



การพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรด
ย่านใกล้ใน ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ



โดย
นางสาวนรีนาถ พวงจีน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาระบบการวิเคราะห์ฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปี
อินฟราเรดย่านใกล้ในไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ



โดย
นางสาวนรีนาถ พวงจิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY METHOD FOR
FRUCTOOLIGOSACCHARIDES IN FUNCTIONAL BANANA FIG SYRUP



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (FOOD TECHNOLOGY)
Engineering and Industrial Technology Silpakorn University
Academic Year 2016
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในไซร์ปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ
โดย	นารีนาด พวงจิน
สาขาวิชา	เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต อินดวงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

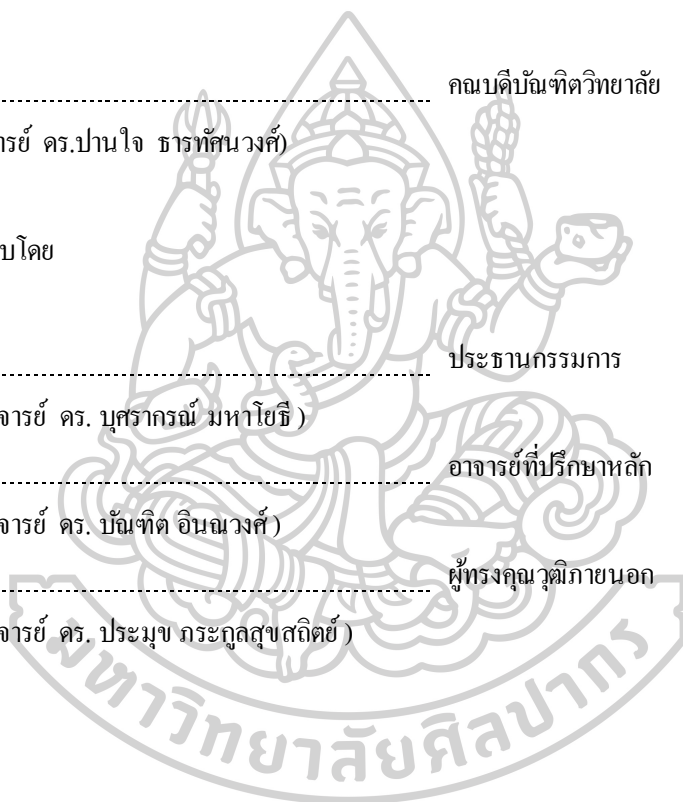
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารัทคนวงศ์)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรากรณ์ มหาโยธี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต อินดวงศ์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประมุข กระจุกสุขสถิตย์)



57403209 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ เทคนิคสเปกโตรสโกปี

อินฟราเรดย่านใกล้

นางสาว นรินาถ พวงจิน: การพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต อินดวงศ์

ไซรัปกล้วยตากที่มีฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์เป็นผลผลิตที่เพิ่มช่องทางตลาดและส่งผลให้เกิดการแข่งขันทางเศรษฐกิจของประเทศไทย แต่เนื่องด้วยวิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์นั้น สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค high performance liquid chromatography (HPLC) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษา การพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR) เพื่อใช้ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ โดยเมื่อใช้เทคนิค NIR ที่ช่วงคลื่น $12500-4000\text{ cm}^{-1}$ และทำการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ร่วมกับการสร้างสมการด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLS) พบว่า สมการทำนายปริมาณซูโครส, กลูโคส, นิสโทส และฟรุคโตฟูเรโนซิลนีสโทส ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.95, 0.98, 0.98 และ 0.97 ค่า RMSEP เท่ากับ 1.54, 0.51, 0.40, 0.42 และ 1.32 ค่า RPD เท่ากับ 4.31, 4.47, 5, 4.9 และ 4.76 และค่า Bias เท่ากับ 0.49, 0.09, -0.02, -0.02 และ -0.08 ตามลำดับ โดยสมการดังกล่าวมีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการทำนายและตรวจวัดปริมาณฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ จากผลดังกล่าวบ่งชี้ให้เห็นว่าเทคนิค NIR สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ในไซรัปกล้วยตากได้

57403209 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : FRUCTOOLIGOSACCHARIDES FUNCTIONAL BANANA FIG SYRUP NEAR-
INFRARED SPECTROSCOPY

MISS Nareenat PHUANGCHEEN: Development of Near-infrared spectroscopy
method for fructooligosaccharides in functional banana fig syrup Thesis advisor : Assistant
Professor Bhundit Innawong

Functional banana fig syrup (FBS) with fructooligosaccharides (FOS) is a product having more marketing chain in Thailand nowadays. FOS was analyzed via high performance liquid chromatography technique (HPLC), the method was difficult, expensive and spent more time for analysis. The aim of this study, to develop analytical method of FOS via using near infrared spectroscopy technique (NIR) in quality monitoring of FBS. NIR have region 12500-4000 cm^{-1} (wave number) it was used with modifying spectrum to find an equation via partial least squares regression (PLS) for detect FOS in the syrup sample. The result of prediction was found that coefficients of determination (R^2) of sucrose, kestose, nystose and fructofuranosyl nystose were 0.95, 0.98, 0.98 and 0.97, RMSEP were 1.54, 0.51, 0.40, 0.42 and 1.32, RPD were 4.31, 4.47, 5, 4.9 and 4.76 and Bias เท่ากับ 0.49, 0.09, -0.02, -0.02 และ -0.08 ตามลำดับ respectively. This equation can use for prediction and evaluate fructooligosaccharides in functional banana fig syrup. NIR technique was applied for detecting sugar component in functional banana fig syrup

กิตติกรรมประกาศ

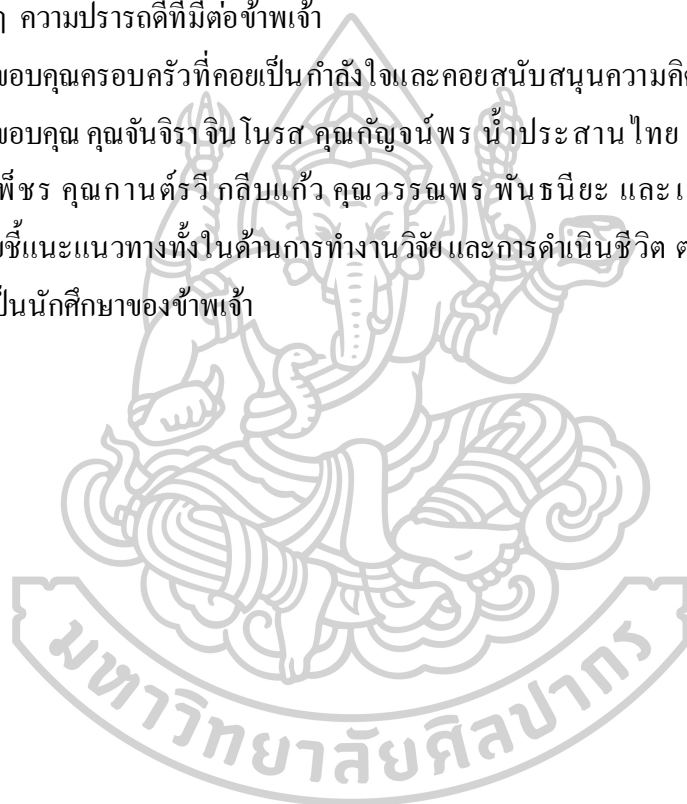
ข้าพเจ้า นางสาวนารีนารถ พวงจิน ขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อินดวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษา ทั้งด้านวิชาการ ด้านวิชาชีพ รวมถึงการดำเนินชีวิตที่ผ่านมามาตลอดช่วงการเป็นนักศึกษาของข้าพเจ้า รวมทั้งในทุกๆ ความปรารถดีที่มีต่อข้าพเจ้า

ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยเป็น กำลังใจและคอยสนับสนุนความคิด ในทุกๆด้าน

ขอขอบคุณ คุณจันจิรา จินโนรส คุณกัญจน์พร น้าประสานไทย คุณจักรพันธ์ ต้นสุวรรณ คุณกิติญา จีเพ็ชร คุณกานต์รวี กสิบแก้ว คุณวรรณพร พันธนิยะ และเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้ คำปรึกษา คอยชี้แนะแนวทางทั้งในด้านการทำงานวิจัย และการดำเนินชีวิต ตลอดช่วงอายุการดำเนิน ชีวิตของการเป็นนักศึกษาของข้าพเจ้า

นารีนารถ พวงจิน



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
บทที่ 2	4
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กัญชง	4
2.2 ไชร์ปุกกล้วยตาก	5
2.3 ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (Fructooligosaccharides: FOS)	8
2.4 เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared spectroscopy, NIR)	11
บทที่ 3	18
วิธีดำเนินการวิจัย	18

3.1	วัตถุประสงค์	18
3.2	สารเคมี	18
3.3	อุปกรณ์และเครื่องมือ	19
3.4	วิธีการทดลอง	19
3.4.1	การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการ ติดตามฟรุกโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์มาตรฐาน	19
3.4.2	การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการ ติดตามฟรุกโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ในไซรับล้อยตาก	22
3.4.3	วิเคราะห์ปริมาณติดตามฟรุกโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ในไซรับล้อยตาก ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)	23
บทที่ 4		25
	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	25
4.1	การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการ ติดตามฟรุกโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์มาตรฐาน	25
4.2	การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการ ติดตามฟรุกโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ในไซรับล้อยตาก	52
บทที่ 5		75
	สรุปผลการทดลอง	75
	รายการอ้างอิง	76
	ภาคผนวก ก	78
	ภาคผนวก ข	82
	ประวัติผู้เขียน	89

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	คุณค่าทางโภชนาการของผลกล้วยสุกหนัก 100 กรัม	4
ตารางที่ 2	องค์ประกอบทางเคมีของไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ	7
ตารางที่ 3	ประสิทธิภาพของสมการทำนาย โดยพิจารณาจากค่า R และ R ²	16
ตารางที่ 4	ตำแหน่งพีกในแถบสเปกตรัม NIR ที่สัมพันธ์กับองค์ประกอบต่างๆ ในผลผลิต	17
ตารางที่ 5	การเตรียมตัวอย่างสารละลายน้ำตาลมาตรฐาน	20
ตารางที่ 6	ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณกลูโคสด้วยเทคนิค NIR.....	29
ตารางที่ 7	ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณฟรุกโตสด้วยเทคนิค NIR.....	33
ตารางที่ 8	ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณซูโครสด้วยเทคนิค NIR.....	37
ตารางที่ 9	ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณเคสโทสด้วยเทคนิค NIR.....	41
ตารางที่ 10	ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณนิสโทสด้วยเทคนิค NIR.....	45
ตารางที่ 11	ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ด้วยเทคนิค NIR.....	49
ตารางที่ 12	ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณซูโครสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตาก เพื่อสุขภาพ ด้วยเทคนิค NIR.....	57
ตารางที่ 13	ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณเคสโทสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตาก เพื่อสุขภาพ ด้วยเทคนิค NIR.....	61
ตารางที่ 14	ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณนิสโทสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตาก เพื่อสุขภาพ ด้วยเทคนิค NIR.....	65
ตารางที่ 15	ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ใน ผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ด้วยเทคนิค NIR.....	69
ตารางที่ 16	ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ใน ผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ด้วยเทคนิค NIR.....	73

ตารางที่ 17 องค์ประกอบทางเคมีของไซรัปกล้วยตากเริ่มต้น 83

ตารางที่ 18 ชนิดและปริมาณน้ำตาลที่พบในไซรัปกล้วยตาก ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC 84



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 โครงสร้างของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ GF2 = เคสโตส, GF3 = นีสโทส และ GF4 = ฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส8

ภาพที่ 2 ปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ในกล้วยน้ำว้า กล้วยไข่ กล้วยหอม และกล้วยเล็บมือนาง9

ภาพที่ 3 โครมาโตแกรมของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ทางการค้า 10

ภาพที่ 4 โครมาโตแกรมของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่สกัดได้จากกล้วยแต่ละชนิด 1)กล้วยไข่ 2) กล้วยน้ำว้า 3)กล้วยหอม และ 4)กล้วยเล็บมือ ทาง 10

ภาพที่ 5 องค์ประกอบของเครื่อง FT-NIR spectroscopy (รุ่น MPA S/N2197, Bruker, Germany).. 12

ภาพที่ 6 การวัดสเปกตรัมจากตัวอย่างในรูปแบบต่างๆ 14

ภาพที่ 7 การวัดตัวอย่าง ในรูปแบบส่องผ่านและสะท้อนกลับ 21

ภาพที่ 8 สเปกตรัมของสารละลายมาตรฐาน 26

ภาพที่ 9 สเปกตรัมของสารละลายกลูโคสมาตรฐานที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี second derivative (d₂)..... 27

ภาพที่ 10 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณกลูโคส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วยวิธี SNV 31

ภาพที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณกลูโคส ในรูปแบบสารละลายที่ ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV 31

ภาพที่ 12 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณฟรุกโตส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วยวิธี MSC 35

ภาพที่ 13 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณฟรุกโตส ในรูปแบบสารละลายที่ ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี MSC 35

ภาพที่ 14 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณซูโครส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่ง สเปกตรัมด้วยวิธี MSC 39

ภาพที่ 15 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณซูโครส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี MSC	39
ภาพที่ 16 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณเคสโทส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV	43
ภาพที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณเคสโทส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV	43
ภาพที่ 18 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณนิสโทส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing	47
ภาพที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณนิสโทส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing	47
ภาพที่ 20 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative	51
ภาพที่ 21 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative	51
ภาพที่ 22 องค์ประกอบทางเคมีของไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ	53
ภาพที่ 23 เส้นสเปกตรัมของไซรัปกล้วยตากจากเทคนิค NIR.....	54
ภาพที่ 24 การปรับแต่งสเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ด้วยวิธี second derivative (d ₂).....	55
ภาพที่ 25 เส้นสเปกตรัมหลังการปรับแต่งด้วยเทคนิค second derivative (d ₂) ของไซรัปกล้วยตาก	55
ภาพที่ 26 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณซูโครสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative.....	59
ภาพที่ 27 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายซูโครสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative.....	59
ภาพที่ 28 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณเคสโทสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing	63

ภาพที่ 29 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายเคสโทสในผลิตภัณฑ์ไชร้ปกล้วยตากเพื่อ คุณภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing	63
ภาพที่ 30 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณนิสโทสในผลิตภัณฑ์ไชร้ปกล้วยตากเพื่อ คุณภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing	67
ภาพที่ 31 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายนิสโทสในผลิตภัณฑ์ไชร้ปกล้วยตากเพื่อ คุณภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing	67
ภาพที่ 32 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ในผลิตภัณฑ์ ไชร้ปกล้วยตากเพื่อคุณภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV	71
ภาพที่ 33 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ในผลิตภัณฑ์ ไชร้ปกล้วยตากเพื่อคุณภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV	71
ภาพที่ 34 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ในผลิตภัณฑ์ ไชร้ปกล้วยตากเพื่อคุณภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV	74
ภาพที่ 35 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลซูโครส	85
ภาพที่ 36 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคส	86
ภาพที่ 37 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลฟรุกโตส	86
ภาพที่ 38 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลคีสโทส	87
ภาพที่ 39 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลนิสโทส	87
ภาพที่ 40 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส	88
ภาพที่ 41 โครมาโตแกรมขององค์ประกอบน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ไชร้ปกล้วยตากเพื่อคุณภาพ	88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องด้วยในปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารเสริมเพื่อสุขภาพได้รับความนิยมมาก สืบเนื่องมาจากผู้บริโภคในปัจจุบันนั้นมีความใส่ใจต่อสุขภาพและการบริโภคอาหารเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารเสริมเพื่อสุขภาพเพิ่มมากขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์เป็นหนึ่งในส่วนของประกอบของอาหารกลุ่มเพื่อสุขภาพ โดยในปัจจุบันกระบวนการวิเคราะห์ฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค โครมาโตกราฟีของเหลวความดันสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) ซึ่งเทคนิคดังกล่าว เป็นเทคนิคที่ทำลายตัวอย่าง มีความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์ มีต้นทุนในการวิเคราะห์ที่สูง และไม่สามารถวิเคราะห์หรือติดตามปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ได้ขณะการผลิต ดังนั้นการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ ฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-infrared spectroscopy: NIR) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้

จากงานวิจัยในปัจจุบัน พบว่ามีการใช้เทคนิค NIR ในการติดตามปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส ซูโครส แลคโตส นีสโทส และฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ซึ่งเทคนิค NIR มีศักยภาพในการทำนายปริมาณซูโครส ในน้ำอ้อย โดยสมการทำนายที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R) เท่ากับ 0.9 (Taira et al., 2013) สำหรับการตรวจสอบปริมาณฟรุกโตส และกลูโคส ในน้ำผึ้ง พบว่า สามารถวิเคราะห์แยกความแตกต่างน้ำผึ้งแท้และน้ำผึ้งเทียมได้ ที่มีอัตราส่วนผสมของกลูโคส และฟรุกโตส ในอัตราส่วนเพิ่มขึ้นในระดับตั้งแต่ร้อยละ 7 ของสารละลายน้ำตาลกลูโคสผสมกับฟรุกโตส (Downey et al., 2003)

จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้น จะเห็นได้ว่าเทคนิค NIRS มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ในการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส ซูโครส แลคโตส นีสโทส ฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส และฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ในผลิตภัณฑ์เสริมสุขภาพได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการติดตามปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ในรูปแบบสารละลาย

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการติดตามปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ในไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

เทคนิค NIR เป็นการตรวจสอบตัวอย่างที่สามารถวิเคราะห์หองค์ประกอบภายในตัวอย่างที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งมีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบได้ ดังนั้นเทคนิค NIR มีความสามารถในการวิเคราะห์ฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ เพื่อทดแทนวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีแบบปัจจุบันที่มีความซับซ้อน ราคาแพง และใช้เวลานาน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. การวิจัยนี้แบ่งการศึกษออกเป็น 2 ขั้นตอน

1.1 ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส ซูโครส เคสโทส นีสโทส และฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทสมาตรฐาน ด้วยเทคนิค NIR

1.2 ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส ซูโครส เคสโทส นีสโทส และฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ด้วยเทคนิค NIR

2. วัตถุประสงค์ในการศึกษาขั้นตอนที่ 1.1 คือสารละลายน้ำตาลมาตรฐาน ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตส ซูโครส เคสโทส (GF_2) นีสโทส (GF_3) และฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส (GF_4) โดยเตรียมในรูปแบบของสารละลาย ที่มีน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย จำนวนตัวอย่างรวมทั้งหมด 600 ตัวอย่าง

3. วัตถุประสงค์ในการศึกษาขั้นตอนที่ 1.2 คือ ผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากจากวิสาหกิจชุมชนกล้วยตากนุฬา อ.บางกระพุ่ม จ.พิษณุโลก จะนำมาผ่านกระบวนการทางด้านชีวภาพ เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในให้มีองค์ประกอบของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ โดยอาศัยความร่วมมือจากศูนย์วิจัยการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ จำนวนตัวอย่างรวม 100 ตัวอย่าง

4. ในการศึกษาขั้นตอนที่ 1.1 ในการสร้างสมการมาตรฐานของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ จะต้องศึกษาให้ครอบคลุมในช่วงความเข้มข้นที่พบจริงได้ในตัวอย่าง และศึกษาที่ในระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน เพื่อความแม่นยำในการทำนายปริมาณน้ำตาล

5. ในการศึกษาขั้นตอนที่ 1.2 เพื่อความแม่นยำในการสร้างสมการทำนายปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ จึงทำให้ตัวอย่างมีความเข้มข้นของปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่แตกต่างกัน

6. ในการศึกษาขั้นตอนที่ 1.1 วิธีมาตรฐาน (reference method) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ กลูโคส ฟรุกโตส ซูโครส เลสโทส นีสโทส และฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ด้วยเครื่อง HPLC (ประมุข, 2554)

7. ในการศึกษาขั้นตอนที่ 1.2 วิธีมาตรฐาน (reference method) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ได้แก่ กลูโคส ฟรุกโตส ซูโครส เลสโทส นีสโทส และฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ด้วยเครื่อง HPLC (ประมุข, 2554)

8. การวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIRS ก่อนการวิเคราะห์ตัวอย่างจะต้องควบคุมอุณหภูมิที่ตรงกับค่าที่กำหนด (25 °C) ทำการวัดสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร หรือ เลขคลื่น 12500-4000 cm^{-1} ในระบบการส่องผ่านและสะท้อนกลับ (transflectance)

9. สร้างสมการเทียบมาตรฐานและทวนสอบการตรวจสอบปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ด้วยเทคนิค PLSR โดยใช้โปรแกรม OPUS Version 7.2.139.1294 (Bruker, Germany) ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐานและสมการทวนสอบทั้ง ในการศึกษาขั้นตอนที่ 1.1 และ 1.2

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กัญชง

กัญชงเป็นพืชที่ปลูกมากในเขตร้อน เขตกึ่งร้อนถึงอบอุ่น (Pan, Shih et al. 2008, Tribess, Hernandez-Urbe et al. 2009) ซึ่งรวมถึงประเทศไทยด้วย โดยทั่วโลกมีกัญชงประมาณ 1000 ชนิด (Waliszewski, Aparicio et al. 2003) และปริมาณผลิตผลทั่วโลกประมาณ 81 ล้านตันต่อปี (Panis, Tottk et al. 1996) ส่วนใหญ่แล้วผู้บริโภคจะรับประทานกัญชงแบบสด (Guerrero-Beltran, Swanson et al. 2005) เพราะกัญชงเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง แต่มีไขมัน คอเลสเตอรอล และเกลือแร่ต่ำ (เบญจมาศ, 2538) (Sanchez, Guio et al. 2008, Tortoe, Johnson et al. 2009) รวมถึงเป็นแหล่งพลังงาน ดังแสดงในตารางที่ 1 กัญชงจึงเป็นอาหารที่เหมาะสมสำหรับบุคคลที่ต้องการควบคุมอาหาร (Aurore, Parfail et al. 2009)

ตารางที่ 1 คุณค่าทางโภชนาการของผลกัญชงสุก หนัก 100 กรัม

สารอาหาร	ปริมาณ	หน่วย
น้ำ	75.7	กรัม
พลังงาน	85	แคลอรี
โปรตีน	1.1	กรัม
ไขมัน	0.2	กรัม
คาร์โบไฮเดรต	22.2	กรัม
ใย	0.8	กรัม
แคลเซียม	8	มิลลิกรัม
เหล็ก	0.7	มิลลิกรัม
โปแตสเซียม	370	มิลลิกรัม
แมกนีเซียม	33	มิลลิกรัม
วิตามินเอ	190	หน่วยสากล
วิตามิน บี1	0.05	มิลลิกรัม
วิตามิน บี2	0.06	มิลลิกรัม
ไนอะซิน	0.7	มิลลิกรัม
วิตามินซี	10	มิลลิกรัม

ที่มา: เบญจมาศ (2538)

กล้วยเป็นผลไม้ที่มีการสุกแบบไคลแมเทอริก (climacteric) โดยเป็นผลไม้ที่มีอัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้นในระหว่างการสุก ซึ่งการสุกจะมีความสัมพันธ์กับก๊าซเอทิลีนที่เพิ่มสูงขึ้น (Rouseff and Leahy 1993) เมื่อมีการหายใจเพิ่มสูงขึ้นก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อต่างๆ ทำให้เกิดการอ่อนนุ่ม และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในนำไปสู่การเสื่อมสภาพของกล้วย (จริงแท้, 2538; (Khalafalla and Palzkill 1990) โดยระหว่างการสุกของผลไม้จะมีปริมาณกรดเพิ่มขึ้น ซึ่งกรดที่พบในกล้วยได้แก่ กรดมาลิก กรดซิตริก และกรดออกซาลิก (Oscar, Harry et al. 1981) โดยกล้วยดิบจะมีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 5-5.6 แต่เมื่อกล้วยสุกค่าความเป็นกรดต่างจะลดลงประมาณ 4.2-4.75 นอกจากนี้กล้วยน้ำว้ามีปริมาณวิตามินซีสูง และเมื่อกล้วยมีการสุกเต็มที่ปริมาณวิตามินซีค่อยๆ ลดลง

โดยเมื่อกล้วยสุกสีเขียวที่เปลือกกล้วยจะหายไป และเกิดสีเหลืองขึ้นมาแทน โดยปกติแล้วผลไม้จะมีคาโรทีน (carotene) และแซนโทฟิลล์ (xanthophyll) เป็นองค์ประกอบ แต่ถูกสีเขียวของคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) บดบังอยู่ แต่ในระหว่างการสุกจะเกิดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ จนกระทั่งคลอโรฟิลล์หมดไป จากนั้นจะปรากฏสีของคาโรทีนอยด์ (carotenoid) ขึ้นมาแทน ซึ่งชนิดแคโรทีนอยด์ที่พบในกล้วยได้แก่แอลฟาแคโรทีน (α -carotene), เบต้าแคโรทีน (β -carotene) และลูทีน (lutein) (Goldstein and Wick 1969)

ระยะการสุกของกล้วยน้ำว้าสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกกล้วย ซึ่งเป็นเครื่องบ่งชี้ระดับการสุกของกล้วย และกล้วยแต่ละระดับการสุกจะมีส่วนประกอบที่แตกต่างกัน โดยมีการแบ่งความสุกของกล้วยตามสีเปลือกเป็น 8 ชั้น ซึ่งเรียกว่าดัชนีสีน้ำตาลของกล้วย (Peel Color Index) (เบญจมาศ, 2538) (Zhang, Whistler et al. 2005)

2.2 ไชร์ปกล้วยตาก

ปัจจุบันการผลิตไชร์ปที่มีในประเทศไทย จะผลิตได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรที่นำมาผ่านกระบวนการเคี่ยวหรือการระเหยน้ำออก (Evaporated syrup) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตไชร์ปจากน้ำตาลมะพร้าว น้ำตาลจาก และไชร์ปจากน้ำอ้อย ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นไชร์ปมีวัตถุดิบเริ่มต้นเป็นของเหลวแล้วจึงมาผ่านกระบวนการเคี่ยวเพื่อให้ได้เป็นไชร์ป ซึ่งผลิตภัณฑ์ไชร์ปจะต้องมีองค์ประกอบของของแข็งที่สามารถละลายน้ำได้ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 65 เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นสูง ดังนั้นจึงมีอายุการเก็บรักษานาน ไม่เกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ แต่เมื่ออายุการเก็บรักษานานขึ้นจะเกิดการเสื่อมเสียทางกายภาพ คือ มีสีคล้ำ เนื่องจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด และเกิดการตกตะกอนเพราะ ไชร์ปจากวัตถุดิบธรรมชาตินั้นมี

