป (terrestrial plant) 2. พืชอิงอาศัย (epiphytes)

2.1.2 พันธุ์สับปะรด

พันธุ์สับปะรดที่ใช้ปลูกเป็นการค้าโดยทั่วไปอาจแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่ม ตามรูปร่างลักษณะของใบและผล คือ Cayenne, Queen, Pernambuco, Spanish และ Mordilond ใน 5 กลุ่มนี้ 3 กลุ่มแรกคือ Cayenne, Queen และ Pernambuco จะมีความแตกต่างกันในด้านรูปร่างลักษณะค่อนข้างชัดเจนและมีพื้นฐานทางพันธุกรรมที่สม่ำเสมอว่ากลุ่ม Spanish และ Mordilond ซึ่งยังมีความแปรปรวนภายในกลุ่มอยู่มาก สำหรับพันธุ์สับปะรดที่ปลูกอยู่ในประเทศไทยจะพบเพียง 3 กลุ่มคือ

2.1.2.1 กลุ่ม Cayenne เป็นกลุ่มที่นิยมปลูกมากที่สุด ทั้งเพื่อใช้บริโภคผลสดและใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมสับปะรดกระป๋อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งพันธุ์ Smooth Cayenne หรือปัตตาเวียซึ่งมีลักษณะขอบใบเรียวมีหนามเพียงเล็กน้อยที่ส่วนปลายใบ ลักษณะของต้นเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่ทรงพุ่มจะสูงประมาณ 100 เซนติเมตร มีจำนวนใบประมาณ 80 ใบ ใบมีสีเขียวเข้มด้านบนเป็นมันและมักมีเหลืองสีแดงในฤดูที่มีแสงแดดจัด ด้านล่างของใบมีไทรโคห์มซึ่งมีลักษณะเป็นขนสีเทาเงินปกคลุมอยู่ทั่วไปใบที่ยาวที่สุด (D-leaf) มีความยาว 80-100 เซนติเมตรและกว้าง 4-5 เซนติเมตร ช่อดอกจะมีดอกย่อยประมาณ 150 ดอกแต่ละดอกจะเปลี่ยนแปลงไปได้มากตามสภาพความสมบูรณ์ของต้นและสิ่งแวดล้อม ผลมีขนาดประมาณ 1.0-2.5 กิโลกรัมรูปร่างค่อนข้างเป็นทรงกระบอก แต่ถ้าผลมีขนาดใหญ่มักจะมีส่วนปลายผลเรียวเล็กกว่าส่วนโคน (conical shape) เมื่อใกล้เก็บเกี่ยวเปลือกผลจะมีสีเขียวเข้ม และเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อผลสุก ผลย่อยหรือตา (eye) ค่อนข้างแบนเรียบ กลีบรองดอก (fruitlet

subtending bract) ต้น หลังจากเก็บเกี่ยวผลไปแล้วจะสร้างหน่อได้ 1-3 หน่อ ลักษณะประจำพันธุ์ดั้งเดิม จะมีตะเกียง 1-2 ตะเกียงแต่ในสภาพแวดล้อมของ ประเทศไทย มักไม่สร้างตะเกียง เนื้อมีสีเหลืองมีเยื่อใย (fiber) ปานกลาง มีปริมาณกรดและน้ำตาล ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ สับปะรด ในกลุ่มอื่น โดยเฉลี่ยมีปริมาณกรด 0.3-0.7% และปริมาณน้ำตาล 12-16 บริกซ์

2.1.2.2 กลุ่ม Queen สับปะรดในกลุ่มนี้มีขนาดของต้นและผลเล็กกว่ากลุ่มแรกเล็กน้อย ใบมีสีเขียวอ่อนมีแถบสีชมพูบริเวณกลางใบ ขอบใบมีหนามเรียงชิดติดกันตลอดความยาวของใบ ผลมีขนาดประมาณ 1.0 กิโลกรัม รูปร่างแบบทรงกระบอก ตาค่อนข้างนูนเปลือกหนา เมื่อสุกเปลือกผลจะมีสีเหลืองเนื้อข้างในมีสีเหลืองเข้มรสหวานกรอบมีเยื่อใยน้อยและมีกลิ่นหอม แกนผลอ่อนนุ่มกว่าพันธุ์ปัตตาเวีย สร้างตะเกียงน้อยแต่สร้างหน่อได้มากทั้งหน่อดินและหน่ออากาศ

2.1.2.3 กลุ่ม Spanish สับปะรดในกลุ่มนี้มีขนาดของต้นและผลอยู่ระหว่างกลางของ Cayenne กับ Queen ใบบางกว่าพันธุ์ปัตตาเวีย ขอบใบมีหนามแหลมรูปโคงจอ ผลมีรูปร่างกลมน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 1.0-1.5 กิโลกรัม ตาขนาดของตาใหญ่กว่าพวก Cayenne เนื้อข้างในมีสีเหลืองจาง และมีปริมาณเยื่อใยสูง แกนผลเหนียว กลิ่นและรสแตกต่างออกไปจากสองกลุ่มแรก

สำหรับสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียเป็นที่รู้จักแพร่หลายในนามสับปะรดศรีราชา และชื่ออื่นๆ เช่น ปรานบุรี, สามร้อยยอด ปลุกกันมากเพื่อโรงงานอุตสาหกรรม แหล่งปลูกที่สำคัญคือ ประจวบคีรีขันธ์ ชลบุรี เพชรบุรี ลำปาง และการปลูกกันทั่ว ๆ ไป เพื่อขายผลสด เพราะมีรสหวานฉ่ำมีน้ำมาก ลักษณะทั่ว ๆ ไป คือ มีใบสีเขียวเข้ม และเป็นร่องตรงกลางผิวใบด้านบนเป็นมันเงา ส่วนใต้ใบจะมีสีออกเทาเงิน ตรงบริเวณกลางใบมักมีสีแดงอมน้ำตาล ขอบใบเรียบมีหนามเล็กน้อยบริเวณปลายใบ กลีบดอกสีม่วงอมน้ำเงิน ผลมีขนาดและรูปร่างต่างกันไป มีน้ำหนักผลอยู่ระหว่าง 2-6 กิโลกรัม แต่โดยปกติทั่วไปประมาณ 2.5 กิโลกรัม เปลือกผลเมื่อดิบสีเขียวคล้ำ เมื่อแก่จัดจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอมส้มทางด้านล่างของผลประมาณครึ่งผล ก้านผลสั้นมีใ้ใหญ่เนื้อเหลืองอ่อนแต่จะเปลี่ยนเป็นสีเข้มในฤดูร้อน รสชาติดี แต่ที่สับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียให้ผลชุกที่สุดมี 2 ช่วง คือ ช่วงสับปะรดปี (summer peak) ซึ่งจะเก็บผลได้มากกว่าสับปะรดทะวายประมาณ 3 เท่า ช่วงนี้จะอยู่ระหว่างเดือนเมษายนถึงมิถุนายน และช่วงสับปะรดทะวาย (winter peak) ซึ่งจะออกในเดือนตุลาคมถึงธันวาคม การสังเกตผลแก่ของสับปะรด พิจารณาได้จากลักษณะภายนอกผล (เกตุอร, 2541) ดังนี้

- ผิวเปลือก จะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นเขียวอมเหลืองอมส้ม หรือเขียวเข้มเป็นมัน
- ใบเล็ก ๆ ของตาย่อย จะเหี่ยวแห้ง เป็นสีน้ำตาลหรือชมพู
- ตาย่อย จะนูนเด่นชัดเรียกว่าตาเต็ม ร่องตาจะตื้นเต็มทีขนาดของผลไม่เพิ่มขึ้นอีก

-ดมกลิ่น ผลสับปะรดแก่จะส่งกลิ่นหอมเฉพาะตัว

-ความแน่นของผล จะลดลงเมื่อใช้นิ้วดีดหรือไม้เคาะเพื่อฟังเสียง ถ้าเสียงโปร่งแสดงว่ายังไม่แก่ ถ้าเสียงทึบ (หรือแปะ) แสดงว่าแก่จัดได้ที่แล้ว

อัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดของสับปะรด จะเป็นตัวกำหนดรสชาติที่ต้องการของผู้บริโภค ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามรสนิยม นอกจากนี้ยังอาจสามารถใช้เป็นตัวพิจารณาบ่งบอกถึงความสุกแก่ของสับปะรดได้เช่นกัน

2.2 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solids หรือ TSS)

Refractometers หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการหักเหของแสง เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งสู่อีกตัวกลางหนึ่ง เช่น จากอากาศสู่น้ำ จากน้ำสู่คริสตัล (crystal) โดยการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดความต่างของตัวแปรที่มีผล เช่น มุม ความเร็ว หรือดัชนีหักเหของแสงของตัวกลาง เป็นต้น ค่าของ Brix (%) จะแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในสารละลายน้ำ (water solution) ปริมาณของแข็งที่สามารถละลายได้ทั้งหมด (total soluble solids) คือผลรวมของของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมด เช่น น้ำตาล กลีโค โปรตีน กรด เป็นต้น และค่าที่อ่านได้จะออกมาในรูปแบบผลรวมของปริมาณของแข็งทั้งหมด โดยพื้นฐานแล้ว Brix (%) จะทำการสอบเทียบ (calibration) กับสารละลายน้ำตาลอ้อย (cane sugar solution) 100 กรัม ดังนั้นเมื่อมีการวัดสารละลายน้ำตาล ค่า Brix (%) ที่ได้จะเป็นความเข้มข้นของน้ำตาลที่แท้จริง สำหรับสารละลายอื่นๆ ที่มีหลายองค์ประกอบ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเทียบกลับเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่แท้จริง

ผลไม้ เมื่อวัดความเข้มข้นของน้ำตาลในผลไม้ โดย Refractometer จะนำไปใช้ประโยชน์ดังนี้

- ใช้กำหนดเวลาในการเก็บเกี่ยวได้อย่างถูกต้อง
- ใช้แยกกลุ่มและแบ่งเกรดของผลไม้ก่อนการขนส่งต่อไป
- ใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลเป็นดัชนีชี้ค่าสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และสถานะของการเจริญเติบโต

2.3 การวิเคราะห์ความเป็นกรด (Titratable Acidity หรือ TA)

ในปัจจุบันการวิเคราะห์ทางปริมาณของสารต่างๆ มีวิธีวิเคราะห์ได้หลากหลายวิธี ซึ่งวิธีการไตเตรทก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในห้องปฏิบัติการตามโรงงานต่างๆ เพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพสินค้า และเพื่อทำการวิจัยผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ด้วยการไตเตรท (Titrimetric method) หลักการของการไตเตรทจะเป็นการวิเคราะห์ปริมาณของสาร โดยอาศัยปฏิกิริยา

ทางเคมีระหว่างสารที่รู้ค่าความเข้มข้นที่แน่นอน ซึ่งเราจะเรียกว่า Titrant เติมลงในสารตัวอย่าง โดยใช้สารเคมีที่เรียกว่า ตัวบ่งชี้ (indicator) เพื่อบ่งบอกว่าถึงจุดยุติ เช่น Phenolphthalein จุดยุติเป็นสีชมพู เป็นต้น จากนั้นนำปริมาตร และความเข้มข้นของ titrant มาคำนวณหาปริมาณสารที่ต้องการ เช่น การหาปริมาณกรด โดยทำการไตเตรทกับด่าง เป็นต้น

2.4 ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของแสง

2.4.1 ปัจจัยในการมองเห็นสีประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วนดังนี้

2.4.1.1 แหล่งกำเนิดแสง (Light source) มี 2 ชนิด แหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ และ แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์

2.4.1.2 วัตถุมีสี (Colored object) เมื่อแสงตกกระทบลงบนวัตถุ จะมีปรากฏการณ์ที่อาจเกิดขึ้นได้หลายกรณี

2.4.1.2.1 การสะท้อน (Reflection) เป็นปรากฏการณ์ซึ่งเกิดขึ้นตรงบริเวณพื้นผิวของวัตถุที่มีความมันเงา

2.4.1.2.2 การส่องผ่าน (Transmission) เป็นปรากฏการณ์ที่แสงส่องทะลุผ่านวัตถุโปร่งแสงโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง

2.4.1.2.3 การดูดกลืนแสง (Absorption) วัตถุจะดูดกลืนแสงส่วนหนึ่งไว้ แล้วปล่อยแถบความยาวคลื่นที่เหลือออกมาจะทำให้วัตถุเกิดสีขึ้น โดยสีที่ปรากฏอยู่บนวัตถุนั้นก็คือสเปกตรัมที่ปล่อยออกมา แต่ถ้าวัตถุนั้นมีสีดำก็แสดงว่าแสงได้ถูกดูดกลืนไว้ทั้งหมด

2.4.1.2.4 การกระเจิง (Scattering) การกระเจิงเกิดขึ้นเพียงบางส่วนวัตถุนั้นจะมีสมบัติโปร่งแสง แต่ถ้าแสงทั้งหมดเกิดการกระเจิง วัตถุนั้นจะมีสมบัติทึบแสง

2.4.1.3 ผู้สังเกตการณ์ (Observer) มนุษย์สามารถมองเห็นสีได้เนื่องจาก ในลูกตาของมนุษย์มีเซลล์ที่ไวต่อแสงอยู่บนเรตินา ได้แก่ 桿 (rod) และ โคน (cone) ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณแสงที่สะท้อนมาจากวัตถุให้สีแล้วส่งไปยังสมองเพื่อทำการวิเคราะห์ และประมวลผลออกมาเป็นภาพ

2.5 หลักการพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้

แสงย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น (Near-Infrared Spectroscopy) เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ พิสูจน์ และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร ซึ่งอาจอยู่ในสถานะของแข็งหรือของเหลวก็ได้ โดยดูจากการเกิดการสั่น (vibration) ของโมเลกุล และการดูดกลืนรังสี near-Infrared ของสาร พลังงานบางส่วนถูกถ่ายทอดไปยังโมเลกุลทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลแล้วเกิดการกระเจิงออกไป การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับ Infrared นี้ได้ดำเนินมาเป็นเวลานานแล้ว ตั้งแต่ปี

ค.ศ. 1800 Sir William Herschel ได้ศึกษาเกี่ยวกับ heating effect ในช่วงต่างๆของสเปกตรัมและพบว่า heating effect มีมากที่สุดแถบสเปกตรัมที่เลยสีแดง (red end) ไปแล้วและในช่วงปลายของศตวรรษที่ 19 ได้เริ่มมีการศึกษา Infrared Spectrum แล้ว ในปี ค.ศ. 1910 Coblentz ได้ศึกษาการดูดกลืนแสง Infrared Spectrum ของสารต่างๆและได้สร้างความสัมพันธ์ Infrared Spectrum กับโครงสร้างของสารขึ้น ซึ่งยังคงใช้อยู่จนถึงปัจจุบัน และในปี ค.ศ. 1939-1945 ได้มีการศึกษาและนำไปใช้ประโยชน์ของ Infrared Spectrum อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ของผสมพวกไฮโดรคาร์บอนและสารในกลุ่มใกล้เคียงกันได้ดี จึงมีผู้วิจัยด้านนี้มากขึ้น ทั้งเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์และเครื่องวัดที่มีสภาพไวสูง จนกระทั่งสร้างเครื่องมือทั้งชนิดลำแสงเดี่ยวและลำแสงคู่ขึ้นมาใช้ในการศึกษา เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณในอุตสาหกรรม

