



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมกรรมการอาหาร)

ปริญญา

วิศวกรรมกรรมการอาหาร

วิศวกรรมกรรมการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์คุณภาพข้าวสารไทยที่ละเมียดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด

Quality Determination of Single Kernel of Thai Milled Rice by Near Infrared
Spectroscopy

นามผู้วิจัย นางสาวจำเนียร นิลพวง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ยรรณฤทธิ์ ฤทธิธิน, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์สุมาพร เกษมสำราญ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ประภาศรี สิงห์รัตน์, M.A.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์คุณภาพข้าวสารไทยที่ละเมียดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด

Quality Determination of Single Kernel of Thai Milled Rice by Near Infrared Spectroscopy

โดย

นางสาวจำเนียร นิลพวง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอาหาร)

พ.ศ. 2551

จำเนียร นิลพวง 2551: การวิเคราะห์คุณภาพข้าวสารไทยที่ละเมียดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอาหาร) สาขาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ธณฤทธิ์ ฤทธิธณ, Ph.D. 103 หน้า

งานวิจัยนี้ต้องการสร้างระบบเพื่อวิเคราะห์คุณภาพข้าวสารไทยที่ละเมียดด้วยเทคนิค NIRS โดยพิจารณาคุณภาพที่สำคัญ ได้แก่ โปรตีน และอมิโลส โดยใช้ข้าวสารไทย 4 พันธุ์ ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105, กข 23, ปทุมธานี 1 และ ชัยนาท 1 ตัวอย่างข้าวสารที่ละเมียดจะถูกวัดสเปกตรัมโดยใช้เซลล์ใส่ตัวอย่างซึ่งออกแบบสำหรับข้าวสารไทยโดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร ด้วยระบบการวัดแบบการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance) จากนั้นนำตัวอย่างข้าวสารแต่ละเมล็ดไปวิเคราะห์ปริมาณทางเคมีด้วยวิธี Dumas combustion และ Iodine titration สำหรับโปรตีน และอมิโลส ตามลำดับ สมการทำนายถูกสร้างด้วยวิธี Partial Least Square Regression (PLSR) จากผลการทดลองพบว่าเซลล์ตัวอย่างที่พัฒนาสามารถวัดสเปกตรัมของข้าวสารไทยมีข้อมูลการดูดกลืนที่สามารถนำไปสร้างสมการทำนายโปรตีนที่มีความแม่นยำโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) และค่าความผิดพลาดมาตรฐานจากการทำนาย (SEP) ของสมการโปรตีน เท่ากับ 0.91 และ 0.91% สำหรับสมการทำนายอมิโลสสามารถใช้สำหรับการคัดแยกกลุ่มข้าวได้โดยมีค่า R และ SEP เท่ากับ 0.84 และ 4.33% จากผลการทดสอบทางสถิติพบว่า สมการทั้งสองสามารถทำนายค่าปริมาณโปรตีน และอมิโลสของข้าวสารไทยที่ละเมียดไม่แตกต่างจากค่าจริงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Chumnian Nilpuang 2008: Quality Determination of Single Kernel of Thai Milled Rice by Near Infrared Spectroscopy. Master of Engineering (Food Engineering), Major Field: Food Engineering, Department of Food Engineering. Thesis Advisor: Mr. Ronnarit Rittiron, Ph.D. 103 pages.

The objective of this research was to develop a system for quality determination of single kernel of Thai milled rice by Near Infrared Spectroscopy (NIRS). The important qualities considered were protein and amylose contents. Four cultivars of Khoadawkmali 105, RD 23, Phathumthani 1 and Chainat 1 were used as samples. A kernel of rice was placed in a specially designed sample cell and a spectrum of single kernel was acquired in wavelength region of 1100 nm to 2500 nm in reflectance mode. Then, protein and amylose contents of each kernel were measured by Dumas combustion and iodine titration methods, respectively. Partial least square regression (PLSR) was used to develop a calibration equation. From the results, it was found that the developed sample cell could be used for spectral acquisition of single kernel of Thai milled rice. Using the system proposed, sufficiently accurate protein calibration equation with correlation coefficient (R) of 0.91 and standard error of prediction (SEP) of 0.91% could be obtained. For amylose calibration equation, it was approximate calibration usable for screening with R and SEP of 0.84 and 4.33%. Both equations showed no significant differences between actual values and NIR predicted values by paired t-test at 95% confidence.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. รณฤทธิ์ ฤทธิธณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และอาจารย์ ดร. สุมาพร เกษมสำราญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้ให้คำแนะนำ และ คำปรึกษาในการวางแผนการทดลอง และการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนให้การตรวจแก้ไข รูปเล่มเพื่อให้มีความสมบูรณ์ กราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์มนตรี พันธ์ ชำของ และรอง ศาสตราจารย์ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์เพื่อ ความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ และน้องๆ ที่ให้กำลังใจทรัพย์ และกำลังใจช่วยสนับสนุนใน ด้านการเรียน และการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จำเนียร นิลพวง

ตุลาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	49
อุปกรณ์	49
วิธีการ	51
ผลและวิจารณ์	58
ผล	58
วิจารณ์	69
สรุปและข้อเสนอแนะ	75
สรุป	75
ข้อเสนอแนะ	75
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	76
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก ปริมาณโปรตีนและอิมูโนโกลบูลินของข้าวสารไทยแต่ละเมล็ดในกลุ่มตัวอย่าง Calibration และ Validation	86
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทำกราฟมาตรฐานปริมาณอิมูโนโกลบูลิน	95
ภาคผนวก ค ข้อมูลการหาค่าความผิดพลาดมาตรฐานของผู้ปฏิบัติงาน และวิธีการ หรือ Standard error of laboratory (SEL)	97
ภาคผนวก ง การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดมาตรฐานจากการทำนาย (SEP)	100
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	103

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณอมิโลสในข้าวสารแต่ละพันธุ์	6
2	การส่งออกข้าวสารของโลก จำแนกรายประเทศ	9
3	ระดับการขัดสี (milling degree)	11
4	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของข้าวสารพันธุ์ต่างๆ	14
5	การแบ่งประเภทข้าวสารตามปริมาณอมิโลส	16
6	ค่าความคงตัวของเจล	27
7	ค่าการกระจายตัวในค่าง	28
8	ค่าการกระจายตัวในค่างที่ระดับอุณหภูมิแปดชนิดต่าง ๆ	28
9	การวิเคราะห์คุณภาพข้าวทางเคมีของข้าวกล้อง และข้าวสารทั้ง 3 พันธุ์	29
10	การแบ่งช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด	32
11	ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบภายในอาหารกับช่วงความยาวคลื่นย่านไกลอินฟราเรด	36
12	ระดับของความแม่นยำของระบบตามความสัมพันธ์ของค่า SEP กับ SEL	44
13	การใช้ประโยชน์เทคนิค NIR ในประเทศไทย	45
14	ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของข้าวไทยกับช่วงอินฟราเรดย่านใกล้	46
15	ค่าทางสถิติของปริมาณโปรตีนของตัวอย่างข้าวสารในกลุ่ม Calibration และ Validation Sample Set	61
16	ผลการวิเคราะห์หาสมการทำนายปริมาณโปรตีนในข้าวสารหนึ่งเมล็ดจากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการต่างๆ ที่ช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร	61
17	ผลการวิเคราะห์ Standard error of laboratory (SEL) ของวิธีวิเคราะห์ปริมาณอมิโลส	65
18	ค่าทางสถิติของปริมาณอมิโลสของตัวอย่างข้าวสารในกลุ่ม Calibration และ Validation Sample Set	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
19 ผลการวิเคราะห์หาสมการทำนายปริมาณอมิโลสในข้าวสารหนึ่งเมล็ดจากการ ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการต่างๆ ที่ช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโน เมตร	67
20 การประเมินสมการทำนายสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R)	70
ตารางผนวกที่	
ก1 ปริมาณโปรตีนของข้าวสารไทยแต่ละเมล็ดในกลุ่มตัวอย่าง Calibration และ Validation	87
ก2 ปริมาณอมิโลสของข้าวสารไทยแต่ละเมล็ดในกลุ่มตัวอย่าง Calibration และ Validation	91
ข1 ข้อมูลการทำกราฟมาตรฐานปริมาณอมิโลส	96
ค1 ข้อมูลการหาค่าความผิดพลาดมาตรฐานของผู้ปฏิบัติงาน และวิธีการ หรือ Standard error of laboratory (SEL)	98
ง1 การเปรียบเทียบค่า SEP ¹ ระหว่างสมการทำนายโปรตีนที่พัฒนากับสมการ ปรับแต่งด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับ MSC และอนุพันธ์อันดับ 2 (SM+MSC+2 nd Derivative)	101
ง2 การเปรียบเทียบค่า SEP ¹ ระหว่างสมการทำนายอมิโลสที่พัฒนากับสมการ ปรับแต่งด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับอนุพันธ์อันดับ 2 (SM+2 nd Derivative)	102

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว	8
2 สูตรโครงสร้างของอมิโลส	15
3 โครงสร้างของอมิโลแพคติน	15
4 สูตรโครงสร้างพื้นฐานของโปรตีน	17
5 สูตรโครงสร้างของกรดไขมัน Lysolecithin	18
6 สูตรโครงสร้างของ 2-acetyl – 1 – pyrroline	20
7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสด้วยวิธี Starch -Iodine-Blue Value	23
8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสด้วยวิธี Iodine Binding Capacity	24
9 ตัวอย่างสารละลายไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของอมิโลสระดับต่าง ๆ และ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสที่ปรากฏ (Apparent amylose content)	25
10 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสด้วยเทคนิคย่านใกล้อินฟราเรด	25
11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสด้วยวิธี DNA marker และผลการ วิเคราะห์	26
12 ลำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ	32
13 ความเข้มแสงของความยาวคลื่นเดียวกันและหลังผ่านตัวอย่างที่มีความหนา (b)	33
14 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม NIR	37
15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า L กับ จำนวนตัวอย่างในกลุ่มทำนาย N_p กำหนดค่า r^2 เท่ากับ 0, 0.5 และ 0.9 ตามลำดับ โดยกราฟทั้ง 3 เส้น เรียงลำดับจาก เส้นบนลงเส้นล่าง	42
16 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสเปกตรัมข้าวสารไทย (a) เครื่อง NIR Spectrometer(BRAN+LUEBBE รุ่น InfraAlyzer 500) และ (b) ลิ้นชัก และเซลล์ ใส่ตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ด	53

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
17 ภาพเขียนแบบบอกขนาดของเซลล์ไส้ตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ดที่พัฒนาขึ้น	53
18 เซลล์ไส้ตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ดที่พัฒนาแบบทาสีดำด้านบน (ซ้าย) และแบบไม่ทาสีดำด้านบน (ขวา)	58
19 สเปกตรัมของข้าวสารหนึ่งเมล็ดที่ใส่ในเซลล์ไส้ตัวอย่าง ซึ่งทำการวัดสเปกตรัมจำนวน 10 ครั้งในเซลล์ไส้ตัวอย่าง (a) แบบทาสีดำด้านบน และ (b) แบบไม่ทาสีดำ	59
20 ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ด ในเซลล์ไส้ตัวอย่างที่พัฒนาในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร	60
21 Scatter plot ระหว่างปริมาณโปรตีนที่ทำนายด้วย NIR และค่าปริมาณโปรตีนจริงของตัวอย่างในกลุ่ม calibration sample set	63
22 Scatter plot ระหว่างปริมาณโปรตีนที่ทำนายด้วย NIR และค่าปริมาณโปรตีนจริงของตัวอย่างในกลุ่ม validation sample set	63
23 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ 0.00157M KIO_3 กับร้อยละปริมาณอมิไธส (%AC)	64
24 ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ด ที่ทำการวัดด้วยเซลล์ไส้ตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณอมิไธสแบบทาสีดำด้านบน ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร	65
25 Scatter plot ระหว่างปริมาณอมิไธสที่ทำนายด้วย NIR และค่าปริมาณอมิไธสจริงของตัวอย่างในกลุ่ม Calibration sample set	68
26 Scatter plot ระหว่างปริมาณอมิไธสที่ทำนายด้วย NIR และค่าปริมาณอมิไธสจริงของตัวอย่างในกลุ่ม validation sample set	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
27 สเปกตรัมของตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ดภายหลังจากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีSmoothing ร่วมกับ MSC และอนุพันธ์อันดับ 2 ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร	69
28 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) กับความยาวคลื่นในช่วง 1100 – 2500 นาโนเมตร ของสมการทำนายปริมาณโปรตีน	71
29 สเปกตรัมของตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ดภายหลังจากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีSmoothing ร่วมกับอนุพันธ์อันดับ 2 ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร	72
30 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) กับความยาวคลื่นในช่วง 1100 – 2500 นาโนเมตร ของสมการทำนายปริมาณอมิโลส	74

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	=	absortivity
A	=	absorbance
AACC	=	American association of cereal chemists
AC	=	amylose content
AOAC	=	association of official analytical chemists
Cal	=	calibration
F	=	factor
FT-IR	=	fourier transform infrared
IR	=	infrared
Min	=	minimum
Max	=	maximum
MLR	=	multiple linear regression
MSC	=	multiplicative scatter correction
nm	=	nanometer
NIR	=	near infrared
NIRS	=	near infrared spectroscopy
PC	=	protein content
PCA	=	principal component analysis
PCR	=	principal component regression
SLR	=	simple linear regression
PLSR	=	partial least square regression
R	=	correlation coefficient
RPD	=	Ratio of SEP to the SD
SD	=	standard deviation
SEC	=	standard error of calibration
SEL	=	standard error of laboratory
SEP	=	standard error of prediction
T	=	transmittance

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Val = validation

การวิเคราะห์คุณภาพข้าวสารไทยที่ละเมียดด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด

Quality Determination of Single Kernel of Thai Milled Rice by Near Infrared Spectroscopy

คำนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทยทั้งการบริโภคภายในประเทศ และส่งออกไปในตลาดโลกซึ่งมีส่วนแบ่งมากที่สุด โดยในปี 2550 มีการส่งออกปริมาณ 9.5 ล้านตัน และมีมูลค่าการส่งออก 12.3 หมื่นล้านบาท ปริมาณข้าวสารคิดเป็นร้อยละ 29.81 ของตลาดโลก (กรมการค้าต่างประเทศ, 2551; สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2551) ซึ่งการส่งออกข้าวไทยนั้นจำเป็นต้องอ้างอิงตามมาตรฐานสินค้าข้าวของกระทรวงพาณิชย์เพื่อควบคุมคุณภาพข้าวไทยซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการรักษาตลาด และขยายตลาดข้าวไทย

ดังนั้นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพื่อนำมาใช้แทนที่การวิเคราะห์ทางเคมีแบบดั้งเดิม ซึ่งเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด (Near Infrared Spectroscopy; NIRS) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีศักยภาพในการวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่สนใจในข้าว เทคนิคนี้มีข้อดี คือ รวดเร็ว ไม่ใช้สารเคมี ประหยัดแรงงาน และต้นทุนในการผลิต อีกทั้งสามารถวิเคราะห์คุณภาพหลาย ๆ อย่างในเวลาเดียวกัน

ในปัจจุบันเทคนิค NIR ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวหลายประการ เช่น การหาปริมาณอมิโลส และโปรตีนของข้าว ที่ช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2498 นาโนเมตร ได้สมการอมิโลส และสมการโปรตีนมีค่า R^2 เท่ากับ 0.95 และ 0.98 ตามลำดับ มีค่า SEP เท่ากับ 1.0% และ 0.10% ตามลำดับ (Delwiche *et al.*, 1995) และที่ช่วงความยาวคลื่น 400 – 2498 นาโนเมตร พบว่าการหาปริมาณอมิโลส และโปรตีนของข้าวมีค่า R^2 เท่ากับ 0.89 และ 0.97 ตามลำดับ มีค่า SEP เท่ากับ 1.3% และ 0.13% ตามลำดับ (Delwiche *et al.*, 1996) จะเห็นได้ว่าเทคนิคนี้มีความแม่นยำสูงเทียบเท่ากับการวิเคราะห์ทางเคมีแต่การวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้นเป็นการวิเคราะห์แบบ Whole grain กล่าวคือค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นตัวแทน

ของข้าวทุกเมล็ดในของตัวอย่างที่สุ่มมา การวิเคราะห์แบบนี้จึงมีข้อจำกัดคือไม่สามารถตรวจสอบคุณสมบัติเฉพาะที่มีอยู่ในข้าวบางเมล็ดได้ เช่น โปรตีนสูง อมิโลสสูง เป็นต้น

การวิเคราะห์แบบที่ละเมล็ดจึงเริ่มมีบทบาทสำคัญในการตรวจสอบ และคัดแยกข้าวที่มีลักษณะพิเศษ เช่น Rittiron *et al.* (2004) ได้นำเทคนิคนี้มาใช้กับข้าวกล้อง เพื่อการคัดเลือกเมล็ดในกระบวนการปรับปรุงพันธุ์ และ Wu *et al.* (2004) ได้สร้างสมการทำนายปริมาณอมิโลสของข้าวสารที่ละเมล็ดด้วยเครื่อง NIR แบบการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance) ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร สำหรับปริมาณอมิโลส พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.76 และ ค่า SEP มีค่าเท่ากับ 5.13 % นอกจากนี้ การวิเคราะห์ที่ละเมล็ดทำให้ทราบลักษณะการกระจายของคุณสมบัติที่สนใจ เช่น Rittiron *et al.* (2005) ได้เสนอวิธีการทดสอบการปลอมปนของข้าวสารพันธุ์ Akitakonachi ในพันธุ์ Koshihikari โดยอาศัยการทดสอบการแจกแจงปกติของค่าโปรตีนในกลุ่มตัวอย่างข้าวที่สุ่ม