สารประกอบอื่นๆ นอกจากน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ อาทิ เช่น โปรตีน วิตามิน และไขมัน เป็นต้น (ประมุข, 2554)

กระบวนการผลิตไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ

กล้วยตากของวิสาหกิจชุมชนกล้วยตากบุปผา จังหวัดพิษณุโลก โดยกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกล้วยตากนั้นมีการผลิตไซรัปกล้วยตาก ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่จะช่วยเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับกล้วยตากพิษณุโลก โดยผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากมีคุณค่าทางโภชนาการ ดังตารางที่ 2 โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบของคุณค่าทางโภชนาการ และองค์ประกอบของน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากพบว่า ผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเริ่มต้นนั้น ไม่พบองค์ประกอบของสารฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ แต่พบว่าปริมาณน้ำตาลซูโครสเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก ซึ่งน้ำตาลซูโครสนั้นเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ได้ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์เป็นองค์ประกอบ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันประชากรของประเทศไทย ซึ่งก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ ซึ่งมีความต้องการอาหารที่ให้คุณประโยชน์แก่ร่างกาย และประชากรผู้สูงอายุมักพบว่ามีปัญหาโรคแทรกซ้อนเป็นส่วนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรคเบาหวาน ทำให้ผลิตภัณฑ์นี้มีความสามารถในการตอบโจทยสภาวะสังคมผู้สูงอายุในประเทศไทย เนื่องจากเมื่อผลิตเป็นไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพแล้วนั้น องค์ประกอบของน้ำตาลทั้งโมเลกุลเดี่ยวและโมเลกุลคู่จะเป็นสารตั้งต้นในการผลิตฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ได้

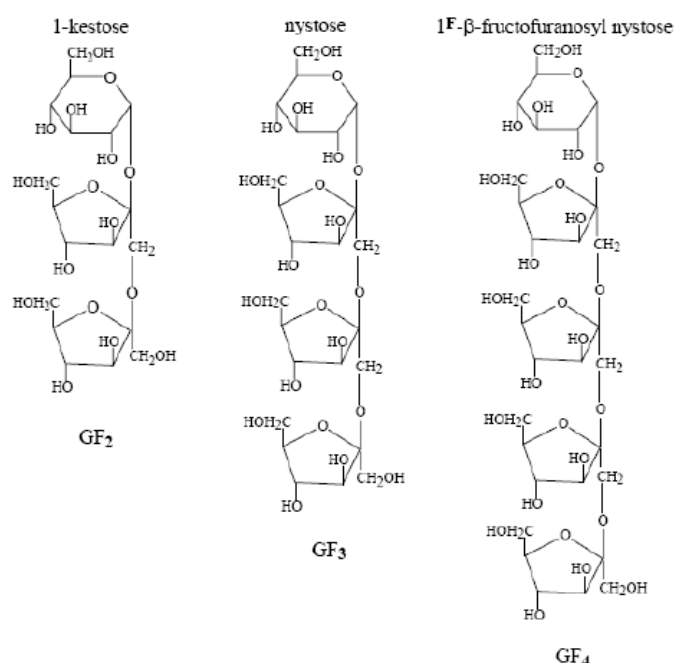
กระบวนการผลิตไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ สามารถผลิตได้โดยนำไซรัปกล้วยตากที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดประมาณ 75 ° Brix สามารถผลิตไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพได้โดยใช้เอนไซม์ Pectinex Ultra SP-L โดยอัตราส่วนของไซรัปต่อเอนไซม์ เท่ากับ 3:1 (v/v) ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง เมื่อทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้วนั้น หลังจากนั้นหยุดปฏิกิริยาโดยการให้ความร้อนและเป็นการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ โดยพาสเจอร์ไรซ์ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที ซึ่งผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพนั้น มีฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 36.45 (w/w) มีค่าความเป็นกรดต่าง pH 4.25 (ประมุข, 2554)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของไซรัปล้ำวยตากเพื่อสุขภาพ

องค์ประกอบทางเคมีกายภาพ	ไซรัปล้ำวยตาก	หน่วย
ค่า L*	9.89 ± 0.10	-
ค่า a*	-0.81 ± 0.10	-
ค่า b*	3.42 ± 0.50	-
ปริมาณความชื้น	16.75 ± 0.30	ร้อยละ (%)
ค่าวอเตอร์แอกติวิตี	0.67 ± 0.11	-
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด	75.00 ± 1.50	° Brix
ค่าความเป็นกรดต่าง	4.25 ± 0.30	-
ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (มาลิก)	1.99 ± 0.00	ร้อยละ (%)
น้ำตาลกลูโคส	568.86 ± 9.56	g/kg
น้ำตาลฟรุกโตส	563.74 ± 10.08	g/kg
น้ำตาลซูโครส	16.97 ± 2.15	g/kg
น้ำตาลฟรุกโตฟูเรโนซิลนิสโทส	55.45 ± 1.06	g/kg
น้ำตาลนิสโทส	53.82 ± 0.78	g/kg
น้ำตาลเคสโทส	60.56 ± 1.15	g/kg
ฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์	169.83 ± 0.95	g/kg

2.3 ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (Fructooligosaccharides: FOS)

ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (Fructooligosaccharides: FOS) คือ โอลิโกแซคคาไรด์ของน้ำตาลฟรุคโตสที่ประกอบด้วยโมเลกุลเดี่ยวของน้ำตาลกลูโคส สามารถผลิตโดยเอนไซม์ฟรุคโตซิลทรานส์เฟอเรส (fructosyltransferase) จากพืชหรือจุลินทรีย์หลายชนิด FOS ประกอบด้วย 1-กิสโตส (GF₂), นีสโตส (GF₃) และ 1-เบต้าฟรุคโตฟูเรโนซิลนีสโตส (GF₄) (Sanchez, Guio et al. 2008) ซึ่งมีโครงสร้างแสดงไว้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ GF₂ = เคสโตส, GF₃ = นีสโตส และ GF₄ = ฟรุคโตฟูเรโนซิลนีสโตส

ที่มา: (Oku, Tokunaga et al. 1984)

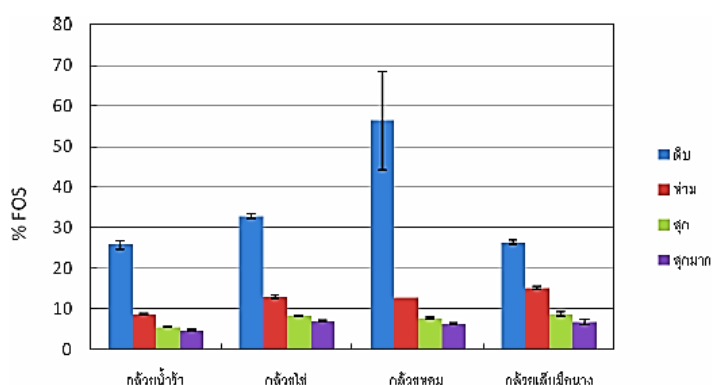
โอลิโกเมอร์ของน้ำตาลฟรุคโตสที่มีโครงสร้างคล้ายกับฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ คือ อินูลิโนโอลิโกแซคคาไรด์ (inulino – oligosaccharides, IOS) ผลิตได้จากการย่อยอินูลิน (inulin) ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ของฟรุคโตสที่มีขนาดยาวให้สั้นลง ย่อยอินูลินเป็นโพลิเมอร์ของฟรุคโตสที่เชื่อมต่อกันเป็นเส้นตรงที่ตำแหน่งบีตา 2, 1 (β -2,1 linked polyfructan) โดยปลายด้านหนึ่งคือกลูโคสที่เชื่อมต่อกับฟรุคโตส ในลักษณะการเชื่อมของซูโครส มีโครงสร้างเป็น GF_n โดยมีค่าดีกรีโพลิเมอร์ไรเซชัน ตั้งแต่ 10–60 โดยพบในหัวบัวตอง รากเร่ เป็นต้น เมื่อย่อยโพลิเมอร์นี้โดยไฮโดรไลซ์ด้วยกรดหรือเอนไซม์อินูลินเนสจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้าง GF_n และ F_n ซึ่งมีค่าดีกรีโพลิเมอร์ไรเซชัน

ตั้งแต่ 2–8 ซึ่งประกอบด้วย GF_n ประมาณร้อยละ 63 และ F_n ประมาณร้อยละ 37 เรียกผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้ว่า อินูลินโอลิโกแซคคาไรด์

(Oku, Tokunaga et al. 1984) ได้รวบรวมฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ไว้ดังนี้คือ

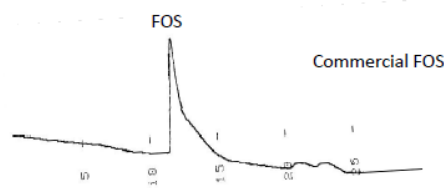
- ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์มีความหวาน 1 ใน 3 เท่าของน้ำตาลซูโครส
- ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์มีความหนืดมากกว่าน้ำตาลซูโครสที่เข้มข้นเดียวกัน เนื่องจากมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่กว่าและมีความเสถียรต่ออุณหภูมิมากกว่าซูโครสด้วย 1- เอสโทส มีค่าจำเพาะการหมุน $[\alpha]_D^{20}$ เท่ากับ 28.5° และอุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ 199 – 200 องศาเซลเซียส
- ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์เกิดเป็นผลึกสีขาวเล็ก ๆ ใต้อย่างรวดเร็วและผลึกฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์นั้นดูความชื้นได้ดี จึงไม่เหมาะที่จะทำให้อยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ผง
- ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์มีความเสถียรในค่า pH ทั่วไปของอาหารคือช่วง pH 4 – 7 ดังนั้นสามารถใช้น้ำตาลฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์เป็นส่วนประกอบในอาหารได้และสามารถเก็บ ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ไว้ในห้องเย็นได้เป็นระยะเวลา 1 ปี

ในกล้วยจะมี FOS เป็นองค์ประกอบโดย FOS ที่มีในกล้วยจะขึ้นกับสายพันธุ์ และระดับการสุกของกล้วย สุวีตนา (2552) กล่าวว่า จะมีปริมาณ FOS ที่ระดับกล้วยดิบมากที่สุดในกล้วยทุกสายพันธุ์ ดังภาพที่ 2

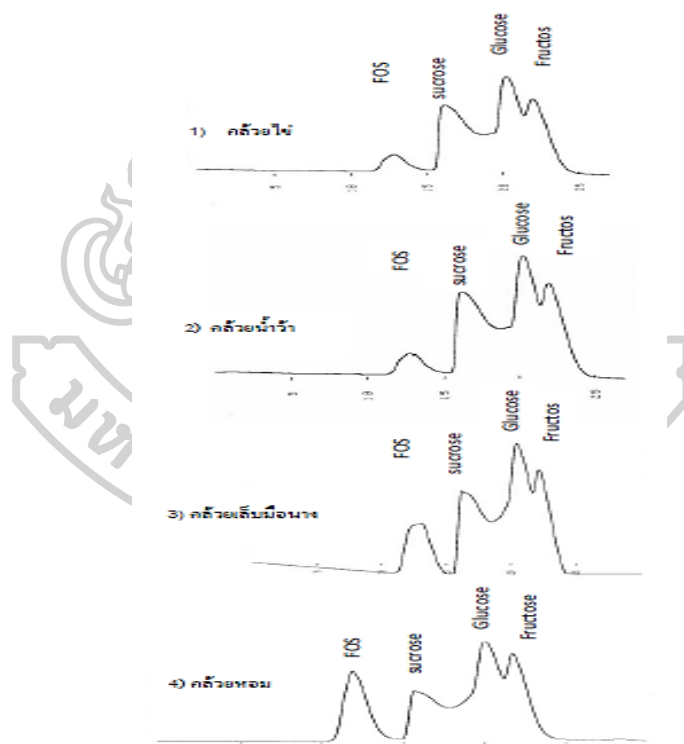


ภาพที่ 2 ปริมาณฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ในกล้วยน้ำว้า กล้วยไข่ กล้วยหอม และกล้วยเล็บมือนาง

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ ที่ได้จากกล้วยน้ำว้า กล้วยไข่ กล้วยหอม และกล้วยเล็บมือนาง กับโครมาโตแกรมของฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ทางการค้าภายใต้ชื่อ Fibersure บริษัท Metamucil ประเทศเบลเยียม พบว่าจะมีลักษณะที่คล้ายกัน แต่จะมีความแตกต่างกันที่ว่า ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ ที่ได้จากกล้วยสายพันธุ์ต่างๆ จะมีพีคของน้ำตาลอื่นๆ มากกว่า ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ทางการค้า ดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4



ภาพที่ 3 โครมาโตแกรมของฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ทางการค้า
ที่มา: สุวัฒน์ (2552)

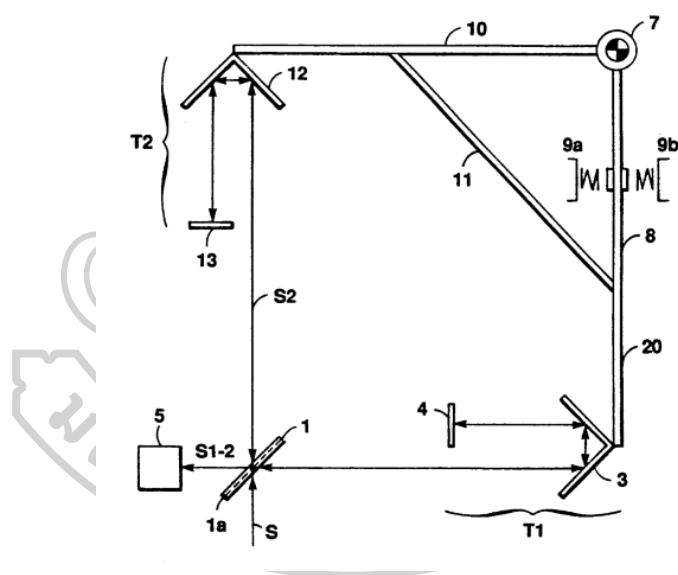


ภาพที่ 4 โครมาโตแกรมของฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่สกัดได้จากกล้วยแต่ละชนิด 1)กล้วยไข่ 2)กล้วยน้ำว้า 3)กล้วยหอม และ 4)กล้วยเล็บมือนาง
ที่มา: สุวัฒน์ (2552)

2.4 เทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared spectroscopy, NIR)

แสงใกล้อินฟราเรด (near infrared) เป็นคลื่นแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 800 - 2500 นาโนเมตร หรือ ที่เลขคลื่น $12500-4000\text{ cm}^{-1}$ โดยมีหลักการดังนี้ คือ เมื่อแสงส่องผ่านไปที่วัตถุส่งผลให้โมเลกุลของสารเกิดการสั่นที่ความถี่สูง ในการสั่นของพันธะต่างๆจะเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละพันธะรวมทั้งตำแหน่งของโมเลกุลและช่วงการดูดกลืนแสงก็เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชันด้วย ดังนั้นเมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตรงกับพันธะในโมเลกุลก็จะเกิดการสั่นและดูดกลืนรังสีไว้ทำให้มีพลังงานมากกว่าปกติ จากเดิมที่โมเลกุลอยู่ในสภาวะพื้น (ground vibration level) เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited vibration level) อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลกลับสู่สภาวะพื้นก็จะปล่อยพลังงานที่รับเพิ่มเข้าไปออกมาในรูปพลังงานความร้อน ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสง (Absorbance, A) เป็นไปตาม กฎของ เบียร์ – แลมเบิร์ต (Beer-Lambert) พลังงานของคลื่นแสงเมื่อผ่านเข้าไปในตัวอย่าง พลังงานจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง ความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีนั้น (Osborne, Fearn et al. 1993) ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีที่ดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้เป็นสารประกอบอินทรีย์คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน โดยจะเป็นการการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C-H, O-H, C=O และ C=C ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถพบได้ในองค์ประกอบของพริกโตโอไลโกแซคคาไรด์ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้เทคนิค NIR สามารถใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยเครื่อง FT-NIR spectrometer นั้นจะใช้อินเทอร์โรมิเตอร์ (interferometer) ที่อาศัยหลักการดูดกลืนแสง ซึ่งองค์ประกอบในเครื่อง FT-NIR spectrometer รุ่น MPA ของบริษัท Bruker นั้นถูกเรียกว่า RockSolid interferometer โดยจะเริ่มที่แหล่งกำเนิดแสง (light source; s) ปล่อยแสงที่มีคุณลักษณะรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่น 780-2500 นาโนเมตร ผ่านกระจกแสง (beam splitter; 1) คือ กระจกที่แสงสามารถผ่านทะลุได้ โดยลำแสงจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกระจกแบ่งแสง หลังจากนั้นแสงจะเข้าสู่ระบบเชิงแสง (optical system; T1 และ T2) ประกอบด้วยกระจกที่อยู่กับที่ (fixed mirror; 4 และ 13) และอุปกรณ์สะท้อนแสง (retroreflector; 3 และ 12) โดยเครื่อง FT-NIR spectrometer ใช้ gold-coated cube-corner โดยจะเห็นได้ว่าแสงที่ผ่านกระจกแบ่งแสงจะเข้าสู่อุปกรณ์สะท้อนแสง (cube-corner) อีกแล้วสะท้อนกลับเข้าสู่กระจกแบ่งแสงอีกครั้ง จากนั้นแสงจึงเดินทางเข้าสู่ตัวอย่างที่อยู่ในช่องใส่ตัวอย่าง (sample cell) เมื่อแสงผ่านตัวอย่างแล้วจะเข้าสู่อุปกรณ์

รวมแสง (integrating sphere) เพื่อช่วยกักเก็บแสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่างเข้าสู่ตัวรับแสง (detector; 5) ซึ่งตัวรับแสงของเครื่องนี้มีชนิดที่เป็นของแข็ง คือ เหล็กซัลไฟด์ และชนิดที่เป็นของเหลว คือ indium gallium arsenide (InGaAs) จากนั้นเข้าสู่กระบวนการประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยความเข้มของแสงที่ตรวจวัดได้นั้นเป็นผลรวมที่เกิดจากแสงในทุกๆ ความยาวคลื่น ตั้งแต่ 780-2500 นาโนเมตร ดังนั้นสัญญาณที่ได้จากการวัดนี้จะถูกเรียกว่า Interferogram โดยจะถูกแปลงสัญญาณออกมาในรูปของสเปกตรัมที่แสดงใน โปรแกรม OPUS ซึ่งใช้การคำนวณด้วย Fourier transform ของระบบคอมพิวเตอร์ร่วมด้วย โดยระบบอินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์มีข้อดี คือ มีความสามารถในการวิเคราะห์ตัวอย่างได้อย่างรวดเร็ว พร้อมกับสามารถตรวจวัดพลังงานของทุกความยาวคลื่นได้ในเวลาเดียวกันด้วย (ดังภาพที่ 5)



ภาพที่ 5 องค์ประกอบของเครื่อง FT-NIR spectroscopy (รุ่น MPA S/N2197, Bruker, Germany)

ที่มา: Simon et al. (1994)

ขั้นตอนในการวัดตัวอย่างด้วยเทคนิค NIR ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การสร้างข้อมูลสเปกตรัม โดยนำตัวอย่างที่สนใจไปวัดด้วยเทคนิค NIR ในช่วงคลื่น NIR และการสร้างข้อมูลทางเคมีเพื่อใช้เป็นสำหรับข้อมูลในการอ้างอิงสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิค NIR โดยจะนำตัวอย่างเดียวกับที่วัดในช่วงคลื่น NIR ไปวัดค่าทางเคมี เมื่อได้ข้อมูลครบถ้วนเรียบร้อยแล้วนั้น จะนำข้อมูลสเปกตรัมและข้อมูลทางเคมีที่ได้มาสร้างสมการเทียบมาตรฐาน (calibration model) จากนั้นจะนำ

ตัวอย่างมาตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำของสมการมาตรฐานดังกล่าว โดยเป็นขั้นตอนของการทวนสอบสมการ (validation model) และทำนายค่า (prediction) ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของตัวอย่างที่นำมาวัดด้วยเทคนิค NIR โดยในปัจจุบันนี้เทคนิค NIR ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างในระยะเวลาที่รวดเร็ว และที่สำคัญเป็นการวัดตัวอย่างที่ไม่มีการทำลายตัวอย่าง ประกอบกับสามารถวิเคราะห์หองค์ประกอบหลายอย่างของตัวอย่างได้ในเวลาเดียวกันด้วย

รูปแบบการวัดตัวอย่างด้วย NIR

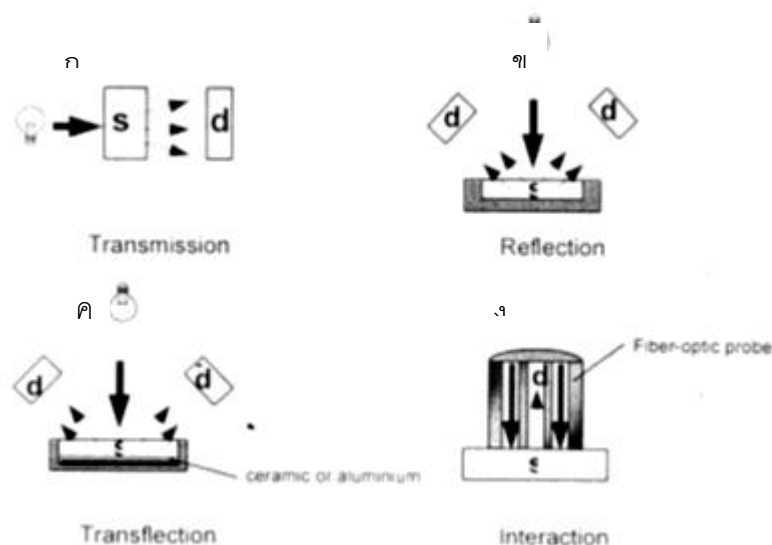
รูปแบบการให้แสงส่องผ่านตัวอย่างในเครื่อง NIR มีหลายแบบได้แก่เช่น transmission, reflection, transflection และ interaction (ศุมาพร, 2545)

- Transmission แสดงกระทบตัวอย่างด้านหนึ่ง โดยที่ detector จะวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมาจากตัวอย่างในด้านตรงกันข้าม (ภาพที่ 6 ก) ส่วนมากจะใช้กับตัวอย่างที่เป็นของเหลวที่แสงสามารถส่องผ่านได้

- Reflection แสงจะตกกระทบที่ผิวของตัวอย่าง และอาจแพร่กระจายในปริมาณหนึ่งก่อนแล้ววัดปริมาณแสงสะท้อนกลับออกมาโดย detector (ภาพที่ 6 ข) ใช้กับตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

- Transflection แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบตัวอย่างและส่องผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบวัตถุที่ไม่ดูดกลืนแสง (แผ่นเซรามิก, ทอง หรืออลูมิเนียม) ที่อยู่ด้านล่างตัวอย่างแล้วเกิดการสะท้อนกลับมายัง detector (ภาพที่ 6 ค)

- Interaction กระบวนการนี้เกิดในกรณีที่ใช้หัววัดใยแก้วนำแสง (fiber optics probe) แสงจะออกมาจากส่วนวงแหวนด้านนอกของหัววัดมาตกกระทบตัวอย่าง และแสงที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างจะถูกส่งไปยัง detector บริเวณส่วนกลางของใยแก้วนำแสง (ภาพที่ 6 ง)



ภาพที่ 6 การวัดสเปกตรัมจากตัวอย่างในรูปแบบต่างๆ

ที่มา: ศุมาพร (2545)

การแปลงหรือการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัม (Spectrum pretreatment)

การแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากเครื่อง NIR เพื่อลดอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ เช่น ความชื้น การบรรจุ และอุณหภูมิของตัวอย่าง เป็นต้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สเปกตรัมมีความแตกต่างกัน ส่งผลต่อสมการที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำในการทำนายลดลง (Bokobza 1998) ดังนั้นการแปลงข้อมูลสเปกตรัมโดยวิธีการทางคณิตศาสตร์ถือเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้ขั้นตอนการสร้างสมการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ในการแปลงข้อมูลสเปกตรัมได้แก่

1. วิธีอนุพันธ์ (derivative) เป็นการหาความชันของสเปกตรัม เพื่อแก้ปัญหาฟีกที่มีฐานกว้าง (broad peak) เนื่องจากการซ้อนทับกันของฟีก (overlapping) และอิทธิพลจากการยกตัวของเส้นสเปกตรัม (base line shift) ที่เกิดจากการกระเจิงแสง (scattering light) (Williams and Norris 2001) โดยการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 1 สามารถลดปัญหาการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ของค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน Y ทำให้เส้นสเปกตรัมเลือนมาชิดกัน แต่ฟีกของสเปกตรัมยังมีรากฐานกว้าง จึงไม่สามารถแยกฟีกออกจากกันอย่างชัดเจนได้อีกทั้งวิธีอนุพันธ์อันดับ 1 ให้ความหมายเป็นค่าความชันของเส้นสเปกตรัมแต่ละความยาวคลื่นซึ่งทำให้แปลความหมายได้ยาก แต่การแปลงข้อมูลด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 (second derivative) สามารถลดผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมมีขนาดเพิ่มขึ้นตลอดช่วงความยาวคลื่นตามแกน

Y ที่ชัดเจนกว่าอนุพันธ์อันดับที่ 1 และแยกฟีกสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับกันออกจากกันได้อย่างชัดเจน ทำให้ทราบตำแหน่งความยาวคลื่น แต่สเปกตรัมมีลักษณะหัวกลับลงมาด้านล่าง (Osborne, Fearn et al. 1993) ดังนั้น การคำนวณการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์อันดับที่ 2 จึงเป็นที่นิยมมากกว่าวิธีอนุพันธ์อันดับที่ 1 โดยการเพิ่มอันดับของอนุพันธ์สูงขึ้น ก็จะได้สเปกตรัมที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นข้อมูลที่ดีในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ แต่การทำอนุพันธ์ที่สูงเกินไปทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณรบกวนกับสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ลดลง เนื่องจากแถบสัญญาณรบกวนมักมีรูปร่างแคบชัน ดังนั้นเมื่อแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยอนุพันธ์สเปกตรัมที่ได้ของสัญญาณรบกวน จึงมีแอมพลิจูด (amplitude) เติบโตมากยิ่งขึ้นจนสามารถรบกวนการวิเคราะห์ได้ (ซีรศักดิ์ และวนิดา, 2550)