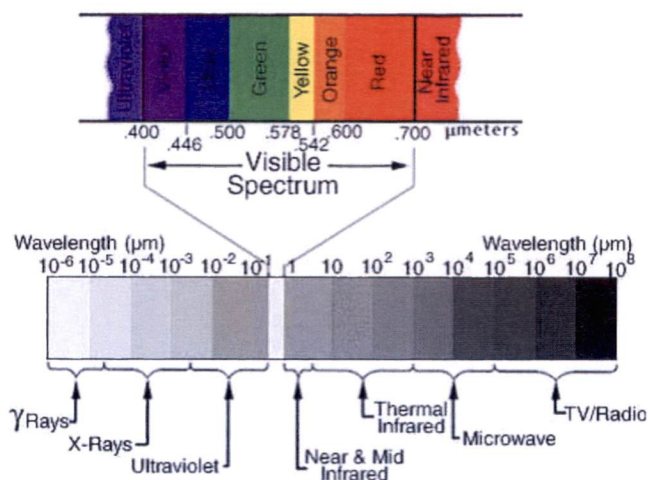
พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แปรโดยตรงกับความถี่ แต่แปรผกผันกับความยาวคลื่น ถ้าพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากความถี่มาก จะมีความยาวคลื่นสั้น(นิพนธ์, 2545) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งช่วงออกตาม ความยาวคลื่น ความถี่ และพลังงานของคลื่น ดังภาพที่ 2.2

$$E \propto \nu \propto 1/\lambda$$

E = พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

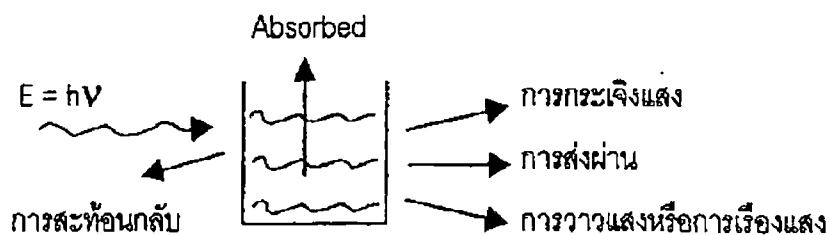
ν = ค่าความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

λ = ค่าความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่ 2.1 ช่วงความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

หลักการของสเปกโทรสโคปี คือ เมื่อลำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ผ่านเข้าไปยังสารละลาย หรือวัตถุ จะมีแสงบางส่วนที่จะถูกดูดกลืน (absorbed) บางส่วนผ่านทะลุออกไป (transmitted) บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ (reflected) บางส่วนเกิดการวาวแสงหรือการเรืองแสง (fluorescence or phosphorescence) และบางส่วนอาจเกิดการกระเจิงแสง (scattered) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2.2 การกระทำกับสารในแบบต่าง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สเปกโทรสโคปีของอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy: NIRS) เป็นคลื่นแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 785 - 2650 นาโนเมตร โดยมีหลักการดังนี้ คือ เมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ แล้วสารเกิดการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง near infrared ทำให้โมเลกุลของสารเกิดการสั่นที่มีความถี่สูง ในการสั่นของพันธะต่างๆ จะเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละพันธะ รวมทั้งตำแหน่งของโมเลกุลและช่วงการดูดกลืนแสงก็เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชันด้วย ดังนั้นเมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตรงกับพันธะในโมเลกุลก็จะเกิดการสั่นและดูดกลืนรังสีไว้ ทำให้มีพลังงานมากกว่าปกติ จากเดิมที่โมเลกุลอยู่ในสถานะพื้น (ground vibration level) เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited vibration level) อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลกลับสู่สถานะพื้นก็จะปล่อยพลังงานที่รับเพิ่มเข้าไปออกมาในรูปพลังงานความร้อน ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสง (Absorbance, A) เป็นไปตามกฎของเบียร์ – แลมเบิร์ต (Beer-Lambert) พลังงานของ

คลื่นแสงเมื่อผ่านเข้าไปในตัวอย่าง พลังงานจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง ความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีนั้น (Osborne *et al.*, 1993) สารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้จะมี H - atom เป็นองค์ประกอบ เช่น O-H พบในแป้ง น้ำน้ำตาล N-H พบในโปรตีน C-H พบในน้ำมัน

การดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดของโมเลกุลสารอินทรีย์ ช่วงคลื่นอินฟราเรดสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 3 ช่วง ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด

ช่วงคลื่น	Wavelength (nm)	Wavenumber (cm ⁻¹)
Region I (Short wavelength NIR)	800-1,200	12,500 – 8,500
Region II (mid IR or fundamental IR)	1,200 – 1,800	8,500 – 5,500
Region III (far IR)	1,800 -2,500	5,500 – 1,000

ในทางปฏิบัติปริมาณความเข้มข้นของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่แสงส่องผ่าน จึงต้องรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกันเรียกว่า กฎของเบียร์ – แลมเบิร์ต เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

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

เนื่องจาก T (Transmittance) คือ

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

ดังนั้น

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

เมื่อ I = ความเข้มของแสงความยาวคลื่นเดียว

ϵ = สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง ปกติเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นและ

อุณหภูมิ

I_0 = ความเข้มของแสงก่อนผ่านตัวกลาง เมื่อ $b = 0$

b = ความหนาของตัวกลางในหน่วยเซนติเมตร

c = ความเข้มข้นของสารในหน่วย โมล/ลิตร

A = ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

2.6 เทคนิคในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

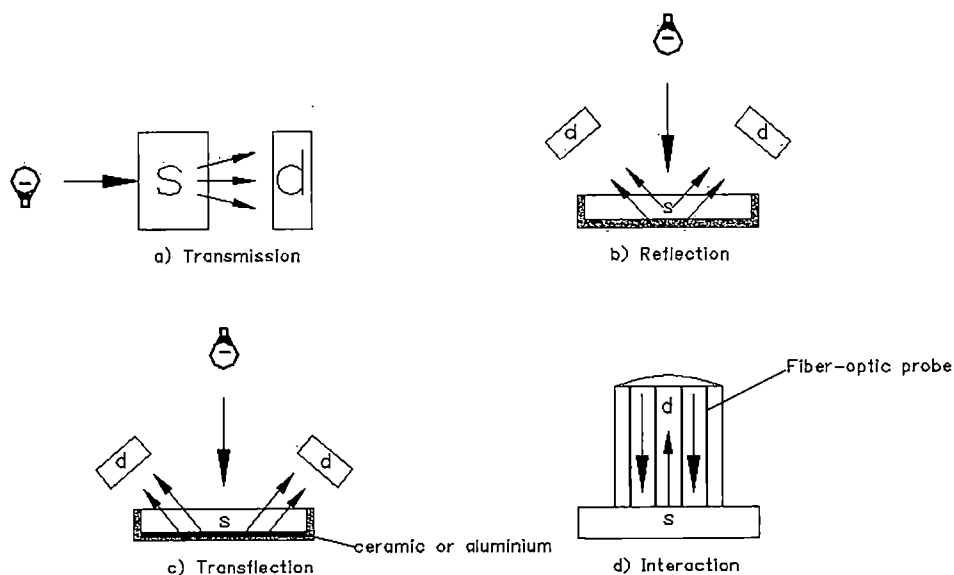
การจัดลักษณะการวางตัวอย่างเพื่อให้ได้สเปกตรัมที่สัมพันธ์กับปริมาณค่าทางเคมีที่สนใจ โดยใช้เทคนิค NIR ได้แก่ (สุมาพร, 2545)

2.6.1 Transmission เป็นการวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมาในด้านตรงกันข้ามกับด้านที่แสงตกกระทบบ ดังภาพที่ 3a

2.6.2 Reflection แสงตกกระทบบที่พื้นผิวของตัวอย่าง แล้วจึงวัดปริมาณแสงที่สะท้อนออกมา โดยรวมถึงแสงที่สะท้อนจากเนื้อตัวอย่างส่วนที่ใกล้ผิวตัวอย่างได้อีกด้วย ดังภาพที่ 3b

2.6.3 Transflection แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบบตัวอย่าง ผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบบแผ่นเซรามิก ทอง หรืออะลูมิเนียมในชั้นใต้สุด แล้วสะท้อนกลับมายัง detector ดังภาพที่ 3c

2.6.4 Interaction ใช้ในกรณี fiber optics probe แสงจากแหล่งกำเนิดแสงย่าน NIR ส่องผ่านลงมายังตัวอย่างในวงแหวนด้านนอกมาตกกระทบบตัวอย่าง แล้วแสงที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างถูกส่งไปยัง detector บริเวณส่วนกลาง fiber optics probe ดังภาพที่ 3d



ภาพที่ 2.3 ลักษณะการวัดสเปกตรัมแบบต่างๆ

2.7 การปรับแต่ง NIR Spectra ก่อนการวิเคราะห์ (Pretreatment of spectral data)

สัญญาณสเปกตรัมที่วัดได้ บางครั้งจะมีสัญญาณรบกวนแทรกเข้ามา ซึ่งอาจเกิดจาก สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียง หรือสาเหตุอื่นๆ ส่งผลให้ สเปกตรัมไม่เรียบ ซึ่งจำเป็นจะต้องปรับแต่งให้เรียบก่อนการวิเคราะห์

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสเปกตรัมอื่นๆ ได้แก่ ขนาดของอนุภาคและความชื้น ซึ่งทำให้สเปกตรัมที่ได้มีความแตกต่างกัน เนื่องมาจากการกระเจิงแสง และความแตกต่างที่เป็นผลมาจากความเข้มข้นของ

องค์ประกอบที่ต้องการวัด ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความแตกต่างในผลเชิงบวก(Additive scattering) ทำให้สเปกตรัมเพิ่มขึ้น ตามตลอดช่วงความยาวคลื่น หรือผลเชิงคูณ (Multiplicative scattering) สเปกตรัมเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นสูงขึ้น

นอกจากนี้สเปกตรัมที่ได้จากการดูดกลืนแสง ในย่านใกล้อินฟราเรด เป็นสเปกตรัมที่มีการเหลื่อมซ้อนทับกันอยู่ (Overlapping band) ดังนั้น ในการวิเคราะห์จึงควรนำไปปรับแต่งด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ก่อน เพื่อให้สเปกตรัม มีความเด่นชัดมากขึ้น และลดความคลาดเคลื่อนให้เหลือน้อยที่สุด วิธีการที่นิยมใช้มี 2 วิธี คือ (อนุพันธ์, 2545)

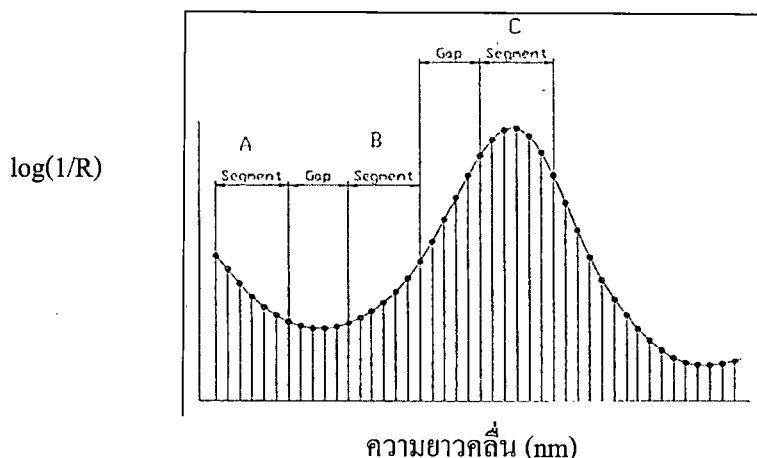
2.7.1 Derivative transformation

2.7.1.1 First derivative การคำนวณ Derivative หรือ ความชันของสเปกตรัม สามารถทำได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{First derivative} &= \text{Slope} \\ &= B - A\end{aligned}$$

โดยที่ A และ B คือ ค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของ Segments ที่มีช่วงเท่ากัน และอยู่ติดกัน

ในการคำนวณต้องกำหนดขนาดของ Segment และ Gap ก่อน ซึ่งขนาด Segment คือ ขนาดของความยาวคลื่นที่เราทำการเฉลี่ย ให้ได้ค่าใหม่เพื่อเป็นตัวแทนขึ้นมาหนึ่งจุด แล้วทำการข้ามช่วงความยาวคลื่นไปเท่ากับขนาดของ Gap เพื่อเริ่มนับเป็นจุดแรกในการคำนวณ Segment ต่อไป ตัวอย่างดังในภาพที่ 4 เป็นสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นที่แต่ละจุดห่างกัน 2 นาโนเมตร มีขนาด Segment และ Gap เท่ากับ 12 และ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยที่ จุด A คือ จุดที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยในช่วงความยาวคลื่น 12 นาโนเมตร (ขนาด Segment) จากนั้นข้ามไป 10 นาโนเมตร (ขนาด Gap) แล้วจึงเฉลี่ยอีกครั้งในช่วงความยาวคลื่น 12 นาโนเมตร เพื่อให้เป็นจุด B แล้วนำค่า A ลบจากค่า B ผลที่ได้นำไปแทนค่าสเปกตรัมที่จุดเริ่มต้นของ Segment แรก ซึ่งการคำนวณจะกระทำทุก Segment ต่อเนื่องกันไปจนตลอดความยาวคลื่น ต่อจากนั้นก็ขยับ Segment ไปทางขวา 1 จุด หรือ 2 นาโนเมตร แล้วคำนวณซ้ำเหมือนที่กล่าวมาจนเสร็จสิ้น



ภาพที่ 2.4 ขนาด Segment และ Gap ที่กำหนดในสเปกตรัมเพื่อคำนวณ Derivative

First derivative ใช้ได้ผลกับตัวอย่างที่มีเนื้อสม่ำเสมอ และมีการกระจายของอนุภาคสม่ำเสมอทั่วถึง นอกจากนั้นแล้ว First derivative ของสเปกตรัมจะช่วยแก้ปัญหา ที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น