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงต้องวิเคราะห์คุณภาพข้าวไทยที่ละเมล็ดด้วยเทคนิค NIR โดยทำการสร้างเซลล์ใส่ตัวอย่างสำหรับการวัดสเปกตรัมของข้าวสารโดยเฉพาะ จากนั้นทำการสร้างระบบเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของข้าว โดยพิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ โปรตีน และอมิโลส ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้ข้าวมีคุณสมบัติต่างกัน โดยเฉพาะคุณภาพการหุงต้ม

วัตถุประสงค์

1. ต้องการสร้างเซลล์ใส่ตัวอย่างสำหรับการวัดสเปกตรัมของข้าวสารไทยที่ละเมียดสำหรับเครื่อง NIR Spectrometer ระบบ Integrating sphere ที่มีลิ้นชักใส่ตัวอย่างด้านล่าง
2. ต้องการสร้างสมการทำนายปริมาณโปรตีนในข้าวสารไทยที่ละเมียดด้วยเทคนิค NIRS
3. ต้องการสร้างสมการทำนายปริมาณอมิโลสในข้าวสารไทยที่ละเมียดด้วยเทคนิค NIRS

การตรวจเอกสาร

1. ข้าว

ข้าวเป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้า (annual grass) ถูกจัดอยู่ในสกุลออไรซา (Genus *Oryza*) ของวงศ์เกรมินี (Family Poaceae หรือ Gramineae) สามารถเจริญเติบโตได้ดีทั้งในเขตร้อน (tropical zone) และเขตอบอุ่น (temperate zone) ข้าวที่ขึ้นอยู่ในท้องที่ต่างๆ ของโลกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ ออไรซา ซาไทวา (*Oryza sativa*) ซึ่งมีแหล่งกำเนิดในทวีปเอเชีย และมีการปลูกกันมากทั่วไปในเอเชีย และแหล่งอื่นๆ ของโลก ออไรซา กลาเบอร์ริมา (*Oryza glaberrima*) ซึ่งมีแหล่งกำเนิดและปลูกในเฉพาะแอฟริกา และข้าวป่า (wild rice) ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในประเทศต่างๆ ของทุกทวีปที่ปลูกข้าว ได้มีการสันนิษฐานว่าข้าวที่ปลูกอยู่ทุกวันนี้ได้มาจากการวิวัฒนาการของข้าวป่าข้ามปี (perennial wild rice) มาเป็นข้าวป่าปีเดียว (annual wild rice) และข้าวปลูกปีเดียว (annual cultivated rice) ตามลำดับ โดยมนุษย์โบราณในยุค 9,000 ปีที่แล้วมาได้นำข้าวป่าเข้ามาปลูกและทำการคัดเลือกพันธุ์ในบริเวณใกล้เคียงกับถิ่นที่อยู่อาศัยจนได้ข้าวล้มลุกสำหรับปลูกติดต่อกันมา (บุญหงส์, 2547)

1.1 การจำแนกข้าว

ข้าวที่ค้าขายกันเกือบทั้งหมดเป็นข้าวที่ปลูกในทวีปเอเชีย ซึ่งข้าวชนิดดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

ข้าวชนิดที่ 1 คือ อินดิกา (Indica) เป็นข้าวเมล็ดยาวเรียวยาว เจริญเติบโตได้ดีในบริเวณเขตร้อน (tropical zone) เช่น ประเทศศรีลังกา จีนตอนใต้และตอนกลาง อินเดีย อินโดนีเซีย บังกลาเทศ ไทย ฟิลิปปินส์ เป็นต้น จากการสันนิษฐานเชื่อกันว่าข้าวอินดิกาได้มีการปลูกครั้งแรกในบริเวณตอนกลางของกลุ่มแม่น้ำแยงซีเกียงเมื่อ ค.ศ. 200 ก่อนที่จะไปสู่ตอนใต้ของอินเดีย ศรีลังกา หมู่เกาะมลายู ภาคกลาง และภาคใต้ของจีน หลังจากนั้นได้มีผู้นำข้าวไปปลูกในตะวันออกกลาง ยุโรป และแอฟริกา

ข้าวชนิดที่ 2 คือ จาโปนิกา (Japonica) เป็นข้าวเมล็ดสั้น ป้อม มีอมิโลสต่ำ เจริญเติบโตได้ดีในเขตอบอุ่น เช่น ประเทศญี่ปุ่น เกาหลี จีนตอนเหนือ และตะวันออก ยุโรปตอนใต้ อเมริกาใต้ เป็นต้น สันนิษฐานว่าแหล่งกำเนิดของจาโปนิกาน่าจะอยู่บริเวณกลุ่มแม่น้ำเหลืองของจีน

และตอนล่างของกลุ่มแม่น้ำแยงซีเกียงต่อมาได้มีการนำพันธุ์ข้าวจากบริเวณเนปาล-ฮัสสัม พม่า-ยูนาน และอินโดจีนเข้ามาปลูกบริเวณดังกล่าวจนพันธุ์ข้าวได้มีการปรับตัวเจริญเติบโตได้ดีในเขตอบอุ่น

ข้าวชนิดที่ 3 คือ จาวานิกา (Javanica) เป็นข้าวคันสูง เมล็ดป้อมใหญ่ สันนิษฐานว่าเกิดจากการคัดเลือกพันธุ์มาจากข้าวอินดิกา และได้นำเข้ามาปลูกในประเทศอินโดนีเซียเป็นครั้งแรกในระยะเวลามากกว่า 1,800 ปีก่อนคริสตกาล และต่อมาก็ได้นำไปปลูกในฟิลิปปินส์ ได้หวัน และญี่ปุ่น แต่ส่วนใหญ่ปลูกในประเทศอินโดนีเซียเท่านั้น (บุญหงส์, 2547)

สำหรับพันธุ์ข้าวที่ปลูกในประเทศไทยเป็นพันธุ์ข้าวเมล็ดยาว คือ ข้าวอินดิกา แต่ประกอบด้วยหลายพันธุ์ ทั้งที่มีการพัฒนาขึ้นใหม่ และข้าวพันธุ์พื้นเมืองซึ่งมีอยู่ประมาณ 3,500 พันธุ์ แต่ข้าวพันธุ์ที่มีบทบาทสำคัญมากที่สุด คือ ข้าวหอมมะลิ หรือข้าวดอกมะลิ มี 2 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และ กข 15 ส่วนพันธุ์ข้าวที่มีการพัฒนาขึ้นมาใหม่ที่สำคัญ ได้แก่ ข้าวเจ้าหอมพันธุ์พิษณุโลก, ข้าวเจ้าหอมพันธุ์สุพรรณบุรี, ข้าวเจ้าหอมพันธุ์คลองหลวง 1, ข้าวเจ้าหอมพันธุ์ปทุมธานี 1 เป็นต้น (นุชรินทร์, 2549)

การจำแนกชนิดของข้าวตามคุณสมบัติของเมล็ดข้าวนั้นจะอาศัยคุณสมบัติของเมล็ดข้าวส่วนใหญ่ 2 ชนิดคือ อมิโลแพคติน (amylopectin) ทำให้เมล็ดข้าวมีสีขาวขุ่นเวลาต้มสุกแล้วจะเหนียว และอมิโลส (amylose) ที่ทำให้ข้าวมีสีขาวใส เมื่อต้มสุกจะมีสีขาวขุ่นและร่วน ดังนั้นจึงจำแนกชนิดของข้าวตามคุณสมบัติของเมล็ดได้เป็น 2 ชนิด คือ ข้าวเหนียว และข้าวเจ้า โดยที่ข้าวเหนียว (glutinous rice) จะมีอมิโลแพคตินเป็นส่วนใหญ่คือประมาณร้อยละ 95 และมีอมิโลสน้อยมาก หรือไม่มี ส่วนข้าวเจ้า (non-glutinous rice) นั้นมีปริมาณอมิโลสร้อยละ 10 – 30 มีอมิโลแพคตินร้อยละ 70 – 90 ตัวอย่างข้าวเจ้าพันธุ์ดีที่ทางการแนะนำได้แก่ ข้าวดอกมะลิ 105, ขาวตาแห้ง 17, เหลืองปะทิว 123, กำผาย 41, กข 1, กข 5, กข 7 ฯลฯ ส่วนพันธุ์ข้าวเหนียวที่ทางการแนะนำ ได้แก่ เหนียวสันป่าตอง, กข 2, กข 4, กข 6, กข 8, กข 10 ฯลฯ ซึ่งแสดงปริมาณอมิโลส และชนิดของข้าวแต่ละพันธุ์ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณมิโลสในข้าวสารแต่ละพันธุ์

พันธุ์ข้าว	ชนิด	เมล็ดยาว (มิลลิเมตร)	ร้อยละมิโลส	ลักษณะข้าวสุก
กข 6	ข้าวเหนียว	7.2	0	นุ่ม และเหนียว
ขาวดอกมะลิ 105*	ข้าวเจ้า	7.2 – 7.6	13 – 18	นุ่ม และเหนียว
กข 15*	ข้าวเจ้า	7.5	14 – 17	นุ่ม และเหนียว
คลองหลวง 1*	ข้าวเจ้า	7.8	14 – 18	นุ่ม และเหนียว
ปทุมธานี 1*	ข้าวเจ้า	7.3 – 7.8	16 – 18	นุ่ม และเหนียว
กข 21	ข้าวเจ้า	7.3	17 – 19	นุ่ม และเหนียว
หอมสุวรรณบุรี*	ข้าวเจ้า	7.7	18 – 19	นุ่ม และเหนียว
สุวรรณบุรี 60	ข้าวเจ้า	7.5	20 – 26	อ่อน
กข 23	ข้าวเจ้า	7.3	22 – 26	อ่อน
ขาวปากหม้อ 148	ข้าวเจ้า	7.7	24 – 26	อ่อน
ขาวตาแห้ง 17	ข้าวเจ้า	7.5	24 – 28	อ่อน
กข 7	ข้าวเจ้า	7.2	24 – 28	อ่อน
ชัยนาท 1	ข้าวเจ้า	7.7	27 – 30	ร่วนแข็ง
สุวรรณบุรี 90	ข้าวเจ้า	7.4	27 – 30	ร่วนแข็ง
ปทุมธานี 60*	ข้าวเจ้า	7.5	27 – 32	ร่วนแข็ง
เหลืองประทิว 123	ข้าวเจ้า	7.4	28 – 32	ร่วนแข็ง
สุวรรณบุรี 1	ข้าวเจ้า	7.3	29	ร่วนแข็ง
เล็บมือนาง 111	ข้าวเจ้า	7.6	29 – 32	ร่วนแข็ง
กข 11	ข้าวเจ้า	7.6	29 – 32	ร่วนแข็ง
ปิ่นแก้ว 56	ข้าวเจ้า	7.5	29 – 31	ร่วนแข็ง
เหลืองใหญ่	ข้าวเจ้า	7.3	30 – 31	ร่วนแข็ง
น้ำสะกูด 19	ข้าวเจ้า	7.6	30 – 31	ร่วนแข็ง
นางพญา 123	ข้าวเจ้า	7.4	31 – 32	ร่วนแข็ง
กข 13	ข้าวเจ้า	6.9	30 – 33	ร่วนแข็ง

หมายเหตุ * มีกลิ่นหอม

ที่มา: งามชื่น (2542) และ งามชื่น (2547)

1.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าวเป็นผลชนิด caryopsis มีเยื่อหุ้มเมล็ด (teata) อยู่ติดกับผนังรังไข่ (ovary wall) โครงสร้างของเมล็ดข้าวแสดงดังภาพที่ 1 ประกอบด้วย

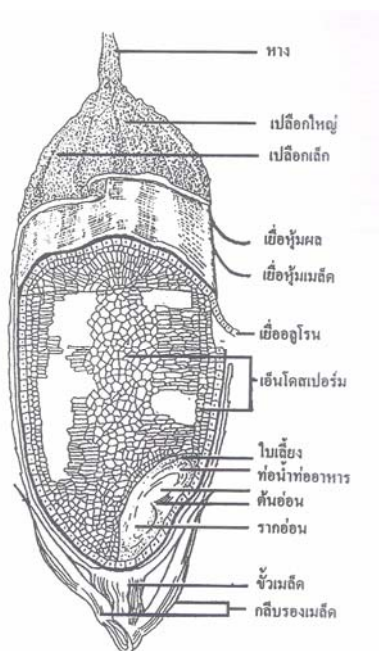
แกลบ (hull หรือ husk) เป็นส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว ประกอบด้วยเปลือกใหญ่ (lemma) เปลือกเล็ก (palea) หาง (awn) ขั้วเมล็ด (rachilla) และกลีบรองเมล็ด (sterile lemmae) เปลือกใหญ่จะปกคลุมอยู่ 2 ใน 3 ของเนื้อที่เมล็ดเปลือกเล็กจะยึดแน่นอยู่ภายในส่วนของเปลือกใหญ่ด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายตะขอ (hooklike structure) ดังนั้นเปลือกข้าวจึงปิดแน่น โดยแกลบมีหน้าที่ป้องกันเมล็ดข้าวจากเชื้อรา และแมลงในระหว่างการเก็บรักษา องค์ประกอบส่วนใหญ่ของแกลบ ได้แก่ ลิกนิน (ร้อยละ 30) เซลลูโลส (ร้อยละ 25) และเถ้า (ร้อยละ 21)

ข้าวกล้อง (brown rice) เป็นส่วนที่ใช้บริโภค ประกอบด้วย คัพภะ (embryo) และส่วนที่เป็นแป้ง (starchy endosperm) ข้าวกล้อง ประกอบด้วยเยื่อหุ้มข้าวกล้อง (caryopsis coat) ซึ่งมีเนื้อเยื่อ 3 ชั้นด้วยกัน ได้แก่ เยื่อชั้นนอก (pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) และเยื่อกัน (nucellus) โดยในเยื่อหุ้มเมล็ดมีโปรตีน ไขมัน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ

เยื่อหุ้มเนื้อเมล็ด (aleurone layer) อยู่ด้านในต่อจากเยื่อกัน เป็นเนื้อเยื่อชนิดเดียวกันกับเนื้อเมล็ด (endosperm) เซลล์ของเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ดประกอบด้วย โปรตีน และไขมัน มากที่สุด

ส่วนที่เป็นแป้ง (starchy endosperm) หรือส่วนที่เป็นข้าวสารจะอยู่ชั้นในสุดของเมล็ด ประกอบด้วยแป้งเป็นส่วนใหญ่ แป้งข้าวจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (starch compound) กลุ่มแป้งหลายๆ กลุ่มจะอยู่รวมกันเป็น micelles โดยมีกลุ่มโปรตีน (protein body) แทรกอยู่ภายในเมล็ด ข้าวสารนี้มีแป้งอยู่ประมาณร้อยละ 84 – 93 โดยน้ำหนัก

คัพภะ (embryo) เป็นส่วนที่อยู่ติดกับส่วนที่เป็นแป้งทางด้านท้องของเมล็ด (ventral side) คัพภะเป็นส่วนของเจริญเป็นต้นอ่อนต่อไป ดังนั้นจึงประกอบด้วย ต้นอ่อน (plumule) รากอ่อน (radicle) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (coleorhiza) เป็นต้น ในคัพภะนี้มีโปรตีน ไขมัน เถ้า และวิตามิน ในปริมาณสูงแต่ไม่มีแป้ง (กัญญา, 2547; นพมาศ, 2547; เพลงพิณ, 2541)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว
ที่มา: กัญญา (2547)

2. ความสำคัญของข้าวไทย

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อประเทศไทยเนื่องจากเป็นอาหารที่มีการบริโภคเป็นหลัก และเป็นอาชีพหลักของเกษตรกร นอกจากนั้นไทยเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวอันดับ 1 ของโลก ได้เป็นเวลานานถึง 20 ปีติดต่อกัน โดยมีส่วนแบ่งการตลาดในปี 2550 ร้อยละ 29.81 ในขณะที่คู่แข่งที่สำคัญ ได้แก่ เวียดนาม ร้อยละ 14.19 อินเดีย ร้อยละ 19.77 สหรัฐอเมริกา ร้อยละ 9.50 และปากีสถาน ร้อยละ 8.46 ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา การส่งออกข้าวของสหรัฐอเมริกา และอินเดียมีทิศทางปรับตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากการขยายพื้นที่เพาะปลูกข้าวเพื่อเป็นการรองรับการส่งออก ส่วนจีนมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากมีนโยบายลดพื้นที่เพาะปลูกข้าวโดยจะนำเข้าจากต่างประเทศทดแทน (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2551)

ตารางที่ 2 การส่งออกข้าวสารของโลก จำแนกรายประเทศ

อันดับ ที่	ประเทศ						ร้อยละส่วนแบ่ง	
		2546	2547	2548	2549	2550	ตลาด	
							2549	2550
1	Thailand	7,552	10,137	7,274	7,376	9,500	25.02	29.81
2	Vietnam	3,795	4,295	5,174	4,705	4,522	15.96	14.19
3	India	4,421	3,172	4,687	4,537	6,301	15.39	19.77
4	United States	3,834	3,090	3,862	3,306	3,029	11.21	9.50
5	Pakistan	1,958	1,986	3,032	3,579	2,696	12.14	8.46
6	Egypt	579	826	1,095	958	1,209	3.25	3.79
7	Uruguay	675	804	762	812	734	2.75	2.30
8	China	2,583	880	656	1,216	1,340	4.12	4.20
9	Argentina	170	249	345	487	436	1.65	1.37
10	Brazil	19	37	272	291	201	0.99	0.63
11	EU-25	220	187	201	144	139	0.49	0.44
12	Cambodia	10	300	200	350	450	1.19	1.41
13	Japan	200	200	200	200	200	0.68	0.63
14	Burma/ ¹ Ecuador	388	130	190	¹ 30	¹ 25	0.10	0.08
15	Guyana	200	243	182	250	210	0.85	0.66
16	Australia/ ² Senegal	141	131	52	² 500	² 200	1.70	0.63
17	Others	830	517	825	742	679	2.50	2.13
World Total (ล้านตัน)		27,575	27,184	29,009	29,483	31,871	100.00	100.00