2. การปรับแก้การกระเจิงแบบพหุคูณ (multiplicative scatter correction, MSC) เป็นการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสเปกตรัมเพื่อลดอิทธิพลของการกระเจิงของแสงที่เกิดจากสาเหตุที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยการปรับเส้นสเปกตรัมทุกเส้นให้หมุนเข้าใกล้เส้นสเปกตรัมเฉลี่ยมากที่สุด ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการลดค่าผิดพลาด (Barnes, Dhanoa et al. 1989) ใช้ NIR แบบวัดการสะท้อนกลับของแสง เพื่อหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดพืช โดยแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี MSC พบว่า มีค่าผิดพลาดของสมการต่ำกว่าสมการของสเปกตรัมดั้งเดิม (original spectrum)

3. วิธีปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (standard normal variate, SNV) เส้นสเปกตรัมที่ได้จะเกิดได้จากการกระเจิงแสงของตัวอย่าง ซึ่งแต่ละเส้นสเปกตรัมมีการกระเจิงแสงที่แตกต่างกันเนื่องจากการกระทบกับองค์ประกอบภายในของตัวอย่างที่แตกต่างกัน นอกจากนี้การกระเจิงแสงขึ้นอยู่กับความยาวของคลื่นแสง ขนาดอนุภาค การกระจายตัวของอนุภาค และดัชนีหักเหของตัวอย่าง ดังนั้นตลอดช่วงของเส้นสเปกตรัมจึงเกิดการกระเจิงแสงไม่เท่ากัน โดยเส้นสเปกตรัมที่ได้รับผลกระทบจากการกระเจิงแสงจะมีการเคลื่อนตัวตามแนวตั้ง มีการหมุนของเส้นสเปกตรัม ซึ่งวิธีการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมให้ใช้วิธีปรับความแปรปรวนจะทำให้ผลลัพธ์คล้ายคลึงกับการปรับแก้การกระเจิงแบบพหุคูณ

4. การปรับค่าเป็นมาตรฐาน (Normalization) เป็นวิธีที่นำมาใช้กำจัดความแปรปรวนของเส้นสเปกตรัม โดยนำค่าดูดกลืนแสงอ้างอิงหรืออาจเป็นค่าการดูดกลืนแสงที่มาก

ที่สุดมาลบออกจากค่าการ ดูดกลืนแสงในเส้นสเปกตรัมเดียวกันที่ความยาวคลื่นต่างๆ หรืออาจนำค่าการดูดกลืนแสงอ้างอิงมาหารค่าการดูดกลืนแสงที่แต่ละ ความยาวคลื่น

วิธีการแปลงข้อมูลสเปกตรัมที่ดีที่สุดก็คือ วิธีที่ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้สมการ ทำนายที่มีความสามารถในการทำนายปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างได้ใกล้เคียงที่สุด อย่างไรก็ตามไม่มีกฎตายตัวแน่นอนสำหรับแน่นอน สำหรับการตัดสินใจเลือกวิธีที่จะใช้ในการแปลงข้อมูล วิธีที่ดีที่สุด คือการลองผิดลองถูกในการทดลองใช้แต่ละวิธีจนกว่าจะได้สมการทำนายที่แม่นยำสุด โดยต้องเข้าใจความหมายและคำนึงถึงข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีให้ชัดเจน (Hruschka 2001)

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพของสมการทำนาย โดยพิจารณาจากค่า R และ R²

R	R ²	ประสิทธิภาพของสมการทำนาย
±0.5	0.25	ไม่ควรใช้ในการทำนาย
±0.51-0.70	0.26-0.49	ความสัมพันธ์ไม่ดีพอ
±0.71-0.80	0.50-0.64	สามารถใช้คัดเลือกเบื้องต้นได้
±0.81-0.90	0.65-0.81	สามารถใช้ในการคัดเลือกหรือประมาณค่าเบื้องต้น
±0.91-0.95	0.82-0.90	สามารถใช้ตรวจคุณภาพได้
±0.96-0.98	0.92-0.96	สามารถใช้ในงานประกันคุณภาพ
±0.99 ขึ้นไป	±0.98 ขึ้นไป	สามารถใช้ได้กับทุกงาน

ตารางที่ 4 ตำแหน่งพิกในแถบสเปกตรัม NIR ที่สัมพันธ์กับองค์ประกอบต่างๆ ในผลผลิต

Wavelength (nm)	Bond vibration	Structure
1440	O-H str. 1st overtone	sucrose, starch
1450	O-H str. 1st overtone	starch, H ₂ O
1528	O-H str.1st overtone (intramol. H-bond)	starch
1540	O-H str.1st overtone (intramol. H-bond)	starch, glucose
1580	O-H str.1st overtone (intramol. H-bond)	starch
1900	O-H str. _ 2xC-O str. Combination	starch
1930	O-H str. + H-O-H def. combination	starch, cellulose
1940	O-H bend 2nd overtone	H ₂ O
1960	O-H str. + O-H bend combination	starch
2000	2x O-H def. + C-O def. combination	starch
2080	O-H str. + O-H def. combination	ROH, sucrose, starch
2100	2xO-H str. + 2xC-O str. Combination	starch
	C-O-O asym.str.3rd overtone	starch, cellulose
2252	O-H str. + C-C str. combination	starch
2276	O-H str. + O-H dif. combination	starch
2323	C-H str. + C-H def. combination	CH ₂ , starch
2461	C-H str. + C-C str. combination	starch
2488	C-H str. + C-C str. combination	starch, cellulose
2500	C-H str. + C-C str. combination	starch

ที่มา: (Osborne, Fearn et al. 1993) และ (Williams and Norris 2001)

str. = stretch def. = deformation sym. = symmetric asym. = asymmetric

*amideI: C=O stretch. Amide II: N-H in-plane bend, C-N stretch. Amide III: C-N stretch, N-H in-plane bend

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุประสงค์

ผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากจากวิสาหกิจชุมชนกล้วยตากบุปผา อ.บางกระทุ่ม จ.พิษณุโลก จะนำมาผ่านกระบวนการทางด้านชีวภาพ เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในให้มีองค์ประกอบของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ โดยอาศัยความร่วมมือจากผู้วิจัยการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ (ผศ.ดร.ประมุข ภาระกุลสูงสถิตย์ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์) ในการจัดเตรียมผลิตภัณฑ์ดังกล่าว โดยมีความเข้มข้น 75 องศาบริกซ์

3.2 สารเคมี

- 3.2.1 กลูโคสมาตรฐาน (Sigma Aldrich) (Steinheim, Germany)
- 3.2.2 ฟรุกโตสมาตรฐาน (Sigma Aldrich) (Steinheim, Germany)
- 3.2.3 ซูโครสมาตรฐาน (Sigma Aldrich) (Steinheim, Germany)
- 3.2.4 เคสโทสมาตรฐาน (Wako Pure Chemical Industries) (Osaka, Japan)
- 3.2.5 นีสโทสมาตรฐาน (Wako Pure Chemical Industries) (Osaka, Japan)
- 3.2.6 ฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทสมาตรฐาน (Wako Pure Chemical Industries) (Osaka, Japan)
- 3.2.7 น้ำกลั่น HPLC grade
- 3.2.8 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) (Merck, Germany)
- 3.2.9 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) (Merck, Germany)
- 3.2.10 ฟีนอล์ฟธาเลิน (phenolphthalein) (Labchem, USA)
- 3.2.11 กรดมาลิกมาตรฐาน (malic acid)

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.3.1 กระดาษกรองเบอร์ 4 ขนาด 110 mm (Whatman, UK)

3.3.2 NIR sample cell สำหรับวัดตัวอย่างของเหลว มี path length 0.2 mm

3.3.3 เครื่องสเปกสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้แบบ FT-NIR spectrometer (รุ่น MPA S/N 2197 Bruker, Germany)

3.3.4 เครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวความดันสูง high performance liquid chromatography (HPLC)

3.3.5 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield)

3.3.6 เครื่องผสมแบบวอร์เท็กซ์ (vortex mixer)

3.3.7 ตู้บดมร้อน (Blender)

3.3.8 เครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด Hand refractometer

3.3.9 เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

3.3.10 เครื่องวัดความชื้น Karl Fisher Titration (รุ่น 758 KFD Titrino, , Switzerland)

3.3.11 เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Decagon Aqualab 4TE, WA, USA)

3.3.12 เครื่องวัดสี (Hunter lab) (MiniScan, Hunter Lab, Virginia, USA)

3.3.13 คอลัมน์ Carbohydrate column-Rezex (Phenomenex, USA)

3.4 วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

3.4.1 การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการติดตามฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์มาตรฐาน

3.4.1.1 การเตรียมตัวอย่าง

น้ำตาลมาตรฐานที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ซูโครส, กลูโคส และฟรุกโตส จากบริษัท Sigma Aldrich (Steinheim, Germany) และฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์มาตรฐาน ได้แก่ เคสโทส (GF₂), นีสโทส (GF₃) และ ฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส (GF₄) จากบริษัท Wako Pure Chemical Industries (Osaka, Japan)

ตัวอย่างน้ำตาลและฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์มาตรฐาน ($n = 60$) ที่ใช้จะนำมาใช้ในรูปของสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ สารละลายฟรุกโตสและซูโครสมาตรฐานความเข้มข้น ร้อยละ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 (w/v) สารละลายกลูโคสมาตรฐานความเข้มข้น ร้อยละ 14, 16, 18 และ 20 (w/v) สารละลายเคสโทสมาตรฐานความเข้มข้น ร้อยละ 5, 6 และ 7 (w/v) และสารละลายนิสโทสมาตรฐานและสารละลายฟรุกโตฟูเรโนซิลนิสโทสมาตรฐาน ความเข้มข้น ร้อยละ 4, 5, และ 6 (w/v) โดยมีน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย โดยการสอบเทียบมาตรฐานนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่กลุ่มที่เป็นสารละลายมาตรฐานเดี่ยว (ไม่มีการผสมระหว่างกัน) ที่มีความเข้มข้นต่างๆ และกลุ่มที่เป็นสารละลายมาตรฐานผสม 2 รูปแบบ คือ ผสมสารละลาย 2 ชนิดเข้าด้วยกัน และผสมสารละลาย 3 ชนิดเข้าด้วยกัน ซึ่งจะทำให้ได้รูปแบบของการสอบเทียบมาตรฐานที่หลากหลายและครอบคลุมมากที่สุด สำหรับนำไปใช้ในการตรวจติดตามในผลิตภัณฑ์ต่อไป

ตารางที่ 5 การเตรียมตัวอย่างสารละลายน้ำตาลมาตรฐาน

สารมาตรฐาน	ความเข้มข้น % (w/v)										จำนวน
ฟรุกโตส	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	100
ซูโครส	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	100
กลูโคส	14	16	18	20							100
เคสโทส (GF ₂)	5	6	7								100
นิสโทส (GF ₃)	4	5	6								100
ฟรุกโตฟูเรโนซิลนิสโทส (GF ₄)	4	5	6								100

3.4.1.2 การวัดสเปกตรัม

สารละลายตัวอย่างมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้นและระดับการผสมต่างๆ จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ โดยใช้เครื่อง NIR ซึ่งจะทำการวิเคราะห์แบบส่องผ่านและสะท้อนกลับ โดยจะนำสารมาตรฐาน 1 ml ซึ่งเป็นของเหลวใส่ใน quartz cuvette ทำการวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร ในรูปแบบการวัดแบบส่องผ่านและสะท้อนกลับ ที่ resolution 16 cm⁻¹ และ scan time 32 ครั้ง อุณหภูมิของสารมาตรฐาน 25 °C ซึ่ง

ตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์จะถูกเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง NIR ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การวัดตัวอย่าง ในรูปแบบส่องผ่านและสะท้อนกลับ

3.4.1.3 การปรับแต่งสเปกตรัม

เนื่องจากความแตกต่างของขนาดสเปกตรัมที่ย่านการดูดกลืนแสงที่ซ้อนทับกัน ซึ่งส่งผลต่อในช่วงการดูดกลืนแสงในตัวแปรที่ศึกษา ดังนั้นจึงนำวิธีการปรับแต่งสเปกตรัม (pretreatment) เข้ามาช่วยเพื่อลดซ้อนทับของสเปกตรัมและเพิ่มความแม่นยำของการทดลอง โดยปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (d_2) และการปรับเรียบ

3.4.1.4 การสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

หลังจากได้ข้อมูลทางสเปกตรัมและทางเคมีแล้ว นำข้อมูลทั้งสองมาหาความสัมพันธ์กัน โดยการสร้างสมการทำนายที่เหมาะสมสำหรับในการใช้ทำนายปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ในสารละลาย ด้วย โปรแกรม OPUS Version 7.2.139.1294 (Bruker, Germany) ด้วยเทคนิคทางสถิติ PLSR (patial least square regression) โดยตัวอย่างที่ถูกนำมาวิเคราะห์ข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการสร้างสมการ (calibration set) และกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมการ (validation set) ถูกแบ่งในอัตราส่วน 60 ต่อ 40 จากนั้นสร้างสมการทำนายด้วยวิธีการพิสูจน์แบบชุดทดสอบ (test set validation)

3.4.2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการติดตามฟรุกโตโอลิโกแซคคาร์ไรด์ในไซรัปกล้วยตาก

3.4.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ จะถูกนำไปเจือจางเป็นสารละลาย โดยเจือจาง 20 เท่า ด้วยน้ำกลั่น หลังจากนั้นจะนำไปผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer เป็นเวลา 5 นาที และเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4-7 °C ก่อนการวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.4.2.2 วิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตาก

3.4.2.2.1 ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total soluble solid) ด้วยดัชนีหักเห (Hand refractometer) (AOAC, 1995) รายงานหน่วยเป็น องศาบริกซ์ (° Brix)

3.4.2.2.2 ค่าความเป็นกรดค่า่าง ด้วยเครื่อง pH meter (AOAC, 1995)

3.4.2.2.3 ค่าปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (Titratable Acidity) โดยการไตเตรดกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนกระทั่งมี pH 8.1 รายงานผลในรูปกรดมาลิก (AOAC, 1995)

3.4.2.2.4 ปริมาณความชื้น Karl Fisher Titration (รุ่น 758 KFD Titrimo, , Switzerland)

3.4.2.2.5 ค่าออกเตอร์แอคทีวิตี (Decagon Aqualab 4TE, WA, USA)

3.4.2.2.6 ค่าสี ในระบบ CIE L*a*b* ด้วยเครื่อง Hunter lab และรายงานในรูปของความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b*) (MiniScan, Hunter Lab, Virginia, USA)

3.4.2.3 การวัดสเปกตรัม

สารละลายตัวอย่างมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้นและระดับการผสมต่างๆ จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ โดยใช้เครื่อง NIR ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ทั้งในส่วนการวัดแบบส่องผ่านและสะท้อนกลับ โดยจะนำสารมาตรฐาน 1 ml ซึ่งเป็นของเหลวใส่ใน quartz cuvette ทำการวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 800-2500 นาโนเมตร ในรูปแบบการวัดแบบส่องผ่านและสะท้อนกลับ ที่ resolution 16 cm⁻¹ และ scan time 32 ครั้ง อุณหภูมิ

ของสารมาตรฐาน 25 °C ซึ่งตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์จะถูกเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง NIR ในแต่ละรูปแบบการวิเคราะห์ ตลอดจนการศึกษา ระยะห่าง (distance) ที่ระยะต่างๆ ที่อาจส่งผลต่อข้อมูลที่วัดค่าได้

3.4.2.4 การปรับแต่งสเปกตรัม

เนื่องจากความแตกต่างของขนาดสเปกตรัมที่ย่านการดูดกลืนแสงที่ซ้อนทับกัน ซึ่งส่งผลต่อในช่วงการดูดกลืนแสงในตัวแปรที่ศึกษา ดังนั้นจึงนำวิธีการปรับแต่งสเปกตรัม (pretreatment) เข้ามาช่วยเพื่อลดซ้อนทับของสเปกตรัมและเพิ่มความแม่นยำของการทดลอง โดยปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับสอง (d_2) และการปรับเรียบ

3.4.2.5 การสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้ในข้อ 3.4.2.3 ถูกนำไปปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ (pretreatment) เพื่อลดผลกระทบจากการกระเจิงแสงที่แตกต่างกันของไซรัปกล้วยตาก และเพิ่มความถูกต้องและแม่นยำของข้อมูลที่วัดได้ โดยทำทั้งหมด 7 วิธี ได้แก่ vector normalization (SNV), multiple scattering correction (MSC), first derivative (d_1), second derivative (d_2), first derivative กับ vector normalization (1+SNV), first derivative กับ multiple scattering correction (1+MSC) และเทคนิคไม่ปรับแต่งสเปกตรัม (no pretreatment) จากนั้นแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มข้อมูลสเปกตรัมที่ใช้สำหรับสร้างสมการ (calibration set) และกลุ่มข้อมูลสเปกตรัมที่ใช้ตรวจสอบสมการ (validation set) และแบ่งกลุ่มในอัตราส่วน 2:1 (calibration set : validation set) โดยในกลุ่ม calibration set จะมีข้อมูลทางเคมีที่ต่ำสุดและสูงสุด เนื่องจากใช้ข้อมูลดังกล่าวเป็นตัวแทนของประชากรในการสร้างสมการเพื่อใช้ทำนายตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ เพื่อให้ครอบคลุมตัวอย่าง โดยการสร้างสมการของค่าทางเคมีของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ในไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพและข้อมูลสเปกตรัมอาศัยเทคนิค partial least square regression (PLS) ด้วยโปรแกรม OPUS version 7.2.139.1294 และสำหรับเทคนิคที่ใช้พิจารณาการปรับแต่งสเปกตรัมสำหรับงานวิจัยนี้ จะเลือกพิจารณาสมการที่ให้ค่า standard error of prediction (SEP) ต่ำ และให้ค่า coefficients of determination (R^2) สูง

3.4.3 วิเคราะห์ปริมาณติดตามฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ในไซรัปกล้วยตาก ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

3.4.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

ผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ จะถูกนำไปเจือจางลงเป็นสารละลาย โดยเจือจาง 20 เท่า ด้วยน้ำกลั่น หลังจากนั้นจะนำไปผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer เป็นเวลา 5 นาที และเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4-7 °C ก่อนการวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.4.3.2 สภาวะที่ใช้คร่าวๆ (บอกอย่างละเอียดในภาคผนวกด้วย)

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส ซูโครส และฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ ได้แก่ นีสโทส เคสโทส และฟรุคโตฟูเรโนซิลนีสโทส ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC; Shimadzu, Japan) ใช้คอลัมน์ Carbohydrate column-Rezex RNM (Phenomenex, USA) ในการวัดน้ำตาลตรวจด้วย RI detector โดยมีเฟสเคลื่อนที่น้ำ (mobile phase) ควบคุมอัตราการไหล 0.4 มิลลิลิตร/นาที อุณหภูมิ oven 80 °C ฉีดตัวอย่างปริมาตร 20 ไมโครลิตร โดยก่อนการฉีดวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างที่นำมาฉีดวิเคราะห์จะถูกเจือจางลงหลังจากการทำปฏิกิริยา 20 เท่า หลังจากนั้นกรองตัวอย่างผ่านตัวกรองเมมเบรนที่มีขนาด 0.45 ไมโครเมตร ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ 30 นาที สามารถระบุชนิดของน้ำตาลโดยการเปรียบเทียบ retention time กับสารน้ำตาลมาตรฐาน และคำนวณหาปริมาณน้ำตาลแต่ละชนิดจากกราฟมาตรฐาน ที่ได้จากการวิเคราะห์ HPLC ซึ่งคำนวณโดยวิธี Serial dilution



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

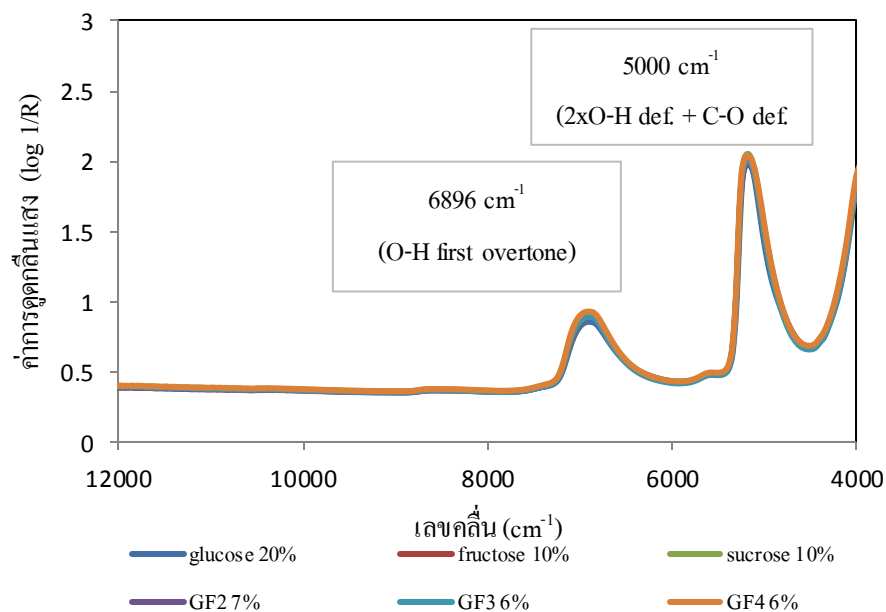
4.1 การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการติดตามฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์มาตรฐาน

4.1.1 ลักษณะสเปกตรัมของน้ำตาลมาตรฐานและการปรับแต่งสเปกตรัม

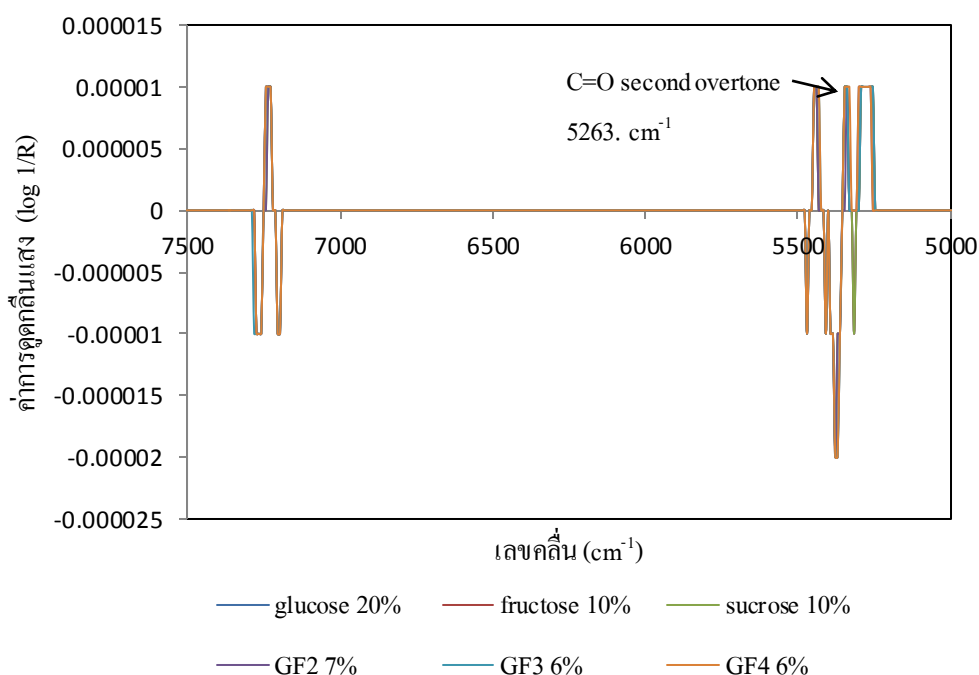
จากการวัดสเปกตรัมของน้ำตาลมาตรฐานทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ กลูโคส ฟรุกโตส ซูโครส เลสโทส (GF_2) นีสโทส (GF_3) และฟรุกโตฟูเรโนซิลนิสโทส (GF_4) โดยการวัดในรูปแบบของสารละลาย ในรูปแบบการวัดแบบส่องผ่านและสะท้อนกลับ (Transflection) โดยวัดที่สภาวะ resolution 16 cm^{-1} และ scan time เท่ากับ 32 ครั้ง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) หรือ $\log 1/R$ กับเลขคลื่น มีหน่วยเป็น cm^{-1} สเปกตรัมของน้ำตาลมาตรฐานที่เป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์โซลิตีฟรุตเพื่อสุขภาพ โดยจากการวัดสเปกตรัมด้วยเทคนิค NIR พบว่า น้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบทั้ง 6 ชนิด มีความสัมพันธ์ในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ที่เลขคลื่น $10101, 6896, 6493, 5263, 5000, 4761, 4440, 4393, 4063, 4000\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเลขคลื่น 10101 cm^{-1} (990 nm) สัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของพันธะภายใน โมเลกุลแบบ O-H second overtone แสดงถึงโครงสร้าง starch ที่บริเวณเลขคลื่น 6896 cm^{-1} (1450 nm) สัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของพันธะภายใน โมเลกุลแบบ O-H first overtone แสดงถึง โครงสร้าง starch, H_2O บริเวณเลขคลื่น 6493 cm^{-1} (1540 nm) สัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของพันธะภายใน โมเลกุลแบบ O-H first overtone (intramol. H-bond) แสดงถึง โครงสร้าง starch บริเวณเลขคลื่น 5263 cm^{-1} (1900 nm) สัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของพันธะภายใน โมเลกุลแบบ C=O second overtone แสดงถึง โครงสร้าง $-CO_2H$ บริเวณเลขคลื่น 5000 cm^{-1} (2000 nm) สัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของพันธะภายใน โมเลกุลแบบ $2 \times O-H\text{ def.} + C-O\text{ def.}$ แสดงถึง โครงสร้าง starch บริเวณเลขคลื่น 4761 cm^{-1} (2100 nm) สัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของพันธะภายใน โมเลกุลแบบ $2 \times O-H\text{ def.} + 2 \times C-O\text{ str.}$ แสดงถึง โครงสร้าง starch บริเวณเลขคลื่น 4440 cm^{-1} (2252 nm) สัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของพันธะภายใน โมเลกุลแบบ O-H def.+ O-H str. แสดงถึง โครงสร้าง starch บริเวณเลขคลื่น 4393 cm^{-1} (2276 nm) สัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของพันธะภายใน โมเลกุลแบบ O-H str.+ C-C str. แสดงถึง โครงสร้าง starch บริเวณเลขคลื่น 4063 cm^{-1} (2461 nm) สัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของพันธะภายใน โมเลกุลแบบ