2.7.1.2 Second derivative คือ การคำนวณผลลบของ ค่าที่ได้จาก First derivative ที่ติดกันนั่นเอง หรือเป็นที่รู้จักกันว่าเป็นการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัม มาจากสูตรดังนี้

$$\frac{d^2 \log(1/R)}{d\lambda^2}$$

เขียนแทนด้วย

$$d^2 \log(1/R)$$

สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{Second derivative} = \text{change in slope}$$

$$= \text{First derivative แรก} - \text{First derivative ถัดมา}$$

$$= (C - B) - (B - A)$$

$$= C - 2B + A$$

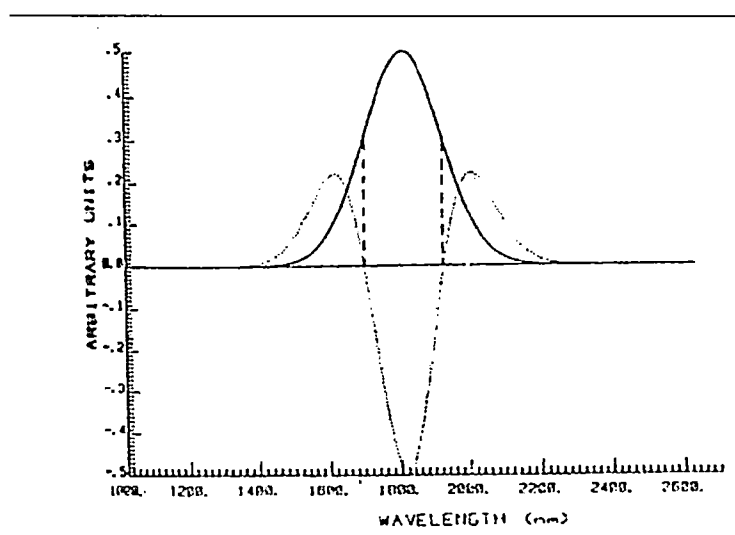
โดยที่ A, B และ C เป็นค่าเฉลี่ยสเปกตรัมของ Segments ที่ติดกัน และมีช่วงเท่ากัน

การคำนวณคล้ายกับ First derivative โดยในการคำนวณค่า Second derivative ของจุดแรก ต้องหาค่า C ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมในช่วงที่สาม หรือ C ในภาพที่ 4 แล้วคำนวณผลลบของค่าเฉลี่ยใน Segment แรก และ Segment ที่สอง ซึ่งก็คือ B-A แล้วคำนวณผลลบของค่าเฉลี่ยใน Segment ที่สอง และ Segment ที่สาม ซึ่งก็คือ C-B แล้วนำผลลบค่าแรกมาลบออกจากผลลบค่าที่สอง ตามสมการ ค่าผลลบสุดท้ายที่ได้นำไปแทนค่าสเปกตรัมที่จุดแรกของ Segment แรก และคำนวณผลลบตามสมการ ไปจน

ครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ต่อจากนั้นจึงเลื่อนไปทางขวา ยาว 1 จุด หรือ 2 นาโนเมตร แล้วทำการหา
 ฐานสี่จสมบูรณ์

การใช้ Second derivative จะช่วยลดผลกระทบจากการกระเจิงแสง ทั้งที่เป็นผลเชิงบวกที่ทำให้
 ขนาดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น และผลเชิงลบที่ทำให้ขนาดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นตาม
 ความยาวคลื่น Second derivative ใช้ได้ผลดีกับตัวอย่างที่มีขนาดอนุภาคต่างๆผสมผสานกันอยู่

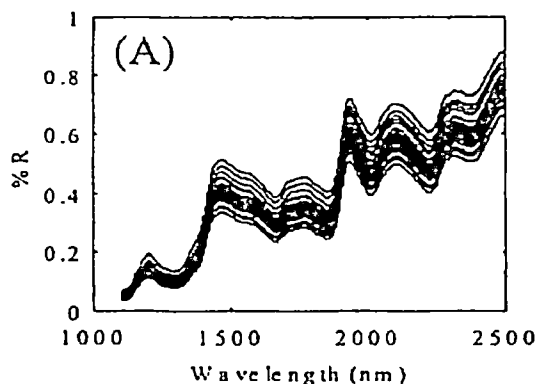
First derivative ให้ความหมายเป็นค่าความยาวคลื่นของแต่ละความยาวคลื่น ซึ่งทำให้แปล
 ความหมายยากกว่า Second derivative ซึ่งได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจาก Second derivative จะให้
 จุดยอดตรงกับจุดยอดของสเปกตรัมเดิม แม้ว่าจะกลับหัว ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 2.5 สเปกตรัม และ Second derivative ของสเปกตรัม

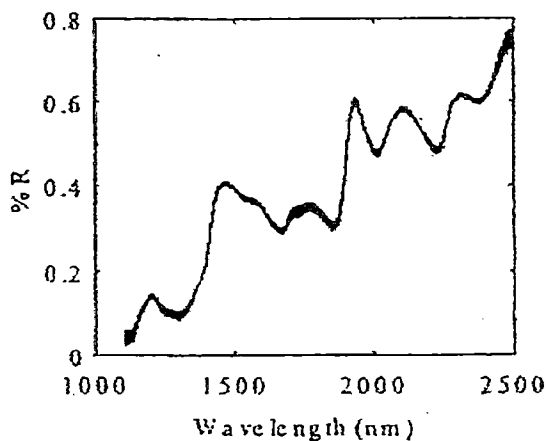
2.7.2 Multiplicative scatter correction (MSC)

เป็นวิธีการที่ช่วยลดผลจากการกระเจิงของแสง ซึ่งโดยทั่วไปการกระเจิงของแสง ให้ความ
 ชันของสเปกตรัมโดยรวมเปลี่ยนไป ดังภาพที่ 6 คล้ายกับว่าสเปกตรัมถูกทำให้หมุนรอบจุดที่ความยาว
 คลื่นต่ำสุด



ภาพที่ 2.6 NIR สเปกตรัม ที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect ก่อนการปรับแก้ด้วย MSC

วิธีการ MSC คือ ทำการหามุมสเปกตรัมของแต่ละตัวอย่างให้มาตรงกับสเปกตรัมเฉลี่ย มีขั้นตอนคือ ในแต่ละตัวอย่างต้องการค่าคงที่ค่าหนึ่งมาลบออกจากสเปกตรัมเพื่อลดผลที่เกิดจากการเลื่อนตัวของสเปกตรัม และต้องการค่าคงที่ค่าหนึ่งมาหาร ค่า $\log(1/R)$ ของทุกๆจุดเพื่อปรับความชันของสเปกตรัมที่เปลี่ยนไป ได้สเปกตรัมดังภาพที่ 7



ภาพที่ 2.7 NIR สเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบแบบ Multiplicative effect หลังการปรับแก้ด้วย MSC

2.8 การวิเคราะห์ข้อมูลจาก Near Infrared Spectra

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง NIR จะอยู่ในรูปของสเปกตรัม ส่วนข้อมูลของค่าคุณลักษณะคุณภาพวิเคราะห์ได้จากวิธีแบบ conventional นำข้อมูลที่ได้จากทั้ง 2 ส่วนมารวมเข้าด้วยกัน แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งขั้นตอนวิเคราะห์ข้อมูลประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือขั้นตอนการวิเคราะห์หาสมการ calibration เพื่อใช้เป็น model ในการวัดค่า

คุณลักษณะคุณภาพต่าง ๆ ตามที่ต้องการตรวจสอบ ส่วนขั้นที่ 2 เป็นขั้นตอนการทดสอบความแม่นยำของสมการ calibration ที่สร้างขึ้น ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเรียกว่า ขั้นตอนการทำ validation เพื่อเลือกสมการที่มีความเหมาะสม และสามารถทำนายค่าได้แม่นยำมากที่สุด เมื่อได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือแล้วจึงจะนำสมการ calibration ที่ได้ไปใช้ทำนายค่าคุณลักษณะที่ต้องการศึกษาจากสเปกตรัม NIR ที่ทำการวัดมาได้

2.8.1 การสร้างสมการ Calibration

การหาตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่จะทำการวิเคราะห์คุณภาพ มีวิธีการหา 2 วิธีหลัก คือ

2.8.1.1 Wavelength selection

เป็นวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระ เฉพาะความยาวคลื่น ที่น่าจะมีความสัมพันธ์ กับตัวแปรที่จะทำการวิเคราะห์ เทคนิคในการคัดเลือกมีหลายแบบเช่น

2.8.1.1.1 เลือกจากความรู้อย่างชำนาญ หรือเอกสารอ้างอิง ที่บ่งบอกถึงช่วงความยาวคลื่นที่คาดว่าจะสัมพันธ์กับค่าที่จะทำการวิเคราะห์

2.8.1.1.2 อาจจะใช้เทคนิคทางสถิติในการคัดเลือกความยาวคลื่นที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์ เช่น Multiple regression หรือการสร้าง correlogram

การสร้าง correlogram เป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แกน X คือ ความยาวคลื่นกับ แกน Y คือ ค่า correlation ง่ายของความสัมพันธ์ระหว่าง optical data ณ ความยาวคลื่นนั้น กับค่าวิเคราะห์ที่หามาได้ด้วยวิธี reference measurement ซึ่งจะช่วยให้นักวิจัยสามารถคัดเลือกความยาวคลื่นที่มีความเป็นไปได้ที่จะสัมพันธ์ กับค่าที่วิเคราะห์

วิธีการสร้างสมการ Calibration แบบ Wavelength selection อาศัยหลัก และวิธีการทางสถิติมาช่วยในการสร้างสมการ เช่น Simple linear regression, Multiple linear regression เป็นต้น

แต่การเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสม จากความยาวคลื่นทั้งหมด ไม่ใช่เรื่องง่าย และอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ ค่าข้อมูลที่ไม่ถูกต้องอาจเกิดปัญหา ทำให้ได้ค่าทำนายที่ต่ำกว่า หรือสูงกว่าค่าแท้จริงอันเนื่องมาจากความผิดพลาดจากการสร้างสมการ หรือเกิดปัญหาเมื่อจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการน้อย และทำให้ได้สมการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในสมการทำให้ได้ข้อมูลที่ไม่น่าเชื่อถือ

2.8.1.2 Simple linear regression หมายถึง สมการ regression ที่ประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระ(X) และตัวแปรตาม (Y) เพียงตัวเดียวในสมการ โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดหรืออธิบายความหมายของข้อมูลให้ได้มากที่สุด เส้นตรงที่ได้นี้เรียกว่า linear regression

สมการของ Linear regression คือ $y = b_0 + b_1X$

โมเดลของ Linear regression คือ $Y = b_0 + b_1X + e$

โดย b_0 = ค่าคงที่ ณ จุดตัดแกน Y

b_1 = ค่าคงที่ regression หรือ ค่าความชันของกราฟ

e = ผลต่างระหว่างค่า $Y - y =$ ค่าความคลาดเคลื่อน(residual)

2.9 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

Near infrared spectroscopy (NIRS) เป็นเทคนิคการวัดค่าแบบไม่ทำลายตัวอย่าง โดยสามารถวัดค่าได้อย่างรวดเร็ว ง่ายต่อการใช้งานและมีความแม่นยำสูง เนื่องจากสเปกโตรสโคปีของอินฟราเรดย่านใกล้ (NIRS) เกิดจากสารดูดกลืนแสงในช่วง 785-2650 นาโนเมตร เป็นผลทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นสามารถนำข้อมูลการดูดกลืนพลังงานแสงมาใช้ประโยชน์(นิพนธ์, 2545) มีการนำเทคนิคการวัดการดูดกลืนแสงในย่านใกล้อินฟราเรดได้นำมาใช้ตรวจสอบคุณภาพภายในผักผลไม้แบบไม่ทำลาย และนำมาใช้เพื่อการคัดแยกผลไม้ต่างๆแบบไม่ทำลายจากการประเมินคุณภาพภายใน (Walsh et al., 2004) และในหลายปีที่ผ่านมา เทคนิควิธีการวัดการดูดกลืนแสงในย่านใกล้อินฟราเรดได้ถูกนำมาประยุกต์เพื่อใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายกับผลไม้หลายชนิด เช่น ใช้ในการหา soluble solids ในผลแคนตาลูป (Dull et al., 1989) ใช้ในการหาปริมาณน้ำตาลในผลพีช (Kawano et al., 1992) ใช้ในการหาปริมาณน้ำตาลในผลส้ม (Kawano et al., 1993) ใช้ในการคัดแยกผลส้มที่มีกรดสูง (Miyamoto et al., 1998) ใช้ในการประเมินหาความแน่นเนื้อ ปริมาณเนื้อแห้ง และ soluble solid ในผลกีวี (McGlone and Kawano, 1998) ใช้ในการหา soluble solid ในผลมะเขือเทศ (Slaughter et al., 1996) ใช้ในการประเมินคุณภาพของผลมะเขือเทศ (Hong et al., 1998) ใช้ในการหา soluble solid ในผลแตงโมและสับปะรด (Guthrie et al., 1998) ใช้ในการหา soluble solid ในผลแอปเปิ้ล (Ventura et al., 1998) ใช้ในการหาปริมาณเนื้อแห้งในผลอะโวคาโด (Clark et al., 2003) ใช้ในการหา soluble solid ในผลลูกพรุน (Slaughter et al., 2003) ใช้ในการประเมินคุณภาพทางสรีรศาสตร์ของผลมะม่วง (Schmilovich et al., 2000) และ ใช้ในการหา soluble solid ในผลมะม่วง (Saranwong et al., 2004)

ได้มีทำวิจัยเพื่อศึกษาความลึกของการผ่านทะลุของแสงในช่วง NIR กับผลแอปเปิ้ลในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 500 ถึง 1900 นาโนเมตร พบว่าความยาวคลื่นที่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อได้ลึกที่สุดคือช่วงความยาวคลื่นสั้นในระหว่าง 700-900 นาโนเมตร (Lammertyn et al., 2000)

โดยมีงานวิจัยที่ใช้ช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่านมาประเมินปริมาณ soluble solid ในแอปเปิ้ล (McGlone et al., 2003) ใช้ช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่านมาแบ่งเกรดผลลูกพีช (Carlomagno et al., 2004) ใช้ช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่านมาประเมินคุณภาพภายในผลแอปเปิ้ลด้วยความเร็วสูง (McGlone and

martinsen, 2004) และได้มีการศึกษาให้เห็นว่าสเปกตรัมของการทะลุผ่านโดยใช้ NIR ช่วงความยาวคลื่นสั้น สามารถทำนายคุณภาพของผลไม้ได้อย่างแม่นยำ (Clark et al., 2003) นอกจากนี้ยังพบว่าอิทธิพลของผิวผลไม้ ความหนาเปลือก และเมล็ด มีผลต่อการทะลุผ่านของแสง การใช้เทคนิคให้แสงทะลุผ่านจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยดังกล่าว เพื่อจะสามารถทำให้ได้ผลของการทำนายที่ถูกต้องมากขึ้นด้วย (Fraser et al., 2003)

ได้เคยมีนักวิจัยพยายามหาเทคนิคเพื่อประเมินคุณภาพภายในของสับปะรด เช่น X-ray เพื่อมาตรวจสอบอาการฉ่ำน้ำภายในของผลสับปะรด (Haff et al., 2006) และใช้เทคนิคการเคาะเพื่อตรวจสอบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของสับปะรด (Chyung et al., 2000 and Pathaveerat et al., 2008) โดยมีความแม่นยำสูงสุดเพียง 77% ซึ่งทั้งนี้ยังคงต้องการเทคนิคที่มีความแม่นยำที่ดีกว่า