¹ การส่งออกข้าวสารของประเทศ Ecuador

² การส่งออกข้าวสารของประเทศ Senegal

ที่มา: สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย (2551)

2.1 ประเภทของข้าวสารที่ส่งออก

การส่งออกข้าวสารของไทยซึ่งตลาดส่วนใหญ่จะอยู่ในภูมิภาคเอเชีย และแอฟริกา โดยประเภทข้าวสารที่มีการส่งออกของไทยในปัจจุบันจำแนกกลุ่มใหญ่ได้ดังนี้ (นุชจรินทร์, 2549)

ข้าวเจ้าขาว มีสัดส่วนการส่งออกมากกว่าร้อยละ 50 ของการส่งออกทั้งหมด โดยข้าวเจ้าที่มีการส่งออกมากที่สุด คือ ข้าวเจ้าหอมมะลิไทย

ข้าวกล้อง (cargo rice) มีสัดส่วนการส่งออกประมาณร้อยละ 2.1 ของการส่งออกทั้งหมด คู่ค้ามักนำเข้าเพื่อทำการสีต่อเป็นข้าวสาร

ข้าวเหนียว (boiled rice) มีสัดส่วนการส่งออกประมาณร้อยละ 22.39 ของการส่งออกทั้งหมด โดยการส่งออกในช่วงปี 2544 – 2548 พบว่ามีแนวโน้มลดลงเนื่องจากคู่แข่งมีผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้น และจำหน่ายในราคาถูกลงกว่าทำให้คู่ค้าหันไปนำเข้าจากคู่แข่งแทน

ปลายข้าว (white broken rice) มีสัดส่วนการส่งออกประมาณร้อยละ 15.19 จำแนกประเภทที่สำคัญ ได้แก่ ปลายข้าวเจ้าหอมมะลิเอ 1 เลิศ ปลายข้าวขาวเอ 1 เลิศ และปลายข้าวเจ้าหอมมะลิเอ 1 เลิศพิเศษ

ข้าวเหนียว (glutinous rice) มีสัดส่วนการส่งออกประมาณร้อยละ 3.63 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากประเทศในแถบเอเชียนำเข้าจากประเทศไทยเพิ่มขึ้น

3. คุณภาพข้าว

การผลิตข้าวนอกจากจะคำนึงถึงผลผลิตแล้วยังต้องคำนึงถึงคุณภาพข้าวควบคู่กันด้วยซึ่งคุณภาพข้าวถูกควบคุมโดยลักษณะทางพันธุกรรม และสภาพแวดล้อม สามารถแบ่งคุณภาพข้าวเป็น 4 ประเภท ได้แก่ คุณภาพการสี (milling quality), คุณภาพในการซื้อขาย, คุณภาพการหุงต้ม, รับประทาน และการแปรรูป (cooking, eating and processing quality) และคุณภาพทางด้านโภชนาการ (nutritive quality)

3.1 คุณภาพการสี (milling quality)

คุณภาพการสีข้าวประเมินได้จากปริมาณข้าวเต็มเมล็ด (whole grain) และต้นข้าว (head rice) ข้าวที่มีคุณภาพสีดี เป็นข้าวที่เมื่อผ่านกระบวนการขัดสีแล้วได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด และต้นข้าวสูง มีปริมาณข้าวหัก (broken rice) น้อย ตามมาตรฐานสินค้าข้าวกำหนดระดับการสี (milling degree) เป็น 4 ระดับดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระดับการขัดสี (milling degree)

ระดับ	ลักษณะการสี
สีดีพิเศษ (extra well milled)	การสีขัดเอารำออกทั้งหมดจนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามเป็นพิเศษ
สีดี (well milled)	การสีขัดเอารำออกทั้งหมดจนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามดี
สีดีปานกลาง (reasonably well milled)	การสีขัดเอารำออกเป็นส่วนมากจนเมล็ดข้าวมีลักษณะสวยงามพอสมควร
สีดีธรรมดา (ordinarily milled)	การสีขัดเอารำออกแต่เพียงบางส่วน

ที่มา: งามชื่น (2547)

โดยมีขั้นตอนพื้นฐานในการสีประกอบด้วย 4 ขั้นตอนได้แก่ การทำความสะอาด (cleaning) การกะเทาะ (hulling) การขัดขาว (whitening) และการคัดแยก (grading) ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพการสี 3 ปัจจัยหลัก คือ พันธุ์ข้าวหรือลักษณะประจำพันธุ์ การดูแลทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว และกระบวนการสีข้าว (กัญญา, 2547; อรอนงค์, 2547) ระดับการขัดสีที่ต่างกันทำให้ปริมาณอมิโลส และปริมาณโปรตีนที่เหลืออยู่แตกต่างกัน ข้าวสารที่มีระดับการขัดสีสูง (deep mill) จะมีโปรตีนต่ำเพราะโปรตีน ไขมัน วิตามิน และเกลือแร่จะมีอยู่มากใน peripheral layer ที่อยู่ใต้ชั้นเปลือกข้าว (bran coat) และแอลิวโรน (aleurone cells) จะถูกสีออกสตาแรช และอมิโลส จะอยู่มากในใจกลางเมล็ด ดังนั้น ระดับการขัดสีจึงมีผลต่อปริมาณโปรตีนมากกว่าอมิโลส เพราะฉะนั้นข้าวที่มีระดับการสีสูงจึงมีความแข็งแรงต่ำแต่มีการเกาะติดกัน และความยืดหยุ่นสูง ทำให้ข้าวสุกนุ่ม และแฉะ เพราะเมล็ดข้าวดูดซึมน้ำแทนที่ไขมัน โปรตีน และเกลือแร่ที่ถูกสีออกไป

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกไปน้อย นอกจากนี้การสีข้าวยังทำให้เมล็ดข้าวสารมีความขาวขึ้นด้วย (สิริรัตน์, 2547)

3.2 คุณภาพในการซื้อขาย

ปัจจุบันคุณภาพในการซื้อขายข้าวมักทำการประเมินคุณภาพ โดยสิ่งกำหนดราคาข้าว ได้แก่ ความชื้นตามมาตรฐานสินค้าข้าวกำหนดความชื้นไม่เกินร้อยละ 14 หากข้าวมีความชื้นเกินกว่าที่กำหนดจะถูกตัดราคา ลักษณะทางกายภาพ เช่น ข้าวท้องไข่ ข้าวเสีย หรือข้าวชนิดอื่นปน เป็นต้น ซึ่งลักษณะเหล่านี้ในปริมาณต่างๆ กันจะเป็นตัวกำหนดราคาข้าว คุณภาพการสีโดยประเมินจากเมื่อสีเป็นข้าวสารแล้วได้ปริมาณข้าวรวม ข้าวเต็มเมล็ด ข้าวตัน ข้าวหักขนาดต่างๆ และปลายข้าว โดยทั่วไปโรงสีจะตั้งเกณฑ์ขั้นต่ำของผลที่ได้จากการสีไว้ถ้าต่ำกว่าจะถูกตัดราคา และชนิดของข้าว เช่น ข้าว 100%, ข้าว 15%, ข้าว 5% เป็นต้น กำหนดราคาโดยมาตรฐานข้าว (กัญญา, 2547)

3.3 คุณภาพการหุงต้ม, รับประทาน และการแปรรูป (cooking, eating and processing quality)

คุณภาพการหุงต้ม และการรับประทานขึ้นกับวิธีการหุงต้ม และพันธุ์ข้าว โดยพันธุ์ข้าวต่างกัน เช่น ข้าวเจ้า และข้าวเหนียว วิธีการหุงต้มให้ได้ลักษณะเนื้อสัมผัสตามที่ผู้บริโภคต้องการจึงต่างกันด้วย โดยข้าวเจ้าหุงต้มในน้ำ ส่วนข้าวเหนียวหุงด้วยการนึ่ง การประเมินคุณภาพการหุงต้ม ได้แก่ การยืดตัวของเมล็ดข้าว (grain elongation) การขยายปริมาตร และการอมน้ำของข้าวสุก (volume expansion and water absorption) และปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุก (solids in cooking water) สำหรับการประเมินคุณภาพการรับประทาน คือ การตรวจสอบโดยประสาทสัมผัส (sensory evaluation) และคุณภาพของข้าวที่เหมาะสมในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ข้าว เช่น ข้าวหนึ่ง ข้าวหุงสุกเร็ว ข้าวกระป๋อง และข้าวแช่เยือกแข็ง เป็นต้น การประเมินคุณภาพของข้าวในการแปรรูปใช้วิธีโดยอ้อม คือ การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี เคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าว และแป้งข้าว นอกจากนี้คุณภาพการหุงต้ม และการรับประทานของข้าวสามารถคาดเดาได้ด้วยคุณสมบัติเมล็ดทางเคมี และยังเป็นคุณภาพที่ผู้บริโภคใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อเพราะความชอบของแต่ละคนต่างกัน เช่น บางคนชอบข้าวแข็งร่วนหุงขึ้นหม้อ บางคนชอบข้าวนุ่มเหนียว (งามชื่น, 2547; อรอนงค์, 2547)

3.4 คุณภาพทางโภชนาการ (nutritive quality)

ผู้บริโภคในปัจจุบันมีความรู้เรื่องคุณค่าทางโภชนาการของอาหารที่บริโภคมากขึ้น และทราบกันดีแล้วว่า ข้าวกล้องมีคุณค่าทางโภชนาการมากกว่าข้าวสารที่ขัดสีจนขาว จึงทำให้สูญเสียสารอาหารแทบทุกชนิดยกเว้น สตาร์ชที่เพิ่มขึ้น ข้าวมีคุณค่า และประโยชน์ต่อสุขภาพ ผู้บริโภคมากกว่าธัญพืชชนิดอื่น เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมี และชีวเคมีของข้าวไม่มีสารกลูเตน ซึ่งพบในข้าวสาลี ข้าวไรย์ ข้าวบาร์เลย์ และข้าวทริทิเคลี จึงไม่ทำให้เกิดโรคเซลิแอค (celiac disease) ซึ่งเป็นการแพ้สารกลูเตน ผู้ป่วยโรคนี้จะถ่ายเหลวเป็นน้ำ แน่นท้องมีลมในท้องมาก คลื่นไส้ อาเจียน ปากเป็นแผล และบางคนน้ำหนักลด (อรอนงค์, 2547) พบว่าองค์ประกอบที่สำคัญ และมีอยู่มากในเมล็ดข้าว ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน สำหรับข้าวสารประกอบด้วยแป้งร้อยละ 75 – 80 ความชื้นร้อยละ 14 โปรตีนร้อยละ 4.5 – 14 นอกจากนี้ยังพบว่าคุณค่าทางโภชนาการของข้าวหอมมะลิมีโปรตีนประมาณร้อยละ 5.4 ไขมันร้อยละ 1 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 81.5 เนื้อเยื่อร้อยละ 0.3 โดยข้าว 100 กรัมจะให้พลังงาน 357 แคลอรี (นพมาศ, 2547)

4. องค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อคุณภาพข้าว

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ สภาพการปลูก การเก็บเกี่ยว และกระบวนการแปรรูปจากข้าวเปลือกเป็นข้าวกล้องและข้าวสาร การวิเคราะห์ทางเคมีโดยทั่วไปใช้วิธีการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของข้าวสาร คือ คาร์โบไฮเดรต แป้ง โปรตีน ไขมัน เส้นใยอาหาร และพลังงาน (หน่วยกิโลแคลอรี) แตกต่างกัน ดังตารางที่ 4

องค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อคุณภาพของข้าวทั้งในข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสาร ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน และกลีตินสารระเหยของข้าว (อรอนงค์, 2547)

4.1 คาร์โบไฮเดรต

สตาร์ช (starch) เป็นคาร์โบไฮเดรตโพลีแซ็กคาไรด์ที่พบมากที่สุด ในเนื้อเมล็ดของข้าว (ประมาณ 90%) จึงมีผลต่อคุณภาพของข้าวมากที่สุดด้วยเช่นกัน โดยโมเลกุลของสตาร์ช (starch granule) มีขนาด 3 – 5 ไมครอน ซึ่งนับว่าเล็กที่สุดในกลุ่มธัญชาติรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมหลายเหลี่ยม รวมตัวกันอยู่ภายในอมิโลพลาส หรือคลอโรพลาสของเซลล์จำนวน 20 – 60 เม็ดสตาร์ชเป็น

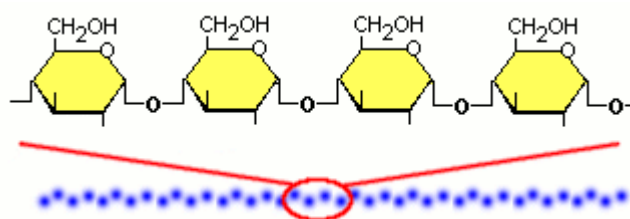
กลุ่มก้อนกลม หรือยารีมี่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มเม็ดสตาร์ชในอิมัลซิฟิเคชันนี้ประมาณ 7 – 39 ไมครอน โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยโพลิเมอร์ของกลูโคส 2 ลักษณะ คือ อมิโลส และอมิโลเพคติน ซึ่งโมเลกุลทั้งสองจัดเรียงตัวกันแน่นจนเป็นเม็ดสตาร์ช โดยมีโครงสร้างลักษณะเป็นรัศมีจากกลางแบบกิ่งผลึก โดยบางส่วนจะอยู่ร่วมกับลิพิด

ตารางที่ 4 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของข้าวสารพันธุ์ต่างๆ

พันธุ์	พลังงาน (กิโลแคลอรี)	องค์ประกอบทางเคมี (กรัม/100 กรัม)					
		คาร์โบไฮเดรต	แป้ง	โปรตีน	ไขมัน	ใยอาหาร	เถ้า
กข 15	352.13	81.97	75.54	5.62	0.20	1.20	0.36
ขาวดอกมะลิ 105	351.62	81.08	73.29	6.27	0.25	1.21	0.38
ปทุมธานี 1	349.05	79.18	71.51	7.63	0.21	2.01	0.42
สุพรรณบุรี 1	353.56	79.18	71.51	6.27	0.25	1.21	0.38
สุพรรณบุรี 2	353.03	81.29	75.10	6.33	0.29	1.57	0.42
ชัยนาท 1	352.62	80.80	77.52	6.82	0.24	1.46	0.37
ชัยนาท 2	353.29	80.21	72.23	7.28	0.37	1.65	0.46
พิษณุโลก 2	352.31	80.92	75.61	6.67	0.22	1.68	0.42
สังข์หยด	352.16	81.11	70.64	6.72	0.10	2.05	0.34
กข 6	351.09	80.95	71.76	5.72	0.49	1.12	0.40
กข 10	352.72	81.51	72.73	5.11	0.70	1.08	0.40
เหนียวสันป่าตอง	348.21	80.78	70.09	5.55	0.33	0.99	0.39

ที่มา: กรมการข้าว (2550)

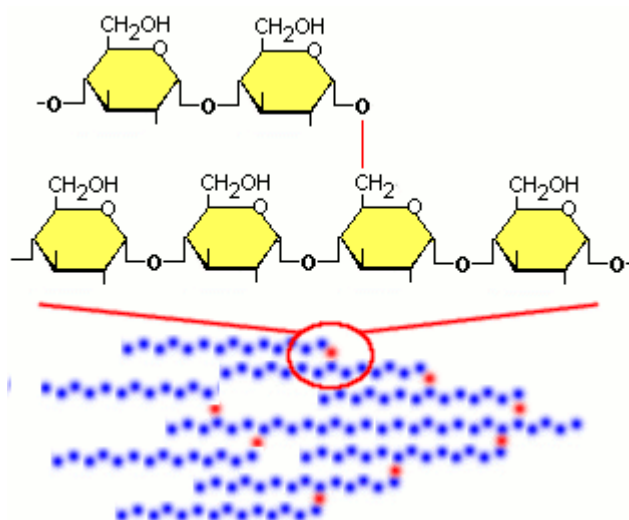
อมิโลส ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสจัดเรียงตัวเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (Linear chains) ด้วยพันธะแอลฟา -1, 4 มีโซ่กิ่ง (branched chain) อยู่ประมาณ 3 – 4 กิ่ง ด้วยพันธะแอลฟา -1, 6 เมื่อย่อยด้วยเอนไซม์ เบตาอมิโลส ได้ส่วนที่เหลือจากการย่อยประมาณร้อยละ 73 – 81 มีระดับของพอลิเมอร์ไรเซชันเฉลี่ย 1,000 – 1,100 มีความยาวของสายเฉลี่ย 250 – 320 จำนวนสายเฉลี่ย 3.4 – 4.0 และมีโมเลกุลที่เป็นกิ่งก้านร้อยละ 31 – 49 โดยแสดงสูตรโครงสร้างของอมิโลสดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 สูตรโครงสร้างของอมิโลส

ที่มา: Bowen (2006)

อมิโลแพคติน ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่จัดเรียงตัวเป็นพอลิเมอร์ที่มีโซ่กิ่งเป็นแขนงมากประมาณ 96 % ต่อกันด้วยพันธะแอลฟา -1, 4 และอีก 4 % ต่อด้วยพันธะแอลฟา -1, 6 มีระดับขั้นการพอลิเมอไรเซชันเฉลี่ย 4,700 – 18,500 ความยาวของสายเฉลี่ย 18 – 21 มีจำนวนสายเฉลี่ย 220 – 1,000 โดยความยาวของสายภายนอกเฉลี่ย 12 – 14 และความยาวภายในของสายเฉลี่ย 5 – 6 (อรอนงค์, 2547) โดยแสดงสูตรโครงสร้างของอมิโลสดังภาพที่ 2



ภาพที่ 3 โครงสร้างของอมิโลแพคติน

ที่มา: Bowen (2006)

คุณสมบัติของสตาร์ชทั้งในส่วนของอมิโลส และอมิโลแพคตินมีผลต่อคุณภาพของข้าวหุงสุก ได้แก่ ความนุ่ม ร่วน และการพองตัวของเมล็ดข้าว ทำให้สามารถแบ่งประเภทคุณภาพข้าวหุงสุกได้ตามปริมาณอมิโลส ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การแบ่งประเภทข้าวสารตามปริมาณอมิโลส