C-H str.+ C-C str. แสดงถึงโครงสร้าง starch และ บริเวณเลขคลื่น 4000 cm^{-1} (2500 nm) สัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของพันธะภายในโมเลกุลแบบ C-H str.+ C-C str. แสดงถึงโครงสร้าง starch

เมื่อพิจารณาน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ทั้ง 6 ชนิด คือ กลูโคส ฟรุคโตส ซูโครส เคสโทส (GF_2) นีสโทส (GF_3) และฟรุคโตฟูเรโนซิลนีสโทส (GF_4) ในรูปแบบสารละลายที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน พบว่า สเปกตรัมที่ได้นั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นสเปกตรัมของน้ำกลั่น คือ มีฐานการดูดกลืนแสงเป็นช่วงกว้าง ดังภาพที่ 8 เนื่องจากองค์ประกอบหลักของสารละลายเป็นน้ำกลั่นที่เป็นตัวทำละลายในสารละลายดังกล่าว ซึ่งพบว่าสเปกตรัมดังกล่าวเกิดการบดบังช่วงการดูดกลืนแสงขององค์ประกอบน้ำตาล ดังนั้นจึงได้นำสเปกตรัมของสารละลายน้ำตาลมาปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี d_2 จึงสามารถวิเคราะห์เลขคลื่นในช่วงการดูดกลืนแสงของน้ำตาลมาตรฐาน ได้ คือ บริเวณเลขคลื่น 5263 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นสะเทือนของพันธะภายใน โมเลกุลแบบ C=O second overtone โดยเป็นโครงสร้างของ starch (Liu, Xiang et al. 2006) ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 8 สเปกตรัมของสารละลายมาตรฐาน



ภาพที่ 9 สเปกตรัมของสารละลายกลูโคสมาตรฐานที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี second derivative (d_2)

4.1.2 ผลการสร้างสมการมาตรฐานด้วยเทคนิค NIR

การศึกษาการตรวจสอบปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ในรูปแบบของสารละลายนั้น เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์ และศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ในกระบวนการวิเคราะห์ปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ด้วยเทคนิค NIRS ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า อิทธิพลที่มีผลต่อการดูดกลืนแสงของน้ำตาลมาตรฐาน กลูโคส ฟรุกโตส ซูโครส เคสโทส นีสโทส และฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส คือ น้ำกลั่น เนื่องจากน้ำกลั่น ประกอบไปด้วยพันธะ O-H bond ซึ่งสามารถรบกวนระบบการดูดกลืนแสงของสารละลายน้ำตาลมาตรฐานได้ ดังนั้นเมื่อได้เส้นสเปกตรัมจากเทคนิค NIR เรียบร้อยแล้วนั้น เส้นสเปกตรัมดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการปรับแต่งสเปกตรัม เพื่อลดความแปรปรวนจากปัจจัยที่มีผลต่อการรบกวนการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ของสารมาตรฐาน

สำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานของปริมาณกลูโคส มีการสร้างสมการใน 3 รูปแบบ กล่าวคือ สมการที่ได้จากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม OPUS Version 7.2.139.1294 (Optimization) สมการที่ได้จากการเลือกช่วงคลื่นเต็มช่วง

อินฟราเรดย่านใกล้ ($12500-4000\text{ cm}^{-1}$) (Full wavelength) และสมการที่เลือกช่วงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของน้ำตาล (ช่วงเลขคลื่น $7000-6300\text{ cm}^{-1}$, $5300-5000\text{ cm}^{-1}$ และ $4800-4000\text{ cm}^{-1}$) พบว่าสมการที่สร้างจากฟังก์ชันการหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดให้ค่า R^2 , RPD สูงที่สุด และให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายปริมาณกลูโคสมาตรฐาน โดยสมการดังกล่าวผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ที่ช่วงคลื่น $9403.8-5446.3\text{ cm}^{-1}$ และ $4605.5-4420.3$ โดยส่งผลให้ค่า R^2 ของสมการดังกล่าวนี้มีค่าเท่ากับ 0.997 (ตารางที่ 6) โดยสมการดังกล่าวนี้มีความสามารถในการใช้ในการทำนายปริมาณของกลูโคสมาตรฐานได้ (Osborne, Fearn et al. 1993)



ตารางที่ 6 ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณกลูโคสด้วยเทคนิค NIR

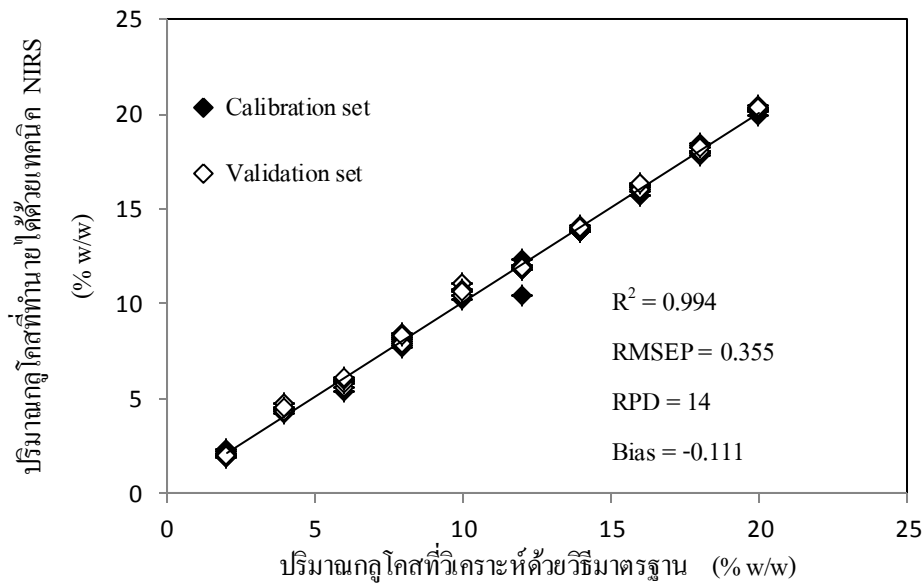
สาร มาตรฐาน	ช่วงเลขคลื่น wavelength selection (cm ⁻¹)	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม	PLS factor	ชุดข้อมูลสมการ						
				ทำนาย (60%)		ชุดข้อมูลทวนสอบข้อมูล (40%)				
				R ²	RMSEE	R ²	RMSEP	RPD	Bias	
กลูโคส	Optimization	9403.8-5446.3 4605.5-4420.3	SNV	6	0.997	0.361	0.994	0.355	14	-0.111
	Full wavelength	12489.6-3996	Second Derivative	4	0.995	0.47	0.984	0.606	8.21	-0.187
	สมการเลือกช่วงที่สัมพันธ์ กับกลูโคส	7004.6-6294.9 5307.5-4998.9 4806-3996	MSC	5	0.9932	0.552	0.9814	0.645	7.39	-0.0757

หมายเหตุ: R²: coefficients of determination, RMSEE: root mean square error of estimation, RMSEP: root mean square error of prediction,

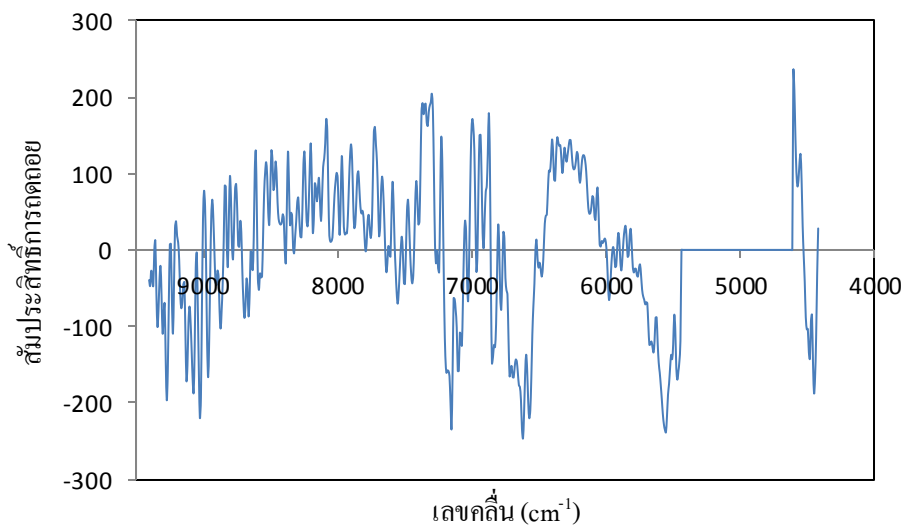
RPD: ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP, Bias: error of prediction

จากภาพที่ 10 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณกลูโคสมาตรฐาน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี second derivative ซึ่งผลการทดลองพบว่า ข้อมูลที่ได้นั้นมีลักษณะการเรียงตัวในแนวเดียวกับเส้นเป้าหมาย (target line) โดยมีลักษณะการกระจายตัวในตามเส้นเป้าหมายตลอดทั้งเส้นตามแนวแกน Y ไม่มีการรวมตัวกันของข้อมูลทีบริเวณใดบริเวณหนึ่ง แสดงว่า การทำนายปริมาณกลูโคสด้วยเทคนิค NIR มีค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ซึ่งจากการปรับเส้นสเปกตรัม พบว่า การดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ของกลูโคสมาตรฐาน อยู่ในช่วงเลขคลื่น 4440 และ 4393 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนการสั่นพันธะ O-H และพันธะ C-H (J.A. and C.C. 1951) (ภาพที่ 11)



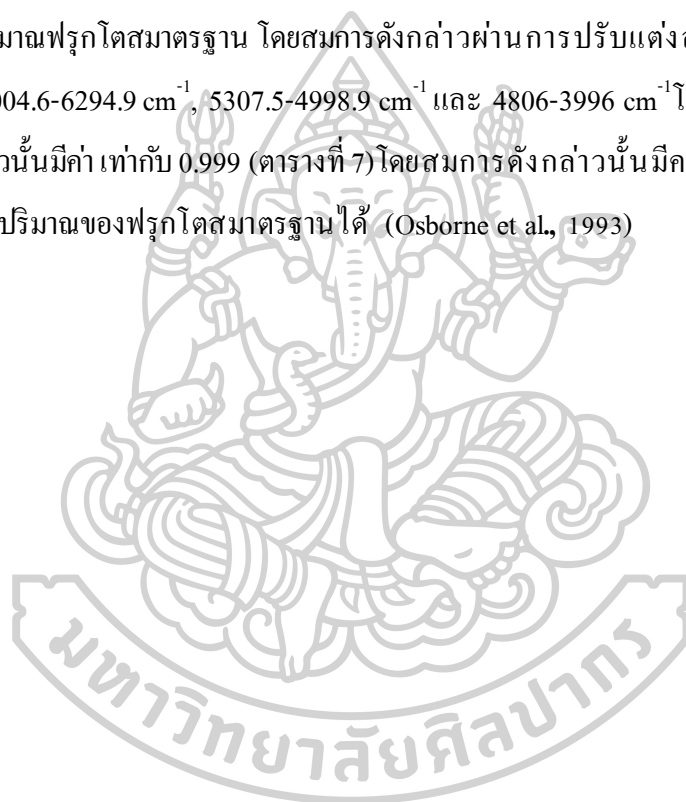


ภาพที่ 10 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณกลูโคส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV



ภาพที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณกลูโคส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV

สำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานของปริมาณฟรุกโตส มีการสร้างสมการใน 3 รูปแบบ กล่าวคือ สมการที่ได้จากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม OPUS Version 7.2.139.1294 (Optimization) สมการที่ได้จากการเลือกช่วงคลื่นเต็มช่วงอินฟราเรด ย่านใกล้ ($12500-4000\text{ cm}^{-1}$) (Full wavelength) และสมการที่เลือกช่วงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของน้ำตาล (ช่วงเลขคลื่น $7000-6300\text{ cm}^{-1}$, $5300-5000\text{ cm}^{-1}$ และ $4800-4000\text{ cm}^{-1}$) พบว่า สมการที่สร้างจากที่เลือกช่วงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของน้ำตาลฟรุกโตส ให้ค่า R^2 , RPD สูงที่สุด และให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายปริมาณฟรุกโตสมาตรฐาน โดยสมการดังกล่าวผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี MSC ที่ช่วงคลื่น $7004.6-6294.9\text{ cm}^{-1}$, $5307.5-4998.9\text{ cm}^{-1}$ และ $4806-3996\text{ cm}^{-1}$ โดยส่งผลให้ค่า R^2 ของสมการดังกล่าวนี้มีค่าเท่ากับ 0.999 (ตารางที่ 7) โดยสมการดังกล่าวนี้มีความสามารถในการใช้ในการทำนายปริมาณของฟรุกโตสมาตรฐานได้ (Osborne et al., 1993)



ตารางที่ 7 ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณฟรุกโตสด้วยเทคนิค NIR

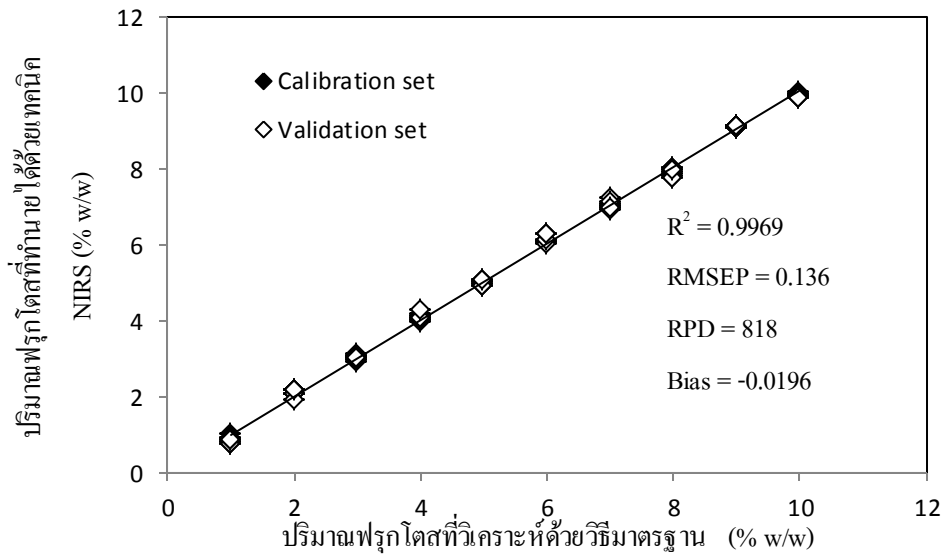
สาร มาตรฐาน	wavelength selection	ช่วงเลขคลื่น (cm ⁻¹)	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม	PLS factor	ชุดข้อมูลสมการ					
					ทำนาย (60%)		ชุดข้อมูลทดสอบข้อมูล (40%)			
					R ²	RMSEE	R ²	RMSEP	RPD	Bias
ฟรุกโตส	Optimization	6480.1-5446.3 4605.5-4242.9	MSC	3	0.997	0.114	0.998	0.113	21.5	-0.003
	Full wavelength	12489.6-3996	MSC	7	0.999	0.104	0.996	0.155	17.5	-0.069
	สมการเลือกช่วงที่สัมพันธ์ กับฟรุกโตส	7004.6-6294.9 5307.5-4998.9 4806-3996	MSC	9	0.9988	0.114	0.9969	0.136	18	-0.0196

หมายเหตุ: R²: coefficients of determination, RMSEE: root mean square error of estimation, RMSEP: root mean square error of prediction,

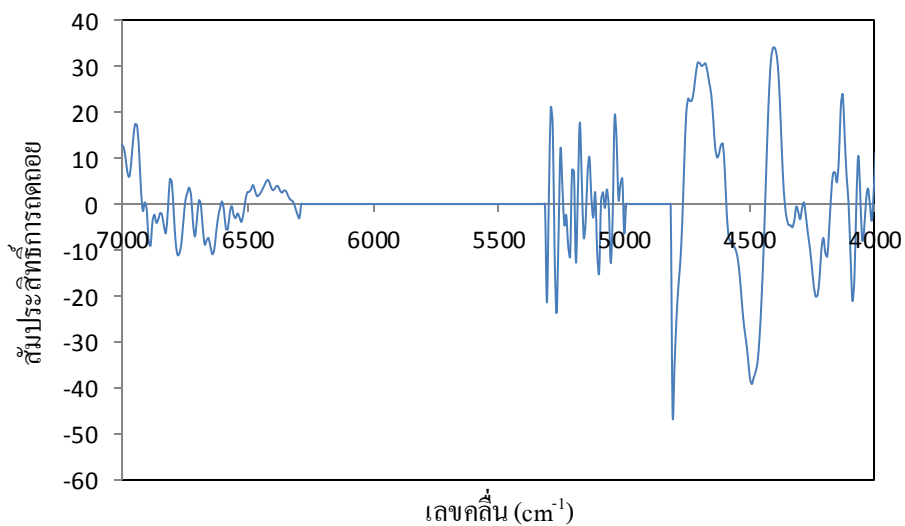
RPD: ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP, Bias: error of prediction

จากภาพที่ 12 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณฟรุกโตสมาตรฐาน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี MSC ซึ่งผลการทดลองพบว่า ข้อมูลที่ได้นั้นมีลักษณะการเรียงตัวในแนวเดียวกับเส้นเป้าหมาย (target line) โดยมีลักษณะการกระจายตัวในตามเส้นเป้าหมายตลอดทั้งเส้นตามแนวแกน Y ไม่มีการรวมตัวกันของข้อมูลที่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง แสดงว่า การทำนายปริมาณฟรุกโตสด้วยเทคนิค NIR มีค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ซึ่งจากการปรับเส้นสเปกตรัมพบว่า การดูดกลืนแสง ในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ของฟรุกโตสมาตรฐาน อยู่ในช่วงเลขคลื่น $6896, 6493, 5263, 5000, 4761$ และ 4440 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนการสั่นพันธะ O-H และพันธะ C-H (J.A. and C.C. 1951) (ภาพที่ 13)



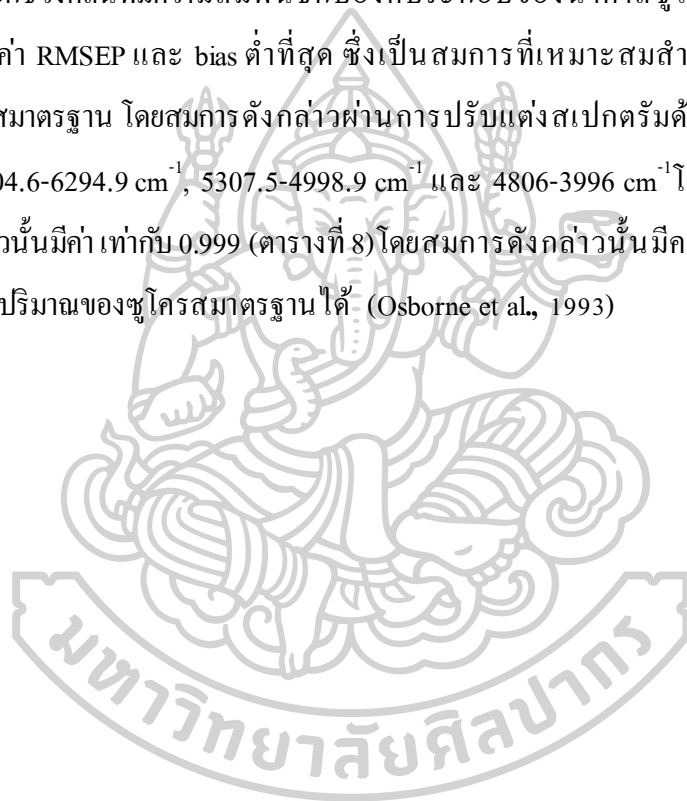


ภาพที่ 12 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณฟรุกโตส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี MSC



ภาพที่ 13 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณฟรุกโตส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี MSC

สำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานของปริมาณซูโครสมีการสร้างสมการใน 3 รูปแบบ กล่าวคือ สมการที่ได้จากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม OPUS Version 7.2.139.1294 (Optimization) สมการที่ได้จากการเลือกช่วงคลื่นเต็มช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ ($12500\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$) (Full wavelength) และสมการที่เลือกช่วงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของน้ำตาล (ช่วงเลขคลื่น $7000\text{-}6300\text{ cm}^{-1}$, $5300\text{-}5000\text{ cm}^{-1}$ และ $4800\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$) พบว่า สมการที่สร้างจากที่เลือกช่วงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของน้ำตาลซูโครสให้ค่า R^2 , RPD สูงที่สุด และให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายปริมาณซูโครสมาตรฐาน โดยสมการดังกล่าวผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative ที่ช่วงคลื่น $7004.6\text{-}6294.9\text{ cm}^{-1}$, $5307.5\text{-}4998.9\text{ cm}^{-1}$ และ $4806\text{-}3996\text{ cm}^{-1}$ โดยส่งผลให้ค่า R^2 ของสมการดังกล่าวนี้มีค่าเท่ากับ 0.999 (ตารางที่ 8) โดยสมการดังกล่าวนี้มีความสามารถในการใช้ในการทำนายปริมาณของซูโครสมาตรฐานได้ (Osborne et al., 1993)



ตารางที่ 8 ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณซูโครสด้วยเทคนิค NIR

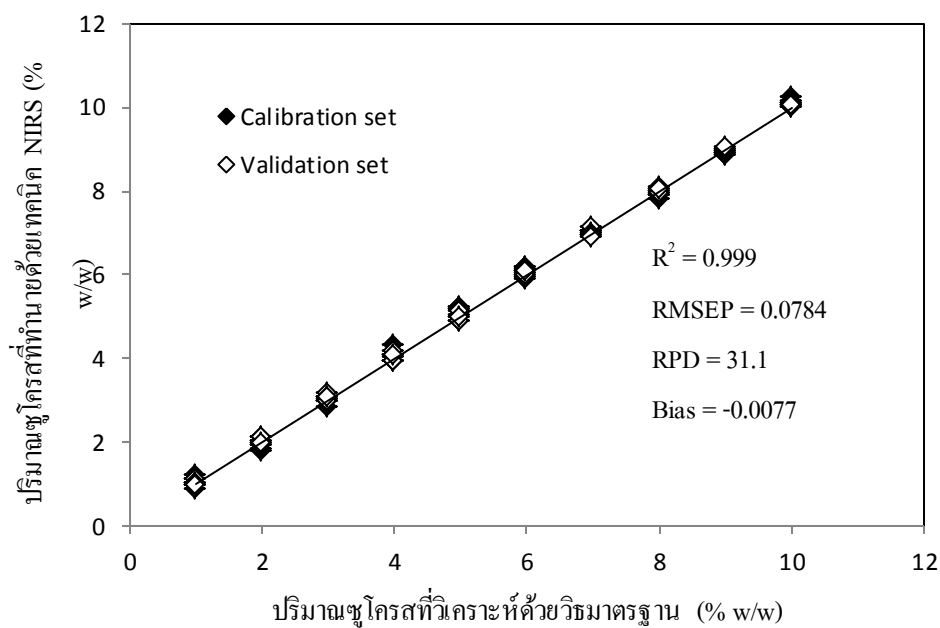
สาร มาตรฐาน	ช่วงเลขคลื่น wavelength selection (cm ⁻¹)	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม	PLS factor	ชุดข้อมูลสมการ						
				ทำนาย (60%)		ชุดข้อมูลทดสอบข้อมูล (40%)				
				R ²	RMSEE	R ²	RMSEP	RPD	Bias	
ซูโครส	Optimization	5778.1-5446.3 4605.5-4242.9	MSC	3	0.9985	0.119	0.999	0.0784	31.1	-0.00769
	Full wavelength	12489.6-3996	Second Derivative	7	0.9987	0.114	0.9867	0.28	8.76	-0.0361
	สมการเลือกช่วงที่สัมพันธ์ กับซูโครส	7004.6-6294.9 5307.5-4998.9 4806-3996	First Derivative	10	0.9995	0.072	0.9978	0.115	21.3	0.0127

หมายเหตุ: R²: coefficients of determination, RMSEE: root mean square error of estimation, RMSEP: root mean square error of prediction,

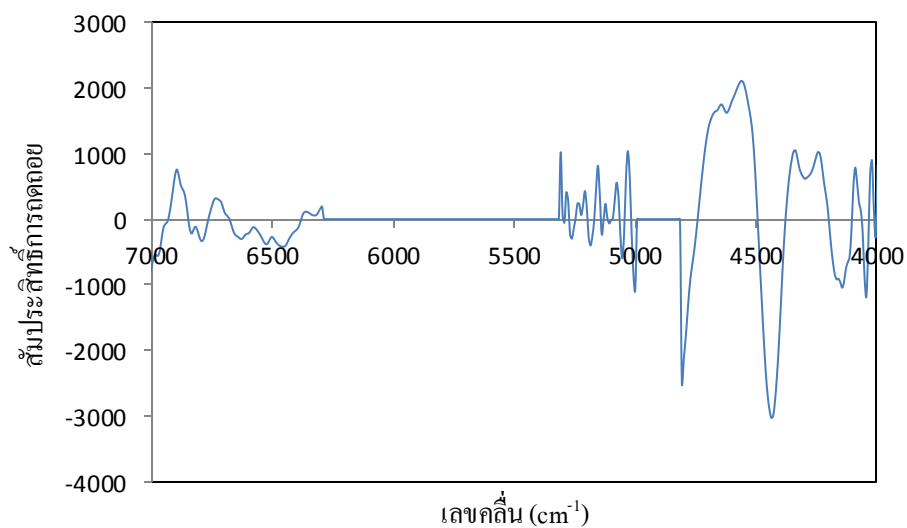
RPD: ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP, Bias: error of prediction

จากภาพที่ 14 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณซูโครสมাত্রฐาน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative ซึ่งผลการทดลองพบว่า ข้อมูลที่ได้นั้นมีลักษณะการเรียงตัวในแนวเดียวกับเส้นเป้าหมาย (target line) โดยมีลักษณะการกระจายตัวในตามเส้นเป้าหมายตลอดทั้งเส้นตามแนวแกน Y ไม่มีการรวมตัวกันของข้อมูลทีบริเวณใดบริเวณหนึ่ง แสดงว่า การทำนายปริมาณซูโครสด้วยเทคนิค NIR มีค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ซึ่งจากการปรับเส้นสเปกตรัม พบว่า การดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ของซูโครสมাত্রฐาน อยู่ในช่วงเลขคลื่น 6896, 6493, 5263, 5000 4761 และ 4440 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนการสั่นพันธะ O-H และพันธะ C-H (J.A. and C.C. 1951) (ภาพที่ 15)