Shiina et al. (1992) และ Tanabe et al. (1995) ได้พยายามนำเทคนิคการใช้แสงย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดแบบสะท้อนกลับมาตรวจสอบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของชิ้นเนื้อสับปะรดสด ซึ่งได้ผลที่ค่อนข้างแม่นยำ (SEP=1.29 และ SEP=0.63 ตามลำดับ) และ Guthrie et al. (1997) ได้ทำการศึกษาโดยใช้เทคนิคการใช้แสงย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดแบบสะท้อนกลับช่วงความยาวคลื่นยาวมาสร้างสมการตรวจสอบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของผลสับปะรดแบบไม่ทำลายแต่ยังไม่ได้ผลที่ดี ($R^2 = 0.75$, SEC=1.21)

กล่าวได้ว่าถึงแม้ว่าจะเคยมีการนำเทคนิคการใช้แสงย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดมาตรวจสอบคุณภาพของสับปะรดแล้ว แต่เป็นการศึกษาในส่วนที่เป็นชิ้นเนื้อสับปะรด (fresh cut) และสำหรับงานวิจัยที่ใช้กับผลสับปะรดแบบไม่ทำลาย ก็เป็นการใช้ แสงย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงยาวแบบสะท้อนกลับ ซึ่งเป็นผลทำให้ผลการทำนายยังไม่ดีนั่นเอง

สำหรับเทคนิคการใช้แสงย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่าน ได้เคยถูกนำมาใช้ในงานวิจัยกับผลไม้เปลือกหนาและได้ผลดี ได้แก่ งานวิจัยของ สนธิสุขและคณะ (2552) ในการศึกษาประเมินหาปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ของผลมังคุดแบบไม่ทำลายได้อย่างแม่นยำ ($R=0.9$, SEP=0.71) นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในการทำนายอาการเนื้อแก้วในผลมังคุดแบบไม่ทำลายในผลมังคุดได้อย่างแม่นยำเช่นกัน (Teerachaichayut et al., 2007)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะนำเทคนิคการใช้แสงย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่านมาใช้กับผลสับปะรดแบบไม่ทำลาย เพื่อพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบคุณภาพภายในของสับปะรดให้ได้แม่นยำและให้เป็นที่ยอมรับเพิ่มมากขึ้น เป็นการพัฒนาเทคนิคการคัดแยกผลไม้ของประเทศไทย เพื่อยกระดับมาตรฐานสินค้าไทยสูงขึ้น และเพื่อที่จะสามารถถ่ายทอดไปสู่ระบบคัดแยกแบบ online ในภาคปฏิบัติจริงต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์

3.1.1 วัตถุประสงค์

คัดเลือกสับประรดพันธุ์ปัตตาเวียที่มีสีและขนาดสม่ำเสมอ เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4-5 นิ้ว หรือมีน้ำหนักผล อยู่ระหว่าง 0.8-2.0 กิโลกรัม ผลต้องไม่สุกจนเกินไป มีเปลือกสีเหลืองอมเขียว (กรมวิชาการเกษตร, 2545)



ภาพที่ 3.1 สับประรดพันธุ์ปัตตาเวีย

หลังจากนั้นทำการวัดขนาดผลของวัตถุประสงค์ ชั่งน้ำหนัก (g) ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของผลสับประรดแล้วจับบันทึก ถ่ายรูปผลสับประรดด้วยกล้องถ่ายภาพรูปแบบดิจิตอลที่มีการควบคุมแสงและระยะการถ่ายให้คงที่

หาสมการความสัมพันธ์อัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดกับค่าการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น

3.2 การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1.1 digital refractrometer model Palette PR-101 (ATAGO, Japan)

3.2.1.2 ขวดน้ำกลั่น

3.2.2 วิธีการทดลอง

3.2.2.1 แบ่งสับประรดออกเป็น 6 ส่วนตามที่ได้ทำเครื่องหมาย เอาไว้ ปอกเปลือกสับประรดนำเนื้อสับประรดแต่ละส่วนมาใส่ลงในผ้าขาวบางคั้นน้ำด้วยที่คั้นน้ำผลไม้

3.2.2.2 วัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด โดยใช้ digital refractrometer

3.3 การวัดปริมาณค่าความเป็นกรด

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1.1 บิวเรต

3.3.1.2 สารละลาย NaOH 1 N

3.3.1.3 สาร Potassium hydrogen phthalate (KHP)

3.3.1.4 ปีกเกอร์

3.3.1.5 เครื่อง Auto Titrator (Titration Excellence T50, Switzerland)

3.3.1.6 โถดูดความชื้น (desiccators)

3.3.2 วิธีการทดลอง

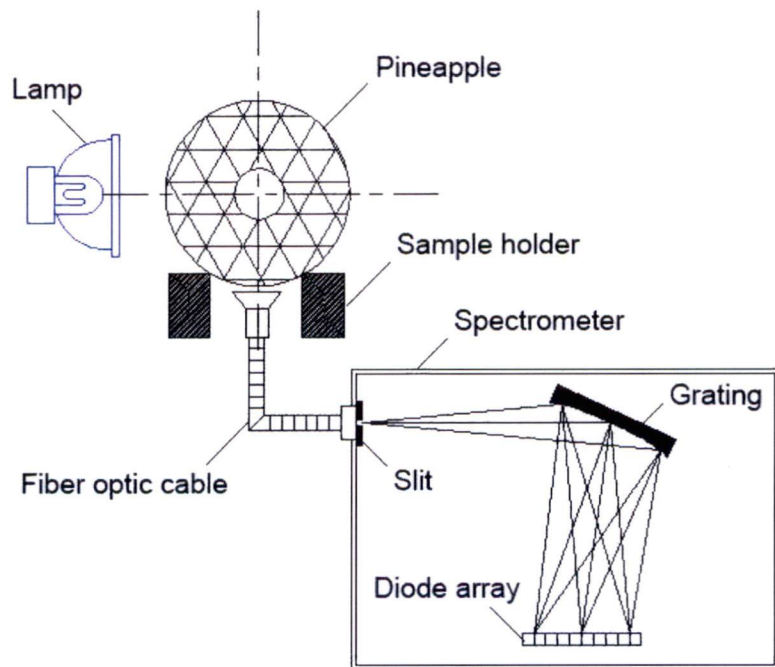
3.3.2.1 เตรียมสารละลาย Sodium hydroxide (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 N ใส่ลงไปในขวดสีชาต่อสายยางเข้ากับเครื่อง Auto Titrator (Titration Excellence T50, Switzerland)

3.3.2.2 นำ Potassium hydrogen phthalate (KHP) ออบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พักให้เย็นในโถดูดความชื้น (desiccators) เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำมาชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งประมาณ 0.1 g ไทเทรตด้วยเครื่อง Auto Titrator เพื่อหาความเข้มข้นมาตรฐานของ Sodium hydroxide

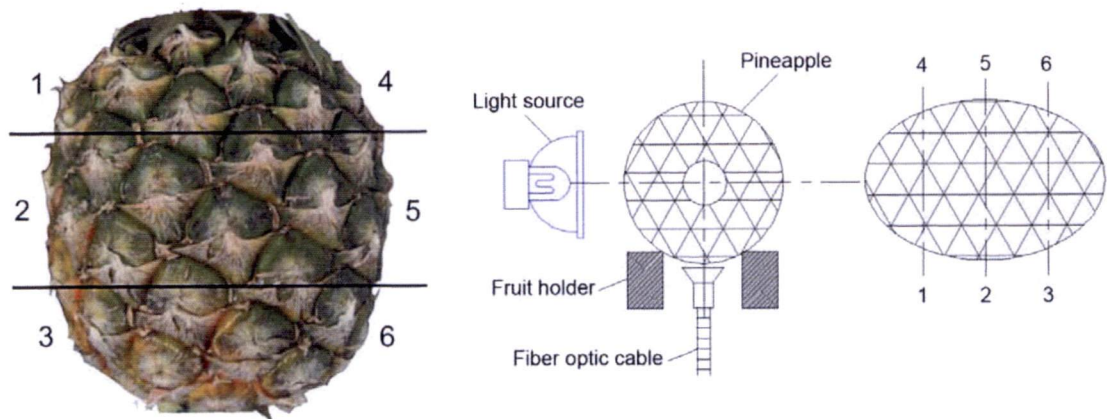
3.3.2.3 แบ่งสับประรดออกเป็น 6 ส่วนตามที่ได้ทำเครื่องหมาย เอาไว้ ปอกเปลือกสับประรดนำเนื้อสับประรดแต่ละส่วนมาใส่ลงในผ้าขาวบางคั้นน้ำด้วยที่คั้นน้ำผลไม้ นำน้ำสับประรดที่คั้นได้ไปเปิดด้วย Autopipet 5 ml แล้วเติมน้ำกลั่นลงไป 50 ml ไทเทรตด้วยเครื่อง Auto Titrator บันทึกค่าเปอเซ็นต์กรดที่ได้ ทำตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

3.4 การวัด NIR Spectroscopy ของสับประรด

นำสับประรดที่ผ่านการเตรียมวัตถุดิบทำเครื่องหมาย 6 จุด ระยะห่างระหว่างจุดเท่าๆกัน จากนั้นทำการตรวจวัดสับประรดแต่ละจุดเพื่อให้ได้เส้นสเปกตรัม ทำการวัดลูกสะ 6 จุดตามเครื่องหมายด้วยเครื่องมือวัดการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่าน (รูปที่ 2) วัดในช่วงความยาวคลื่น 665-955 นาโนเมตร กำหนดสภาพเครื่องในการวัดตามตารางที่ 1 วางตัวอย่างลงบนฐานรองรับที่ทำจากโฟมออกแบบให้มีส่วนโค้งพอดีกับตัวอย่างที่ต้องการจะวัด มีการป้องกันแสงจากภายนอกขณะทำการวัดตัวอย่าง นำส่วนที่ทำเครื่องหมายของผลสับประรดวางแนบกับเซ็นเซอร์ Scan สับประรดโดยใช้คำสั่งทาง computer โดย scan 6 ครั้งต่อ 1 ลูก โดยสแกนด้านใดด้านหนึ่งด้านของผลสับประรด 1 ครั้ง หลังจาก scan ด้านที่ 1 เสร็จแล้วจึง scan ด้านที่ 2 โดยทำการทดลองซ้ำเหมือนด้านที่ 1 เก็บข้อมูล spectrum ที่ได้ใน computer หลังจากนั้นทำความสะอาดเครื่อง แล้วนำสับประรดลูกใหม่มาทำซ้ำเช่นเดิมจนครบนำข้อมูล spectrum ไปวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติต่อไป หลังจากนั้นนำสับประรดที่ผ่านการวัดมาทำการผ่าเพื่อตรวจสอบภายในผล ถ่ายรูปด้วยกล้องถ่ายรูปแบบดิจิทัลที่มีการควบคุมแสงและระยะการถ่ายให้คงที่ จากนั้นนำเนื้อสับประรดสับเป็นชิ้นเล็กๆ ทำการคั้นน้ำสับประรดด้วยเครื่องคั้นแบบกดด้วยมือ และกรองน้ำสับประรดด้วยผ้ากรอง จากนั้นนำไปตรวจวัด ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและปริมาณค่าความเป็นกรด



ภาพที่ 3.2 แสดงภาพเครื่องมือและส่วนประกอบของเครื่อง NIR ที่ใช้ในการวัด



ภาพที่ 3.3 แสดงภาพตำแหน่งในการสแกนของผลสับปะรดแต่ละลูก

3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

สร้างสมการทำนายคุณภาพสับปะรด (อัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรด) แบบไม่ทำลาย จากค่าการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดจากวัตถุคิบที่ทำการเก็บข้อมูล ทำการสุ่มแบ่งออกเป็นสองกลุ่ม โดยกลุ่มแรกใช้เพื่อการสร้างโมเดลและกลุ่มที่สองใช้ในการทำนาย โดยที่กลุ่มแรกนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างโมเดลโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยบางส่วนโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดหรือ partial least squares regression (PLSR) และใช้วิธีการเปรียบเทียบแบบ cross-validation ในการเลือกให้ได้โมเดลที่ดีที่สุดจะพิจารณาจากจำนวน latent variables (LV) ที่ทำให้ได้ค่าของความผิดพลาดจากการปรับเทียบหรือ standard error of calibration (SEC) ต่ำที่สุด และมีค่า bias ต่ำ ในการประเมินประสิทธิภาพในการทำนายของโมเดลใช้ข้อมูลของกลุ่มที่แยกไว้สำหรับการทำนายทำนายโดยวิธี cross-validation และพิจารณาเปรียบเทียบค่าของ correlation coefficient (R) และค่าของความผิดพลาดการทำนายหรือ standard error of prediction (SEP) และค่า bias ที่ได้ ใช้ในการตัดสินใจว่าโมเดลแต่ละโมเดลมีความสามารถในการทำนายได้แม่นยำมากน้อยเพียงใด โดยที่โมเดลที่มีความสามารถในการทำนายได้แม่นยำกว่าจะต้องมีค่า correlation coefficient ที่สูง และมีค่า standard error of calibration ที่ต่ำกว่า ทั้งนี้จะต้องมีค่า bias ที่ต่ำในการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ The Unscrambler (version 9.6, CAMO AS, Trondheim, Norway)

ตารางที่ 3.1 แสดงสภาพของเครื่อง NIR ที่ใช้ในการวัด

Items	Value
Detector	Silicon diode array
Wavelength measured	665-955 nm
Averaged	6 scans
Integration Time	10
Reference material	Teflon ball
Reference measurement	Every 6 samples

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการวัดการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น

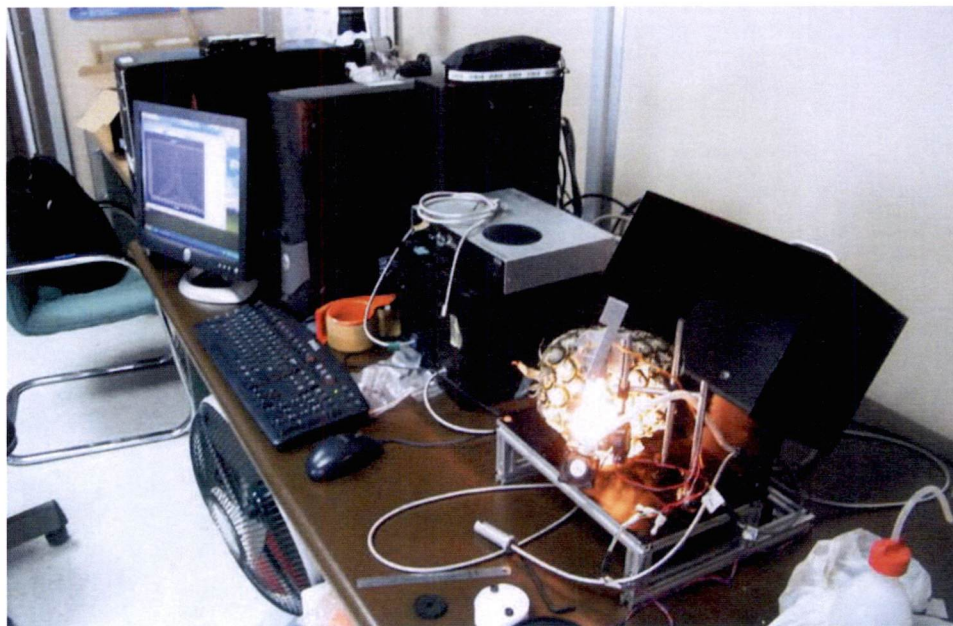
วัตถุประสงค์สืบประดุกลำเลียงมาที่ห้องปฏิบัติการตามภาพที่ 4.1 เพื่อตรวจสอบลักษณะภายนอกของแต่ละผลด้วยสายตา คัดลูกที่มีสภาพที่ดีตามเกณฑ์ที่กำหนด ทำความสะอาดและทำการวัดขนาดของผลตลอดจนทำการชั่งน้ำหนัก ใส่รหัสสืบประดแต่ละผลก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนพลังงานแสงช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด



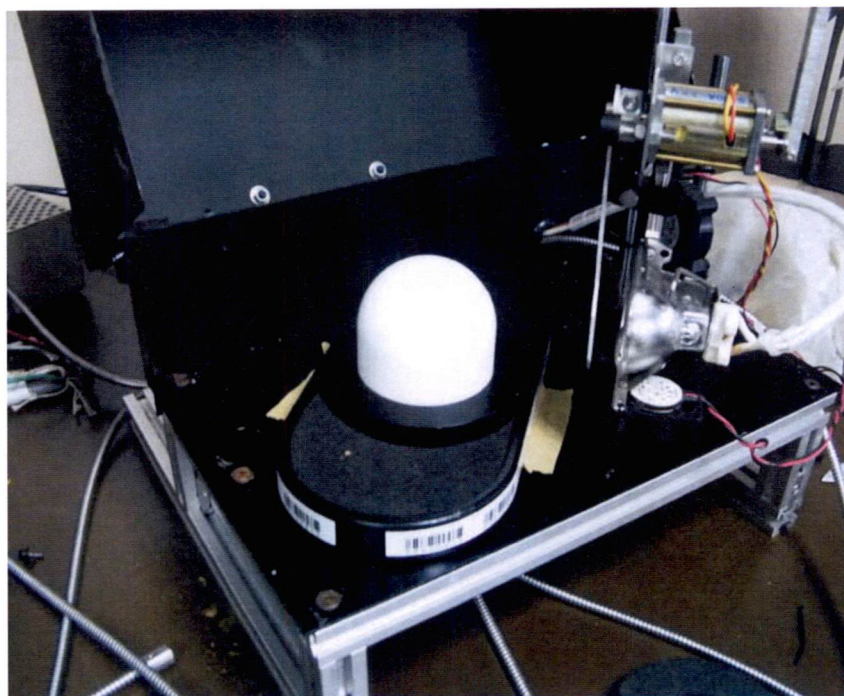
ภาพที่ 4.1 สืบประดที่ใช้ในงานวิจัย

ทำการทดลองหาสภาวะของเครื่องที่เหมาะสมสำหรับการวัดผลสืบประด พร้อมทั้งออกแบบและสร้างฐานรองรับผลสืบประดเพื่อป้องกันแสงภายนอกไม่ให้เข้าไปแทรกซ้อนมีผลกระทบต่อข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนพลังงานแสงช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดของแต่ละตัวอย่าง เพื่อทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมแล้ว บันทึกและควบคุมให้เป็นสภาวะคงที่เพื่อใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

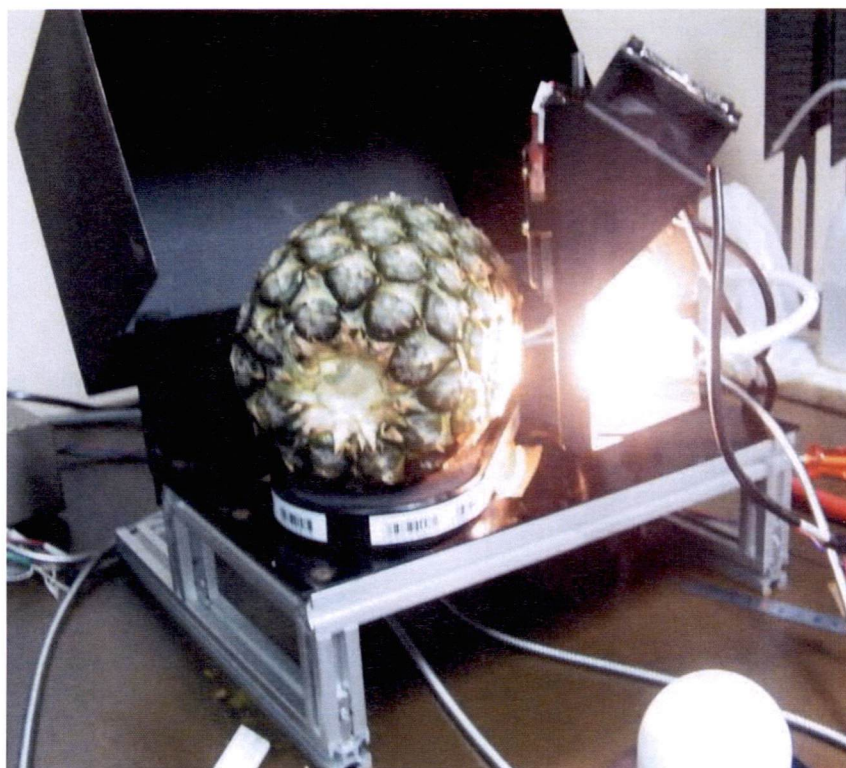
เตรียมเครื่องมือวัดการดูดกลืนพลังงานแสงช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดให้พร้อมและตั้งค่าสภาวะต่างๆ ให้คงที่ ตามภาพที่ 4.2 โดยก่อนทำการวัดค่าการทะลุผ่านของแสงของตัวอย่างในแต่ละวัน จะทำการวัดค่าการทะลุผ่านของแสงของ reference ที่ทำมาจาก Teflon ตามภาพที่ 4.3 เพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าการดูดกลืนพลังงานแสง และทำการวัดผลสืบประดแต่ละลูกใน 6 ตำแหน่งด้านข้างผลตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นตามภาพที่ 4.4 บันทึกผลข้อมูลเพื่อเก็บไว้วิเคราะห์ต่อไป



ภาพที่ 4.2 เครื่องมือวัดการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่าน



ภาพที่ 4.3 แสดงภาพ Teflon ball ที่ใช้เป็น Reference สำหรับการวัดการดูดกลืนพลังงานแสง



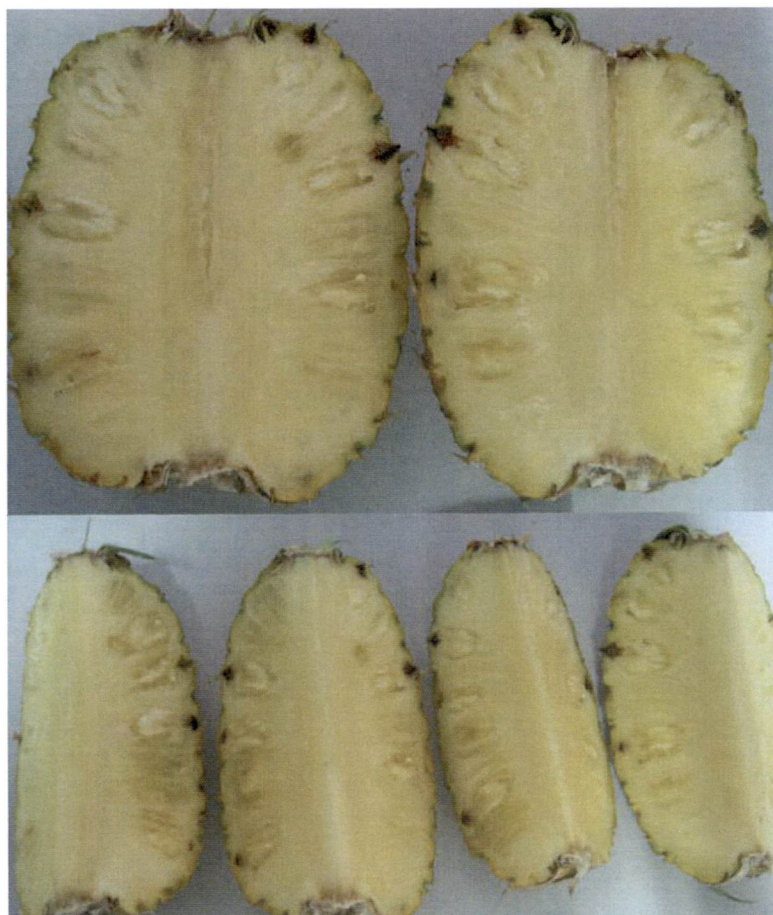
ภาพที่ 4.4 แสดงภาพผลสับปะรดระหว่างการวัดการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรด

4.2 ผลการวัดค่า TSS และ TA ของสับปะรด

หลังจากทำการวัดค่าการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดของแต่ละตัวอย่างแล้ว นำสับปะรดแต่ละผลมาผ่ากลางแบ่งเป็นสองส่วนตามแนวแกน และผ่าครึ่งของแต่ละส่วนอีกครั้งเพื่อตรวจสอบคุณภาพเนื้อภายในตามภาพที่ 4.5 จากนั้นปอกเปลือกออกและนำเนื้อของทั้งผลมาสับให้มีชิ้นเล็กลงและนำมาคั้นน้ำสับปะรดด้วยเครื่องคั้นแบบมีอกคั้น นำน้ำสับปะรดที่ได้กรองด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นนำน้ำสับปะรดที่ได้ไปตรวจหาปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด (TSS) และค่าความเป็นกรด (TA) ตามวิธีที่กล่าวไว้ข้างต้น บันทึกผลเป็นข้อมูลของแต่ละผลเพื่อเก็บไว้วิเคราะห์ผลต่อไป ได้ผลการตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 4.1

ในการวิเคราะห์ผลงานวิจัยนี้ สุ่มเลือกตัวอย่างสับปะรดจำนวน 159 ตัวอย่าง โดยมีผลข้อมูลของปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด และค่าความเป็นกรด ตามที่แสดงในตารางที่ 4.1 จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณหาอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรด (B/A) ทำการแบ่งตัวอย่างออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกจำนวน 106 ตัวอย่าง ใช้เป็นกลุ่มสำหรับการสร้างสมการ (calibration set) และกลุ่มที่สองจำนวน 53 ตัวอย่าง ใช้เป็นกลุ่มสำหรับการทำนาย (prediction set) โดยตัวอย่างทั้งสองกลุ่มมีค่าอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดดังแสดง

ในตารางที่ 4.2 ทั้งนี้ข้อมูลทั้งสองกลุ่มมีการกระจายตัวของค่า อัตราส่วนอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดใกล้เคียงกัน โดยพิจารณาจากค่า standard deviation (SD) ของกลุ่มแรกมีค่าเท่ากับ 4.66 และกลุ่มที่สองมีค่าเท่ากับ 4.99



ภาพที่ 4.5 แสดงภาพการตรวจคุณภาพภายในของผลสับปะรด

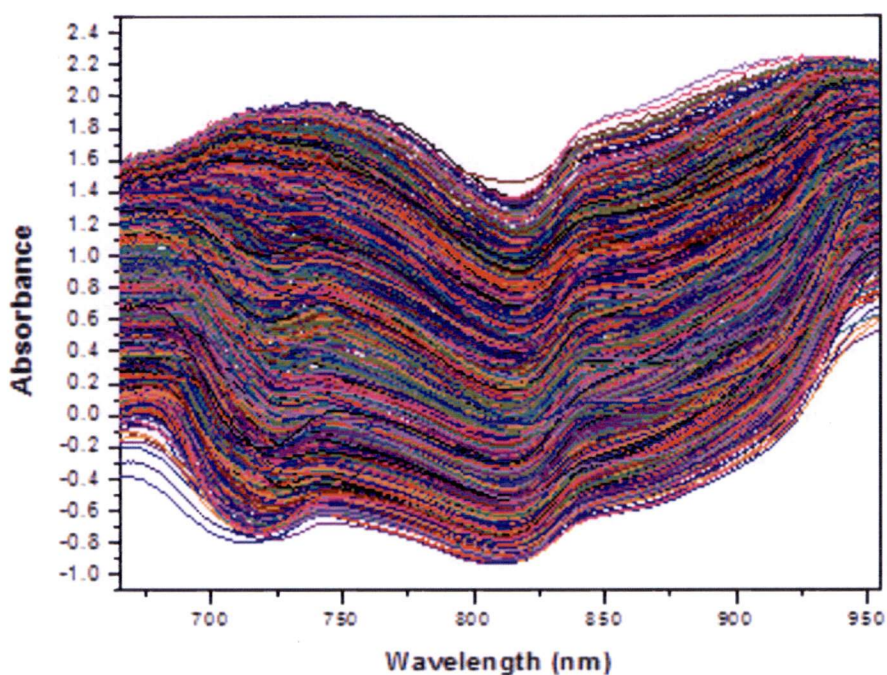
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่า TSS และ TA ของสับปะรด

Sample	N	TSS			Titratable Acidity		
		Mean (°Bx)	Range (°Bx)	SD	Mean (%)	Range (%)	SD
Pineapple	159	12.41	7.02-16.18	1.64	0.75	0.47-1.16	0.16

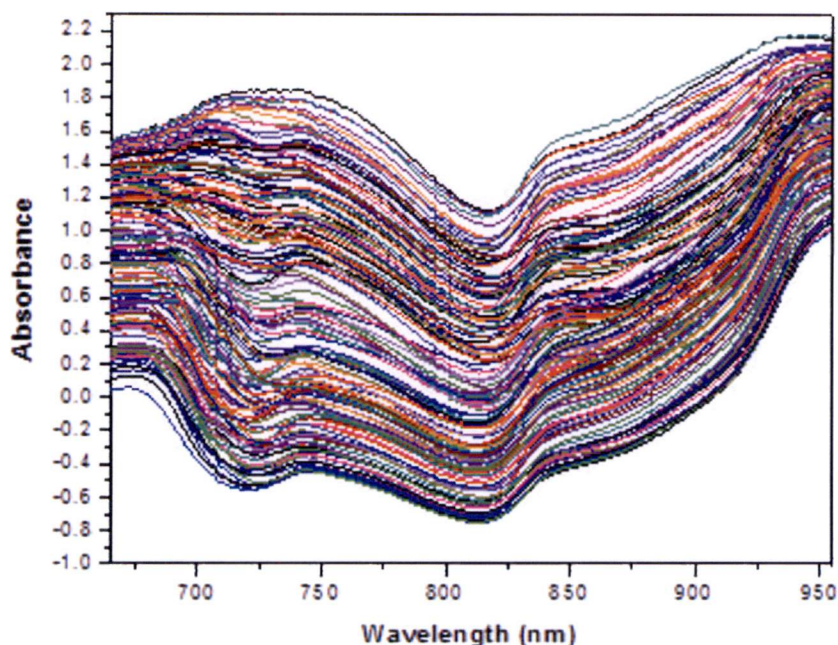
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลตัวอย่างของสับปะรดในกลุ่ม calibration และกลุ่ม prediction