ประเภทข้าว	ร้อยละอมิโลส	ลักษณะข้าวสุก
	งามขึ้น (2547)	
ข้าวเหนียว	0 – 2	เหนียวมาก
ข้าวอมิโลสต่ำ	10 – 19	เหนียวนุ่ม
ข้าวอมิโลสปานกลาง	20 – 25	ค่อนข้างร่วนไม่แข็ง
ข้าวอมิโลสสูง	26 – 34	ร่วนแข็ง

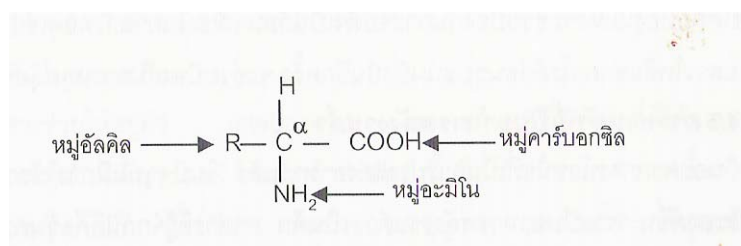
ที่มา: งามขึ้น (2547)

คุณสมบัติบางประการของอมิโลส เช่น สมบัติการละลาย (Solubility) อมิโลสสามารถละลายได้ดีในสารละลายเจือจางของด่าง นอกจากนี้ยังละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น สารละลายคลอรัลไฮเดรต (aqueous choral hydrate), กรดไดคลอโรอะซิติก (dichloroacetic acid), กรดฟอร์มิก (formic acid) และยูเรีย (urea) เป็นต้น ตัวอย่างที่เป็นแป้งจะใช้วิธีละลายแป้งออกจากตัวอย่างที่ไม่รุนแรง เช่น การต้มตัวอย่างในน้ำเดือด สำหรับตัวอย่างที่เป็นเมล็ด หรือหัว ซึ่งเม็ดแป้งถูกเก็บอยู่ในเซลล์ที่มีผนังเซลล์ห่อหุ้มอยู่วิธีการในการละลายจะซับซ้อนและรุนแรงมากขึ้น เช่น สกัดโดยใช้เมทิลซัลไฟด์ (methyl sulfoxide) ร่วมกับการใช้ความร้อนสูง นอกจากนี้อมิโลสยังมีคุณสมบัติทำปฏิกิริยากับไอโอดีนเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงินที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างอมิโลสกับไอโอดีนในสารละลายด่าง (NaOH) แต่มักเกิดการรบกวนจากไขมัน (lipid) และยังพบว่าไอโอดีนไม่เสถียรในสารละลายด่าง ส่วนในสถานะที่เป็นกรดเกิดการรบกวนจากสารประกอบเชิงซ้อนสีม่วงแดงที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างอมิโลสกับไอโอดีนมากกว่าในสถานะที่เป็นด่าง (Juliano, 1985)

4.2 โปรตีน

โปรตีนในข้าวมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว และสภาพแวดล้อมที่ปลูกข้าว (อรอนงค์, 2547; บุญหงส์, 2747) โดยทั่วไปจะมีปริมาณน้อยกว่าในธัญพืชชนิดอื่น และโครงสร้างพื้นฐานของโปรตีน คือ กรดอะมิโนแอลฟา ซึ่งประกอบด้วย α - carbon ต่อด้วยพันธะโคเวเลนต์กับอะตอมไฮโดรเจน หมู่อะมิโน หมู่อัลคิล และหมู่อาร์บอกลดดังภาพที่ 4 ซึ่งปริมาณโปรตีนใน

ข้าวกล้องมีค่าร้อยละ 7.1 – 15.4 (Radomir, 1996) สำหรับปริมาณโปรตีนในข้าวสารของข้าวพันธุ์ต่างๆ ในเอเชียมีค่าร้อยละ 4 – 14 และมีค่าปริมาณโปรตีนในข้าวสารเฉลี่ยร้อยละ 6.3 – 9.2 โดยมีค่าปริมาณโปรตีนในข้าวสารเฉลี่ยทั้งหมดร้อยละ 7.8 (Juliano, 1993) และจากการศึกษาเบื้องต้นของ IRRI (International Rice Research Institute) จาก 7,419 ตัวอย่าง พบว่าปริมาณโปรตีนในข้าวกล้องเฉลี่ยประมาณร้อยละ 8 ข้าวสารร้อยละ 7 และปริมาณไลซีน (Lysine) ในโปรตีนประมาณร้อยละ 3.8 – 4 (วรวิทย์, 2546)



ภาพที่ 4 สูตรโครงสร้างพื้นฐานของโปรตีน
ที่มา: รังสินี (2550)

โปรตีนในข้าวประกอบด้วยแอลบูมิน (albumin), กลูเทลิน (glutelin) หรือออร์ซานิน (oryzenin) โปรลามิน (prolamin) และโกลบิวลิน (globulin) สำหรับข้าวสารโปรตีนสะสม (storage proteins) ที่มีมากใน endosperm ได้แก่ แอลบูมิน และกลูเทลิน ส่วนโปรตีนที่มีในข้าวนี้เกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ของเมล็ด โดยมีมากในชั้นหุ้มเปลือกเมล็ด คัพพะ (embryo) และเนื้อด้านนอกจะมีโปรตีนมากกว่าใจกลางเมล็ด ได้แก่ โปรลามิน และโกลบิวลิน (Radomir, 1996; Ju *et al.*, 1999; ภัทรานี, 2544)

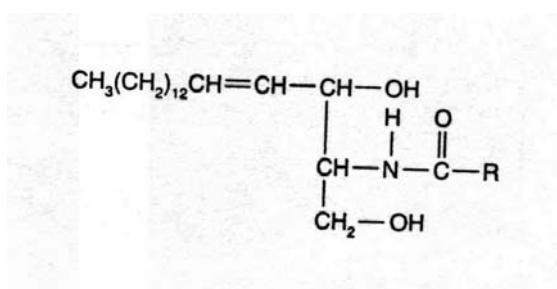
โปรตีนจากข้าวสามารถจำแนกโดยการละลายของโปรตีนแต่ละชนิด ได้แก่ โปรตีนแอลบูมินละลายในน้ำหรือละลายในน้ำที่มีกรดอยู่เพียงเล็กน้อย แอลบูมินมีกรดอะมิโนไลซีน (lysine) อยู่สูง และจะตกตะกอนทันทีเมื่อได้รับความร้อน, โปรตีนโกลบิวลินละลายในเกลือ (โซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.4 โมลาร์) และเมื่อได้รับความร้อนจะไม่ง่ายในการตกตะกอน, โปรตีนกลูเทลินละลายในกรดหรือด่าง (กรดไฮโดรคลอริก หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์) และโปรตีนโปรลามินละลายในแอลกอฮอล์ หรือเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 70 – 80

โปรตีนจากข้าวมีสัดส่วนของ แอลบูมิน: โกลบิวลิน: กลูเทลิน: โปรลามิน เป็น 4.5: 13.1: 79.7: 2.6 (Ju et al., 1999) และ 5: 12: 80: 3 (Juliano, 1994) จึงสรุปได้ว่าโปรตีนกลูเทลินเป็นโปรตีนหลักที่พบทั้งในเมล็ดข้าวกล้อง และข้าวสาร

นอกจากนั้นยังพบว่า โปรตีน และเมล็ดศตวรรษอาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมีร่วมกันระหว่างการหุงต้ม โดยเฉพาะโปรตีนกลูเทลิน และไกลบิวลินซึ่งมีมากกว่าโปรตีนชนิดอื่น ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำของสตาร์ช ลดลง และขัดขวางการพองตัวของเม็ดศตวรรษ จึงมีอาจมีผลทำให้เนื้อสัมผัสของข้าว่วนขึ้นได้ (อรอนงค์, 2547; Ju *et al.*, 1999)

4.3 ໄບມັນ

ไขมันในข้าวส่วนใหญ่ คือ ไตรกลีเซอไรด์ รองลงมา คือ ฟอสโฟลิพิด (Phospholipids) ไกลโคลิพิด (glycolipids) และเทอร์ปีนอยด์ (terpenoids) ทั้งไขมันภายนอก และภายในเมล็ดสตาร์ช เป็นไขมันประเภทสารประกอบโมโนแอซิล (monoacyl) ซึ่งกลุ่มของโมโนแอซิลจะเป็นกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่า สำหรับไขมันภายในเมล็ดสตาร์ช ยังเป็นไลโซเลซิthin (lysolecithin) (อรอนงค์, 2547) แสดงดังภาพที่ 5 นอกจากนี้ไขมัน (fat) พบเฉพาะที่ชั้นในสุดของเยื่อหุ้มเมล็ด (aleurone layer) และที่ส่วนของคัพภะ ดังนั้นในการขัดสีข้าว ก่อให้เกิดเป็นข้าวสารขาว (milled rice) จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียไขมัน ไปอยู่ในรูปของรำข้าวเป็นปริมาณมากกว่าร้อยละ 80 (บุญหงส์, 2747; ออรอนงค์, 2547; Julianio, 1993) และในข้าวสารมีไขมันประมาณร้อยละ 1.5 – 1.7 ส่วนใหญ่อยู่ในรูป non – starch lipids



ภาพที่ 5 สูตรโครงสร้างของกรดไขมัน Lysolecithin

ที่มา: Anonymous (2008)

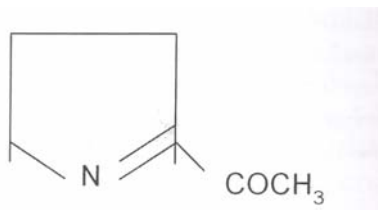
ไขมันสามารถรวมตัวกับอมิโลสได้เป็น amylose – lipids complex ที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้แป้งมีแนวโน้มลดการพองตัว และการละลาย เมื่อให้ความร้อนสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น

4.4 ความชื้น

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ และเกี่ยวข้องกับคุณภาพเมล็ดทั้งทางตรง และทางอ้อม คือ ปริมาณความชื้นของข้าว ทั้งในข้าวเปลือก และข้าวสาร ใช้เป็นกฎเกณฑ์มาตรฐานที่สำคัญเพื่อการซื้อขายข้าว เนื่องจากปริมาณความชื้นสามารถบ่งชี้ถึงน้ำหนักของเนื้อข้าวที่ผู้ซื้อ และผู้ขาย เกี่ยวข้องโดยตรง ในการกำหนดราคาซื้อ-ขาย และในทางอ้อมนั้น ความชื้นสามารถบ่งชี้ถึงอายุการเก็บรักษาข้าวหรือบ่งบอกถึงความปลอดภัยในการเก็บรักษาให้ข้าวมีคุณภาพดี จากการทดลองพบว่า ข้าวที่มีความชื้นสูงจะเสื่อมเสียเร็วกว่าข้าวที่มีความชื้นต่ำ ระดับความชื้นทั่วไปของข้าวที่ยอมรับว่าปลอดภัยต่อการเก็บรักษาที่เหมาะสม คือร้อยละ 13 ซึ่งจะเก็บรักษาได้ดีภายในเวลา 6 เดือน และถ้าข้าวมีความชื้นร้อยละ 12 จะทำให้เก็บรักษาได้นานขึ้น นอกจากนี้ความชื้นของข้าวยังมีผลต่อคุณภาพการสีของข้าวเปลือก โดยเป็นปัจจัยสำคัญตั้งแต่การเก็บเกี่ยวข้าวที่แก่ ความชื้นเหมาะสมร้อยละ 22 – 26 การตากข้าวเปลือกเพื่อลดความชื้นลงให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา (ความชื้นไม่สูงกว่าร้อยละ 14) จนถึงเวลาการสีข้าวเปลือกที่มีความชื้นเหมาะสมก็จะทำให้ได้ข้าวเต็มเมล็ดสูง และข้าวหักน้อย (อรอนงค์, 2547)

4.5 กลิ่นของสารระเหยของข้าว

ข้าวบางพันธุ์มีกลิ่นสารระเหยบางชนิดที่ผู้บริโภคบางกลุ่มชอบ แต่บางกลุ่มก็ไม่ชอบ ซึ่งเป็นกลิ่นที่มีอยู่ประจำพันธุ์ เช่น ข้าวหอมที่ซื้อขายในตลาดข้าวของโลก คือ พันธุ์ข้าวที่มีสาร 2 – แอซีทิล – 1 – ไพร์โรลีน (2 – acetyl – 1 – pyrroline) แสดงสูตร โครงสร้างดังภาพที่ 6 ซึ่งเป็นสารหลักของกลิ่นหอมจากข้าว โดยข้าวหอมที่อยู่ในรูปข้าวกล้องจะมีสารชนิดนี้ประมาณ 0.1 – 0.2 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ในขณะที่ข้าวสารมีเพียง 0.04 – 0.09 ไมโครกรัมต่อกรัม (น้ำหนักแห้ง) ส่วนกลิ่นเหม็นอาจเกิดจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันไม่อิ่มตัว, กรดแอมิโนที่มีสารซัลเฟอร์ในโมเลกุล, สารประเภทไฮโดรเจนซัลไฟด์, แอมโมเนีย, คาร์บอนไดออกไซด์ หรือ แอวิเทลดีไฮด์ซึ่งเป็นกลิ่นที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ (อรอนงค์, 2547)



ภาพที่ 6 สูตรโครงสร้างของ 2-acetyl – 1 - pyrroline

ที่มา: อรอนงค์ (2547)

สำหรับข้าวหอมมะลิของไทยความหอมเกิดจากสารระเหยชื่อ 2 – acetyl – 1 – pyrroline ซึ่งเป็นสารที่ระเหยหายไปได้ การรักษาความหอมของข้าวหอมมะลิให้คงอยู่นานนั้นจึงควรเก็บข้าวไว้ในที่เย็น อุณหภูมิประมาณ 15 องศาเซลเซียส เก็บข้าวเปลือกที่มีความชื้นต่ำร้อยละ 14 – 15 ลดความชื้นข้าวเปลือกที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไปประมาณ 30 – 40 องศาเซลเซียส จะเก็บรักษาได้ไม่นานแต่คุณภาพความหอมดีกว่าที่อุณหภูมิสูงๆ (Wongpornchai *et al.*, 2004)

5. การตรวจสอบคุณภาพข้าวสารทางเคมี

5.1 วิธีการทั่วไปแบบวิเคราะห์ข้าวหลายเมล็ด

5.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น วิธีการคือ บดเมล็ดข้าวขาวด้วยเครื่องบดเมล็ดข้าวขนาด 80 – 100 เมช (mesh) ให้เป็นแป้ง ชั่งแป้งมา 1 กรัม ใส่กล่องอลูมิเนียมปิดฝา แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนักแป้งหลังอบ โดยที่ต้องชั่งน้ำหนักกล่องอลูมิเนียมพร้อมฝาก่อนทำการอบ จากนั้นนำน้ำหนักแป้งก่อนอบ และหลังอบมาคำนวณหาความชื้นจากสูตร (งามชื่น, 2547; อรอนงค์ และคณะ, 2542)

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{(B - C) \times 100}{(B - A)} \quad (1)$$

เมื่อ A = น้ำหนักกล่องอูมิเนียมพร้อมฝา

B = น้ำหนักกล่องอูมิเนียมพร้อมฝาและแป้งก่อนอบ

C = น้ำหนักกล่องอูมิเนียมพร้อมฝาและแป้งหลังอบ

5.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (Buchi Kjeldahl Lab Food Biochem Analysis)

วิธีการคือ ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ในหลอดย่อยโปรตีนเคมเคตลิสต์ 10 กรัม ที่ผสมระหว่าง CuSO_4 กับ K_2SO_4 ในอัตราส่วน 0.5:10 แล้วปรับปริมาตรให้ได้จำนวน 20 มิลลิลิตร นำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จนได้สารละลายใส ทำการกลั่นตัวอย่างที่ได้ด้วยน้ำกลั่นจำนวน 50 มิลลิลิตร ร้อยละ 32 NaOH จำนวน 70 มิลลิลิตร และ ร้อยละ 4 กรดบอริกจำนวน 30 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปไทเทรตกับสารละลาย 0.1 N H_2SO_4 จนได้สีชมพูอ่อน นำค่าความเข้มข้นของ H_2SO_4 แทนค่าสูตร (2) จะได้ % N (Nitrogen) และคำนวณปริมาณโปรตีน (% Crude Protein) จากสูตร (3)

$$\% \text{ N} = \frac{14 \times (V_1 - V_2) \times \text{ความเข้มข้นของ } \text{H}_2\text{SO}_4 \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}} \quad (2)$$

เมื่อ V_1 = ปริมาตรของ H_2SO_4 ที่ไทเทรตตัวอย่าง

V_2 = ปริมาตรของ H_2SO_4 ที่ไทเทรต blank

$$\% \text{ Crude Protein} = \% \text{ N} \times 5.95 \quad (3)$$

เมื่อ 5.95 = แฟกเตอร์ของโปรตีนในข้าว

5.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Soxtec system HT6 และ Lab Food Biochem Analysis)