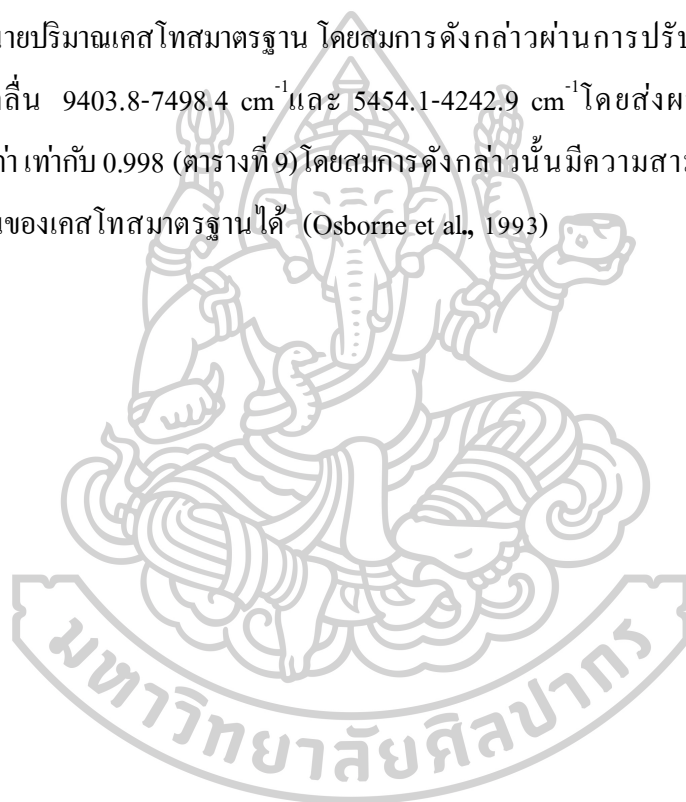


ภาพที่ 14 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณยูเรีย ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี MSC



ภาพที่ 15 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสมการทำนายปริมาณยูเรีย ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี MSC

สำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานของปริมาณเคสโทสมิการสร้างสมการใน 3 รูปแบบ กล่าวคือ สมการที่ได้จากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม OPUS Version 7.2.139.1294 (Optimization) สมการที่ได้จากการเลือกช่วงคลื่นเต็มช่วงอินฟราเรด ย่านใกล้ ($12500-4000\text{ cm}^{-1}$) (Full wavelength) และสมการที่เลือกช่วงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับ องค์ประกอบของน้ำตาล (ช่วงเลขคลื่น $7000-6300\text{ cm}^{-1}$, $5300-5000\text{ cm}^{-1}$ และ $4800-4000\text{ cm}^{-1}$) พบว่า สมการที่สร้างจากจากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติของน้ำตาลเคสโทสให้ค่า R^2 , RPD สูงที่สุด และให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับ ใช้ในการทำนายปริมาณเคสโทสมิมาตรฐาน โดยสมการดังกล่าวผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ที่ช่วงคลื่น $9403.8-7498.4\text{ cm}^{-1}$ และ $5454.1-4242.9\text{ cm}^{-1}$ โดยส่งผลให้ค่า R^2 ของสมการ ดังกล่าวนั้นมีค่าเท่ากับ 0.998 (ตารางที่ 9) โดยสมการดังกล่าวนี้มีความสามารถในการใช้ในการ ทำนายปริมาณของเคสโทสมิมาตรฐานได้ (Osborne et al., 1993)



ตารางที่ 9 ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณแอสโทด้วยเทคนิค NIR

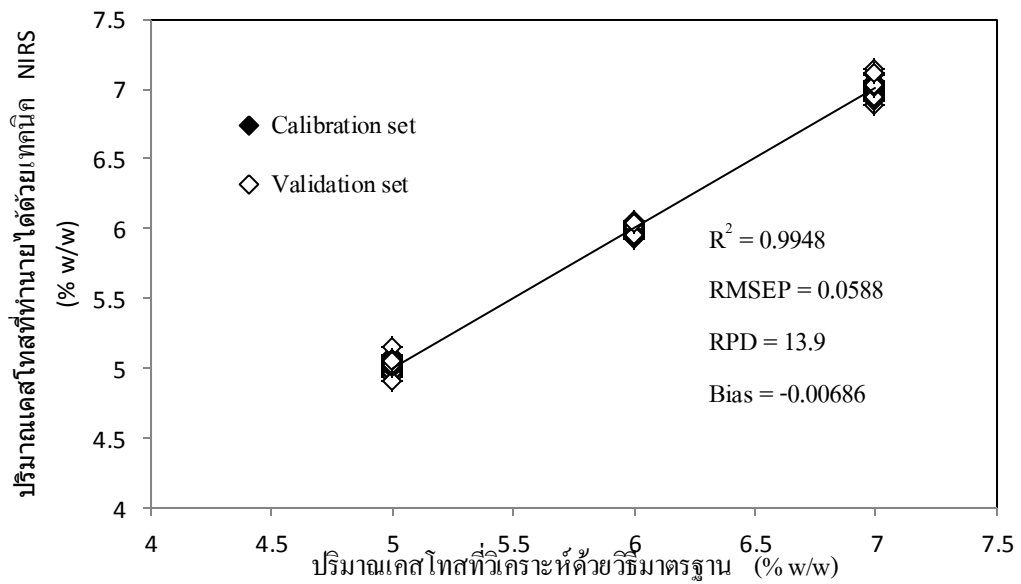
สาร	ช่วงเลขคลื่น (cm^{-1})	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม	PLS factor	ชุดข้อมูลสมการ						
				ทำนาย (60%)		ชุดข้อมูลทวนสอบข้อมูล (40%)				
มาตรฐาน	wavelength selection			R^2	RMSEE	R^2	RMSEP	RPD	Bias	
แอสโท (GF ₂)	Optimization	9403.8-7498.4 5454.1-4242.9	SNV	9	0.9979	0.0406	0.9948	0.0588	13.9	-0.00686
	Full wavelength	12489.6-3996	First Derivative	8	0.9974	0.0451	0.9749	0.129	6.32	-0.00496
	สมการเลือกช่วงที่สัมพันธ์ กับแอสโท	7004.6-6294.9 5307.5-4998.9 4806-3996	No spectral data processing	10	0.9975	0.0447	0.9894	0.0837	9.83	-0.0127

หมายเหตุ: R^2 : coefficients of determination, RMSEE: root mean square error of estimation, RMSEP: root mean square error of prediction,

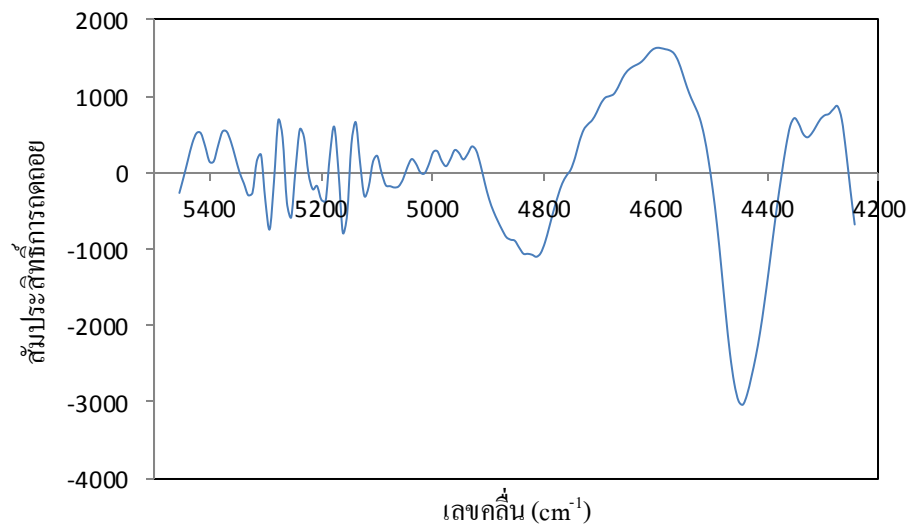
RPD: ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP, Bias: error of prediction

จากภาพที่ 16 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณเคสโทสมมาตรฐาน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ซึ่งผลการทดลองพบว่า ข้อมูลที่ได้นั้นมีลักษณะการเรียงตัวในแนวเดียวกับเส้นเป้าหมาย (target line) โดยมีลักษณะการกระจายตัวในตามเส้นเป้าหมายตลอดทั้งเส้นตามแนวแกน Y ไม่มีการรวมตัวกันของข้อมูลที่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง แสดงว่า การทำนายปริมาณเคสโทสด้วยเทคนิค NIR มีค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ซึ่งจากการปรับเส้นสเปกตรัมพบว่า การดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ของเคสโทสมมาตรฐาน อยู่ในช่วงเลขคลื่น 5263, 5000, 4761, 4440 และ 4393 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนการสั่นพันธะ O-H และพันธะ C-H (J.A. and C.C. 1951) (ภาพที่ 17)



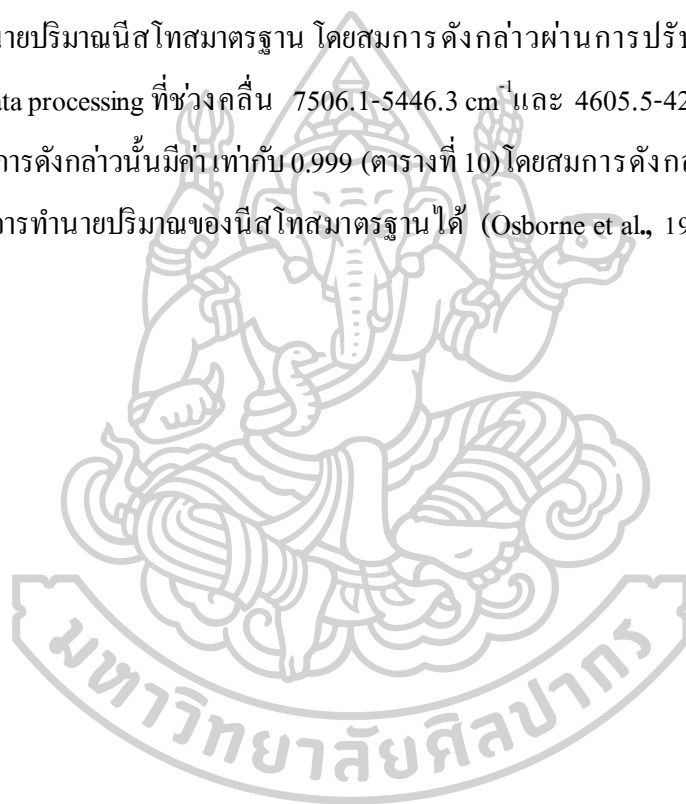


ภาพที่ 16 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV



ภาพที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณแอมโมเนียมไนโตรเจน ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV

สำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานของปริมาณนิสโทสมีการสร้างสมการใน 3 รูปแบบ กล่าวคือ สมการที่ได้จากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม OPUS Version 7.2.139.1294 (Optimization) สมการที่ได้จากการเลือกช่วงคลื่นเต็มช่วงอินฟราเรด ย่านใกล้ ($12500-4000\text{ cm}^{-1}$) (Full wavelength) และสมการที่เลือกช่วงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับ องค์ประกอบของน้ำตาล (ช่วงเลขคลื่น $7000-6300\text{ cm}^{-1}$, $5300-5000\text{ cm}^{-1}$ และ $4800-4000\text{ cm}^{-1}$) พบว่า สมการที่สร้างจากจากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติของน้ำตาลนิสโทสให้ค่า R^2 , RPD สูงที่สุด และให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับ ใช้ในการทำนายปริมาณนิสโทสมาตรฐาน โดยสมการดังกล่าวผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing ที่ช่วงคลื่น $7506.1-5446.3\text{ cm}^{-1}$ และ $4605.5-4242.9\text{ cm}^{-1}$ โดยส่งผลให้ ค่า R^2 ของสมการดังกล่าวนี้มีค่าเท่ากับ 0.999 (ตารางที่ 10) โดยสมการดังกล่าวนี้มีความสามารถในการใช้ในการทำนายปริมาณของนิสโทสมาตรฐานได้ (Osborne et al., 1993)



ตารางที่ 10 ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณนีสโทสด้วยเทคนิค NIR

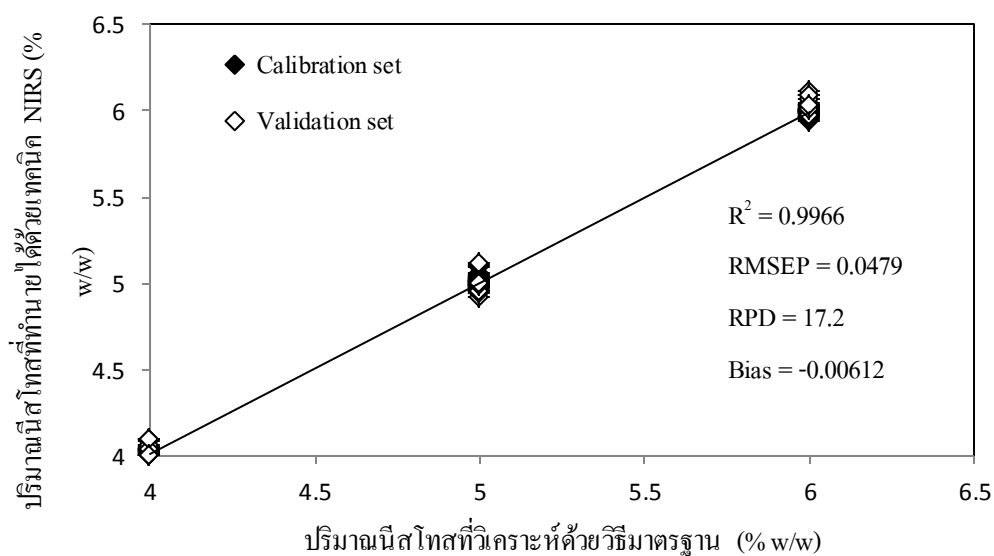
สาร มาตรฐาน	ช่วงเลขคลื่น wavelength selection (cm ⁻¹)	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม processing	PLS factor	ชุดข้อมูลสมการ						
				ทำนาย (60%)		ชุดข้อมูลทวนสอบข้อมูล (40%)				
				R ²	RMSEE	R ²	RMSEP	RPD	Bias	
นีสโทส (GF ₃)	Optimization	7506.1-5446.3	No spectral data	9	0.999	0.0281	0.9966	0.0479	17.2	-0.00612
		4605.5-4242.9	processing							
	Full wavelength	12489.6-3996	First Derivative	9	0.9979	0.0415	0.9539	0.175	4.66	-0.00184
	สมการเลือกช่วงที่สัมพันธ์ กับนีสโทส	7004.6-6294.9	First Derivative	10	0.9961	0.0563	0.9896	0.0832	9.87	-0.00841
	5307.5-4998.9									
	4806-3996									

หมายเหตุ: R²: coefficients of determination, RMSEE: root mean square error of estimation, RMSEP: root mean square error of prediction,

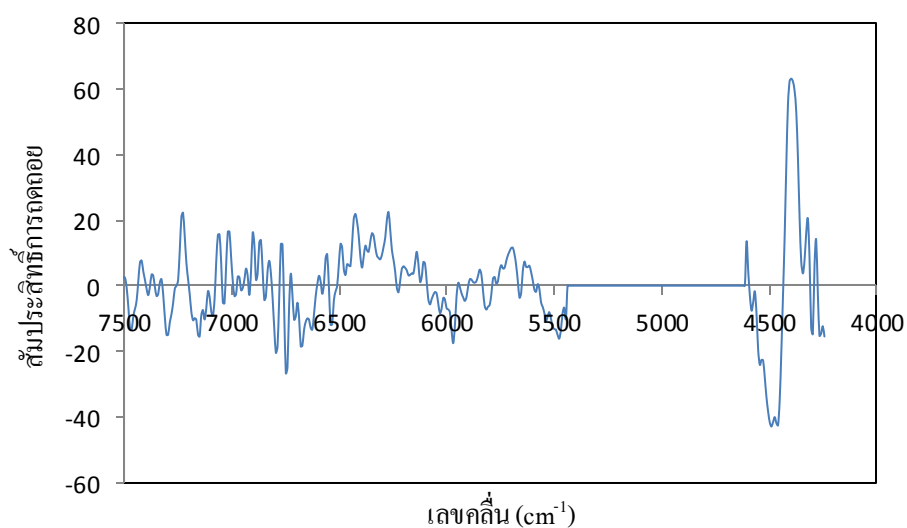
RPD: ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP, Bias: error of prediction

จากภาพที่ 18 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณนี้สโทสมมาตรฐาน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing ซึ่งผลการทดลองพบว่า ข้อมูลที่ได้นั้นมีลักษณะการเรียงตัวในแนวเดียวกับเส้นเป้าหมาย (target line) โดยมีลักษณะการกระจายตัวในตามเส้นเป้าหมายตลอดทั้งเส้นตามแนวแกน Y ไม่มีการรวมตัวกันของข้อมูลทีบริเวณใดบริเวณหนึ่ง แสดงว่า การทำนายปริมาณนี้สโทสด้วยเทคนิค NIRS มีค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ซึ่งจากการปรับเส้นสเปกตรัมพบว่า การดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ของนี้สโทสมมาตรฐาน อยู่ในช่วงเลขคลื่น 6896, 6493, 4440 และ 4393 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนการสั่นพันธะ O-H และพันธะ C-H (J.A. and C.C. 1951) (ภาพที่ 19)



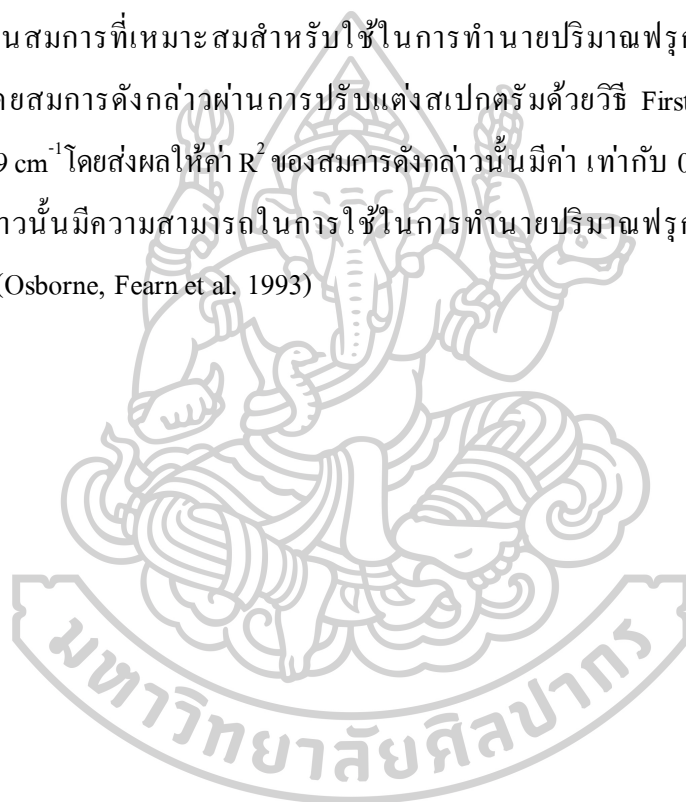


ภาพที่ 18 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณน้ำโทส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing



ภาพที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสมการทำนายปริมาณน้ำโทส ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing

สำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานของปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส มีการสร้างสมการใน 3 รูปแบบ กล่าวคือ สมการที่ได้จากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม OPUS Version 7.2.139.1294 (Optimization) สมการที่ได้จากการเลือกช่วงคลื่นเต็มช่วงอินฟราเรดย่านไกล (12500-4000 cm^{-1}) (Full wavelength) และสมการที่เลือกช่วงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของน้ำตาล (ช่วงเลขคลื่น 7000-6300 cm^{-1} , 5300-5000 cm^{-1} และ 4800-4000 cm^{-1}) พบว่า สมการที่สร้างจากจากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติของน้ำตาลฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ให้ค่า R^2 , RPD สูงที่สุด และให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทสมาตรฐาน โดยสมการดังกล่าวผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative ที่ช่วงคลื่น 5454.1-4242.9 cm^{-1} โดยส่งผลให้ค่า R^2 ของสมการดังกล่าวนี้มีค่า เท่ากับ 0.998 (ตารางที่ 11) โดยสมการดังกล่าวนี้มีความสามารถในการใช้ในการทำนายปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทสมาตรฐานได้ (Osborne, Fearn et al. 1993)



ตารางที่ 11 ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ด้วยเทคนิค NIR

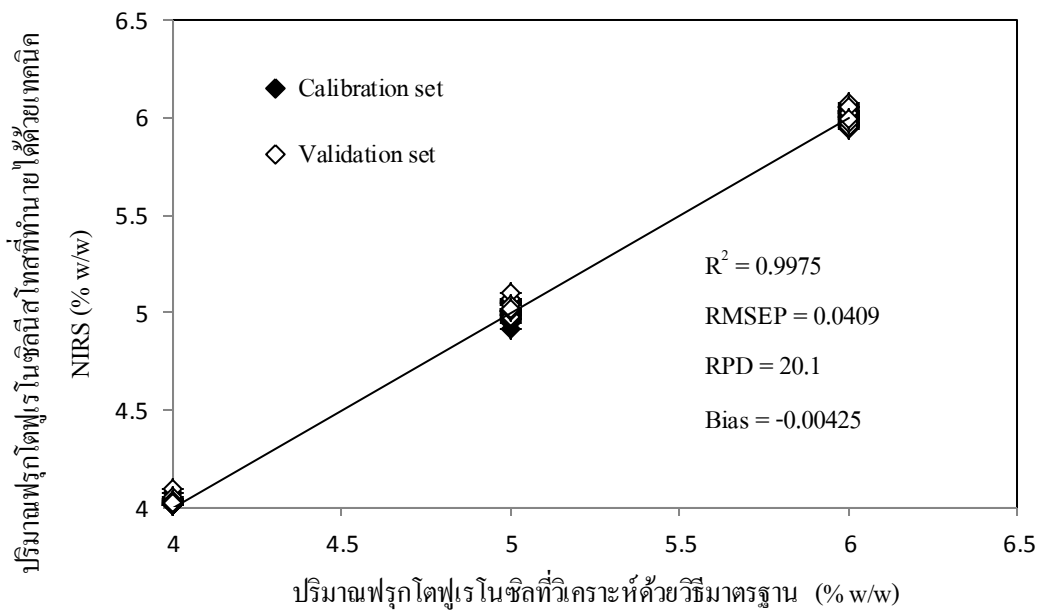
สาร มาตรฐาน	ช่วงเลขคลื่น wavelength selection (cm ⁻¹)	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม	PLS factor	ชุดข้อมูลสมการ						
				ทำนาย (60%)		ชุดข้อมูลทวนสอบข้อมูล (40%)				
				R ²	RMSEE	R ²	RMSEP	RPD	Bias	
ฟรุกโตฟูเร โนซิลนีส โทส (GF ₄)	Optimization	5454.1-4242.9	First Derivative	10	0.9981	0.0393	0.9975	0.0409	20.1	-0.00425
	Full wavelength	12489.6-3996	First Derivative	8	0.9981	0.0387	0.9703	0.141	5.93	0.0282
	สมการเลือกช่วงที่สัมพันธ์ กับฟรุกโตฟูเรโนซิลนีส โทส	7004.6-6294.9	No spectral data processing	10	0.9981	0.0407	0.9838	0.104	7.87	-0.00422
		5307.5-4998.9 4806-3996								

หมายเหตุ: R²: coefficients of determination, RMSEE: root mean square error of estimation, RMSEP: root mean square error of prediction,

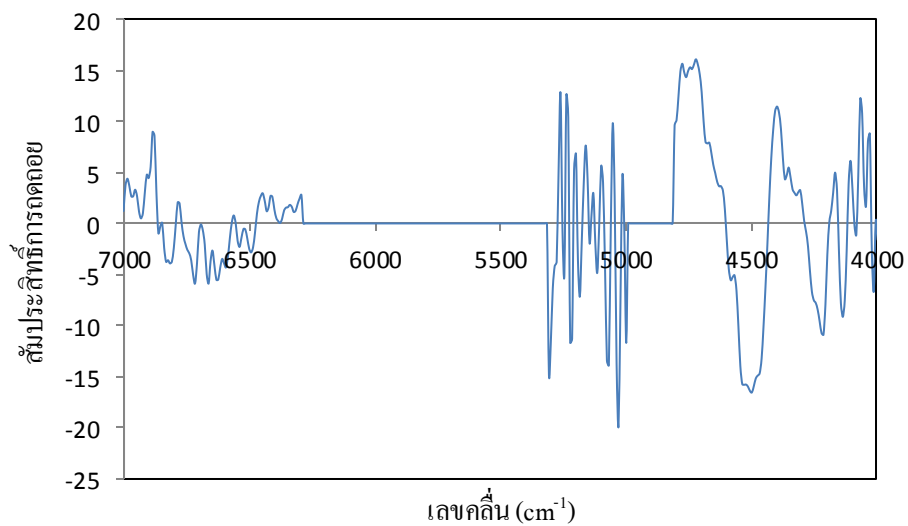
RPD: ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP, Bias: error of prediction

จากภาพที่ 20 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส มาตรฐาน ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative ซึ่งผลการทดลองพบว่า ข้อมูลที่ได้ นั้นมีลักษณะการเรียงตัวในแนวเดียวกับเส้นเป้าหมาย (target line) โดยมีลักษณะการกระจายตัวใน ตามเส้นเป้าหมายตลอดทั้งเส้นตามแนวแกน Y ไม่มีการรวมตัวกันของข้อมูลที่บริเวณใดบริเวณ หนึ่ง แสดงว่า การทำนายปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ด้วยเทคนิค NIR มีค่าการทำนายที่ ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ซึ่งจากการปรับเส้นสเปกตรัม พบว่า การดูดกลืน แสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ของฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส มาตรฐาน อยู่ในช่วงเลขคลื่น 5263, 5000, 4761, 4440 และ 4393 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนการสั่นพันธะ O-H และพันธะ C-H (J.A. and C.C. 1951) (ภาพที่ 21)





ภาพที่ 20 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณฟรุกโตสในช็อกโกแลต ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative



ภาพที่ 21 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณฟรุกโตสในช็อกโกแลต ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative

4.2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการติดตามฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ในไซรัปล้วยตาก