Sample set	N	B/A mean	B/A range	SD
Calibration	106	17.46	9.50-25.94	4.66
Prediction	53	17.46	10.11-25.90	4.69

ผลการวัดการดูดกลืนพลังงานแสงช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่านของแต่ละจุดที่ทำการวัดจากตัวอย่างสับปะรดทั้งหมด (954 สเปกตรัม) ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 4.6 และเมื่อนำสเปกตรัมของแต่ละตัวอย่างมาเฉลี่ย จะได้ผลค่าการดูดกลืนพลังงานแสงช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่านของแต่ละตัวอย่าง (159 ตัวอย่าง) ดังที่ได้แสดงในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.6 สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดทั้งหมด



ภาพที่ 4.7 สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดเฉลี่ยแต่ละผล

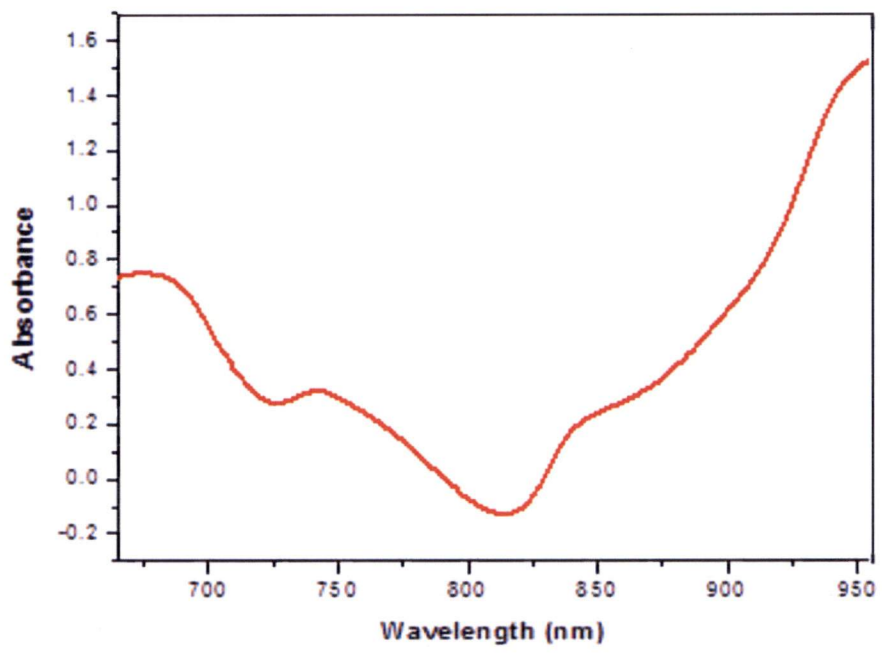
4.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดที่วัดทุกจุด (individual spectra) และข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดเฉลี่ย (averaged spectra) และข้อมูลค่าอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรด (B/A) ในกลุ่มสำหรับการสร้างสมการ (calibration set) มาวิเคราะห์สร้างสมการสำหรับการทำนายและทดสอบสมการ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดเฉลี่ย สามารถนำไปใช้สร้างสมการได้ผลที่ดีกว่าการใช้ข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดที่วัดทุกจุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดเฉลี่ยในการสร้างสมการการทำนาย

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการสร้างสมการจากสเปกตรัมทั้งหมดและสเปกตรัมเฉลี่ย

Spectral preprocessing	Individual spectra				Averaged spectra			
	N	factor	R	RMSEP	N	factor	R	RMSEP
Original	636	16	0.688	3.464	106	7	0.771	2.964

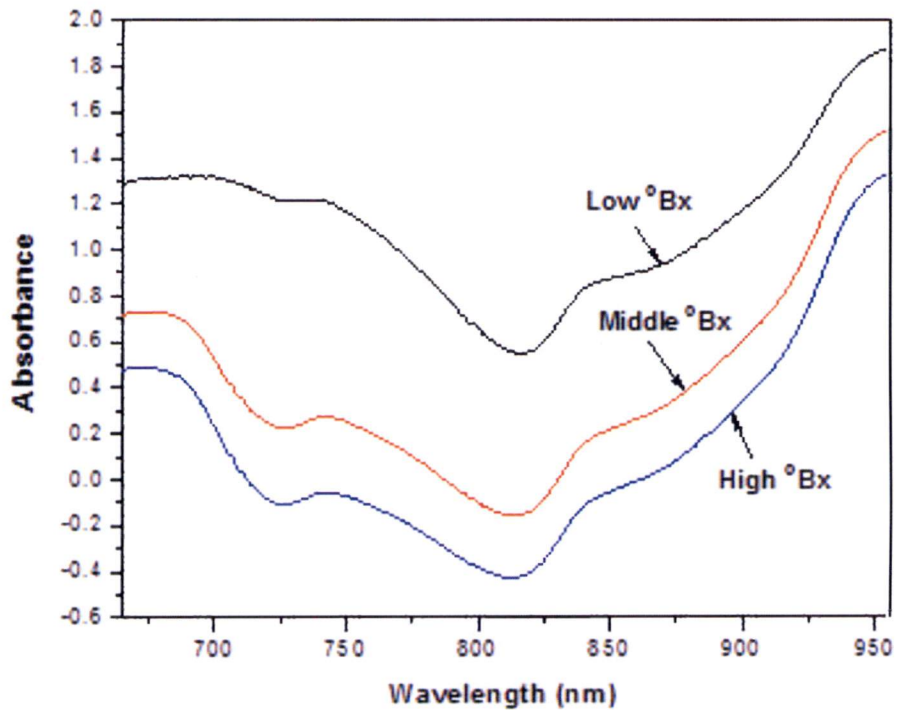
เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดทั้งหมดมาเฉลี่ย จะได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.8 จากข้อมูลเส้นสเปกตรัมของการดูดกลืนพลังงานแสงช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นที่ได้ของผลสับปะรดพบว่าเกิด peak ในช่วงบริเวณ 692, 758 และ 964 นาโนเมตร ซึ่งที่บริเวณ 692 นาโนเมตร เป็นบริเวณ peak ของ Chlorophyll และที่บริเวณ 758 และ 964 นาโนเมตร เป็นบริเวณ peak ของน้ำนั่นเอง



ภาพที่ 4.8 สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นเฉลี่ยของผลสับปะรดทั้งหมด

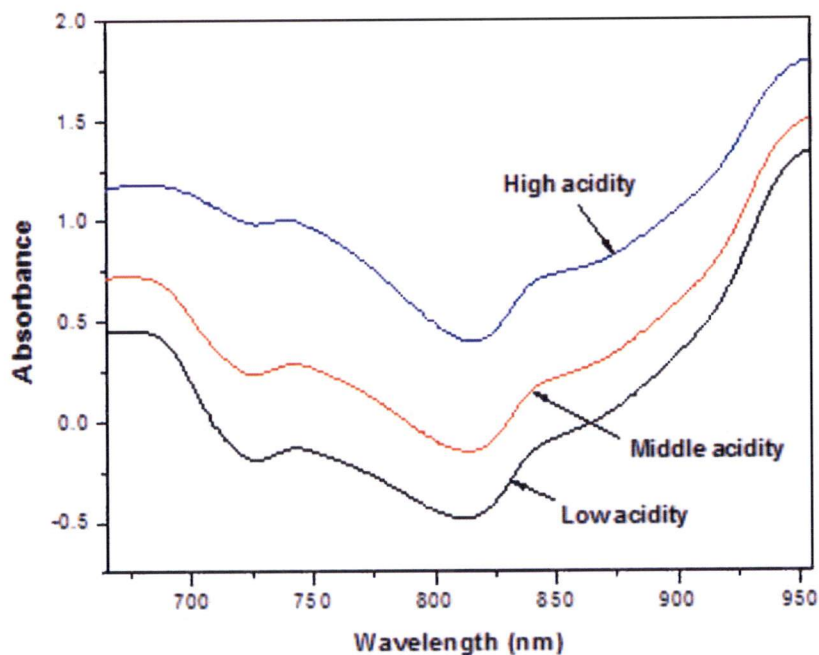
เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดในกลุ่มสับปะรดที่มีปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมด (TSS) แตกต่างกันมาเปรียบเทียบกัน โดยในที่นี้แบ่งเป็นสามระดับคือ กลุ่มสับปะรดที่มี ปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมดต่ำ (มีค่าต่ำกว่า 11 °Bx) กลุ่มสับปะรดที่มีปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมดปานกลาง (มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 11-14 °Bx) และกลุ่ม

สับปะรดที่มีปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมดสูง (มีค่ามากกว่า 11 °Bx) ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.9 จะเห็นว่าการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของกลุ่มสับปะรดที่มีปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมดต่ำ จะมีค่ามากกว่าของกลุ่มสับปะรดที่มี ปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมดปานกลางและของกลุ่มสับปะรดที่มีปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมดสูง ตามลำดับ



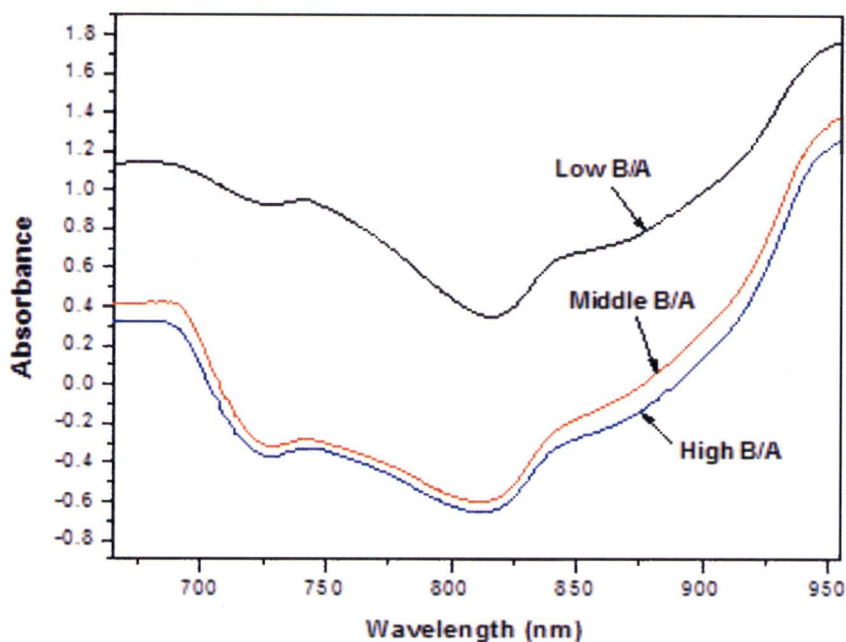
ภาพที่ 4.9 สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงเฉลี่ยของกลุ่มสับปะรดที่มี TSS แตกต่างกัน

เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดในกลุ่มสับปะรดที่มีค่าความเป็นกรด (TA) แตกต่างกันมาเปรียบเทียบกัน โดยในที่นี้แบ่งเป็นสามระดับคือ กลุ่มสับปะรดที่มีค่าความเป็นกรดต่ำ (มีค่าต่ำกว่า 0.6 %) กลุ่มสับปะรดที่มีค่าความเป็น กรดปานกลาง (มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.6-0.8%) และ กลุ่มสับปะรดที่มีค่าความเป็นกรดสูง (มีค่ามากกว่า 0.8%) ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.10 จะเห็นว่าการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของกลุ่มสับปะรดที่มีค่าความเป็นกรดสูง จะมีค่ามากกว่าของกลุ่มสับปะรดที่มีค่าความเป็น กรดปานกลางและของกลุ่มสับปะรดที่มีค่าความเป็นกรดต่ำ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงเฉื่อยของกลุ่มสับปะรดที่มี %Acidity ต่างกัน

และเช่นเดียวกันเมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดในกลุ่มสับปะรดที่มีอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรด (B/A) ต่างกันมาเปรียบเทียบกัน โดยในที่นี้แบ่งเป็นสามระดับคือ กลุ่มสับปะรดที่มีค่าอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดต่ำ (มีค่าต่ำกว่า 12) กลุ่มสับปะรดที่มีค่าอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดปานกลาง (มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 12-22) และ กลุ่มสับปะรดที่มีค่าอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดสูง (มีค่ามากกว่า 22) ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4. 11 จะเห็นว่าการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของกลุ่มสับปะรดที่มีค่าอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดต่ำ จะมีค่ามากกว่าของกลุ่มสับปะรดที่มีค่าอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดปานกลางและของกลุ่มสับปะรดที่มีค่าอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดสูง ตามลำดับ ดังนั้นจากข้อมูลที่ได้จึงสามารถกล่าวได้ว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีอิทธิพลต่อการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นมากกว่าค่าความเป็นกรด

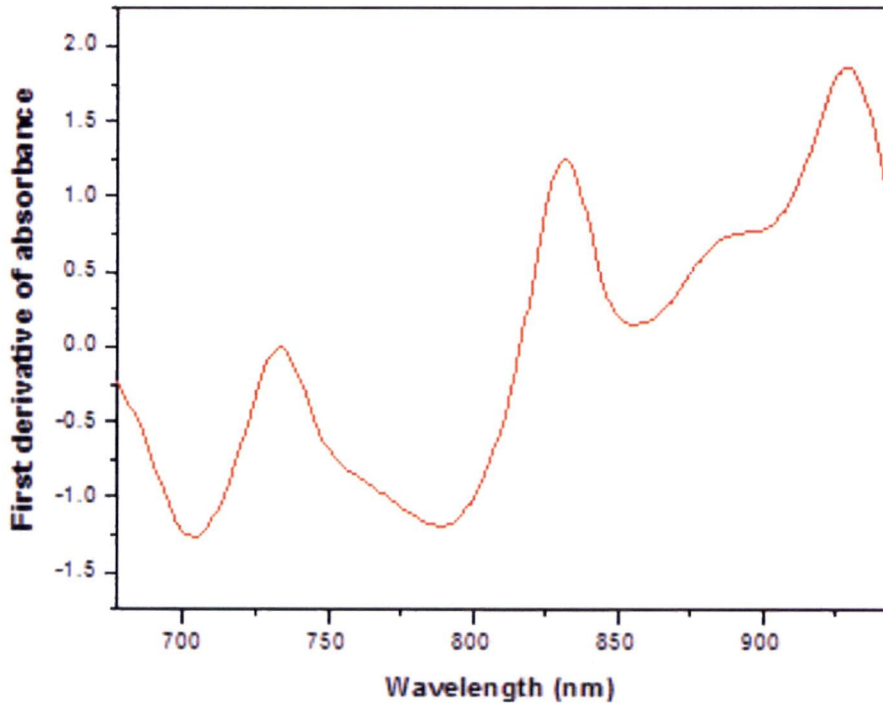


ภาพที่ 4.11 สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงเฉลี่ยของกลุ่มสับปะรดที่มี B/A แตกต่างกัน

เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดเฉลี่ยของกลุ่มสำหรับการสร้างสมการ มาทำ pretreatment ด้วยกระบวนการต่างๆ ได้แก่ multiplicative scatter correction (MSC), standard normal variate transformation (SNV), Savitzky-Golay smoothing, first derivative differentiation และ second derivative differentiation และวิเคราะห์เพื่อสร้างโมเดลโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยบางส่วนโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดหรือ partial least squares regression (PLSR) และใช้วิธีการปรับเทียบแบบ cross-validation ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 จากผลพบว่ากระบวนการ pretreatment ข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดเฉลี่ยด้วยวิธี Smoothing (Savitzky-Golay) ร่วมกับ standard normal variate transformation (SNV) และ first derivative differentiation (Savitzky-Golay) ได้โมเดลที่ดีที่สุดโดยมีจำนวน latent variables (LV) หรือ partial least squares factors เท่ากับ 5 มีค่า correlation coefficient (R) เท่ากับ 0.777 และมีค่าของความผิดพลาดจากการทำนายหรือ Root mean square error of prediction (RMSEP) เท่ากับ 2.950 ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากกระบวนการ pretreatments แบบอื่นๆ

เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นที่ผ่านกระบวนการ pretreatment ด้วยวิธี Smoothing (Savitzky-Golay) ร่วมกับ standard normal variate transformation

(SNV) และ first derivative differentiation (Savitzky-Golay) ของผลสับปะรดทั้งหมดมาเฉลี่ยจะได้ผล ดังแสดงในภาพที่ 4.11



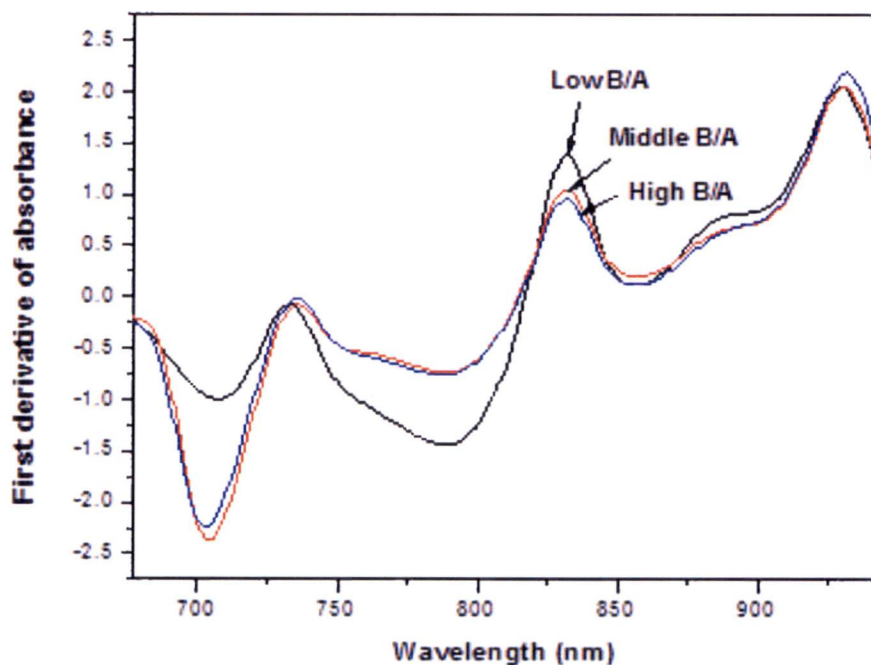
ภาพที่ 4.12 สเปกตรัมเฉลี่ยที่ผ่านการ preprocessing ของสับปะรดทั้งหมด

ดังนั้นในการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการสร้างสมการทำนาย อัตราส่วนของปริมาณของแข็ง ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรด (B/A) ของผลสับปะรดจึงนำข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงาน แสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดเฉลี่ยของกลุ่มสำหรับการสร้างสมการทำนาย มาผ่าน กระบวนการ pretreatment ด้วยวิธี Smoothing (Savitzky-Golay) ร่วมกับ standard normal variate transformation (SNV) และ first derivative differentiation (Savitzky-Golay) และนำสมการที่ได้นี้ไป ทดสอบประสิทธิภาพในการทำนายหรือความแม่นยำจากข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดเฉลี่ยและข้อมูลอัตราส่วนของปริมาณของแข็งละลายได้ ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรด ของกลุ่มสำหรับการทำนาย (prediction set) ต่อไป

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลผลของการทำ pretreatments ในกลุ่ม calibration เพื่อใช้สร้างสมการ

Spectral preprocessing	No. of PLS factor	R	RMSEP
Original	7	0.771	2.964
Smoothing	7	0.774	2.945
1 st derivative	5	0.766	2.993
2 nd derivative	4	0.739	3.132
MSC	5	0.724	3.212
Smoothing +1 st derivative	11	0.763	3.034
Smoothing +2 nd derivative	8	0.747	3.115
Smoothing +MSC	10	0.758	3.051
Smoothing +SNV	12	0.766	3.016
MSC+1 st derivative	6	0.741	3.132
MSC+2 nd derivative	5	0.699	3.367
Smoothing +MSC+1 st derivative	11	0.747	3.134
Smoothing +MSC+2 nd derivative	5	0.724	3.212
SNV+1 st derivative	5	0.755	3.049
SNV+2 nd derivative	5	0.731	3.189
Smoothing +SNV+1 st derivative	5	0.777	2.950
Smoothing +SNV+2 nd derivative	6	0.749	3.099
SNV+MSC	5	0.752	3.066
Smoothing +SNV+ MSC	4	0.765	2.991

เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดที่ผ่านกระบวนการ pretreatment ด้วยวิธี Smoothing (Savitzky-Golay) ร่วมกับ standard normal variate transformation (SNV) และ first derivative differentiation (Savitzky-Golay) ในกลุ่มสับปะรดที่มีอัตราส่วนของปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรด (B/A) แตกต่างกันมาเปรียบเทียบกับ เช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4. 13 จะเห็นว่าสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นที่ผ่านกระบวนการ pretreatment ของกลุ่มสับปะรดแต่ละกลุ่มมีค่า peak ที่ความยาวคลื่นต่างๆ แตกต่างกัน ดังนั้นข้อมูล สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดที่ผ่านกระบวนการ pretreatment ด้วยวิธี Smoothing (Savitzky-Golay) ร่วมกับ standard normal variate transformation (SNV) และ first derivative differentiation (Savitzky-Golay) มีความแตกต่างกันในแต่ละกลุ่มสับปะรดที่มีค่าอัตราส่วนของปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดแตกต่างกัน บ่งชี้ว่าสามารถนำมาใช้สร้างสมการเพื่อตรวจสอบหรือทำนายค่าอัตราส่วนของปริมาณของแข็งละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดได้



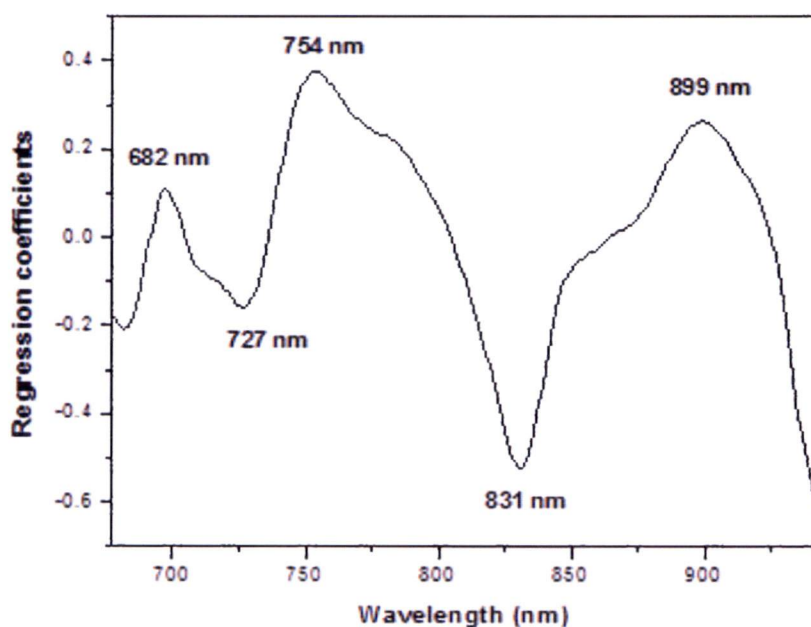
ภาพที่ 4.13 สเปกตรัมเฉลี่ยที่ผ่านการ preprocessing ของกลุ่มสับปะรดที่มี B/A แตกต่างกัน

จากข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปะรดที่ผ่านกระบวนการ pretreatment ด้วยวิธี Smoothing (Savitzky-Golay) ร่วมกับ standard normal variate transformation (SNV) และ first derivative differentiation (Savitzky-Golay) ของกลุ่มสำหรับการสร้างสมการ (calibration set) จำนวน 106 ตัวอย่าง มาสร้างสมการทำนายคุณภาพสับปะรด (อัตราส่วนของปริมาณของแข็งละลายได้ต่อความเป็นกรด) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยบางส่วนโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดหรือ partial least squares regression (PLSR) และใช้วิธีการปรับเทียบแบบ cross-validation เลือกใช้โมเดลที่ดีที่สุด จากนั้นนำมาทำ การประเมินประสิทธิภาพในการทำนายของโมเดล โดยใช้กลุ่มสำหรับการทำนาย (prediction set) จำนวน 53 ตัวอย่าง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 โมเดลที่ใช้ในการทำนายหลังจากการทดสอบด้วยวิธี cross validation ได้ค่าของ correlation coefficient (R) เท่ากับ 0.847 และค่าของความผิดพลาดจากการ ปรับเทียบหรือ Root mean square error of calibration (RMSEC) เท่ากับ 2.464 และเมื่อนำโมเดลไปทดสอบความสามารถในการทำนายด้วยกลุ่ม prediction set ได้ได้ค่าของ correlation coefficient (R) เท่ากับ 0.801 และค่าของความผิดพลาดจากการ ทำนายหรือ Root mean square error of prediction (RMSEP) เท่ากับ 2.795

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลประสิทธิภาพของสมการที่ใช้ในการทำนายค่า B/A

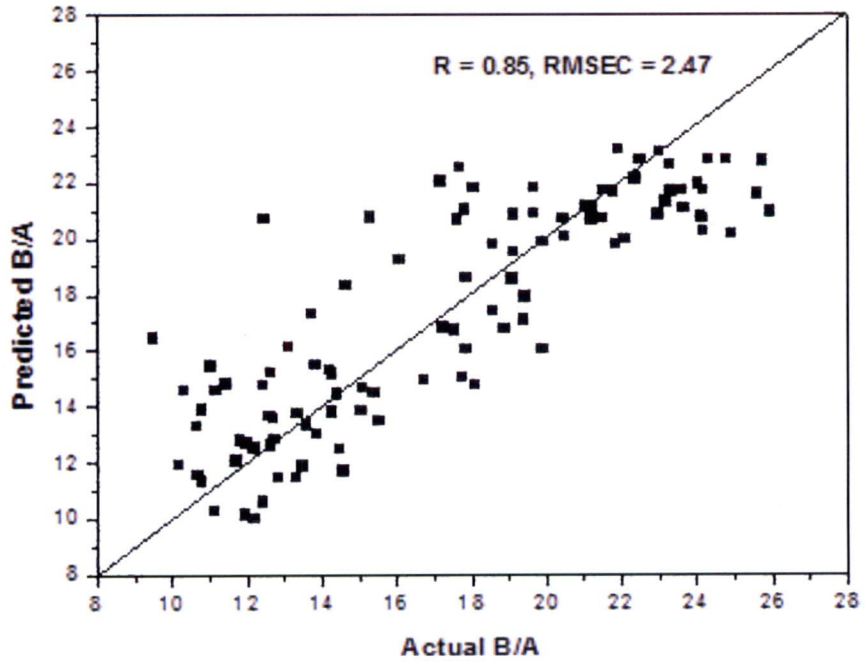
Preprocessing	No. of PLS factor	Calibration			Prediction		
		N	R	RMSEC	N	R	RMSEP
Smoothing +SNV +1 st derivative	5	106	0.847	2.464	53	0.801	2.795

จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระในโมเดลที่ใช้ในการทำนาย ได้ข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 4.14 มีค่าคงที่ของสมการเท่ากับ 40.78 ค่าสัมประสิทธิ์ที่สำคัญของค่า การดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นของผลสับปรดที่ผ่านกระบวนการ pretreatment ด้วยวิธี Smoothing (Savitzky-Golay) ร่วมกับ standard normal variate transformation (SNV) และ first derivative differentiation (Savitzky-Golay) เท่ากับ 0.522 ที่ความยาวคลื่น 831 นาโนเมตร, 0.374 ที่ความยาวคลื่น 754 นาโนเมตร, 0.262 ที่ความยาวคลื่น 899 นาโนเมตร, 0.206 ที่ความยาวคลื่น 692 นาโนเมตร และ 0.159 ที่ความยาวคลื่น 727 นาโนเมตร

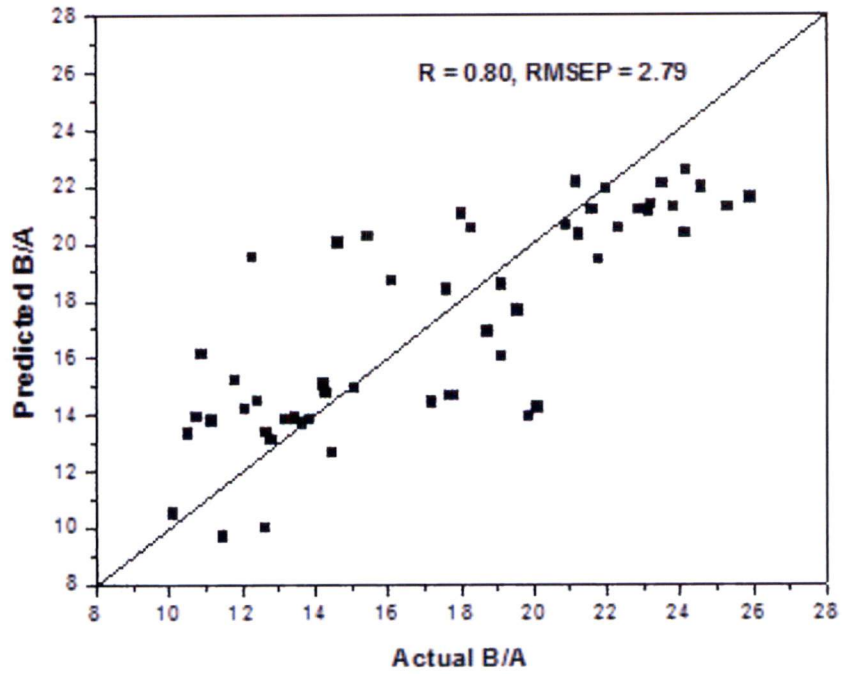


ภาพที่ 4.14 แสดงความยาวคลื่นที่มีความสำคัญที่ใช้ในการสร้างสมการ

ผลเปรียบเทียบข้อมูลค่า อัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดที่ได้จากโมเดลที่ใช้ในการทำนายกับค่าอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดที่วัดได้จริง จากกลุ่มที่ใช้สร้างสมการ (calibration set) ด้วยวิธี cross validation ได้ผลแสดงในภาพที่ 4.15 และผลเปรียบเทียบข้อมูลค่า อัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดที่ได้จากโมเดลที่ใช้ในการทำนายกับค่าอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดที่วัดได้จริง จากกลุ่มที่ใช้ในการทำนาย (prediction set) ได้ผลแสดงในภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.15 แสดงผลการทำนายค่า B/A ในกลุ่มสับประรดที่ใช้สร้างสมการ(calibration set)