วิธีการคือ ก่อนชั่งตัวอย่างให้เปิดเครื่องทำความเย็น ควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 15 องศาเซลเซียส ให้น้ำไหลเข้าเครื่อง Extraction unit : Soxtec system HT 6 และ เปิดเครื่องมืออัตโนมัติสำหรับควบคุมอุณหภูมิ : 1046 Soxtec service unit โดยตั้งอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ชั่งตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอน (ประมาณ 1 กรัม) ใส่ในกระดาศกรองขนาด 11 ไมครอน (whatman เบอร์ 1) ปิดกระดาศกรองใส่ใน thimble นำ thimble ไปใส่ใน Extraction unit : Soxtec system HT 6 ใส่ปิโตรเลียมอีเทอร์ 50 มิลลิลิตรลงใน extraction cup และ glass bead ที่ทราบน้ำหนักคงที่แล้ว (ทำในตู้ดูดควัน) แล้วนำไปวางบน hot plate ของเครื่อง Extraction unit : Soxtec system HT 6 (อยู่ใต้

thimble เพื่อรองรับไขมันที่สกัดได้) เลื่อน thimble ลงมาจุ่มใน extraction cup ที่มีปิโตรเลียมอีเทอร์ อยู่ ตั้งเวลาในการสกัด 30 นาที โดยเลื่อนปุ่ม extraction mode ไปที่ตำแหน่ง “Boiling” เมื่อครบ 30 นาทีให้เลื่อนปุ่ม extraction mode ไปที่ตำแหน่ง “Rinsing” เพื่อให้ thimble แขนงอยู่และให้ตัวทำละลายชะล้างตัวอย่างเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที เมื่อครบ 30 นาทีให้เลื่อนคันโยกไปที่ตำแหน่ง “Evaporation” เพื่อให้ปิโตรเลียมอีเทอร์ใน extraction cup ระเหยออกให้หมด ใช้เวลาอย่างน้อย 30 นาที เมื่อครบ 30 นาทีให้เลื่อนคันโยกลงมา แล้วเอา extraction cup ออกจาก extraction unit : Soxtec system HT6 นำ extraction cup จากนั้นนำอบที่อุณหภูมิ 93 – 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วใส่ในโถดูดความชื้น และชั่ง extraction cup จนได้น้ำหนักคงที่ คำนวณปริมาณไขมัน (%) จากสูตร (4)

$$\text{ปริมาณไขมัน(\%)} = \frac{(C - A)}{B} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ A = น้ำหนัก extraction cup + glass bead

B = น้ำหนักตัวอย่าง

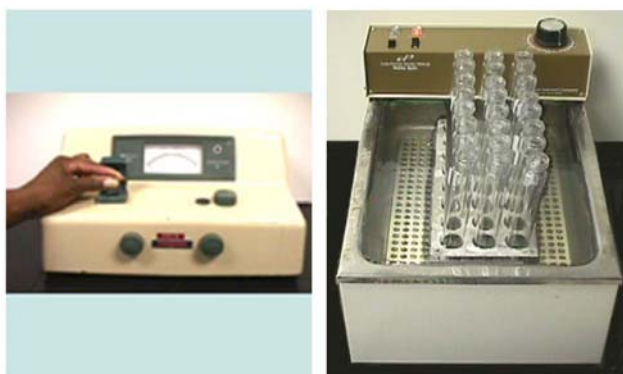
C = น้ำหนัก extraction cup + glass bead + ไขมัน (กรัม)

5.1.4 การวิเคราะห์ปริมาณอมิโอส (USDA, 2005)

เนื่องจากปริมาณอมิโอสมีความสัมพันธ์กับคุณภาพการหุงต้ม และรับประทาน การวิเคราะห์ปริมาณอมิโอส จึงมีความสำคัญ ในอดีตการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโอสส่วนใหญ่จะใช้สารเคมีโดยใช้สารละลายไอโอดีนทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของอมิโอส แล้วจึงนำไปวัดค่าสีโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แต่ปัจจุบันนี้การวิเคราะห์หาปริมาณอมิโอสที่เหมาะสมนั้นสามารถใช้ตัวอย่างน้อย รวดเร็ว ไม่ใช้สารเคมีที่เป็นพิษ ราคาถูก และให้ผลการทดลองที่ถูกต้องแม่นยำ การวิเคราะห์หาปริมาณอมิโอสที่อยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น

1) การวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสด้วยวิธี Starch-Iodine-Blue Value

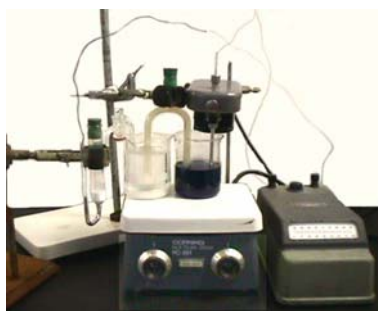
การวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสวิธีนี้ สามารถตรวจวิเคราะห์จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างแป้งที่ละลายในสารละลาย นำไปให้ความร้อนโดยปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสม อมิโลส เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนจะเกิดสารเชิงซ้อนอมิโลส-ไอโอดีนได้ สารละลายสีน้ำเงิน ซึ่งสามารถหาปริมาณอมิโลสในแป้งโดยการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ช่วงแสง 610 – 620 นาโนเมตร และเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน วิธีการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 7 วิธีนี้เป็นวิธีที่รวดเร็ว แต่มีความแม่นยำต่ำ (USDA, 2005d)



ภาพที่ 7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสด้วยวิธี Starch -Iodine-Blue Value ที่มา: USDA. (2005d)

2) การวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสด้วยวิธี Iodine Binding Capacity

การวิเคราะห์วิธีนี้ทำได้โดยนำเมล็ดข้าวมาบดจะได้แป้งข้าว กำจัดไขมันและโปรตีนออกจากแป้งข้าวโดยใช้สารเคมี จากนั้นนำสตาร์ชมาละลายในสารละลายที่ประกอบไปด้วยกรดไฮโดรคลอริก และค่อยๆ เติมสารละลายไอโอดีนเกิดเป็นสารละลายสตาร์ชอย่างช้าๆ โมเลกุลของอมิโลสจะทำปฏิกิริยากับสารละลายเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน จากนั้นนำไปวัดค่าปริมาณอมิโลส เปรียบเทียบกับปริมาณอมิโลสบริสุทธิ์ต่างๆ วิธีนี้ใช้ตัวอย่างน้อย มีความแม่นยำมากกว่าวิธีแรก แต่มีความยุ่งยากในการเตรียมตัวอย่าง เนื่องจากในการทำสารละลายมาตรฐานต้องสกัดอมิโลแพคตินออกก่อน ทำให้วิธีนี้ใช้เวลาในการวิเคราะห์นานถึง 2 สัปดาห์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้แสดงดังภาพที่ 8 (USDA, 2005b)



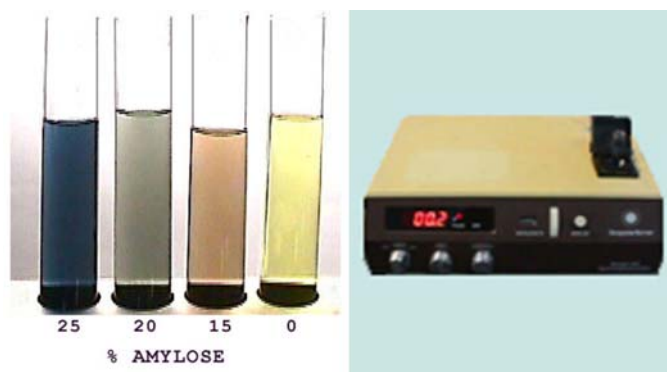
ภาพที่ 8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสด้วยวิธี Iodine Binding Capacity
ที่มา: USDA. (2005b)

3) การวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสที่ปรากฏ (Apparent amylose content)

การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถทำได้โดยนำเมล็ดข้าวมาบดให้ละเอียด ขนาด 80 เมช เติมน้ำ เอทานอล และสารละลายไอโอดีนไฮดรอกไซด์ และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างด้วยกรดอะซิติก เติมสารละลายไอโอดีน โมเลกุลของอมิโลสที่ปรากฏจะทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนอมิโลส-ไอโอดีน ได้สารละลายสีน้ำเงิน จากนั้นวัดหาปริมาณอมิโลสด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ วิเคราะห์หาปริมาณอมิโลส และเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน แป้งข้าวที่มีอมิโลสระดับต่างๆ สีของสารละลายจะแตกต่างกันดังภาพที่ 9 วิธีนี้ใช้ตัวอย่างน้อย รวดเร็วเพราะไม่ต้องกำจัดโปรตีน และไขมันออกจากแป้งข้าว แต่ผลการทดลองมีความแม่นยำต่ำ เนื่องจากปริมาณอมิโลสที่วัดได้ไม่ใช่ปริมาณอมิโลสที่แท้จริง เนื่องจากสารละลายไอโอดีนสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของอมิโลแพคตินบางส่วน และให้สารละลายสีน้ำเงินเช่นเดียวกัน (USDA, 2005c)

4) การวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสที่ปรากฏด้วยเครื่องวิเคราะห์อัตโนมัติ

การวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสวิธีนี้หลักการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสที่ปรากฏ แต่ใช้เครื่องวิเคราะห์อัตโนมัติ (Autoanalyzer) แทนเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยที่สารละลายไอโอดีน กรดอะซิติก และแป้งจะละลายรวมกันอยู่ในเครื่องวิเคราะห์อัตโนมัติ เครื่องมือชนิดนี้จะอ่านค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปของสารละลาย และนำไปประมวลผลหาปริมาณอมิโลสจากคอมพิวเตอร์ วิธีนี้เป็นวิธีที่รวดเร็วเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสที่ปรากฏ



ภาพที่ 9 ตัวอย่างสารละลายไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของอมิโลสระดับต่าง ๆ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสที่ปรากฏ (Apparent amylose content)

ที่มา: USDA. (2005e)

5) การวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสด้วยเทคนิคย่านใกล้อินฟราเรด

การวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสด้วยเทคนิคย่านใกล้อินฟราเรด เป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย องค์ประกอบของแป้งข้าวส่วนใหญ่จะประกอบด้วยหมู่ -CH, -OH และ NH ในการทดลองนี้ใช้ตัวอย่างข้าวประมาณ 5 กรัม ต่อการวิเคราะห์หนึ่งตัวอย่าง ซึ่งอ่านค่าที่ได้ออกมาเป็นรูปกราฟ และคำนวณหาค่าปริมาณอมิโลสจากสมการที่สร้างขึ้นจากวิธีอ้างอิง (Reference method) เครื่อง NIR แสดงดังภาพที่ 10 (USDA, 2005c)

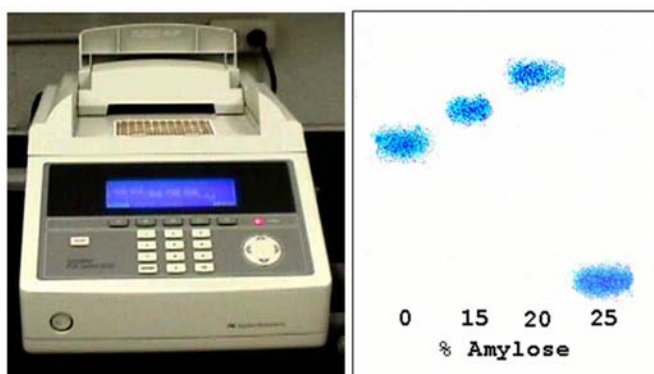


ภาพที่ 10 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสด้วยเทคนิคย่านใกล้อินฟราเรด

ที่มา: USDA. (2005c)

6) การวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสด้วยวิธี DNA Marker

โดยปกติยีนของข้าวเหนียวมักจะถูกควบคุมด้วยปริมาณอมิโลส การวิเคราะห์วิธีนี้จะใช้ DNA จากเมล็ดข้าวหรือเนื้อเยื่อพืช โดยนำ DNA ที่ได้จากข้าวมาผสมกับ Primer เอนไซม์ (Taq polymerase) และองค์ประกอบอื่นๆ ของ DNA เช่น นิวคลีโอไทด์ นำสารละลายไปเก็บที่ Thermocycle ที่อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นนำสารละลายมาวิเคราะห์โดยเทคนิคอิเล็กโตรโฟเรซิส (polyacrylamide gel electrophoresis) นำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับปริมาณอมิโลสของข้าวพันธุ์ต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรโฟเรซิสเช่นเดียวกัน วิธีนี้ต้องอาศัยผู้ทดลองที่มีความเชี่ยวชาญสูง และใช้เวลานาน ตัวอย่างผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 11 (USDA, 2005a)



ภาพที่ 11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลด้วยวิธี DNA marker และผลการวิเคราะห์ ที่มา: USDA. (2005a)

5.1.5 อัตราการยืดตัวของข้าว (Elongation ratio) วิธีการคือ แช่เมล็ดข้าวสารในน้ำเย็นนาน 20 นาที และต้มในน้ำเดือด 10 นาที แล้วจึงวัดความยาวของข้าวสุกโดยใช้เวอร์เนียเปรียบเทียบกับความยาวของข้าวสารดังสูตร (5)

$$\text{อัตราการยืดตัวของข้าว} = \frac{\text{ความยาวเฉลี่ยของข้าวสุก}}{\text{ความยาวเฉลี่ยของข้าวสาร}} \quad (5)$$

5.1.6 ความคงตัวของเจล (Gel consistency) วิธีการคือ ชั่งแป้ง 0.1 กรัม ใส่ในหลอดแก้วขนาด 13x100 มิลลิเมตร ใส่แอลกอฮอล์ผสม Thymol blue 0.2% ปริมาณ 0.2 มิลลิลิตร

แล้วเติมสารละลายต่าง KOH ประมาณ 2 มิลลิลิตร ต้มในน้ำเดือดพร้อมกับปิดฝาหลอดนาน 8 นาที ทำให้เย็นโดยแช่ในน้ำผสมน้ำแข็ง นาน 20 นาที เพื่อให้แป้งแข็งตัว แล้วจึงวางหลอดแก้วในแนวราบบนกระดาษกราฟนาน 30 นาที อ่านระยะทางที่แป้งไหลไป ค่าความคงตัวของเจลสามารถแบ่งประเภทของข้าวออกเป็น 3 ชนิด ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าความคงตัวของเจล

ความคงตัวของเจล	ระยะทางที่แป้งไหล (มิลลิเมตร)
แข็ง	25 – 40
ปานกลาง	41 – 60
อ่อน	61 – 100

ที่มา: วาสนา (2538)

5.1.7 การกระจายตัวในด่าง (Alkali test) วิธีการคือ นำเมล็ดข้าวสาร 10 เมล็ด แช่ในสารละลายต่าง KOH เข้มข้น 1.7% ตั้งทิ้งไว้ นาน 23 ชั่วโมง แล้วจึงอ่านค่าการกระจายของเมล็ดที่ปรากฏ ดังตารางที่ 7 และค่าการกระจายตัวในด่างมีค่า 1 – 7

อรอนงค์ และคณะ 2542 ได้วิเคราะห์คุณภาพข้าวกล้อง และข้าวสารทางเคมีของข้าวหอมมะลิ 105 ข้าวเหนียวสันป่าตอง และข้าวขาวตาแห้ง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 9 พบว่า ข้าวกล้องทั้ง 3 พันธุ์มีความชื้นมากกว่าข้าวสารเล็กน้อย ปริมาณโปรตีนในข้าวหอมมะลิ 105 น้อยกว่าข้าวเหนียวสันป่าตอง และข้าวขาวตาแห้ง ปริมาณโปรตีนในข้าวขาวตาแห้งมากกว่าข้าวหอมมะลิ 105 และข้าวเหนียวสันป่าตอง โดยโปรตีนในข้าวกล้องจะมากกว่าในข้าวสาร ส่วนปริมาณไขมันในข้าวกล้องมากกว่าข้าวขาว และปริมาณไขมันในข้าวหอมมะลิ 105 มากกว่าข้าวเหนียวสันป่าตอง และข้าวขาวตาแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวหอมมะลิเป็นข้าวอมิไลด์ต่ำ และข้าวขาวตาแห้งเป็นข้าวอมิไลด์สูงโดยปริมาณอมิไลด์ในข้าวกล้องมากกว่าข้าวสาร ซึ่งปริมาณอมิไลด์มีความสัมพันธ์กับอัตราการยืดตัว ความคงตัวของเจล การกระจายในด่าง และอุณหภูมิเจลาติไนเซชัน

ชั้น โดยเฉพาะในข้าวขาวตาแห้งมีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันสูงกว่าข้าวหอมมะลิ 105 และข้าวเหนียว
สันป่าตองซึ่งระดับอุณหภูมิเจลาติไนเซชันอ่านได้จากตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ค่าการกระจายตัวในค่า

คะแนน	ลักษณะการกระจายของเมล็ด
1	เมล็ด ไม่เปลี่ยนแปลง
2	เมล็ดพองตัว
3	เมล็ดพองตัว มีแป้งกระจายออกจากเมล็ด แต่ไม่โดยรอบ หรือ แคบ
4	เมล็ดพองตัว มีแป้งกระจายออกจากเมล็ด โดยรอบ และกว้าง
5	เมล็ดแตกปริทางขวาง หรือทางยาว แป้งกระจายออกโดยรอบกว้าง
6	เมล็ดสลายรวมกับแป้งที่กระจายออกมา
7	เมล็ดสลายจนหมด แป้งใส

ที่มา: Juliano (1985)

ตารางที่ 8 ค่าการกระจายตัวในค่าที่ระดับอุณหภูมิแป้งสุกต่าง ๆ

ระดับ	อุณหภูมิแป้งสุก (องศาเซลเซียส)	ค่าการกระจายตัวในค่า
ต่ำ	ต่ำกว่า 70	6 – 7
ปานกลาง	70 – 74	4 – 5
สูง	มากกว่า 74	1 – 3

ที่มา: วาสนา (2538) และ Juliano (1985)

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์คุณภาพข้าวทางเคมีของข้าวกล้อง และข้าวสารทั้ง 3 พันธุ์

ตัวอย่าง	ข้าวขาวดอกมะลิ 105		ข้าวเหนียวสันป่าตอง		ข้าวขาวตาแห้ง	
	ข้าวกล้อง	ข้าวสาร	ข้าวกล้อง	ข้าวสาร	ข้าวกล้อง	ข้าวสาร
% ความชื้น	12.39	11.93	12.98	12.84	12.78	12.42
% โปรตีน	6.39	6.25	7.4	7.12	8.35	8.53
% ไขมัน	2.63	0.21	2.26	0.187	2.06	0.16
% อมิโลส	13.73	16.13	5.68	5.13	19.21	23.32
อัตราการยืดตัว	1.08	2.29	1.065	1.65	1.05	2.20
ความคงตัวของเจล	เจลอ่อน	เจลอ่อน	เจลอ่อน	เจลอ่อน	เจลอ่อน	เจลอ่อน
การละลายในด่าง	6	6	6	6	1	2
อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	สูง	สูง