4.2.1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของไซรัปล้วยตาก

เนื่องจากกล้วยตากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการผลิต และจำหน่ายมากในท้องตลาด เนื่องจากกล้วยสามารถปลูกและเจริญเติบโตได้ทั่วทุกภูมิภาคของภูมิประเทศ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์กล้วยตากมีราคาขายต่ำ มีวัตถุดิบที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์กล้วยตาก จากการศึกษาไซรัปล้วยตากเบื้องต้น พบว่าไซรัปล้วยตากที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้จะมีลักษณะสีเหลืองเข้มจนถึงน้ำตาลแดง ซึ่งมีค่าความสว่าง L^* เท่ากับ 9.89 ± 0.10 ค่าความเป็นสีแดง-เขียว a^* เท่ากับ -0.81 ± 0.10 และค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน เท่ากับ $b^* 3.42 \pm 0.50$ ไซรัปล้วยตากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวมีปริมาตรความชื้นร้อยละ 16.75 ± 0.30 และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี ประมาณ 0.67 ± 0.11 จากการศึกษาพบว่าไซรัปล้วยตากมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีปริมาณต่ำ เนื่องจากไซรัปล้วยตากประกอบด้วยของแข็งที่สามารถละลายได้ทั้งหมดในระดับความเข้มข้น 75.00 ± 1.50 ° Brix ซึ่งมีปริมาณมาก จากการศึกษาไซรัปล้วยตากมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบปริมาณมาก จากการศึกษางานวิจัยของประมุข (2554) พบว่า กระบวนการผลิตฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่เหมาะสม สามารถผลิตฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์โดยการใช้น้ำไซรัป Pectinex Ultra SP-L อัตราส่วนของไซรัปล้วยตากต่อเอนไซม์ Pectinex Ultra SP-L เป็น 3:1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ซึ่งหลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ไซรัปล้วยตากที่มีฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์มาวิเคราะห์หาปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ วิเคราะห์โดยเครื่อง HPLC ได้ของปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ และชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ นอกจากนี้ไซรัปล้วยตากที่ไซรัปล้วยตากมีความเป็นกรดต่าง 4.25 ± 0.30 และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (มาลิก) ร้อยละ 1.99 คังดาราครั้งที่ 22 ซึ่งฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้นั้น เกิดจากการทำปฏิกิริยาของน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ ที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ไซรัปเริ่มต้น โดยมีเอนไซม์ Pectinex Ultra SP-L ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของกลูโคสและฟรุกโตส ได้เป็น ฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ซึ่งเป็นสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย

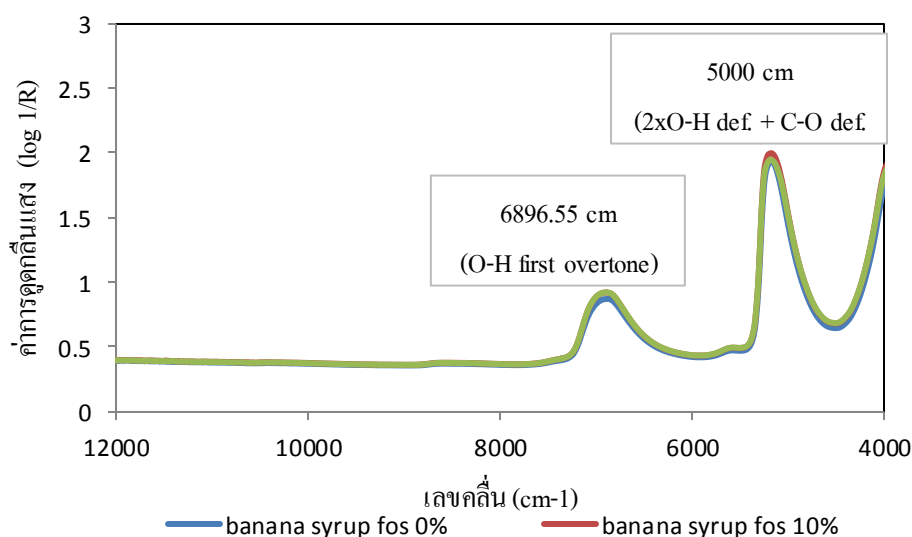
ภาพที่ 22 องค์ประกอบทางเคมีของ ไชร์ปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ

องค์ประกอบทางเคมี	ไชร์ปกล้วยตาก	หน่วย
ค่า L*	9.89 ± 0.10	-
ค่า a*	-0.81 ± 0.10	-
ค่า b*	3.42 ± 0.50	-
ปริมาณความชื้น	16.75 ± 0.30	ร้อยละ (%)
ค่าแอดอร์แอคติวิตี	0.67 ± 0.11	-
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด	75.00 ± 1.50	° Brix
ค่าความเป็นกรดต่าง	4.25 ± 0.30	-
ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (มาลิก)	1.99 ± 0.00	ร้อยละ (%)
น้ำตาลกลูโคส	186.15 ± 2.58	g/kg
น้ำตาลฟรุกโตส	57.45 ± 0.45	g/kg
น้ำตาลซูโครส	52.45 ± 1.23	g/kg
น้ำตาลฟรุกโตฟูเรโนซิลนิสโทส	55.45 ± 1.06	g/kg
น้ำตาลนิสโทส	53.82 ± 0.78	g/kg
น้ำตาลเคสโทส	60.56 ± 1.15	g/kg
ฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์	169.83 ± 0.95	g/kg

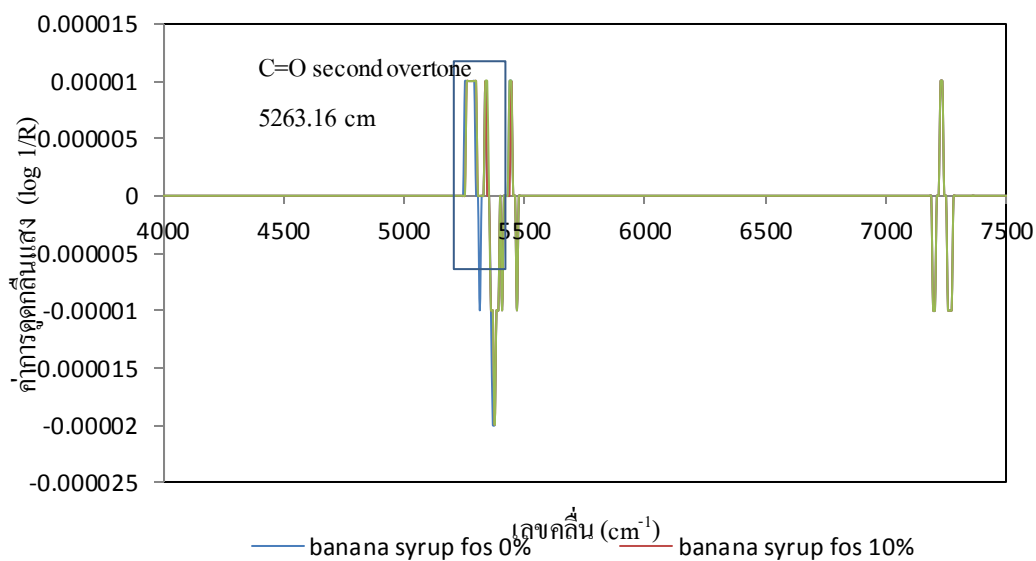
จากผลการทดลองของสารละลายผสมแล้วสามารถใช้เทคนิค NIR ในการประมาณค่าองค์ประกอบทางเคมีของ ไชร์ปกล้วยตาก ซึ่งใน ไชร์ปกล้วยตากนั้นมีองค์ประกอบทางเคมีที่หลากหลายและมีองค์ประกอบของน้ำตาลชนิดเดียวกันกับสารละลายผสม นอกจากนี้พบว่าปริมาณของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่พบในผลิตภัณฑ์ ไชร์ปกล้วยตากเพื่อสุขภาพนั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากปริมาณรวมของน้ำตาลเคสโทส น้ำตาลนิสโทส และน้ำตาลฟรุกโตฟูเรโนซิลนิสโทส ซึ่งน้ำตาลทั้งสามชนิดนี้ เป็นน้ำตาลหน่วยย่อยของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่พบในผลิตภัณฑ์ ไชร์ปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ

4.2.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

ผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน จำนวน 100 ตัวอย่าง เจือจาง 20 เท่า โดยในเบื้องต้นจำเป็นต้องอาศัยการทดสอบเพื่อหาสภาวะความเข้มข้นที่เหมาะสมก่อนกับเครื่อง NIR ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ทั้งในส่วนของการวัดแบบส่องผ่านและสะท้อนกลับ โดยจะนำสารมาตรฐาน 1 mm ซึ่งเป็นของเหลวใสใน quartz cuvette ทำการวิเคราะห์ที่ช่วงความยาวคลื่น 1200-2500 นาโนเมตร ตัวอย่างจะถูกแสง 32 ครั้ง อุณหภูมิของสารมาตรฐาน 25 °C (Rambla et al., 1997) ซึ่งตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์จะถูกเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง NIR รวมถึงสภาวะของการวัดต่างๆ ซึ่งเส้นสเปกตรัมของไซรัปกล้วยตากแสดงดังภาพที่ 23

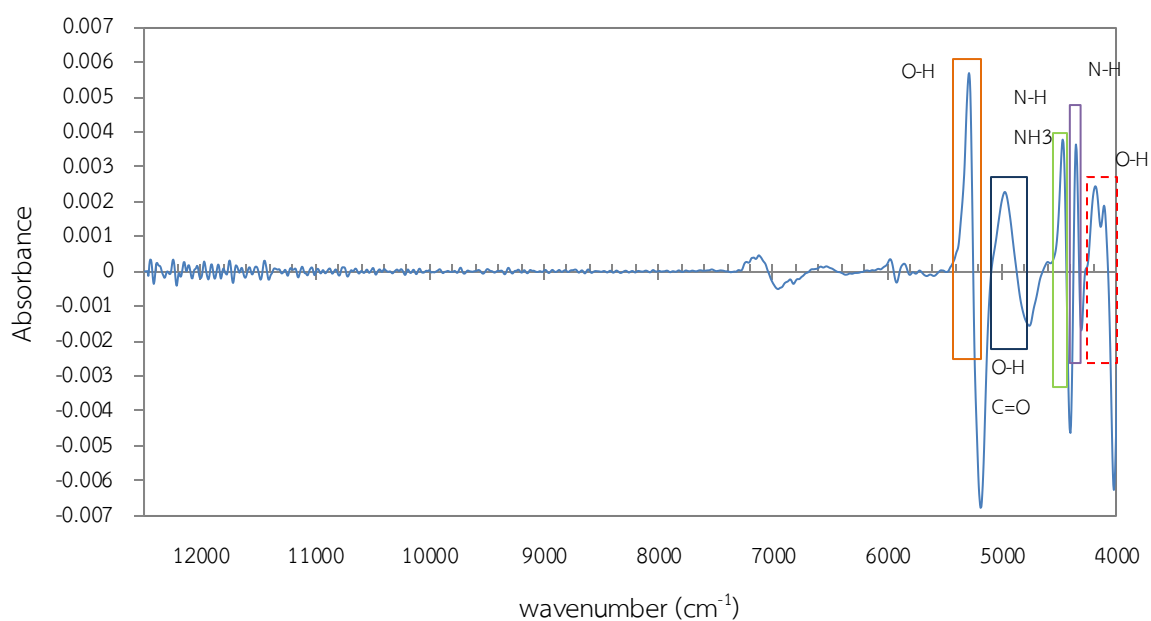


ภาพที่ 23 เส้นสเปกตรัมของไซรัปกล้วยตากจากเทคนิค NIR



ภาพที่ 24 การปรับแต่งสเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ด้วยวิธี second derivative (d_2)

เมื่อได้เส้นสเปกตรัมเริ่มต้นของไซรัปกล้วยตากมาตั้งข้างต้นแล้วนั้น ก็นำมาปรับแต่งเส้นสเปกตรัมด้วยวิธี second derivative (d_2) เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูลและปรับเส้นสเปกตรัมให้สามารถเห็นช่วงการดูดกลืนแสงของไซรัปกล้วยตากได้ชัดเจนมากขึ้น ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 เส้นสเปกตรัมหลังการปรับแต่งด้วยเทคนิค second derivative (d_2) ของไซรัปกล้วยตาก

จากภาพที่ 25 พบว่าเกิดการดูดกลืนแสงที่เลขคลื่น 4200 cm^{-1} (2380 nm) ดูดกลืนพันธะ O-H second overtone ของ โครงสร้างแอลกอฮอล์ เลขคลื่น 4350 cm^{-1} (2280 nm) ดูดกลืนพันธะ C-H ของโครงสร้าง CH_3 เลขคลื่น 4600 cm^{-1} (2242 nm) ดูดกลืนพันธะ N-H และ NH_3 ของโครงสร้าง กรดอะมิโน เลขคลื่น 5000 cm^{-1} (2000 nm) ดูดกลืนพันธะ O-H และ C=O ของโครงสร้างสตาร์ช ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของไซรัปกล้วยตากที่เป็นน้ำตาล ซึ่งมีพันธะ O-H และ C=O สามารถ ดูดกลืนแสงในช่วงนี้เช่นกัน และเลขคลื่น 5250 cm^{-1} (1900 nm) ดูดกลืนพันธะ O-H และ C=O ของ โครงสร้าง starch

สำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานของปริมาณซูโครสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ มีการสร้างสมการใน 3 รูปแบบ กล่าวคือ สมการที่ได้จากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุด แบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม OPUS Version 7.2.139.1294 (Optimization) สมการที่ได้จากการเลือก ช่วงคลื่นเต็มช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ ($12500\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$) (Full wavelength) และสมการที่เลือกช่วง คลื่นที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของน้ำตาล (ช่วงเลขคลื่น $7000\text{-}6300\text{ cm}^{-1}$, $5300\text{-}5000\text{ cm}^{-1}$ และ $4800\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$) พบว่า สมการที่สร้างจากเลือกช่วงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบ ของน้ำตาลซูโครส ให้ค่า R^2 , RPD สูงที่สุด และให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นสมการที่ เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายปริมาณซูโครส โดยสมการดังกล่าวผ่านการปรับแต่งสเปกตรัม ด้วยวิธี First derivative ที่ช่วงคลื่น $7004.6\text{-}6294.9$, $5307.5\text{-}4998.9$ และ $4806\text{-}3996\text{ cm}^{-1}$ โดยส่งผล ให้ค่า R^2 ของสมการดังกล่าวนี้มีค่า เท่ากับ 0.96 (ตารางที่ 12) โดยสมการดังกล่าวนี้มีความ สามารถในการใช้ในการทำนายปริมาณซูโครสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพได้ (Osborne, Fearn et al. 1993)

ตารางที่ 12 ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณซูโครสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ด้วยเทคนิค NIR

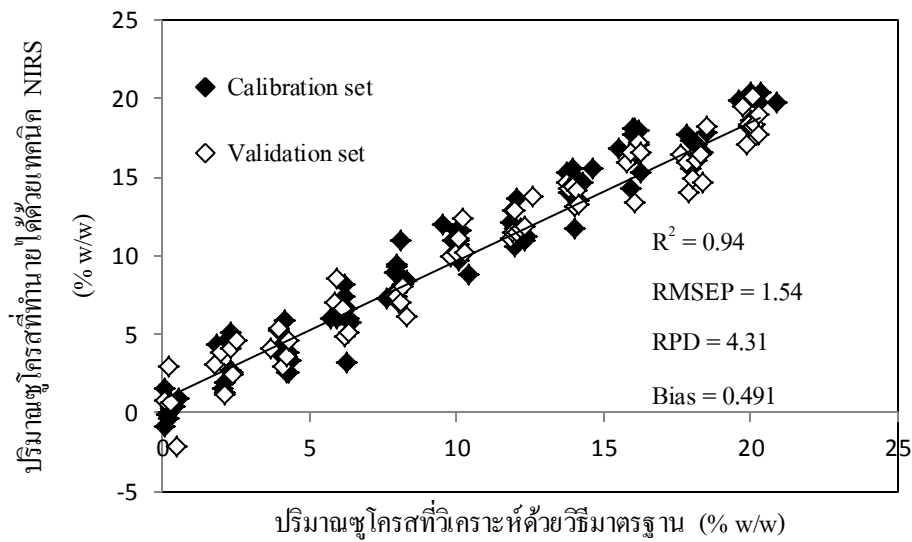
ตัวอย่างไซรัป	ช่วงเลขคลื่น wavelength selection (cm ⁻¹)	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม	PLS factor	ชุดข้อมูลสมการ						
				ทำนาย (60%)		ชุดข้อมูลทวนสอบข้อมูล (40%)				
กล้วยตาก				R ²	RMSEE	R ²	RMSEP	RPD	Bias	
ซูโครส	Optimization	9403.8-5446.3 4605.5-4242.9	SNV	7	0.0758	1.01	0.9556	1.33	4.75	0.075
	Full wavekenght	12489.6-3996	No spectral data processing	9	0.9614	1.29	0.8535	2.41	2.9	1.05
	สมการเลือกช่วงที่สัมพันธ์ กับซูโครส	7004.6-6294.9 5307.5-4998.9 4806-3996	First Derivative	8	0.9598	1.31	0.94	1.54	4.31	0.491

หมายเหตุ: R²: coefficients of determination, RMSEE: root mean square error of estimation, RMSEP: root mean square error of prediction,

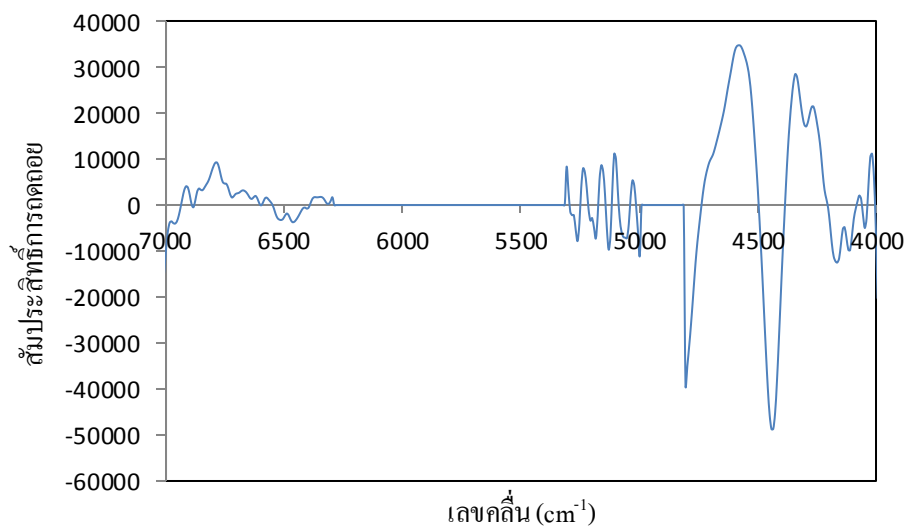
RPD: ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP, Bias: error of prediction

จากภาพที่ 26 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณซูโครสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative ซึ่งผลการทดลองพบว่า ข้อมูลที่ได้นั้นมีลักษณะการเรียงตัวในแนวเดียวกับเส้นเป้าหมาย (target line) โดยมีลักษณะการกระจายตัวในตามเส้นเป้าหมายตลอดทั้งเส้นตามแนวแกน Y ไม่มีการรวมตัวกันของข้อมูลที่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง แสดงว่า การทำนายปริมาณซูโครส ด้วยเทคนิค NIRS มีค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ซึ่งจากการปรับเส้นสเปกตรัม พบว่า การดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ของซูโครสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ อยู่ในช่วงเลขคลื่น 6896, 6493, 5263, 5000, 4761, 4440 และ 4393 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนการสั่นพันธะ O-H และพันธะ C-H (J.A. and C.C. 1951) (ภาพที่ 27)



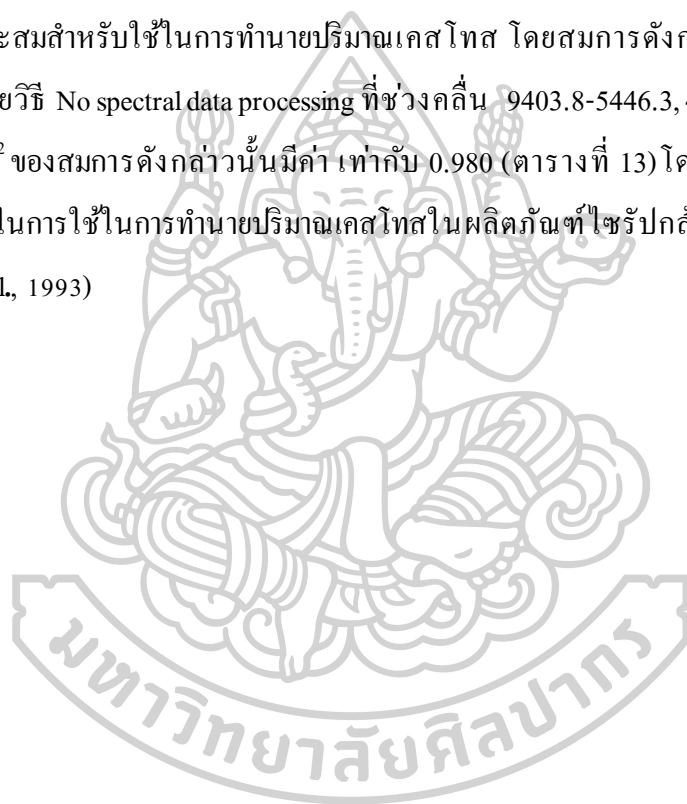


ภาพที่ 26 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณซูโครสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อ
 สุขภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative



ภาพที่ 27 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสมการทำนายซูโครสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อ
 สุขภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative

สำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานของปริมาณเคสโทสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อ
สุขภาพ มีการสร้างสมการใน 3 รูปแบบ กล่าวคือ สมการที่ได้จากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่
เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม OPUS Version 7.2.139.1294 (Optimization) สมการที่
ได้จากการเลือกช่วงคลื่นเต็มช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ ($12500\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$) (Full wavelength) และ
สมการที่เลือกช่วงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของน้ำตาล (ช่วงเลขคลื่น $7000\text{-}6300\text{ cm}^{-1}$,
 $5300\text{-}5000\text{ cm}^{-1}$ และ $4800\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$) พบว่า สมการที่สร้างจากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่
เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติ ให้ค่า R^2 , RPD สูงที่สุด และให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำที่สุด ซึ่งเป็น
สมการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายปริมาณเคสโทส โดยสมการดังกล่าวผ่านการปรับแต่ง
สเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing ที่ช่วงคลื่น $9403.8\text{-}5446.3$, $4605.5\text{-}4242.9\text{ cm}^{-1}$ โดย
ส่งผลให้ค่า R^2 ของสมการดังกล่าวนี้มีค่าเท่ากับ 0.980 (ตารางที่ 13) โดยสมการดังกล่าวนี้มี
ความสามารถในการใช้ในการทำนายปริมาณเคสโทสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพได้
(Osborne et al., 1993)



ตารางที่ 13 ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณแคลเซียมในผลิตภัณฑ์ไอซ์กรีกกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ด้วยเทคนิค NIR

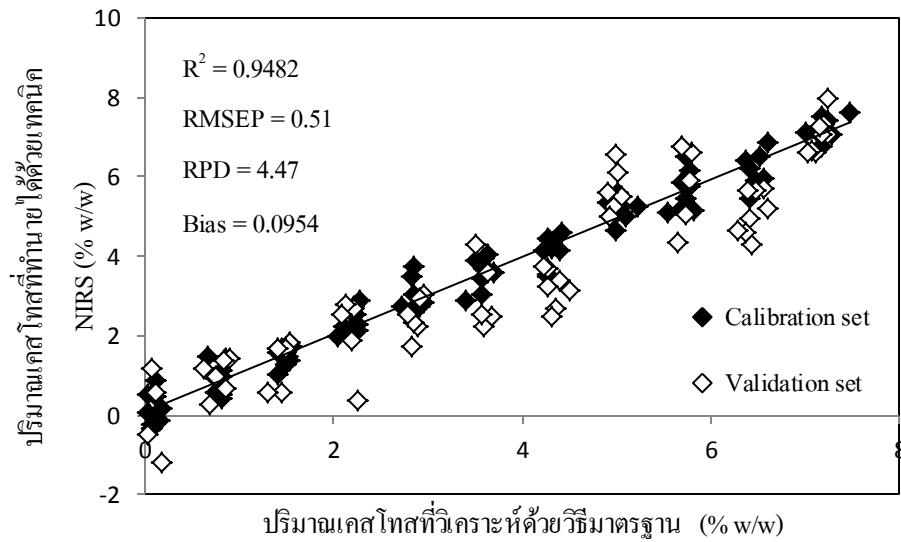
ตัวอย่างไอซ์กรีกกล้วยตาก	ช่วงเลขคลื่น (cm ⁻¹)	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม	PLS factor	ชุดข้อมูลสมการ						
				ทำนาย (60%)		ชุดข้อมูลทดสอบข้อมูล (40%)				
wavelength selection				R ²	RMSEE	R ²	RMSEP	RPD	Bias	
แคลเซียม (GF ₂)	Optimization	9403.8-5446.3 4605.5-4242.9	No spectral data processing	9	0.9801	0.331	0.9594	0.452	5.02	-0.072
	Full wavelength	12489.6-3996	1+SNV	9	0.9718	0.395	0.8298	0.924	2.64	0.367
	สมการเลือกช่วงที่สัมพันธ์ กับแคลเซียม	7004.6-6294.9 5307.5-4998.9 4806-3996	First Derivative	9	0.9641	0.445	0.9482	0.51	4.47	0.0954

หมายเหตุ: R²: coefficients of determination, RMSEE: root mean square error of estimation, RMSEP: root mean square error of prediction,