ภาพที่ 4.16 แสดงผลการทำนายค่า B/A ในกลุ่มสับประรดที่ใช้ในการทำนาย (prediction set)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลที่ได้ของงานวิจัย สามารถสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนาย อัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดของผลสับประรดพันธุ์ปัตตาเวีย โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยบางส่วนโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดหรือ partial least squares regression (PLSR) จากข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่าน ที่ผ่านกระบวนการ pretreatment ด้วยวิธี Smoothing (Savitzky-Golay) ร่วมกับ standard normal variate transformation (SNV) และ first derivative differentiation (Savitzky-Golay) โดยโมเดลมีความสามารถในการทำนายที่แม่นยำ กล่าวได้ว่า การใช้เทคนิค การดูดกลืนพลังงานแสงใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่านสามารถที่จะนำไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์คัดแยกแบบไม่ทำลายสำหรับผลสับประรดพันธุ์ปัตตาเวียที่มีคุณภาพแตกต่างกันตามค่าอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรด มีความเป็นไปได้

บรรณานุกรม

- กรมวิชาการเกษตร. 2545. เกษตรดีที่เหมาะสมสำหรับสับปะรด. กรุงเทพมหานคร. โรงพิมพ์ ชุมชุม สหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด. หน้า 3-30.
- เกตุอร ทองเครือ. 2541. การปลูกสับปะรด. แหล่งที่มา: <http://web.ku.ac.th/agri/pineapple/index.html>, 17 กันยายน 2541.
- จินดารัฐ วีระวุฒิ. 2541. สับปะรดและสรีรวิทยาการเจริญเติบโตของสับปะรด. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. หน้า 58.
- นิพนธ์ ตังคณานุกรักษ์. 2545. หลักพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้สเปกโตรสโกปี. น.39-61. ใน *การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก*. 27-28 พฤศจิกายน 2545. สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. สับปะรด. แหล่งที่มา: http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.php, 22 สิงหาคม 2552.
- สนธิสุข ชีระชัยชยดี, วารุณี ธนะแพสย์, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, สุมาพร เกษมสำราญ. 2552. การประเมินปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของมังคุดแบบไม่ทำลายโดยใช้แสงย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร* 40(1): 55-64.
- สุมาพร เกษมสำราญ. 2545. หลักพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้สเปกโตรสโกปี. น.39-61. ใน *การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก*. 27-28 พฤศจิกายน 2545. สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. 2545. หลักพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้สเปกโตรสโกปี. น.39-61. ใน *การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก*. 27-28 พฤศจิกายน 2545. สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Batholomew, D.P. and S.B. Kadzimin. 1976. Porometer cup to measure leaf resistance of pineapple. *Crop Sci.* 16: 565-568.
- Carlomagno, G., L. Capozzo, G. Attolico and A. Distanto. 2004. Non-destructive grading of peaches by near-infrared spectrometry. *Infrared Physics & Technol.* 46: 23-29.
- Chyung, A. 2000. Evaluating the internal quality of pineapple by acoustics. ASAE paper No. 00613.

- Clark, C. J., V. A. McGlone, C. Requejo, A. White and A. B. Woolf. 2003. Dry matter determination in 'Hass' avocado by NIR spectroscopy. *Postharvest Biol. Technol.* 29: 300-307.
- Collins, J.L. 1968. The Pineapple. Leonard Hill, London. P 47.
- Dull, G. G., G. S. Birth, D. A. Smittle and R. G. Leffler. 1989. NIR analysis of soluble solids in intact cantaloupe. *J. Food Sci.* 54 (2): 393-395.
- Fraser, D. G., R. B. Jordan, R. Kunemeyer and V. A. McGlone. 2003. Light distribution inside mandarin fruit during internal quality assessment by NIR spectroscopy. *Postharvest Biol. Technol.* 27: 185-196.
- Guthrie, J. and K. Walsh. 1997. Non-invasive assessment of pineapple and mango fruit quality using near infrared spectroscopy. *Aust. J. Exp. Agr.* 37, 253-63.
- Guthrie, J. and B. Wedding. 1998. Robustness of NIR calibrations for soluble solids in intact melon and pineapple. *J. Near Infrared Spectrosc.* 6: 259-265.
- Haff, R.F., D.C. Slaughter, Y. Sarig, A. Kader, 2006. X-ray assessment of translucency in pineapple. *J. Food Process. Pres.* 30, 527-533.
- Hong, T. L. and S. C. S. Tsou. 1998. Determination of tomato quality by NIR spectroscopy. *J. Near Infrared Spectrosc.* 6: 321-324.
- Kawano, S., H. Watanabe and M. Iwamoto. 1992. Determination of sugar content in intact peaches by NIR spectroscopy with fiber optics in interactance mode. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 61(2): 445-451.
- Kawano, S., T. Fujiwara and M. Iwamoto. 1993. Nondestructive determination of sugar content in satsuma mandarin using NIR transmittance. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 62: 465-470.
- Lammertyn, J., A. Peirs, J. De Baerdemaeker and B. Nicolai. 2000. Light penetration properties of NIR radiation in fruit with respect to non-destructive quality assessment. *Postharvest Biol. Technol.* 18: 121-132.
- McGlone, V. A. and S. Kawano. 1998. Firmness, dry-matter and soluble-solids assessment of postharvest kiwifruit by NIR spectroscopy. *Postharvest Biol. Technol.* 13: 131-141.
- McGlone, V. A., R. B. Jordan, R. Seelye and C. J. Clark. 2003. Dry-matter, a better predictor of the post-storage soluble solids in apples?. *Postharvest Biol. Technol.* 28: 431-435.

- McGlone, V. A. and P. J. Martinsen. 2004. Transmission measurements on intact apples moving at high speed. *J. Near Infrared Spectrosc.* 12: 37-43.
- Miyamoto Miyamoto, K., M. Kawauchi and T. Fukuda. 1998. Classification of high acid fruits by partial least squares using NIR transmittance spectra of intact satsuma mandarins. *J. Near Infrared Spectrosc.* 6, 267-271.
- Osborne, B.G., T. Fearn and P. H. Hindle. 1993. Practical NIR Spectroscopy with applications in food and beverage analysis. Second Edition. Longman Scientific and Technical, Harlow, Essex, UK. 227 pp.
- Pathaveerat, S., A. Terdwongworakul and A. Phaungsombut. 2008. Multivariate data analysis for classification of pineapple maturity. *J. Food Eng.* 89, 112–118.
- Saranwong, S., J. Sornsrivichai and S. Kawano. 2004. Prediction of ripe-stage eating quality of mango fruit from its harvest quality measured nondestructively by near infrared spectroscopy. *Postharvest Biol. Technol.* 31: 137–145.
- Schmilovitch, Z., A. Mizrach, A. Hoffman, H. Egozi , Y. Fuchs and Fuchs. 2000. Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry. *Postharvest Biol. Technol.* 19: 245–252.
- Shiina, T., T. Ijiri, I. Matsuda, T. Kato, S. Kawano and N. Ohoshiro, 1992. Determination of brix value and acidity in pineapple fruits by near infrared spectroscopy. *Acta Hortic.* 334, 261–273.
- Slaughter, D. C., D. Barrett and M. Boersig. 1996. Nondestructive determination of soluble solids in tomatoes using NIR spectroscopy. *J. Food Sci.* 61 (4): 695-697.
- Slaughter, D. C., J. F. Thompson and E. S. Tan, 2003. Nondestructive determination of total and soluble solids in fresh prune using near infrared spectroscopy. *Postharvest Biol. Technol.* 28: 437-444.
- Tanabe, T., T. Akinaga, Y. Kohda, Y. Kohno, H. Makeda and T. Mizuno. 1995. Internal quality measurement of tropical fruits by Near Infra-Red spectroscopic technique (Part 1 & 2). *Proc. Soc. Agric. Struct. Japan* 26, 153–160.
- Teerachaichayut, S., K. Y. Kil, A. Terdwongworakul, W. Thanapase and Y. Nakanishi. 2007. Non-

destructive prediction of translucent flesh disorder in intact mangosteen by short wavelength near infrared spectroscopy. *Postharvest Biol. Technol.* 43, 202–206.

Ventura, M., A. D. Jager, H. D. Putter and F. P. M. M. Roelofs. 1998. Non-destructive determination of soluble solids in apple fruit by near infrared spectroscopy (NIRS). *Postharvest Biol. Technol.* 14: 21–27.

Walsh, K. B., M. Golic and C. V. Greensill. 2004. Sorting of fruit using infrared spectroscopy: application to a range of fruit and vegetables for soluble solids and dry matter content. *J. Near Infrared Spectrosc.* 12: 141-148.

ภาคผนวก ก

ตาราง ก.1 ข้อมูลของอัตราส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อค่าความเป็นกรดสับประรด

Sample No	Brix	% Acidity	B/A
1	10.75	1.13	9.50
2	11.73	1.16	10.11
3	8.82	0.86	10.20
4	10.83	1.05	10.32
5	10.20	0.97	10.53
6	8.35	0.78	10.68
7	12.15	1.14	10.69
8	7.02	0.65	10.77
9	9.57	0.89	10.79
10	11.82	1.09	10.81
11	11.45	1.05	10.90
12	10.87	0.98	11.04
13	10.27	0.92	11.16
14	10.55	0.94	11.18
15	10.98	0.98	11.19
16	10.17	0.89	11.44
17	10.97	0.96	11.48
18	10.98	0.94	11.74
19	11.25	0.95	11.82
20	13.17	1.11	11.83
21	9.52	0.80	11.97
22	11.27	0.94	12.00
23	10.80	0.89	12.09
24	9.43	0.77	12.21
25	10.67	0.87	12.21
26	12.12	0.98	12.32
27	10.45	0.84	12.43

Sample No	Brix	% Acidity	B/A
28	11.35	0.91	12.44
29	10.83	0.87	12.44
30	13.48	1.08	12.47
31	12.25	0.97	12.62
32	9.33	0.74	12.63
33	11.90	0.94	12.64
34	12.60	1.00	12.66
35	10.43	0.82	12.68
36	10.95	0.86	12.70
37	10.80	0.85	12.76
38	9.03	0.71	12.81
39	10.08	0.79	12.83
40	12.37	0.94	13.13
41	9.78	0.74	13.24
42	11.55	0.87	13.34
43	11.97	0.90	13.37
44	15.27	1.13	13.47
45	10.00	0.74	13.50
46	11.48	0.84	13.62
47	11.90	0.87	13.67
48	11.77	0.86	13.75
49	10.43	0.75	13.85
50	11.40	0.82	13.86
51	11.12	0.80	13.88
52	10.23	0.72	14.20
53	10.68	0.75	14.26
54	12.33	0.86	14.29
55	13.22	0.93	14.29

Sample No	Brix	% Acidity	B/A
56	11.83	0.83	14.30
57	10.40	0.72	14.41
58	11.58	0.80	14.48
59	11.58	0.80	14.48
60	9.93	0.68	14.59
61	12.08	0.83	14.65
62	13.25	0.90	14.67
63	11.52	0.77	15.05
64	12.23	0.81	15.10
65	12.23	0.81	15.10
66	13.20	0.86	15.30
67	9.45	0.61	15.41
68	12.62	0.82	15.46
69	11.90	0.76	15.56
70	11.98	0.75	16.09
71	13.68	0.85	16.13
72	13.67	0.82	16.75
73	14.52	0.85	17.18
74	12.97	0.75	17.19
75	11.95	0.69	17.24
76	11.57	0.66	17.55
77	13.75	0.78	17.63
78	12.43	0.71	17.64
79	12.75	0.72	17.67
80	12.73	0.72	17.69
81	12.62	0.71	17.75
82	13.93	0.78	17.84
83	12.58	0.70	17.85

Sample No	Brix	% Acidity	B/A
84	12.97	0.73	17.86
85	11.77	0.66	17.87
86	13.67	0.76	18.04
87	15.83	0.88	18.06
88	12.22	0.68	18.10
89	13.20	0.72	18.29
90	13.37	0.72	18.56
91	12.43	0.67	18.58
92	15.12	0.81	18.74
93	12.75	0.68	18.89
94	13.65	0.72	19.09
95	14.12	0.74	19.12
96	14.50	0.76	19.12
97	12.33	0.65	19.12
98	12.32	0.64	19.15
99	13.87	0.72	19.39
100	13.23	0.68	19.44
101	13.12	0.67	19.58
102	12.38	0.63	19.66
103	14.25	0.72	19.68
104	15.63	0.79	19.87
105	12.63	0.64	19.90
106	12.12	0.61	19.92
107	14.18	0.70	20.12
108	13.83	0.68	20.44
109	12.43	0.61	20.49
110	12.47	0.60	20.89
111	12.43	0.59	21.07

Sample No	Brix	% Acidity	B/A
112	13.18	0.62	21.15
113	13.30	0.63	21.17
114	11.98	0.57	21.21
115	12.82	0.60	21.21
116	14.43	0.68	21.23
117	12.50	0.58	21.49
118	14.68	0.68	21.54
119	12.40	0.57	21.60
120	14.68	0.68	21.62
121	13.17	0.61	21.76
122	12.88	0.59	21.77
123	13.32	0.61	21.86
124	15.32	0.70	21.93
125	14.18	0.65	21.99
126	11.92	0.54	22.10
127	12.90	0.58	22.31
128	13.65	0.61	22.32
129	12.78	0.57	22.36
130	12.08	0.54	22.48
131	12.90	0.56	22.87
132	13.43	0.59	22.96
133	15.10	0.66	23.02
134	12.73	0.55	23.15
135	12.28	0.53	23.18
136	13.92	0.60	23.19
137	16.18	0.70	23.20
138	14.43	0.62	23.28
139	13.38	0.57	23.31

Sample No	Brix	% Acidity	B/A
140	14.82	0.63	23.52
141	13.80	0.59	23.59
142	12.53	0.53	23.65
143	13.78	0.58	23.83
144	12.07	0.50	24.01
145	13.75	0.57	24.09
146	14.42	0.60	24.13
147	12.32	0.51	24.15
148	14.82	0.61	24.16
149	12.08	0.50	24.17
150	12.17	0.50	24.17
151	15.32	0.63	24.31
152	15.57	0.63	24.58
153	15.15	0.61	24.77
154	11.92	0.48	24.91
155	13.92	0.55	25.30
156	14.25	0.56	25.60
157	15.07	0.59	25.72
158	13.60	0.53	25.90
159	12.23	0.47	25.94

Mean	12.41	0.75	17.46
Max	16.18	1.16	25.94
Min	7.02	0.47	9.50
SD	1.64	0.16	4.66

119884