ที่มา: อรอนงค์ และคณะ (2542)

5.2 วิธีการวิเคราะห์ข้าวแบบทีละเมล็ด

5.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในอาหาร ได้แก่ แป้ง ธัญพืชและ Oilseeds สามารถใช้วิธี Dumas Combustion ตาม AACC Method 46 – 30 (1999) หรือ American Association of Cereal Chemists Method 46 – 30 ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูง เหมาะกับการใช้งานจริง วิธีวิเคราะห์โดยการเผาตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 950 °C สารประกอบไนโตรเจนถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจนในขั้นสุดท้าย และถูกวัดด้วยตัวตรวจวัดชนิด Thermal Conductivity Detector ก่อนการวิเคราะห์ต้องทำ Calibrate เครื่องด้วยสาร EDTA (9.59 % Nitrogen) เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 3 – 4 นาที โดยไม่มีสารเคมีที่เป็นของเสีย เครื่องจะแสดงค่าปริมาณไนโตรเจนที่วัดได้เป็น % N (Nitrogen) ดังปฏิกิริยานี้



คำนวณหาปริมาณโปรตีน (Crude Protein) จากสูตร (3)

$$\% \text{ Crude Protein} = \% N \times 5.95 \quad (3)$$

5.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณอมิโนส

การวิเคราะห์หาปริมาณอมิโนสที่ปรากฏด้วยเครื่องวิเคราะห์อัตโนมัติ จากการทดลองของ Zhang *et al.* (2003) สำหรับการวิเคราะห์ข้าวที่ละเมียด วิธีการวิเคราะห์ คือ นำเมล็ดข้าวเปลือกมาแบ่งเป็น 2 ส่วนที่เท่ากันส่วนหนึ่งจะมี embryo และอีกส่วนจะไม่มี นำส่วนที่ไม่มี embryo ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่นแล้วแยกเปลือกออก จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Autoanalyzer (Zhang *et al.*, 2003; Sano, 1984) ซึ่งมีหลักการวิเคราะห์เหมือนกับ Juliano (1971) โดยที่กรดอะซิดิก สารละลายไอโอไดนและแป้งจะละลายรวมกันอยู่ในเครื่องจะอ่านค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปของสารละลาย และนำไปประมวลผลหาปริมาณอมิโนสจากคอมพิวเตอร์

จากหลักการวิเคราะห์ปริมาณอมิโนสที่ปรากฏนี้ Wu *et al.* (2004) ทำการเตรียมตัวอย่างจากข้าวหนึ่งเมล็ดในสารละลายด่าง (Alkali) แล้วทำการเติมกรดอะซิดิกและสารละลายไอโอไดนจากนั้นนำไปวัดค่าปริมาณอมิโนสด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์รุ่น 7230G ที่ช่วง 620 นาโนเมตร (Wu *et al.*, 2004)

นอกจากนี้ด้วยวิธีเดียวกัน Tan *et al.* (1999) นำตัวอย่างข้าวหนึ่งเมล็ดทำการเจลาติไนเซชัน ในสารละลาย NaOH เข้มข้น 1 N ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่นปริมาตร 8 มิลลิลิตร (He *et al.*, 2007) ที่อุณหภูมิ 50 °C นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำการสกัดไขมันด้วยสารผสมระหว่าง Butanol กับ Petroleum ether ในอัตราส่วน 1:3 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เมื่อทำการสกัดแล้วเติมน้ำกลั่น KI เข้มข้น 0.4 N ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร แล้วนำไป

ไทเทรตด้วยสาร KIO_3 เข้มข้น 1.57 มิลลิโมลาร์ ด้วยเครื่อง Autotitrator โดยต้องทำการฟาร์มมาตรฐานด้วยสารอิมิโดส และอิมิโดแพคติน

6. หลักการพื้นฐานเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด

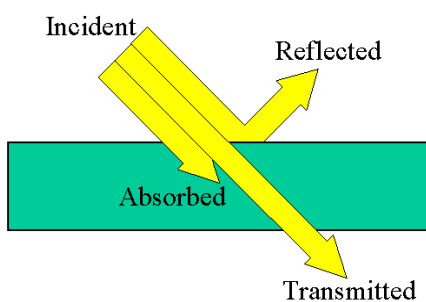
หลักการของสเปกโตรสโกปี คือ เมื่อลำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Incident) ผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุจะเกิดอันตรกิริยากับอะตอม และโมเลกุลทำให้มีแสงบางส่วนที่จะถูกดูดกลืน (Absorption) บางส่วนผ่านทะลุออกไป (Transmittion) บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ (reflection) บางส่วนเกิดการวาวแสง หรือการเรืองแสง (fluorescence or phosphorescence) และบางส่วนอาจเกิดการกระเจิงแสง (scattering) (วลัยพร, 2548) แต่แสงส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนที่ถูกดูดกลืน สะท้อนกลับ และทะลุออกไป ดังภาพที่ 12

การดูดกลืนแสงย่านอินฟราเรดของโมเลกุลสารอินทรีย์ ช่วงคลื่นอินฟราเรดสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 3 ช่วง ดังตารางที่ 10

ช่วงใกล้อินฟราเรด (Near Infrared) มีความยาวคลื่นในช่วง 780 – 2500 นาโนเมตร แถบการดูดกลืนแสงเกิดจากโอเวอร์ โทน และ combination มักพบว่าช่วงการดูดกลืนแสงที่ได้ค่อนข้างต่ำ มีประโยชน์ในการวิเคราะห์หาปริมาณของกลุ่มฟังก์ชันนัล และศึกษาโครงสร้างโมเลกุล

ช่วงกลางอินฟราเรด (Middle Infrared) มีความยาวคลื่นในช่วง 2500 – 50000 นาโนเมตร สเปกตรัมที่ได้ค่อนข้างยุ่งยากเพราะโครงสร้างของโมเลกุลที่สมบูรณ์ การวิเคราะห์จึงต้องใช้วิธีเปรียบเทียบกับสเปกตรัมที่ทราบโครงสร้างแล้ว ใช้ในการวิเคราะห์กลุ่มฟังก์ชันนัล

ช่วงไกลอินฟราเรด (Far Infrared) มีความยาวคลื่นในช่วง $5 \times 10^4 - 10^6$ นาโนเมตร ช่วงนี้ไม่ค่อยที่จะได้ใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากสเปกตรัมไม่ได้เกิดจากการสั่นหรือหมุนของโมเลกุล แต่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการทรานสิชันที่เกี่ยวกับการหมุนของโมเลกุล (วลัยพร, 2548)



ภาพที่ 12 ลำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุ
ที่มา: AOAA Coastal Services Center (2008)

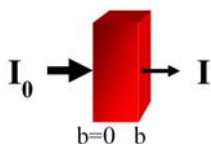
ตารางที่ 10 การแบ่งช่วงคลื่นย่านอินฟราเรด

ช่วงคลื่น	Characteristic transition	ความยาวคลื่น (nm)	เลขคลื่น (cm ⁻¹)
อินฟราเรดย่านใกล้ (Near IR, NIR)	Overtone combination	780 – 2500	12800 – 4000
อินฟราเรดย่านกลาง (Mid IR, MIR or Fundamental IR)	Fundamental vibrations	2500 – 5x10 ⁴	4000 – 200
อินฟราเรดย่านไกล (Far IR)	Rotations	5x10 ⁴ – 10 ⁶	200 – 10

ที่มา: Osborne *et al.* (1993)

สเปกโตรสโกปีมีกฎของการดูดกลืนแสงที่สำคัญที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กฎ ดังนี้คือ

กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) กล่าวว่า เมื่อแสงสีเดียวซึ่งก็คือ แสงความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน หรืออาจกล่าวได้ว่า ถ้าให้แสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางหนึ่งที่เป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ความเข้มของแสงจะลดลงขึ้นกับความหนาของตัวกลาง (b) ดังภาพที่ 13 ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังสมการ (6)



ภาพที่ 13 ความเข้มแสงของความยาวคลื่นเดียวก่อนและหลังผ่านตัวอย่างที่มีความหนา (b)

$$\log \frac{I_0}{I} = K_l b \quad (6)$$

เมื่อ I = ความเข้มของแสงความยาวคลื่นเดียวหลังผ่านตัวอย่าง

K_l = proportionality constant (เซนติเมตร⁻¹)

I_0 = ความเข้มของแสงความยาวคลื่นเดียวก่อนผ่านตัวอย่าง เมื่อ $b = 0$

b = ความหนาของตัวกลาง (เซนติเมตร)

โดยกฎของแลมเบิร์ตใช้ได้กับการดูดกลืนแสงที่สารมีเนื้อเดียว และไม่กระจายแสง สารนั้นอาจเป็นก๊าซ ของเหลว และของแข็งก็ได้ ส่วนมากในทางปริมาณมักเกี่ยวข้องกับสารละลาย ค่าคงที่ K_l ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และอุณหภูมิของสารที่วัดการดูดกลืนแสง

กฎของเบียร์ (Beer's law) กล่าวว่า เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรผันตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น หรือกล่าวได้ว่าสัดส่วนของลำแสงที่ผ่านสารละลายที่มีความ

หนาขนาดหนึ่งจะลดลงขึ้นกับค่าความเข้มข้นของแสงที่เพิ่มขึ้น (สุพรรณิกา, 2548) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังสมการ (7)

$$\log \frac{I_0}{I} = K_2 c \quad (7)$$

เมื่อ K_2 = proportionality constant (ลิตร/โมล)

c = ความเข้มข้นของสาร (โมล/ลิตร)

ดังนั้น ค่าคงที่ K_2 ขึ้นอยู่กับความเข้มของสาร ถ้ารวมกฎของของเบียร์และกฎแลมเบิร์ตเข้าด้วยกันจะได้กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) และค่า proportionality constant เปลี่ยนเป็นค่าใหม่เรียกว่า molar absorptivity (a) จะได้กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ดังในรูปสมการ (8)

$$\log \frac{I_0}{I} = abc \quad (8)$$

เมื่อ a = molar absorptivity (ลิตร/โมล.เซนติเมตร)

อัตราส่วนของ $\frac{I}{I_0}$ เรียกว่า Transmittance (T) และ $\log \frac{I}{I_0}$ เรียกว่า Absorbance

(A) จึงเขียนกฎของเบียร์-แลมเบิร์ตได้ใหม่ดังในรูปสมการ (9) (พิมล, 2524)

$$A = \log \frac{I_0}{I} = abc = \log \frac{1}{T} \quad (9)$$

เมื่อ T = Transmittance

A = Absorbance

6.1 การดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กย่านใกล้อินฟราเรด

เทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรดมีหลักการ คือ เมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปยังสารละลาย หรือวัตถุ แล้วสารเกิดการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง near infrared ทำให้โมเลกุลของสารเกิดการสั่นที่ความถี่สูง ในการสั่นของพันธะต่าง ๆ จะเกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละพันธะ รวมทั้งตำแหน่งของโมเลกุล และช่วงของการดูดกลืนแสงก็เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชันด้วย ดังนั้นเมื่อโมเลกุลได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตรงกับพันธะในโมเลกุลก็จะเกิดการสั่น และดูดกลืนรังสีไว้ ทำให้มีพลังงานมากกว่าปกติ จากเดิมที่โมเลกุลอยู่ในสถานะพื้น (ground vibration level) เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มมากขึ้นจะอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited vibration level) อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลกลับสู่สถานะพื้นก็จะปล่อยพลังงานที่รับเพิ่มเข้าไป ออกมาในรูปพลังงานความร้อน ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสง (Absorbance) เป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ซึ่งพลังงานของคลื่นแสงเมื่อผ่านเข้าไปในตัวอย่าง พลังงานจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง โดยความเข้มข้นของแสงที่ผ่านออกมาโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีนั้น สารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้จะมี H-atom เป็นองค์ประกอบ เช่น O-H พบในแป้ง น้ำ น้ำตาล N-H พบในโปรตีน C-H พบในน้ำมัน (วไลพร, 2548)

โมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์กับช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน เนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างของโมเลกุลต่างกัน นอกจากนั้นในแต่ละโมเลกุลจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นมากกว่า 1 ช่วง เช่น โมเลกุลของน้ำ (H_2O) ที่มีมากในผลิตภัณฑ์อาหารมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น 4 ช่วง คือ 760, 970, 1450 และ 1940 นาโนเมตร (Osborne *et al.*, 1993) ดังนั้นถ้าทำการทดสอบในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวจะสามารถหาความสัมพันธ์ของน้ำภายในตัวอย่างได้ นอกจากนั้นในผลิตภัณฑ์อาหารยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่สำคัญเช่น โปรตีน ไขมัน ในกรณีของน้ำตาล α - D-glucose ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่ง มีความยาวคลื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น 1198, 1269, 1371, 1440, 2275, 2364 และอีกมากมาย ดังตารางที่ 11

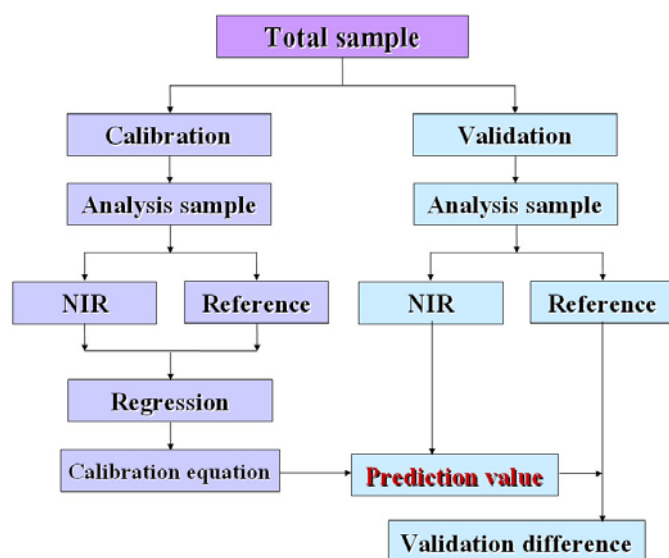
ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบภายในอาหารกับช่วงความยาวคลื่นย่านใกล้อินฟราเรด

องค์ประกอบ	โมเลกุลที่เกี่ยวข้อง	คลื่นย่านใกล้อินฟราเรด	
		ความยาวคลื่น (nm)	เลขคลื่น (cm^{-1})
น้ำ	-OH ⁻	1920 – 1950	5208 – 5128
		1400 – 1450	7142 – 6896
โปรตีน	-NH	2080 – 2220	4807 – 4504
		1560 – 1670	6410 – 5988
ไขมัน	Methylene, -CH, -CH ₂ , -CH ₃	2300 – 2350	4347 – 4255
		1680 – 1760	5952 – 5681
คาร์โบไฮเดรต	-CO, -CH combination	2060 – 2150	4854 – 4651

ที่มา: Osborne *et al* (1993)

6.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค Near Infrared (NIR)

การดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม NIR ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ การสร้างสมการที่ใช้ทำนาย (Calibration) และขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้นมา (Validation) แสดงดังภาพที่ 14 ในการทำ Calibration ก็เพื่อให้ได้สมการมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายค่าคุณลักษณะคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทราบ ต่อจากนั้นต้องมีการนำสมการมาตรฐานที่ได้จากการ Calibration มาตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำของสมการมาตรฐานในการทำนายค่าคุณภาพซึ่งขั้นตอนนี้เรียกว่าการทำ Validation หรือ Verification เพื่อทดสอบสมการที่ได้ว่ามีความเหมาะสม หรือแม่นยำหรือไม่ เมื่อได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือแล้วจึงนำสมการที่ได้ไปทำนายค่าคุณลักษณะที่ต้องการศึกษาจากสเปกตรัม NIR ที่ทำการวัดมาได้ (ธงชัย, 2545)



ภาพที่ 14 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัม NIR

ที่มา: ธงชัย (2545)

6.2.1 ขั้นตอนการทำ Calibration

ในขั้นตอนการทำ Calibration จำเป็นต้องมีการเก็บตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์อย่างเพียงพอ โดยที่การเตรียมตัวอย่งนั้นจะต้องมีลักษณะอย่างเดียวกับตัวอย่างที่จะนำเครื่อง NIR spectrometer ไปใช้ในงานวิเคราะห์คุณภาพต่อไปในอนาคต ดังนั้นเพื่อให้ผลวิเคราะห์ออกมาดีที่สุด จำเป็นต้องมีตัวอย่างสุ่มอย่างถูกต้อง และเพียงพอ และเป็นตัวแทนที่ดีของประชากร ขั้นตอนการทำ Calibration เมื่อเก็บรวบรวมข้อมูลมาแล้วแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ กำหนดตัวแปรอิสระ (Independent variables) และตัวแปรตาม (Dependent variable) การสร้างสมการ Calibration และเทคนิคอื่นๆ ในการแปลงข้อมูลสเปกตรัมก่อนการทำ Calibration

ตัวแปรอิสระที่นำมาใช้ในการสร้างสมการ คือ ค่าที่อ่านได้จากสเปกตรัม NIR เช่น ค่า $\log(1/T)$ ซึ่งค่าที่นำมาอาจจะเป็นค่าที่อ่านมาจากความยาวคลื่นหนึ่ง (Fixed wavelength) บางความยาวคลื่นที่เกี่ยวข้องกับสารที่จะทำการวิเคราะห์ (Selected wavelength) หรือมาจากทุกๆ ค่าของความยาวคลื่นที่ทำการศึกษา (Full spectrum) การนำค่าที่อ่านได้จากสเปกตรัมที่กล่าวมาอาจมีการนำเทคนิคทางคณิตศาสตร์ เช่น Derivation Fourier transform มาใช้ในการแปลงข้อมูลก่อน เพื่อให้ข้อมูลของตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามมากขึ้น สำหรับตัวแปรตาม