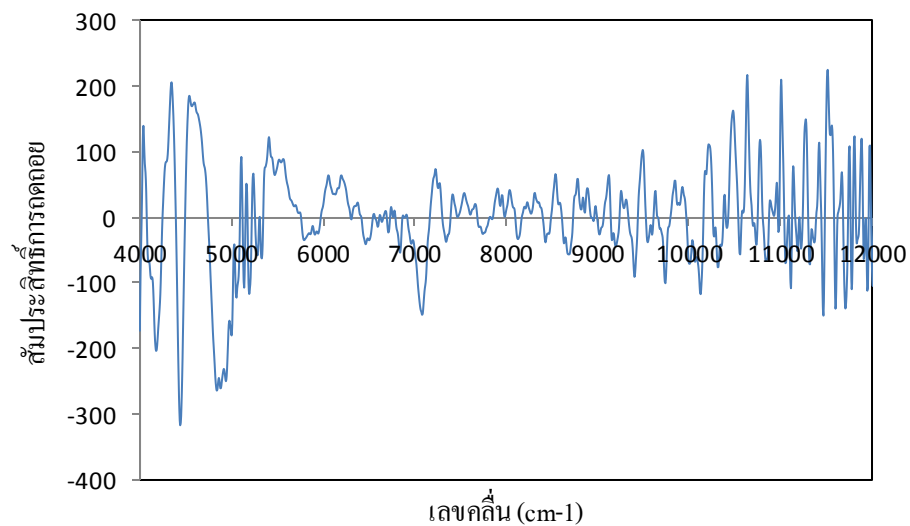
RPD: ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP, Bias: error of prediction

จากภาพที่ 28 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณเคสโทสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing ซึ่งผลการทดลองพบว่า ข้อมูลที่ได้นั้นมีลักษณะการเรียงตัวในแนวเดียวกับเส้นเป้าหมาย (target line) โดยมีลักษณะการกระจายตัวในตามเส้นเป้าหมายตลอดทั้งเส้นตามแนวแกน Y ไม่มีการรวมตัวกันของข้อมูลที่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง แสดงว่า การทำนายปริมาณเคสโทส ด้วยเทคนิค NIR มีค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ซึ่งจากการปรับเส้นสเปกตรัม พบว่า การดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ของเคสโทสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ อยู่ในช่วงเลขคลื่น 6896, 6493, 4440 และ 4393 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนการสั่นพันธะ O-H และพันธะ C-H (J.A. and C.C. 1951) (ภาพที่ 29)



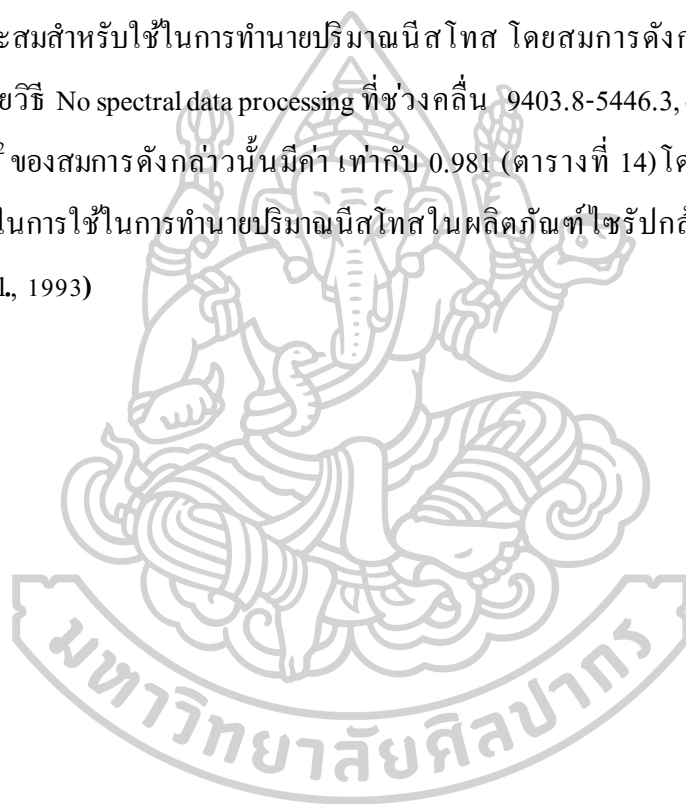


ภาพที่ 28 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณแคโรทีนในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing



ภาพที่ 29 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสมการทำนายแคโรทีนในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing

สำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานของปริมาณนิสโทสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อ
สุขภาพ มีการสร้างสมการใน 3 รูปแบบ กล่าวคือ สมการที่ได้จากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่
เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม OPUS Version 7.2.139.1294 (Optimization) สมการที่
ได้จากการเลือกช่วงคลื่นเต็มช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ ($12500\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$) (Full wavelength) และ
สมการที่เลือกช่วงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของน้ำตาล (ช่วงเลขคลื่น $7000\text{-}6300\text{ cm}^{-1}$,
 $5300\text{-}5000\text{ cm}^{-1}$ และ $4800\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$) พบว่า สมการที่สร้างจากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่
เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติ ให้ค่า R^2 , RPD สูงที่สุด และให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำที่สุด ซึ่งเป็น
สมการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายปริมาณนิสโทส โดยสมการดังกล่าวผ่านการปรับแต่ง
สเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing ที่ช่วงคลื่น $9403.8\text{-}5446.3$, $4605.5\text{-}4242.9\text{ cm}^{-1}$ โดย
ส่งผลให้ค่า R^2 ของสมการดังกล่าวนี้มีค่าเท่ากับ 0.981 (ตารางที่ 14) โดยสมการดังกล่าวนี้มี
ความสามารถในการใช้ในการทำนายปริมาณนิสโทสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพได้
(Osborne et al., 1993)



ตารางที่ 14 ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณนีสโทสในผลิตภัณฑ์ไอซ์กรีมกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ด้วยเทคนิค NIR

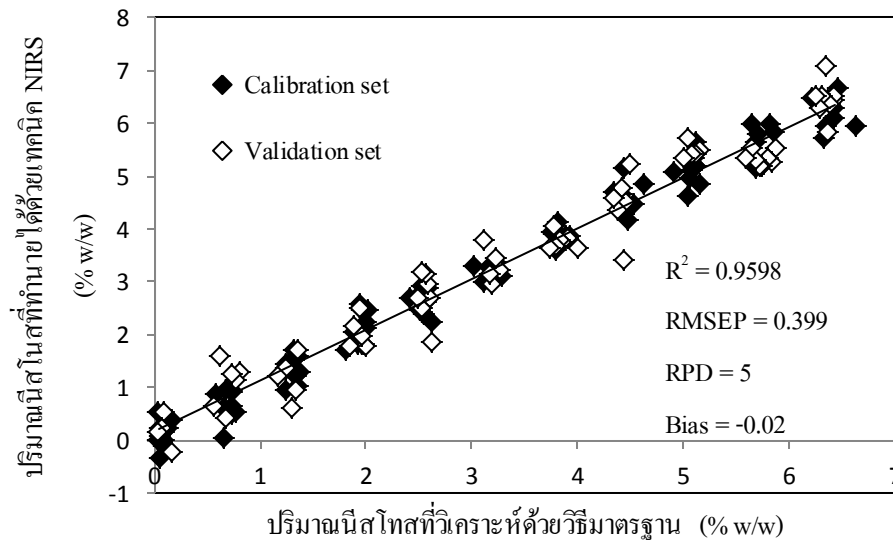
ตัวอย่างไอซ์กรีม กล้วยตาก	wavelength selection	ช่วงเลขคลื่น (cm^{-1})	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม	PLS factor	ชุดข้อมูลสมการ					
					ทำนาย (60%)		ชุดข้อมูลทดสอบข้อมูล (40%)			
					R^2	RMSEE	R^2	RMSEP	RPD	Bias
นีสโทส (GF_3)	Optimization	9403.8-5446.3	No spectral data	9	0.9809	0.288	0.9598	0.399	5	-0.02
		4605.5-4242.9	processing							
	Full wavelength	12489.6-3996	No spectral data	9	0.9611	0.412	0.847	0.779	2.75	0.288
			processing							
	สมการเลือกช่วงที่สัมพันธ์ กับนีสโทส	7004.6-6294.9	No spectral data	10	0.9593	0.424	0.9317	0.521	3.86	0.0663
		5307.5-4998.9	processing							
		4806-3996								

หมายเหตุ: R^2 : coefficients of determination, RMSEE: root mean square error of estimation, RMSEP: root mean square error of prediction,

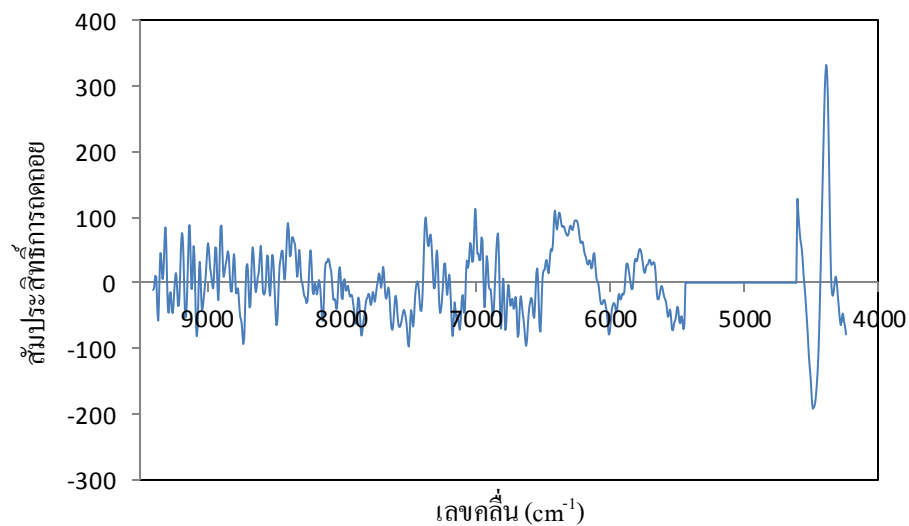
RPD: ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP, Bias: error of prediction

จากภาพที่ 30 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณนิสโทสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing ซึ่งผลการทดลองพบว่า ข้อมูลที่ได้นั้นมีลักษณะการเรียงตัวในแนวเดียวกับเส้นเป้าหมาย (target line) โดยมีลักษณะการกระจายตัวในตามเส้นเป้าหมายตลอดทั้งเส้นตามแนวแกน Y ไม่มีการรวมตัวกันของข้อมูลทีบริเวณใดบริเวณหนึ่ง แสดงว่า การทำนายปริมาณนิสโทส ด้วยเทคนิค NIR มีค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ซึ่งจากการปรับเส้นสเปกตรัม พบว่า การดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ของนิสโทสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ อยู่ในช่วงเลขคลื่น 6896, 6493, 4440 และ 4393 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนการสั่นพันธะ O-H และพันธะ C-H (J.A. and C.C. 1951) (ภาพที่ 31)



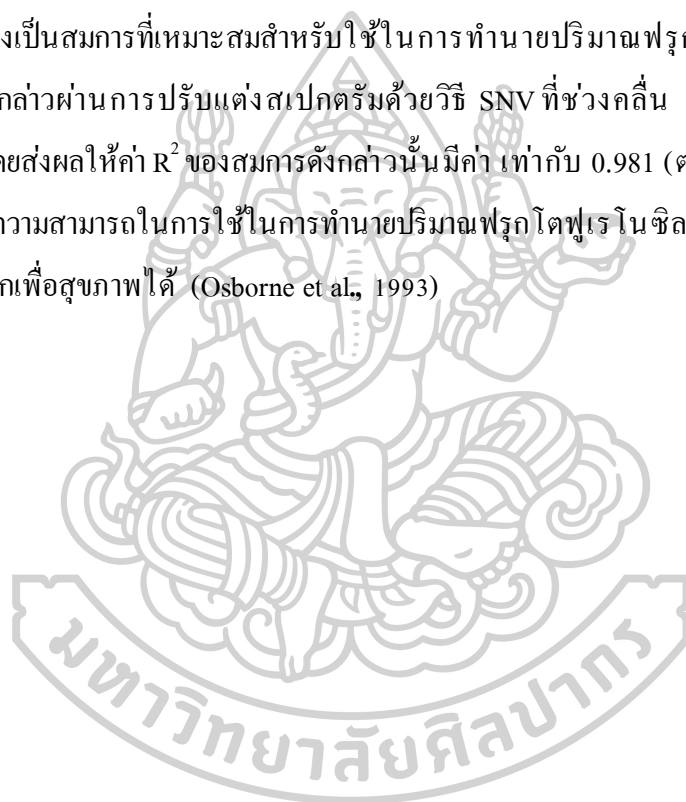


ภาพที่ 30 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณนํ้าโทสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อ
ดูภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing



ภาพที่ 31 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสมการทำนายนํ้าโทสในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อ
ดูภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี No spectral data processing

สำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานของปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ มีการสร้างสมการใน 3 รูปแบบ กล่าวคือ สมการที่ได้จากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม OPUS Version 7.2.139.1294 (Optimization) สมการที่ได้จากการเลือกช่วงคลื่นเต็มช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ ($12500-4000\text{ cm}^{-1}$) (Full wavelength) และสมการที่เลือกช่วงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของน้ำตาล (ช่วงเลขคลื่น $7000-6300\text{ cm}^{-1}$, $5300-5000\text{ cm}^{-1}$ และ $4800-4000\text{ cm}^{-1}$) พบว่า สมการที่สร้างจากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติ ให้ค่า R^2 , RPD สูงที่สุด และให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส โดยสมการดังกล่าวผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ที่ช่วงคลื่น $9403.8-5446.3, 4605.5-4242.9\text{ cm}^{-1}$ โดยส่งผลให้ค่า R^2 ของสมการดังกล่าวนี้มีค่าเท่ากับ 0.981 (ตารางที่ 15) โดยสมการดังกล่าวนี้มีความสามารถในการใช้ในการทำนายปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพได้ (Osborne et al., 1993)



ตารางที่ 15 ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ด้วยเทคนิค NIR

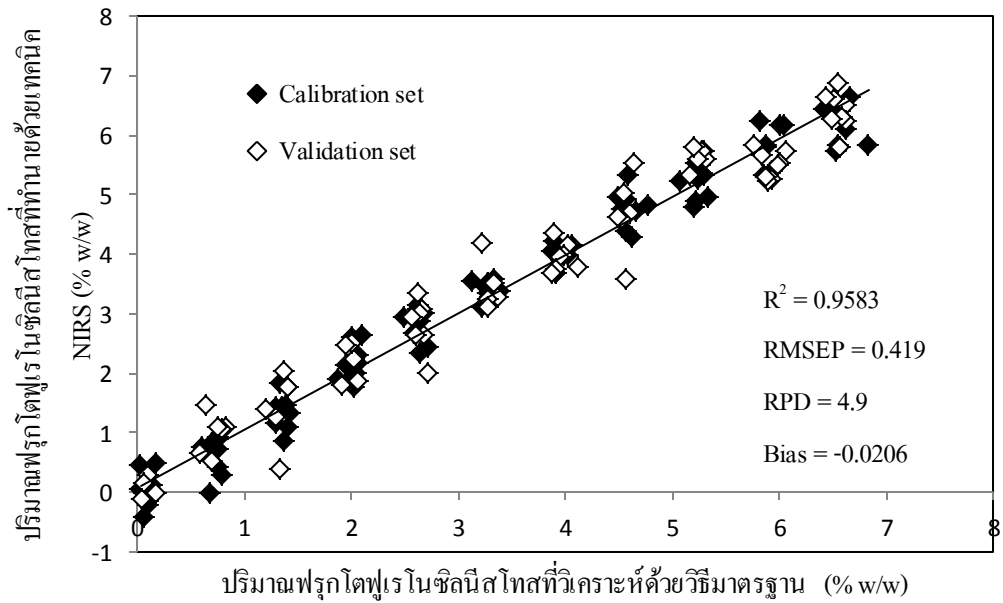
ตัวอย่างไซรัป กล้วยตาก	wavelength selection	ช่วงเลขคลื่น (cm^{-1})	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม	PLS factor	ชุดข้อมูลสมการ ทำนาย (60%)		ชุดข้อมูลทวนสอบข้อมูล (40%)			
					R^2	RMSEE	R^2	RMSEP	RPD	Bias
ฟรุกโตฟูเรโน ลนีสโทส (GF ₄)	Optimization	9403.8-5446.3 4605.5-4242.9	SNV	7	0.9746	0.339	0.9583	0.419	4.9	-0.0206
	Full wavelength	12489.6-3996	1+MSC	8	0.9616	0.419	0.8101	0.895	2.59	0.416
	สมการเลือกช่วงที่	7004.6-6294.9	No spectral data	10	0.9614	0.425	0.9354	0.522	3.95	0.0403
	สัมพันธ์กับฟรุกโต	5307.5-4998.9	processing							
	ฟูเรโนซิลนีสโทส	4806-3996								

หมายเหตุ: R^2 : coefficients of determination, RMSEE: root mean square error of estimation, RMSEP: root mean square error of prediction,

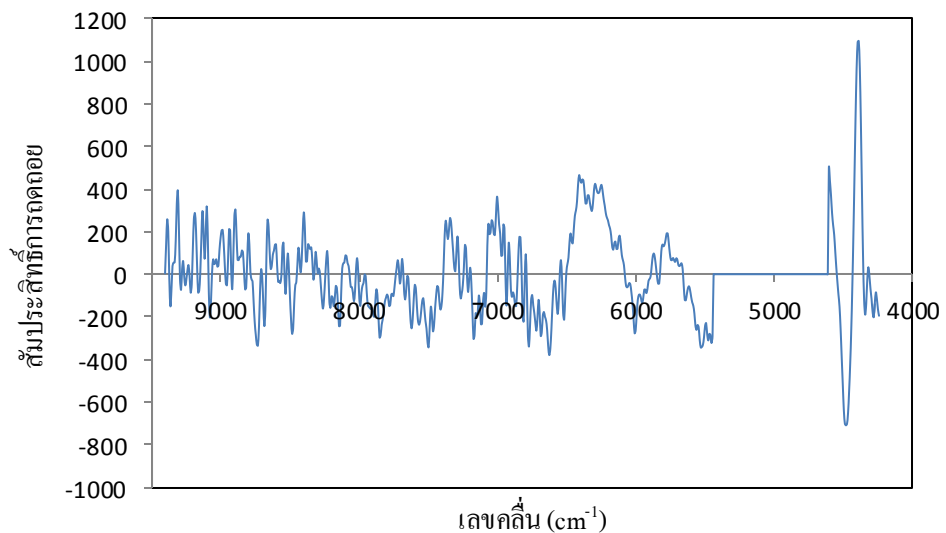
RPD: ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP, Bias: error of prediction

จากภาพที่ 32 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ซึ่งผลการทดลองพบว่า ข้อมูลที่ได้นั้นมีลักษณะการเรียงตัวในแนวเดียวกับเส้นเป้าหมาย (target line) โดยมีลักษณะการกระจายตัวในตามเส้นเป้าหมายตลอดทั้งเส้นตามแนวแกน Y ไม่มีการรวมตัวกันของข้อมูลทีบริเวณใดบริเวณหนึ่ง แสดงว่า การทำนายปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ด้วยเทคนิค NIR มีค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ซึ่งจากการปรับเส้นสเปกตรัม พบว่าการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ของฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ อยู่ในช่วงเลขคลื่น 6896, 6493, 4440 และ 4393 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนการสั่นพันธะ O-H และพันธะ C-H (J.A. and C.C. 1951) (ภาพที่ 33)



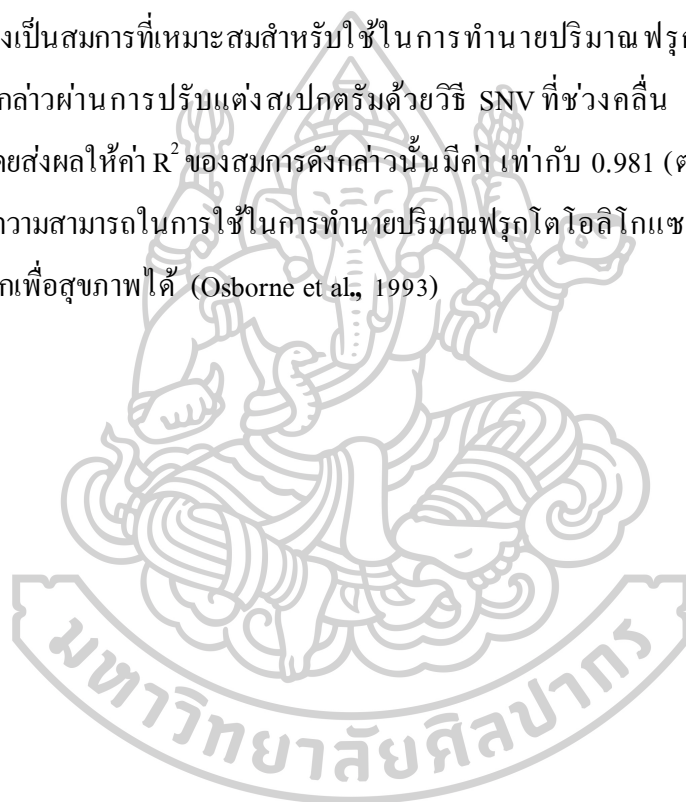


ภาพที่ 32 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV



ภาพที่ 33 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV

สำหรับการสร้างสมการเทียบมาตรฐานของปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ มีการสร้างสมการใน 3 รูปแบบ กล่าวคือ สมการที่ได้จากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม OPUS Version 7.2.139.1294 (Optimization) สมการที่ได้จากการเลือกช่วงคลื่นเต็มช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ ($12500-4000\text{ cm}^{-1}$) (Full wavelength) และสมการที่เลือกช่วงคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบของน้ำตาล (ช่วงเลขคลื่น $7000-6300\text{ cm}^{-1}$, $5300-5000\text{ cm}^{-1}$ และ $4800-4000\text{ cm}^{-1}$) พบว่า สมการที่สร้างจากฟังก์ชันหาความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติ ให้ค่า R^2 , RPD สูงที่สุด และให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำที่สุด ซึ่งเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ โดยสมการดังกล่าวผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ที่ช่วงคลื่น $9403.8-5446.3, 4605.5-4242.9\text{ cm}^{-1}$ โดยส่งผลให้ค่า R^2 ของสมการดังกล่าวนี้มีค่าเท่ากับ 0.981 (ตารางที่ 16) โดยสมการดังกล่าวนี้มีความสามารถในการใช้ในการทำนายปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพได้ (Osborne et al., 1993)

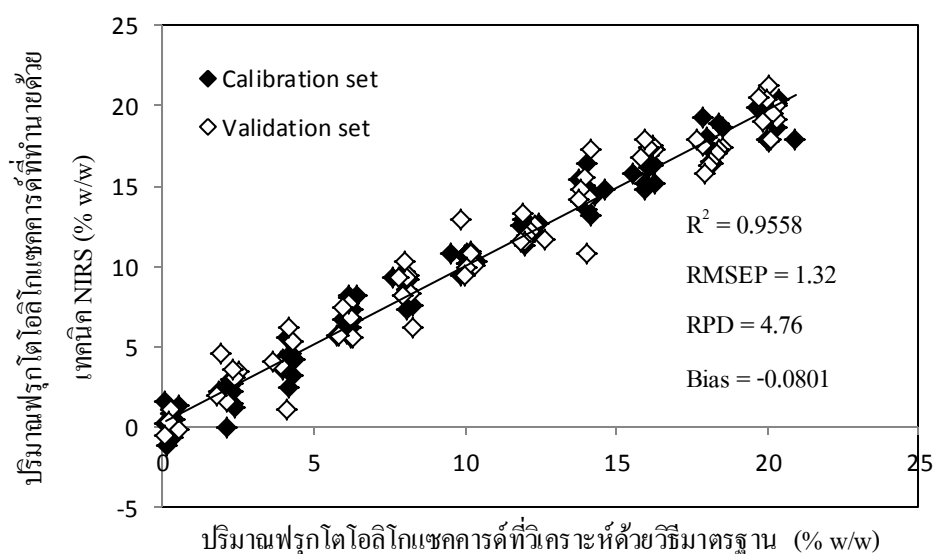


ตารางที่ 16 ค่าทางสถิติแบบจำลองที่ศึกษาการทำนายปริมาณฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ ในผลิตภัณฑ์ไอซ์กรีมกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ด้วยเทคนิค NIR

ตัวอย่างไอซ์กรีม กล้วยตาก	wavelength selection	ช่วงเลขคลื่น (cm ⁻¹)	วิธีการปรับแต่ง สเปกตรัม	PLS factor	ชุดข้อมูลสมการ					
					ทำนาย (60%)			ชุดข้อมูลทดสอบข้อมูล (40%)		
					R ²	RMSEE	R ²	RMSEP	RPD	Bias
ฟรุคโตโอลิโก แซคคาไรด์ (FOS)	Optimization	9403.8-5446.3 4605.5-4242.9	SNV	7	0.9753	1.03	0.9558	1.32	4.76	-0.0801
	Full wavelength	12489.6-3996	1+SNV	9	0.9692	1.16	0.8359	2.55	2.8	1.2
	สมการเลือกช่วง ที่สัมพันธ์ กับฟรุคโตโอลิ โกแซคคาไรด์	7004.6-6294.9 5307.5-4998.9 4806-3996	No spectral data processing	10	0.9632	1.27	0.9243	1.73	3.66	0.205

หมายเหตุ: R²: coefficients of determination, RMSEE: root mean square error of estimation, RMSEP: root mean square error of prediction,
RPD: ratio of standard deviation of reference data in validation set to SEP, Bias: error of prediction

จากภาพที่ 34 แสดงลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV ซึ่งผลการทดลองพบว่า ข้อมูลที่ได้นั้นมีลักษณะการเรียงตัวในแนวเดียวกับเส้นเป้าหมาย (target line) โดยมีลักษณะการกระจายตัวในตามเส้นเป้าหมายตลอดทั้งเส้นตามแนวแกน Y ไม่มีการรวมตัวกันของข้อมูลที่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง แสดงว่า การทำนายปริมาณฟรุกโตฟูเรโนซิลนิสโทส ด้วยเทคนิค NIRS มีค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ซึ่งจากการปรับเส้นสเปกตรัม พบว่าการดูคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ อยู่ในช่วงเลขคลื่น 6896, 6493, 4440 และ 4393 cm^{-1} เป็นการดูคลื่นการสั่นพันธะ O-H และพันธะ C-H (J.A. and C.C. 1951)



ภาพที่ 34 ลักษณะการกระจายจุดบนกราฟของปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ ในรูปแบบสารละลายที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี SNV

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การประยุกต์ใช้เทคนิค NIR เลขคลื่น 12500-4000 cm^{-1} ในการติดตามปริมาณของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตาก สามารถทำได้โดยอาศัยการเตรียมตัวอย่างเบื้องต้น โดยการเจือจาง 20 เท่า พร้อมทั้งใช้เทคนิคการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์ เพื่อลดการกระเจิงของข้อมูลด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ร่วมกับการสร้างสมการด้วยเทคนิค PLS ทำให้ได้สมการในการทำนายค่าทางเคมีของไซรัปกล้วยตาก

จากการสร้างสมการทำนายขององค์ประกอบทางเคมีของไซรัปกล้วยตาก พบว่าสมการทำนายปริมาณซูโครส เลสโทส นิสโทส และฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.95, 0.98, 0.98 และ 0.97 ค่า RMSEP เท่ากับ 1.54, 0.51, 0.40, 0.42 และ 1.32 ค่า RPD เท่ากับ 4.31, 4.47, 5, 4.9 และ 4.76 และค่า Bias เท่ากับ 0.49, 0.09, -0.02, -0.02 และ -0.08 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าสมการทำนายดังกล่าวมีความสามารถทำนายปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพได้ ซึ่งตัวอย่างไซรัปกล้วยตากที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่อุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการ จึงส่งผลให้มีองค์ประกอบทางเคมีที่หลากหลายเป็นอนุภาคที่ทำให้เกิดการกระเจิงแสงการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นของ NIR แต่เนื่องการเตรียมตัวอย่างเบื้องต้น โดยการเจือจาง 20 เท่าสามารถลดการกระเจิงแสงการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น NIR ได้ ทำให้สมการทำนายปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ของไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพได้

รายการอ้างอิง

- Aurore, G., B. Parfail and L. Fährsmane (2009). "Bananas, raw materials for making processed food products." Trends in Food Science and Technology(20): 78-91.
- Barnes, R. J., M. S. Dhanoa and S. J. Lister (1989). "Standard normal variate transformation and detrending of near-infrared diffuse reflectance spectra." Applied Spectroscopy **43**(5): 772-777.
- Bokobza, L. (1998). "1998." Journal of Near Infrared Spectroscopy(6): 3-17.
- Goldstein, J. L. and E. L. Wick (1969). "Lipid in ripening banana fruit." Journal of Food Science(34): 482-484.
- Guerrero-Beltran, J. A., B. G. Swanson and G. V. Barbosa-Canovas (2005). "Inhibition of polyphenoloxidase in mango puree with 4-hexylresorcinol, cysteine and ascorbic acid." Lebensmittel Wissenschaft and Technology(38): 625–630.
- Hruschka, W. R. (2001). "Data analysis: wavelength selection methods In: Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries." Williams, P. and Norris, K., eds. American Society of Cereal Chemists, St. Paul, MN: 39-58.
- Izidoro, D. R., M. R. Sierakowski, C. W. Haminiuk and A. P. Scheer (2007). "Influence of green banana pulp on the rheological behavior and chemical characteristics of emulsions (mayonnaises)." Lebensmittel Wissenschaft and Technology(7): 262-269.
- J.A., C. and P. C.C. (1951). "The near infrared absorption spectrum of liquid water " Journal of Optical Society of America **41**(5): 302-304.
- Khalafalla, M. S. and D. A. Palzkill (1990). "Carbohydrates and praline in jojoba clones that differ in frost susceptibility." Journal of Hort Science(25): 103-105.
- Liu, H., B. Xiang and L. Qu (2006). "Structure analysis of ascorbic acid using near-infrared spectroscopy and generalized two-dimensional correlation spectroscopy." Journal molecular structure **794**(1): 12-17.
- Oku, T., T. Tokunaga and N. Hosoya. (1984). "Nondigestibility of a new sweetener, 'Neosugar', in the rat." Journal of Nutrition(114): 1574–1581.
- Osborne, B. G., T. Fearn and P. H. Hindle (1993). "Practical NIR Spectroscopy with Application in Food and Beverage Analysis." Longman Scientific & Technical, Singapore: 227.

- Oscar, P., W. Harry, A. Beth and C. Frenkel (1981). "Enhancement of fruit sensory quality by postharvest applications of acetaldehyde and ethanol." Journal of Food Science(47): 270-276.
- Pan, Z., C. Shih, T. H. McHugh and E. Hirschberg (2008). "Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying." Food Science and Technology(41): 1944-1951.
- Panis, B., N. Tottk, K. V. Nimmen, L. A. Withersb and R. Swennen (1996). "Cryopreservation of banana (*Musa spp.*) meristem cultures after preculture on sucrose." Plant Science(121): 95-106.
- Rouseff, R. L. and M. M. Leahy (1993). "Fruit flavors." American Chemical Society, Washington: 292.
- Sanchez, O., F. Guio, D. Garcia, E. Silva and L. Caicedo (2008). "Fructooligosaccharides production by *Aspergillus* sp. N74 in a mechanically agitated airlift reactor." Food and Bioprocess Processing(86): 109-115.
- Tortoe, C., P.-N. T. Johnson and A. I. Nyarko (2009). "Effects of osmo-dehydration, blanching and semi-ripening on the viscoelastic, water activity and colorimetry properties of flour from three cultivars of plantain (*Musa AAB*)." Innovative Food Science and Emerging Technologies(10): 82–86.
- Tribess, T. B., J. P. Hernandez-Urbe, M. G. C. Mendez-Montealvo, E. W. Menezes, L. A. Bello-Perez and C. C. Tadini (2009). "Thermal properties and resistant starch content of green banana flour (*Musacavendishii*) produced at different drying conditions." Lebensmittel Wissenschaft and Technology (42): 1022–1025.
- Waliszewski, K. N., M. A. Aparicio, L. A. Bello and J. A. Monroy (2003). "Changes of banana starch by chemical and physical modification." Carbohydrate Polymers(52): 237–242.
- Williams, P. C. and K. Norris (2001). "Method development and implementation of near-infrared spectroscopy in industrial manufacturing processes." In Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries, 2nd ed., St. Paul, Minn.: American Association of Cereal Chemists.
- Zhang, P., R. L. Whistler, J. N. BeMiller and B. R. Hamaker (2005). "Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility—a review." Carbohydrate Polymers(59): 443–458.



สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าทางสถิติของ เทคนิค NIRS

- ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlative coefficient; R)

$$R = \frac{[\sum(y_i - \bar{y})^2]^{1/2}}{[\sum(y_i - \bar{y})^2]}$$

- ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination; R²)

$$R^2 = \frac{[\sum(y_i - \bar{y})^2]}{[\sum(y_i - \bar{y})^2]}$$

- ค่าความคาดเคลื่อนในการทำนาย (Root mean square error of prediction; RMSEP)

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum(Y_{pred} - Y_{act})^2}{n}}$$

- ความผิดพลาดมาตรฐานของการทำนาย (Standard error of prediction; SEP)

$$SEP = \left[\frac{\sum(d_i - bias^2)}{n_v - 1} \right]^{1/2}$$

- ค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ย (Bias)

$$Bias = \bar{d} = \left(\frac{\sum d_i}{n_v} \right) = \frac{\sum(y - y_i)}{n_v}$$

- ค่าสัดส่วนระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับความผิดพลาดมาตรฐานในการทำนายของกลุ่มทวนสอบสมการ (Ratio of standard deviation of reference data in validation set SEP; RPD)

$$RPD = \frac{SD_{val}}{SEP}$$

เมื่อ	y_i	=	ค่าทางกายภาพหรือเคมีที่ได้จากการวัดด้วยวิธีมาตรฐาน
	y	=	ค่าทางกายภาพหรือเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการทำนาย
	\bar{y}	=	ค่าเฉลี่ยของค่าทางกายภาพหรือเคมี
	d_i	=	ค่าความแตกต่างระหว่างค่าทางกายภาพหรือเคมีที่ได้จากการวัดด้วยวิธีมาตรฐานกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการทำนาย

- n_c = จำนวนตัวอย่างในชุดข้อมูลสำหรับสร้างสมการเทียบมาตรฐาน
 n_v = จำนวนตัวอย่างในชุดข้อมูลสำหรับสร้างสมการทวนสอบ
 p = จำนวนตัวแปรที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

การทวนสอบสมการทำนายตามมาตรฐานของ ISO 12099

- Bias checking (paired t-test)

$$T_b = \pm \frac{t_{(1-\frac{\alpha}{2})} \times SEP}{\sqrt{n}}$$

เมื่อ T_b คือ bias confidence limits

ทั้งนี้การประเมินค่า Bias ดูจาก $Bias < T_b$; Bias ยอมรับได้ (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%)

- SEP checking (F-test, ratio of variances)

$$T_{UE} = SEC \sqrt{F(\alpha; v, M)}$$

$$SEC = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{n_c - p - 1}}$$

เมื่อ T_{UE} = คือ The unexplained error confidence limit (UECLs)

α = probability of making a type I error, 5%

V = $n-1$ (degree of freedom associated with SEP)

M = $n_c - p - 1$ (degree of freedom associated with SEC)

n_c = จำนวนตัวอย่างในชุดข้อมูลสำหรับสร้างสมการมาตรฐาน

p = จำนวนตัวแปรที่ใช้ในการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

ทั้งนี้การประเมินค่า SEP ดูจาก $SEP < T_{UE}$; SEP ยอมรับได้ (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%)

- Slope checking

$$T_{obs} = |b - 1| \sqrt{\frac{s_y^2 (n-1)}{s_{res}^2}}$$

$$S_{res} = \frac{\sqrt{\sum (y_i - a + b\hat{y}_i)^2}}{n-2}$$

- เมื่อ
- n = number of independent sample
 - S_y^2 = variance of the n predicted values
 - S_{res} = residual standard deviation
 - a = intercept
 - b = slope
 - y_i = the reference value
 - \hat{y}_i = the predicted value

ทั้งนี้การประเมินค่า Slope ดูจาก $T_{obs} \geq t_{(1-\frac{\alpha}{2})}$, slope b แตกต่างจาก 1

- การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน (% error)

$$\text{คำนวณจากสูตร \% error} = \left| \frac{Y_n - X_n}{Y_n} \right| \times 100\%$$

เมื่อ Y_n = ค่าที่แท้จริงของการวัด

X_n = ค่าที่อ่านได้จากการวัด





ภาคผนวก ข

ค่าทางเคมีของไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพจากวิธีมาตรฐาน

กล้วยตากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการผลิต และจำหน่ายมากในท้องตลาด เนื่องจากกล้วยสามารถปลูกและเจริญเติบโตได้ทั่วทุกภูมิภาคของภูมิภาคของประเทศ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์กล้วยตากมีราคาขายต่ำ มีวัตถุดิบที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นสำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์กล้วยตาก จากการศึกษาไซรัปกล้วยตากเบื้องต้น พบว่าไซรัปกล้วยตากที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้จะมีลักษณะสีเหลืองเข้มจนถึงน้ำตาลแดง ซึ่งมีความสว่าง L^* เท่ากับ 9.89 ± 0.10 ค่าความเป็นสีแดง-เขียว a^* เท่ากับ -0.81 ± 0.10 และค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน เท่ากับ $b^* 3.42 \pm 0.50$ ไซรัปกล้วยตากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวมีปริมาณความชื้นร้อยละ 16.75 ± 0.30 และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี ประมาณ 0.67 ± 0.11 จากการศึกษาพบว่าไซรัปกล้วยตากมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีปริมาณต่ำ เนื่องจากไซรัปกล้วยตากประกอบด้วยของแข็งที่สามารถละลายได้ทั้งหมดในระดับความเข้มข้น $75.00 \pm 1.50^\circ$ Brix ซึ่งมีปริมาณมาก จากการศึกษาไซรัปกล้วยตากมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบปริมาณมาก ซึ่งน้ำตาลที่พบในในไซรัปกล้วยตาก คือ น้ำตาลกลูโคส 568.86 ± 9.56 g/kg น้ำตาลฟรุกโตส 563.74 ± 10.08 g/kg และน้ำตาลซูโครส 16.97 ± 2.15 g/kg นอกจากนี้ไซรัปกล้วยตากที่ไซรัปกล้วยตากมีความเป็นกรดต่าง 4.25 ± 0.30 และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (มาลิก) ร้อยละ 1.99 ดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 องค์ประกอบทางเคมีของ ไซรัปกล้วยตากเริ่มต้น

องค์ประกอบทางเคมี	ไซรัปกล้วยตาก	หน่วย
ค่า L^*	9.89 ± 0.10	
ค่า a^*	-0.81 ± 0.10	
ค่า b^*	3.42 ± 0.50	
ปริมาณความชื้น	16.75 ± 0.30	ร้อยละ (%)
ค่าวอเตอร์แอกติวิตี	0.67 ± 0.11	
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด	75.00 ± 1.50	$^\circ$ Brix
ค่าความเป็นกรดต่าง	4.25 ± 0.30	
ปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ (มาลิก)	1.99 ± 0.00	ร้อยละ (%)
น้ำตาลกลูโคส	568.86 ± 9.56	g/kg
น้ำตาลฟรุกโตส	563.74 ± 10.08	g/kg
น้ำตาลซูโครส	16.97 ± 2.15	g/kg

น้ำตาลฟรุกโตฟูเรโนซิลนิสโทส	0.00 ± 0.0	g/kg
น้ำตาลนิสโทส	0.00 ± 0.0	g/kg
น้ำตาลเคสโทส	0.00 ± 0.0	g/kg

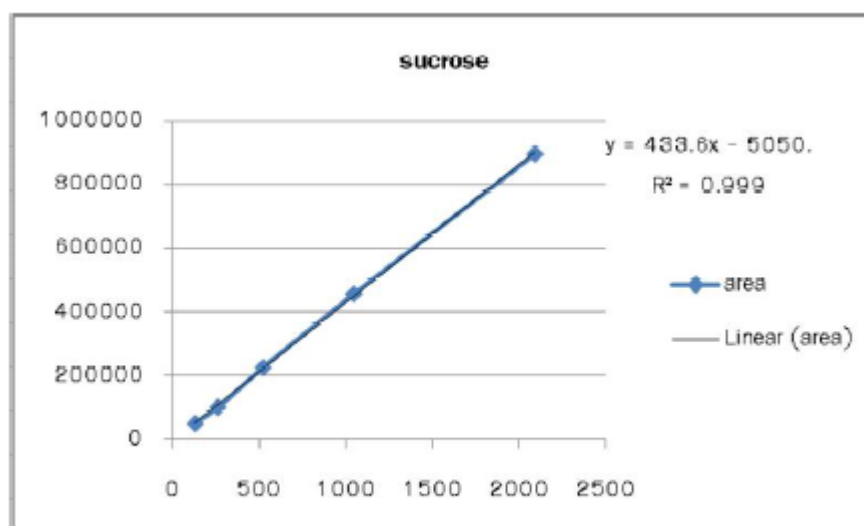
จากผลการศึกษาดังกล่าว พบว่าองค์ประกอบของไซรัปกล้วยตากเริ่มต้นไม่มีใยอาหารฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์เป็นองค์ประกอบ ส่งผลให้ต้องมีการผลิตฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์จากการศึกษางานวิจัยของ ประมุข (2554) พบว่า กระบวนการผลิตฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่เหมาะสม สามารถผลิตฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์โดยการใส่เอนไซม์ Pectinex Ultra SP-L อัตราส่วนของไซรัปกล้วยตากต่อเอนไซม์ Pectinex Ultra SP-L เป็น 3:1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ซึ่งหลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากที่มีฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์มาวิเคราะห์หาปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ วิเคราะห์โดยเครื่อง HPLC ได้ของปริมาณฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์และชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ดังตารางที่ 5 ซึ่งฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้นั้น เกิดจากการทำปฏิกิริยาของน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์ ที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ไซรัปเริ่มต้น โดยมีเอนไซม์ Pectinex Ultra SP-L ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของกลูโคสและฟรุกโตส ได้เป็นฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ ซึ่งเป็นสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย

ตารางที่ 18 ชนิดและปริมาณน้ำตาลที่พบในไซรัปกล้วยตาก ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

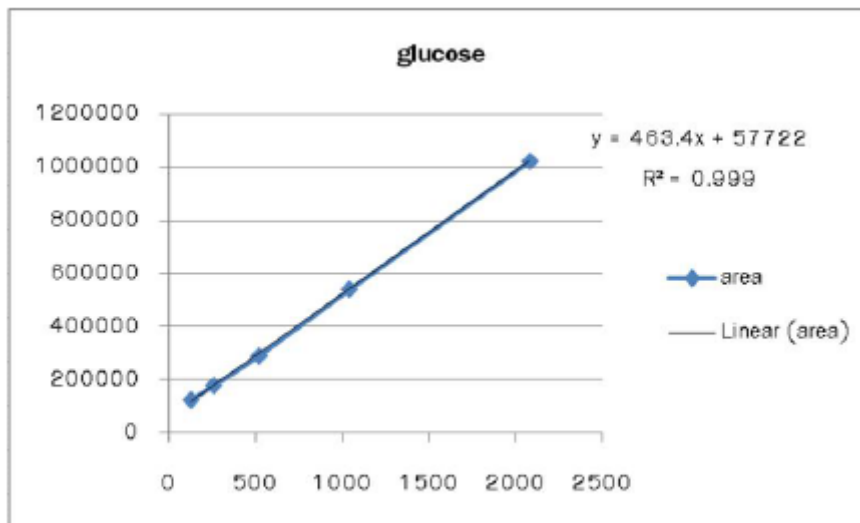
ชนิดของน้ำตาล	ปริมาณ (g/kg)
ซูโครส	52.45 ± 1.23
กลูโคส	186.15 ± 2.58
ฟรุกโตส	57.45 ± 0.45
ฟรุกโตฟูเรโนซิลนิสโทส	
โทส	55.45 ± 1.06
นิสโทส	53.82 ± 0.78
คีสโทส	60.56 ± 1.15
ฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์	169.83 ± 0.95

กราฟมาตรฐานน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ

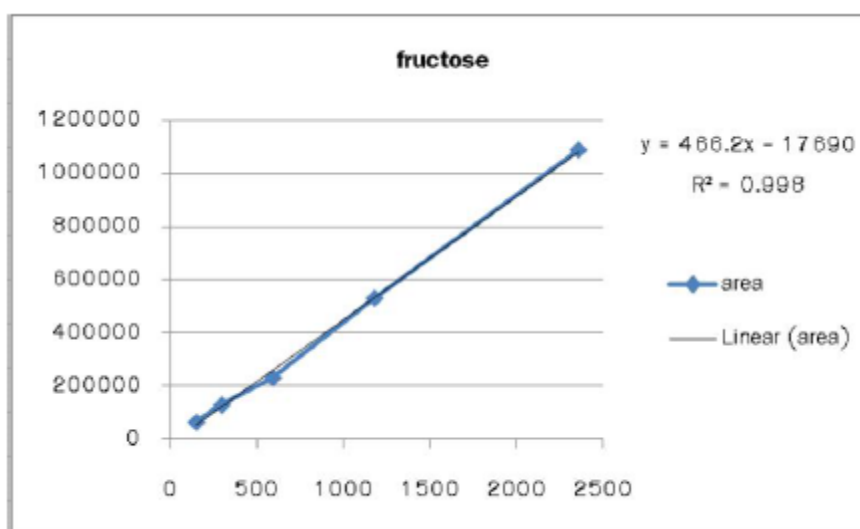
จากการศึกษาชนิดและปริมาณของน้ำตาลฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่พบในไซรัปกล้วยตาก วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC พบว่า น้ำตาลซูโครสมีปริมาณ 52.45 ± 1.23 กรัม/กิโลกรัม น้ำตาลกลูโคส 186.15 ± 2.58 กรัม/กิโลกรัม ฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส 55.45 ± 1.06 กรัม/กิโลกรัม นีสโทส 53.82 ± 0.78 กรัม/กิโลกรัม คีสโทส 60.56 ± 1.15 กรัม/กิโลกรัม และมีปริมาณน้ำตาลฟรุกโตโอลิโกแซคคาไรด์ทั้งหมด 169.83 ± 0.95 กรัม/กิโลกรัม ที่พบในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตาก ซึ่งจากปริมาณที่พบสามารถคำนวณหากราฟมาตรฐานของน้ำตาลซูโครส (ภาพที่ 35) น้ำตาลกลูโคส (ภาพที่ 36) น้ำตาลฟรุกโตส (ภาพที่ 37) น้ำตาลเคสโทส (ภาพที่ 38) น้ำตาลนีสโทส (ภาพที่ 39) และน้ำตาลฟรุกโตฟูเรโนซิลนีสโทส (ภาพที่ 40)



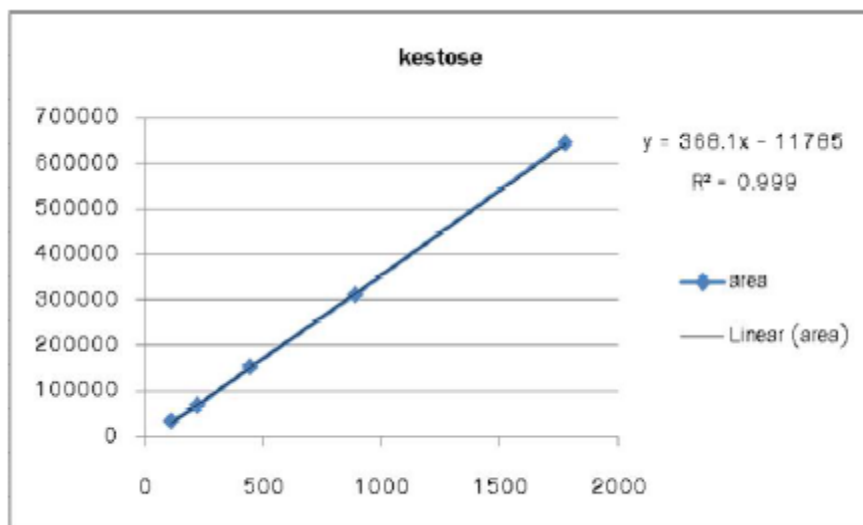
ภาพที่ 35 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลซูโครส



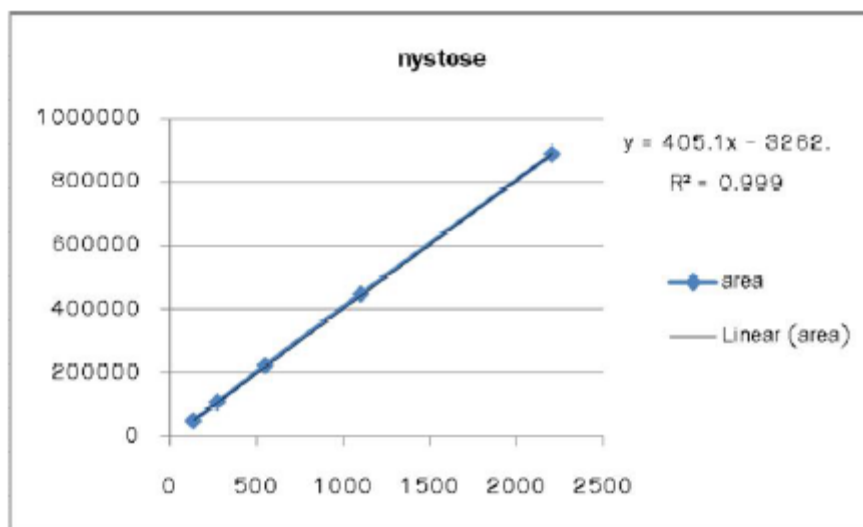
ภาพที่ 36 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคส



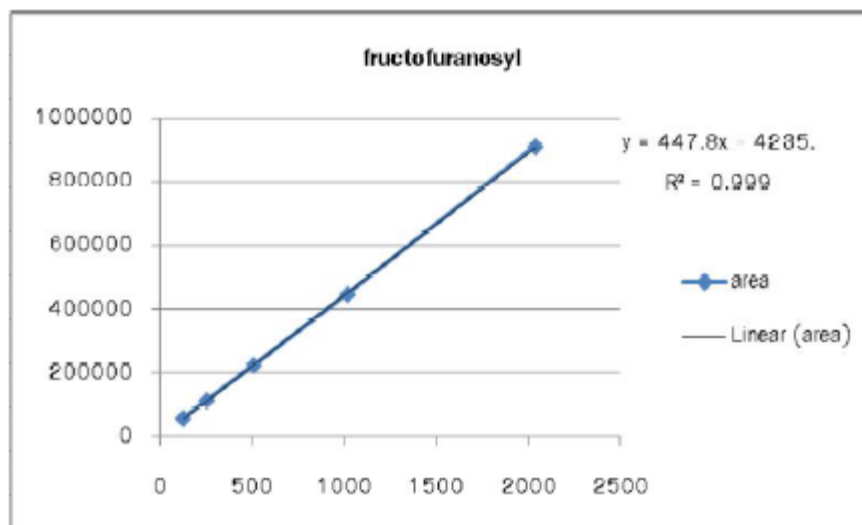
ภาพที่ 37 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลฟรุกโตส



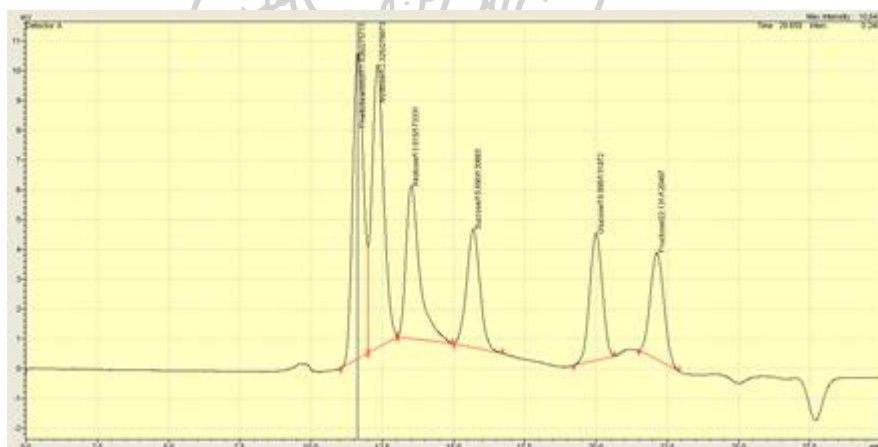
ภาพที่ 38 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลคีสโทส



ภาพที่ 39 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลนีสโทส



ภาพที่ 40 กราฟมาตรฐานของน้ำตาลน้ำตาลฟรุกโตฟูแรโนซิลนิสโทส



ภาพที่ 41 โครมาโตแกรมขององค์ประกอบน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ไซรัปกล้วยตากเพื่อสุขภาพ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นารีนารถ พวงจิ้น
วัน เดือน ปี เกิด	27 March 1991
สถานที่เกิด	นนทบุรี
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2256 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยี อาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย ศิลปากร พ.ศ. 2257 ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยี อาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย ศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	181/1 หมู่ 12 ตำบลท่าม่วง อำเภอท่าม่วง จังหวัดลพบุรี 15150