หมายถึง ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Reference laboratory methods เช่น ความชื้นในแป้งด้วยวิธี Oven drying method และการวิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยวิธี Soxhlet extraction เป็นต้น

การสร้างสมการ Calibration นั้นสิ่งสำคัญคือการหาตัวแปรอิสระที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่จะทำการวิเคราะห์คุณภาพ วิธีการสร้างสมการ Calibration แบบ Selective wavelength อาศัยหลัก และวิธีการทางสถิติมาช่วยในการสร้างสมการ เช่น Simple Linear Regression (SLR), Multiple Linear Regressions (MLR) เป็นต้น

Principal Component Regression (PCR) ลักษณะสเปกตรัมของคลื่นแสง NIR โดยทั่วไปจะมี peak ซ้อนทับกัน (overlapping) และ broad peak อยู่มาก ดังนั้นการสร้างสมการประเมินค่าทางเคมีที่พิจารณาเพียงความยาวคลื่นเดียว หรือความยาวคลื่นน้อย ๆ จะให้ผลการวิเคราะห์ได้ไม่ถูกต้องเท่ากับการพิจารณาทั้งสเปกตรัม (full spectrum method) หรือบางช่วงของสเปกตรัม การทำ PCR จะเริ่มจากการทำ Principal Component Analysis (PCA) กับข้อมูลที่เป็นตัวแปรอิสระที่ได้มาจากข้อมูลของสเปกตรัมเพื่อสร้างองค์ประกอบหรือตัวแปรใหม่ก่อนแล้วจึงนำค่าของตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตามที่ได้จากวิธีการทางเคมี (Reference methods) เพื่อสร้างสมการทำนายโดยใช้หลักของสถิติ MLR

Partial Least Square Regression (PLSR) เป็นเทคนิคในการลดจำนวนตัวแปรวิธีหนึ่ง โดยการจัดกลุ่มลดจำนวนตัวแปร การสร้างข้อมูลใหม่นั้นจะมีการนำข้อมูลตัวแปรตามเข้ามาร่วมในการสร้างตัวแปรใหม่ที่เรียกว่าคะแนนปัจจัย (Factor score) PLSR ไม่จำเป็นต้องมีการแยกไปทำขั้นตอน Regression อีกเนื่องจากค่าคะแนนปัจจัยที่สร้างขึ้นใหม่จะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอยู่แล้ว ในขณะที่วิธีการ Principal Component Regression (PCR) ค่าคะแนนปัจจัยที่สร้างขึ้นใหม่จะมีความเกี่ยวข้องกับข้อมูลตัวแปรเดิมในสเปกตรัมเท่านั้น จำเป็นต้องนำค่าคะแนนปัจจัยที่ได้ไปสร้างสมการ Regression อีกครั้งก่อนนำไปใช้ในการทำนายค่าตัวแปรตามต่อไป (ธงชัย, 2545)

วิธีทางสถิติเพื่อตรวจสอบสมการถดถอย (Regression) ที่ใช้ในการทำนายค่าทางเคมีเพื่อพิจารณาว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมหรือไม่ สามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient: R) ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการสร้างสมการ (Standard Error of Calibration: SEC) วิธีการคำนวณค่า R แสดงดังสูตร (10) โดยตัวแปรอิสระ X คือ ค่าการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่อ่านได้จากสเปกตรัมของตัวอย่าง ตัวแปรตาม Y คือ

ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี หรือ Reference Laboratory Method และ n คือ จำนวนตัวอย่าง และ SEC แสดงดังสูตร (11) โดย a คือ ค่าคงที่ ณ จุดตัดแกน Y เมื่อ X มีค่าเท่ากับ 0 ในขณะที่ b คือ ค่าคงที่ regression หรือค่าความชันของกราฟ

$$R = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{n}}{\sqrt{(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n})(\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n})}} \quad (10)$$

เมื่อ R = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

n = จำนวนตัวอย่าง

X = ค่าการดูดกลืนของความยาวคลื่นที่อ่านได้จากสเปกตรัมของตัวอย่าง

Y = ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี

$$SEC = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - a - bX_i)^2}}{n - 2} \quad (11)$$

เมื่อ SEC = ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการสร้างสมการ

a = ค่าคงที่ ณ จุดตัดแกน Y

b = ค่าคงที่ regression

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

6.2.2 ขั้นตอนการทำ Validation

หลังจากได้สมการ Calibration ที่เหมาะสมแล้วจะต้องมีการทวนสอบว่าสมการที่สร้างขึ้นมาจากชุดข้อมูลที่สุ่มมานั้นสามารถนำมาทำนายข้อมูลชุดอื่นที่เป็นประชากรกลุ่มเดียวกันได้หรือไม่ ตัวอย่างถูกนำมาวิเคราะห์คุณภาพด้วยการวัดค่าการคลาดเคลื่อนของความยาวคลื่นที่อ่านได้จากสเปกตรัมของตัวอย่าง (X) ไปแทนค่าสมการ Calibration ที่สร้างขึ้นจะได้สมการทำนายด้วย NIR และค่าที่ทำนายได้ (Y)

วิธีทางสถิติเพื่อตรวจสอบสมการถดถอย (Regression) ที่ใช้ในการทำนายค่าทางเคมีเพื่อพิจารณาว่าสมการที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมหรือไม่ สามารถพิจารณาได้จากค่า ค่าความผิดพลาดมาตรฐานจากการทำนาย (Standard Error of Prediction: SEP) และค่าความแตกต่าง (Bias) ระหว่างค่าที่ทำนายได้จากสมการที่สร้างขึ้น (Y) กับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริง (X) วิธีการคำนวณค่า SEP และ Bias แสดงดังสูตร (12) และ (13) ตามลำดับ (ธงชัย, 2545)

$$SEP = \sqrt{\frac{\sum (X - Y)^2 - \frac{(\sum (X - Y))^2}{n}}{(n - 1)}} \quad (12)$$

เมื่อ SEP = ค่าความผิดพลาดมาตรฐานจากการทำนาย

n = จำนวนตัวอย่าง

X = ค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริง

Y = ค่าที่ทำนายได้จากสมการที่สร้างขึ้น

$$Bias = \frac{\sum (X - Y)}{n} \quad (13)$$

เมื่อ $Bias$ = ค่าความแตกต่างเฉลี่ยของค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริงกับค่าที่ทำนายได้จากสมการที่สร้างขึ้น

นอกจากนี้ยังมีวิธีทางสถิติทดสอบความแม่นยำของสมการทำนายโดย t-test แสดงดังสูตร (14) ถ้าค่า t-test อยู่ในช่วง $-2 < t < 2$ แสดงว่าการวิเคราะห์ด้วยสมการทำนายไม่แตกต่างจากค่าจริงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

$$t - test = \frac{Bias \sqrt{n_v}}{SEP} \quad (14)$$

เมื่อ SEP = ค่าความผิดพลาดมาตรฐานจากการทำนาย

$Bias$ = ค่าความแตกต่างเฉลี่ยของค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริงกับค่าที่ทำนายได้จากสมการที่สร้างขึ้น

n_v = จำนวนตัวอย่างในกลุ่ม Validation

6.2.3 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดมาตรฐานจากการทำนาย (Fearn, 1996)

วิธีการที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความแตกต่างของค่าความผิดพลาดมาตรฐานจากการทำนาย (SEP) ของสมการทำนาย 2 สมการ (Naes *et al.*, 2004; Fearn, 1996) ด้วยการเปรียบเทียบค่า SEP คำนวณได้จากการหาค่า r (correlation coefficient) ของความผิดพลาดจากการทำนาย (prediction error) ระหว่างกลุ่มทำนาย 2 กลุ่ม แล้วนำ r แทนค่าในสูตร (15)

$$K = 1 + \frac{2(1 - r^2)t_{(N_p - 2), 0.025}^2}{N_p - 2} \quad (15)$$

เมื่อ r = ค่า correlation coefficient ของความผิดพลาดจากการทำนาย (prediction error) ระหว่างกลุ่มทำนาย 2 กลุ่ม

N_p = จำนวนตัวอย่างในกลุ่มทำนาย

$t_{(N_p - 2), 0.025}$ = ค่า t score ที่ระดับความเป็นอิสระ $N_p - 2$

จำนวนตัวอย่างในกลุ่มทำนายทั้งสองสมการต้องมีจำนวนที่เท่ากันถึงจะเปรียบเทียบกันได้ และ $t_{(N_p - 2), 0.025}$ คือ ค่า t score 2.5% ของ t-distribution ที่ $N_p - 2$ degree of freedom โดยทั่วไป $t_{(N_p - 2), 0.025}$ ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 2 เมื่อได้ K แล้วนำแทนค่าในสูตร (16)

$$L = \sqrt{\left[K + \sqrt{(K^2 - 1)} \right]} \quad (16)$$

และ

$$\frac{SEP_1}{SEP_2} \times \frac{1}{L} \quad (17)$$

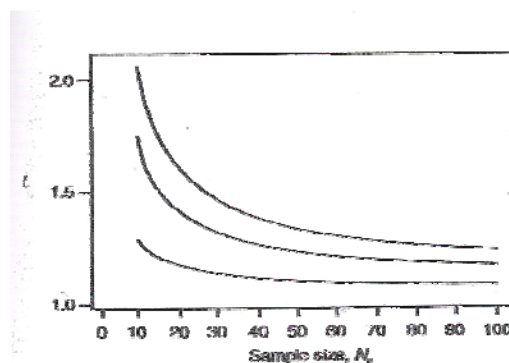
และ

$$\frac{SEP_1}{SEP_2} \times L \quad (18)$$

จากผลการคำนวณของสูตร (17) และสูตร (18) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ถ้าค่าคำนวณจากทั้ง 2 สมการมีค่า 1 อยู่ในช่วง แสดงว่าสมการทั้งสองมีค่า SEP ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างเช่น ผลการคำนวณของสูตร (17) มีค่าเท่ากับ 0.90 และผลการคำนวณของสูตร (18) มีค่าเท่ากับ 1.10 จะเห็นว่าผลของทั้ง 2 สูตรมีค่า 1 อยู่ในช่วง ดังนั้นจากการเปรียบเทียบค่า SEP ของสมการทำนาย 2 สมการ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตัวอย่างที่สองการเปรียบเทียบค่า SEP ของสมการทำนาย 2 สมการ ที่มีจำนวนตัวอย่างในกลุ่มทำนายเท่ากับ 30 ตัวอย่าง มีค่า r^2 เท่ากับ 0.5 จากภาพที่ 15 (กราฟเส้นกลาง) ได้ค่า L เท่ากับ 1.31 ดังนั้นถ้าต้องการให้สมการทั้ง 2 สมการ ไม่แตกต่างกันค่าสมการโดย $\frac{SEP_1}{SEP_2} \times \frac{1}{L} < 1$

โดยที่ $\frac{SEP_1}{SEP_2} < 1.3$ และค่าสมการ $\frac{SEP_1}{SEP_2} \times L \geq 1$ โดยที่ $\frac{SEP_1}{SEP_2} \geq 1/1.3$



ภาพที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า L กับ จำนวนตัวอย่างในกลุ่มทำนาย N_p กำหนดค่า r เท่ากับ 0, 0.5 และ 0.9 ตามลำดับ โดยกราฟทั้ง 3 เส้น เรียงลำดับจากเส้นบนลงเส้นล่าง

ที่มา: Neas *et al.* (2004)

6.2.4 การหาค่า Standard error of the laboratory (SEL)

ค่า SEL เป็นค่าที่แสดงความแม่นยำของผู้ทดลอง และวิธีวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง มีสูตรที่สำคัญ ได้แก่ การหาค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่างแสดงดังสูตร (19) (Jerome and Howard, 2006) และการหาค่า SEL แสดงดังสูตร (20)

$$\bar{x}_i = \sum_{j=1}^r x_{ij} \quad (19)$$

เมื่อ $\bar{x}_i$ = ค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่าง
 x_{ij} = ค่าแต่ละซ้ำของแต่ละตัวอย่าง

$$SEL = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n(r-1)}} \quad (20)$$

เมื่อ SEL = ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในผู้ปฏิบัติงาน และวิธีการทดลอง
 n = จำนวนตัวอย่าง
 r = จำนวนซ้ำ

ค่า SEL เป็นค่าที่แสดงความแม่นยำของผู้ปฏิบัติงาน และวิธีวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง โดยทั่วไปสามารถนำค่า SEP ของสมการทำนายเปรียบเทียบกับค่า SEL ของวิธีทางเคมี เพื่อประเมินความแม่นยำของวิธี NIR เช่น สมการทำนายที่ได้จะมีความแม่นยำดีมาก ถ้าสมการทำนายมีค่า SEP เท่ากับ 1 ถึง 1.5 เท่าของค่า SEL นอกจากนี้ยังพบว่าสมการทำนายที่ได้จะมีความแม่นยำต่ำ ถ้าสมการทำนายมีค่า SEP เท่ากับ 5 เท่าของค่า SEL ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ระดับของความแม่นยำของระบบตามความสัมพันธ์ของค่า SEP กับ SEL

SEP	Level precision
SEP = (1 – 1.5) SEL	Excellent precision
SEP = (2 – 3) SEL	Good precision
SEP = 4 SEL	Medium precision
SEP = 5 SEL	Low precision

ที่มา: Urbano *et al.* (2004)

7. การใช้ประโยชน์ NIR ในประเทศไทย

จากการสำรวจ (วารุณี, 2548) พบว่าการใช้ประโยชน์ของเทคนิค NIR ในประเทศไทย เริ่มมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นกว่า 10 กว่าปีแล้ว ปัจจุบันมีเครื่องนี้ขายผ่านตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทย รวมทั้งสิ้น 179 เครื่อง ส่วนใหญ่จะใช้งานวิเคราะห์ด้านปริมาณในลักษณะของ rapid analytical routine method กว่าร้อยละ 80 ของการใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกันอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร ดังตารางที่ 13 การใช้ประโยชน์ทางด้านเทคนิค NIRS ก่อนข้างแพร่หลายมากขึ้นในอุตสาหกรรม อันเป็นผลมาจากความต้องการของอุตสาหกรรมที่ต้องประหยัดเวลา ลดการใช้สารเคมี และต้นทุนในระยะยาว ในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิต ตั้งแต่วัตถุดิบจนถึงผลิตภัณฑ์สุดท้าย ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และประสิทธิผล

8. การประยุกต์ใช้ NIR ในการวิเคราะห์ปริมาณอมิโลส และโปรตีนในข้าว

Delwiche *et al.* (1995) ได้สร้างสมการทำนายปริมาณอมิโลส และ โปรตีนของข้าวที่ผ่านการบดด้วยเทคนิค NIR แบบการสะท้อนกลับของแสง ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2498 นาโนเมตร โดยใช้วิธีทางสถิติ Partial Least Squares Regression (PLSR) ได้สมการอมิโลส และ โปรตีนมีค่า R^2 เท่ากับ 0.95 และ 0.98 ตามลำดับ มีค่า SEP เท่ากับร้อยละ 1.0 และ 0.10ตามลำดับ และ Delwiche *et al.* (1996) ได้สร้างสมการทำนายปริมาณอมิโลส และ โปรตีนของข้าวแบบ Whole grain ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 – 2498 นาโนเมตร พบว่าการหาปริมาณอมิโลส และ โปรตีนของข้าวมีค่า R^2 เท่ากับ 0.89 และ 0.97 ตามลำดับ มีค่า SEP เท่ากับร้อยละ 1.3 และ 0.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 13 การใช้ประโยชน์เทคนิค NIR ในประเทศไทย

ชนิดอุตสาหกรรม	ชนิดของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์	องค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์
มันสำปะหลัง	มันแผ่น และมันอัดเม็ด	ความชื้น, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรต, เส้นใย, จี๊เล้า
อาหารสัตว์ และสัตว์น้ำ	วัตถุดิบ (ข้าวโพด, ข้าวสาลี, ปลาป่น, กระดูกอ่อน, ถั่วเหลืองป่น, ปลาขี้ขาว และผลิตภัณฑ์สำเร็จ)	ความชื้น, โปรตีน, ไขมัน, เส้นใย, จี๊เล้า
แป้ง (ข้าวสาลี และอื่นๆ)	วัตถุดิบ (สินค้านำเข้า) และผลิตภัณฑ์สำเร็จ	ความชื้น, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรต, เส้นใย, จี๊เล้า, กลูเต็น
นม และผลิตภัณฑ์นม	น้ำมันดิบ, นมผง, นมหวาน	ความชื้น, โปรตีน, คาร์โบไฮเดรต, ไขมัน
น้ำมันพืช	วัตถุดิบ (ถั่วเหลือง, รำ, ข้าว)	ความชื้น, โปรตีน, น้ำมัน, กรดไขมันอิสระ

ที่มา: วารุณี (2548)

Shimizu *et al.* (1998) ได้ทำการพัฒนาเทคนิคการตรวจสอบคุณภาพข้าวในอุตสาหกรรมข้าวญี่ปุ่น โดยการตรวจสอบปริมาณอมิโลส และองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ ความชื้นและโปรตีน ใน Whole grain ด้วยเครื่อง NIR แบบการส่องผ่านของแสง (Transmittance) ในช่วงความยาวคลื่น 825 – 1075 นาโนเมตร พบว่าสมการที่สร้างขึ้นด้วยวิธี PLSR เพื่อใช้ในการทำนายปริมาณอมิโลสมีค่า R เท่ากับร้อยละ 0.84 และมีค่า SEP เท่ากับร้อยละ 0.78 นอกจากนี้ยังทำการตรวจสอบคุณภาพข้าวทางกายภาพอีกด้วย

Shimizu *et al.* (1999) ได้ทำการตรวจสอบปริมาณอมิโลสในข้าวญี่ปุ่นที่ปริมาณอมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 13.2 – 20.7 ด้วยเครื่อง NIR แบบการส่องผ่านของแสง (Transmittance) ที่ช่วงความยาวคลื่น 833 – 1050 นาโนเมตร พบว่าสมการที่สร้างขึ้นด้วยวิธี PLSR เพื่อใช้ในการทำนายปริมาณอมิโลสมีค่า R² เท่ากับ 0.74 และมีค่า SEP เท่ากับร้อยละ 1.25

ณัฐกานต์ (2547) ศึกษาการดูดกลืนแสงที่ได้จากการวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIR ที่ช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร แบบ Whole grain ในระบบการสะท้อนกลับของแสง

(Reflectance) พบว่าสเปกตรัมที่ได้มีความสัมพันธ์กับค่าคุณภาพทางเคมี ได้แก่ ปริมาณอมิโนสเปรียบเทียบกับปริมาณสตาร์ช ปริมาณสตาร์ช ปริมาณโปรตีน และปริมาณความชื้น โดยค่าคุณภาพทางเคมีที่กล่าวมาจะมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างกัน ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของข้าวไทยกับช่วงอินฟราเรดย่านใกล้

องค์ประกอบ	โมเลกุลที่เกี่ยวข้อง	ช่วงที่เกี่ยวข้อง
		ความยาวคลื่น (nm)
อมิโนส	C-H	1260, 2080 และ 2270
สตาร์ช	C-H และ โมเลกุลสตาร์ช	1460, 1830
โปรตีน	N-H และ O=C-NH	1720, 2100
ความชื้น	O-H และ โมเลกุลสตาร์ช	1460, 1910

ที่มา: ญัฐกานต์ (2547)

สมการที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายปริมาณอมิโนสเปรียบเทียบกับปริมาณสตาร์ช ปริมาณสตาร์ช ปริมาณโปรตีน และปริมาณความชื้นของข้าว ด้วยวิธี PLSR สามารถสร้างสมการที่ใช้ในการทำนายค่าคุณภาพดังกล่าวได้แม่นยำกว่าวิธีทางสถิติ Simple Linear Regression (SLR) และ Multiple Linear Regression (MLR) สำหรับสมการที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายปริมาณอมิโนสเปรียบเทียบกับปริมาณสตาร์ช ปริมาณสตาร์ช ปริมาณโปรตีน และปริมาณความชื้นของข้าว ด้วยวิธี PLSR มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.989, 0.954, 0.896 และ 0.741 ตามลำดับ และมีค่า SEP เท่ากับร้อยละ 1.221, 0.619, 0.138 และ 0.252 ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังสร้างสมการเพื่อแบ่งกลุ่มข้าวขาว โดยกำหนดกลุ่มข้าวตามปริมาณอมิโลส (งามชื่น, 2536) ซึ่งสามารถแบ่งข้าวทั้ง 6 พันธุ์ ที่ทำการศึกษาออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มข้าวที่มีปริมาณอมิโลสต่ำ (ปริมาณอมิโลสร้อยละ 10 – 20) ได้แก่ ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์ปทุมธานี 1, กลุ่มข้าวที่มีปริมาณอมิโลส ปานกลาง (ปริมาณอมิโลสร้อยละ 20 – 25) ได้แก่ ข้าวพันธุ์ กข 23 และพันธุ์สุพรรณบุรี 60 และกลุ่มข้าวที่มีปริมาณอมิโลสสูง (ปริมาณอมิโลสร้อยละ 25 – 34) ได้แก่ ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 และพันธุ์สุพรรณบุรี 90 ทำการสร้างสมการแบ่งตามกลุ่มข้าวขาวตามปริมาณอมิโลส ด้วยวิธีทางสถิติ Multiple Discriminant Analysis (MDA) พบว่า สมการที่สร้างขึ้นจากค่าการดูดกลืนแสงที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับ 2 สามารถนำมาแบ่งกลุ่มข้าวของไทยได้อย่างถูกต้องและมีความแม่นยำในการทำนายร้อยละ 93.80

Thamakorn *et al.* (2006) สร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนายปริมาณอมิโลสในข้าวซึ่งแบ่งกลุ่มข้าวตามปริมาณอมิโลส (งามชื่น, 2536) ด้วยการตรวจหาปริมาณอมิโลสด้วยวิธีวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสที่ปรากฏ (Apparent amylose content) ในข้าวสารไทย 80 พันธุ์ จำนวน 257 ตัวอย่าง พบว่าปริมาณ อมิโลสในข้าวสารไทยอยู่ในช่วงร้อยละ 12.42 – 32.88 ทำการวัดค่าสเปกตรัมด้วยเครื่อง FT – NIR Spectrometer NIRLab N-200 (Buchi, Flawil, Switzerland) แบบ Whole grain ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร ระบบการวัดแบบการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance) วิเคราะห์ด้วยวิธี PLSR สมการที่สร้างขึ้นจากค่าการดูดกลืนแสงที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับ 2 ได้สมการอมิโลสมีค่า F เท่ากับ 11 แพกเตอร์ และค่าสถิติในการทำนายดังนี้ คือ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.934 มีค่า SEP และ Bias เท่ากับร้อยละ 1.48 และ 0.082 ตามลำดับ สามารถนำมาแบ่งกลุ่มข้าวของไทยได้อย่างถูกต้อง และมีความแม่นยำ

ศิราพร และคณะ (2550ก, 2550ข) สร้างสมการเพื่อใช้ทำนายปริมาณโปรตีน และอมิโลสในข้าวสารไทย ในข้าว 5 พันธุ์ ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105 กข 15 ปทุมธานี 1 หอมสุพรรณบุรี และชัยนาท 1 ทำการวัดค่าสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIRSystems 6500 ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร และนำมาวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ การหาปริมาณโปรตีนด้วยวิธี Dumas combustion จำนวนตัวอย่างข้าวทั้งหมด 119 ตัวอย่าง ปริมาณโปรตีนที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 6.64 – 9.03 นำค่าที่ได้มาสร้างสมการทำนายโดยวิเคราะห์ด้วยวิธี PLSR พบว่า R มีค่าเท่ากับ 0.95 มีค่า SEC, SEP และ RPD เท่ากับร้อยละ 0.15, 0.19 และ 2.52 ตามลำดับ และการหาปริมาณอมิโลสด้วยวิธีวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสที่ปรากฏ (Apparent amylose content) อยู่ในช่วงร้อยละ 13.88 – 33.09 โดยสมการทำนายปริมาณอมิโลสมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.96 ค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการสร้างสมการ (SEC) เท่ากับร้อยละ 1.69 ค่าความผิดพลาดมาตรฐานจากการทำนาย (SEP) เท่ากับ

ร้อยละ 1.92 และค่า Bias เท่ากับร้อยละ -0.05 สมการทำนายปริมาณมิโลส และสมการทำนายปริมาณโปรตีนทั้ง 2 สมการสร้างขึ้นจากค่าการดูดกลืนแสงที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับอนุพันธ์อันดับ 2 และ MSC

Rittiron *et al.* (2004) ได้นำเทคนิค NIR มาใช้กับข้าวกล้อง เพื่อการคัดเลือกเมล็ดในกระบวนการปรับปรุงพันธุ์ และ Wu *et al.* (2004) ได้สร้างสมการทำนายปริมาณมิโลสของข้าวสารที่ละเมียดด้วยเครื่อง NIR แบบการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance) ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร สำหรับปริมาณมิโลส พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.76 และ ค่า SEP มีค่าเท่ากับ 5.13% นอกจากนี้ การวิเคราะห์ที่ละเมียดทำให้ทราบลักษณะการกระจายของคุณสมบัติที่สนใจ เช่น Rittiron *et al.* (2005) ได้เสนอวิธีการทดสอบการปลอมปนของข้าวสารพันธุ์ Akitakonachi ในพันธุ์ Koshihikari โดยอาศัยการทดสอบการแจกแจงปกติของค่าโปรตีนในกลุ่มตัวอย่างข้าวที่สุ่ม

Bangweak (2007) สร้างสมการเพื่อใช้ทำนายปริมาณโปรตีนในข้าวกล้องที่ละเมียด (Single-kernel) โดยการหาปริมาณโปรตีน แล้วทำการวัดค่าสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIR Systems Model 6500 ระบบการวัดแบบการส่องผ่านของแสง (Transmittance) ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาสร้างสมการทำนายโดยวิเคราะห์ด้วยวิธี PLSR มีค่า SEP เท่ากับร้อยละ 0.58 สมการที่สร้างขึ้นจากค่าการดูดกลืนแสงที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีอนุพันธ์อันดับ 2

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ตัวอย่างข้าว

ตัวอย่างข้าวที่ใช้ในการศึกษาจำนวน 4 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พันธุ์ปทุมธานี 1 พันธุ์ กข 23 พันธุ์ชัยนาท 1 ที่ปลูกในปี 2550 และพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่ปลูกในปี 2549 จากศูนย์วิจัยข้าวสุรินทร์ ศูนย์วิจัยข้าวสุพรรณบุรี ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี และศูนย์วิจัยข้าวชัยนาท ตามลำดับ ตัวอย่างที่นำมาเป็นข้าวเปลือกจำนวนพันธุ์ละ 2 กิโลกรัม

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างข้าวสารไทย

- 2.1 เครื่องกะเทาะข้าวแบบลูกยาง, ห้างหุ้นส่วนจำกัด เจ็กเซ่งฮวด
- 2.2 เครื่องขัดขาว รุ่น K – 1, ห้างหุ้นส่วนจำกัด เจ็กเซ่งฮวด

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสเปกตรัมข้าวสารไทย

- 3.1 เครื่อง NIR Spectrometer (BRAN+LUEBBE รุ่น InfraAlyzer 500), Germany
- 3.2 เซลล์ใส่ตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ด เส้นผ่านศูนย์กลาง 84 มิลลิเมตร
- 3.3 คีมหนีบ (Forceps)

4. อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

- 4.1 เครื่อง Combustion Analyzer รุ่น Leco FP – 528 ยี่ห้อ Leco, USA
- 4.2 Aluminium Foil ยี่ห้อ Leco, USA
- 4.3 Rice flour calibration sample for CHNS ยี่ห้อ Leco, USA
- 4.4 Ethylenediaminetetraacetic acid: EDTA (9.59% Nitrogen) ยี่ห้อ Leco, USA
- 4.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (MC 1 Analytic AC 210S sartorius)

5. อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณมิลอส

5.1 เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ รุ่น T 50 (METTLER TOLEDO), Switzerland

5.2 เครื่องบดข้าวสาร (Cyclone sample mill Udy Corporation Colorado, Model. 3010-19),
USA

5.3 เครื่อง Shaking Waterbath (JERUSALEM TUTTNAUER Co.)

5.4 เครื่องเขย่าสาร (EYEL4 MULTI SHAKER MMS), บริษัท TOKYO RIKAKIKAI.

5.5 เครื่อง Vortex (Touch Mixer Model 232), Fisher Scientific.

5.6 Amylose from potatoes ยี่ห้อ Fluka, BioChemika, UK.

5.7 Amylopectin from potatoes ยี่ห้อ Fluka, BioChemika, UK.

5.8 สารโพแทสเซียมไอโอเดต (potassium iodate: KIO_3) ยี่ห้อ UNIVAR, บริษัท Ajax
Finechem Pty, New Zealand.

5.9 สารโพแทสเซียมไอโอไดด์ (potassium iodide: KI) ยี่ห้อ UNIVAR, บริษัท Ajax
Finechem Pty, New Zealand.

5.10 สารโซเดียมไทโอซัลเฟต (sodium thiosulfate: $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) ยี่ห้อ UNIVAR, บริษัท
Ajax Finechem Pty, New Zealand.

5.11 สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium chloride: NaOH) ยี่ห้อ UNIVAR, บริษัท Ajax
Finechem Pty, New Zealand.

5.12 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid: HCl) ยี่ห้อ LAB-SCANANALYTICAL
SCIENCES บริษัท Labscan Asia.

5.13 สารบิวทานอล (1 – butanol: $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$) ยี่ห้อ QreCTM Grade AR.

5.14 สารปิโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether) ยี่ห้อ B.T.Baker, USA.

6. เครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

6.1 โปรแกรม The Unscrambler ® 7.01 (Camo AS, Norway)

6.2 โปรแกรม Microsoft Office Excel 2003

วิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่างข้าวสารไทย

พันธุ์ข้าวที่ใช้ในการศึกษาจำนวน 4 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พันธุ์ปทุมธานี 1 พันธุ์ กข 23 พันธุ์ชัยนาท 1 ที่ปลูกในปี 2550 และพันธุ์ปทุมธานี 1 ที่ปลูกในปี 2549 จากศูนย์วิจัยข้าวสุรินทร์ ศูนย์วิจัยข้าวสุพรรณบุรี ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี และศูนย์วิจัยข้าวชัยนาท ตามลำดับ นำตัวอย่างข้าวเปลือกมากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะข้าวแบบลูกยาง และขัดขาวเป็นข้าวสาร ด้วยเครื่องขัดขาว รุ่น K – 1 ชนิดแกนขัดเป็นโลหะ แบบปรับน้ำหนักถ่วงไม่ได้โดยควบคุมระดับการขัดสี (Degree of milling) ที่ร้อยละ 14 ตามระดับการขัดสีที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของข้าวเปลือก (นิทัศน์ และคณะ, 2548) ซึ่งเป็นปริมาณรำที่ขัดออกไปเทียบกับน้ำหนักข้าวกล้องก่อนขัดสี

2. การวัดสเปกตรัมข้าวสารไทย

สเปกตรัมของข้าวสารไทยจะถูกวัดด้วยเครื่อง NIR Spectrometer (BRAN+LUEBBE รุ่น InfraAlyzer 500) ดังรูปที่ 16 (a) โดยระบบการวัดแบบการสะท้อนกลับของแสง (Reflectance) ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร ตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ดจะใส่ในเซลล์ใส่ตัวอย่าง จากนั้นนำเซลล์ใส่ตัวอย่างใส่ในลิ้นชักของเครื่อง NIR Spectrometer ดังรูปที่ 16 (b) เพื่อทำการวัดสเปกตรัมข้าวสารไทยทีละเมล็ดต่อไป

3. การพัฒนาเซลล์ใส่ตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ด

เนื่องจากไม่มีเซลล์ใส่ตัวอย่าง สำหรับการวัดการสเปกตรัมของข้าวสารหนึ่งเมล็ดด้วยเครื่อง NIR Spectrometer (BRAN+LUEBBE รุ่น InfraAlyzer 500) จึงได้ทำการออกแบบ และสร้างเซลล์ใส่ตัวอย่าง ด้วยวัสดุอะลูมิเนียมอัลลอยด์ (Aluminium Alloy Round Series: 2024) ซึ่งมีดัชนีการ

สะท้อนแสงสูง โดยมีขนาดของเซลล์ใส่ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 17 ส่วนที่สำคัญที่สุดของเซลล์ คือ ร่องที่ใส่เมล็ดข้าวสารหนึ่งเมล็ด เป็นวงรีที่มีขนาดความกว้าง 4 มิลลิเมตร ความยาว 9 มิลลิเมตร และความลึก 2 มิลลิเมตร ซึ่งออกแบบโดยเฉพาะสำหรับข้าวสารไทย มีด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบ ทาสีดำด้านบน และแบบไม่ทาสีดำ

4. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

การหาปริมาณโปรตีนใช้วิธี Combustion Method ตามวิธีการวิเคราะห์มาตรฐาน American Association of Cereal Chemists Method 46 – 30 (AACC; 1999) โดยใช้เครื่อง Combustion Analyzer รุ่น Leco FP – 528 เครื่องจะแสดงค่าปริมาณไนโตรเจนที่วัดได้เป็น % N (Nitrogen) และคำนวณหาปริมาณโปรตีนจากสูตร %Crude Protein

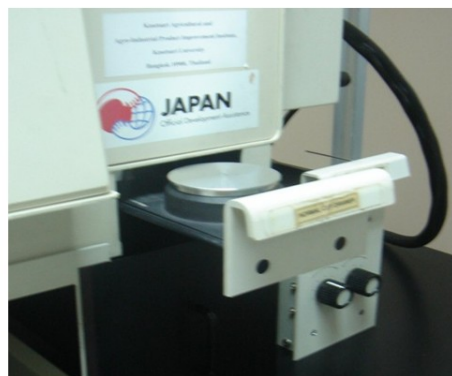
5. การวิเคราะห์ปริมาณอมิโนส

การวิเคราะห์หาปริมาณอมิโนสของข้าวสารไทย ด้วยวิธี Iodine titration (Tan *et al.*, 1999; Tain *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2007) มีหลักการ คือ หาค่าปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO_3) ที่โพลิไอออน I_3^- เข้าไปอยู่ในโพรงกลางเกลียวอมิโนส แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตร 0.00157 M KIO_3 กับร้อยละปริมาณอมิโนสแสดงในรูปแบบของกราฟมาตรฐาน

ขั้นตอนที่สำคัญในการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโนส ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนการไทเทรต นำตัวอย่างข้าวสารที่ละเมล็ดซึ่งมีค่าเฉลี่ย 0.02 กรัม เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 N (NaOH) 2 มิลลิลิตร แล้วทำการเจลาติไนเซชันที่อุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง โดยใช้ Shaking Waterbath เติมน้ำกลั่น 8 มิลลิลิตร ต้มตัวอย่างที่เตรียมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที แล้วทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นสกัดไขมันด้วยสารสกัดผสมระหว่าง บิวทานอลกับปิโตรเลียมอีเทอร์ในอัตราส่วน 1:3 เติมน้ำสกัด 5 มิลลิลิตร แล้วเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 15 นาที ทำ 2 ครั้ง ดังนั้นจะเหลือสารตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ตัวอย่างที่สกัดไขมันแล้ว ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส เพื่อรอขั้นตอนการเตรียมสารผสม โดยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนการไทเทรตแสดงดังแผนผังนี้

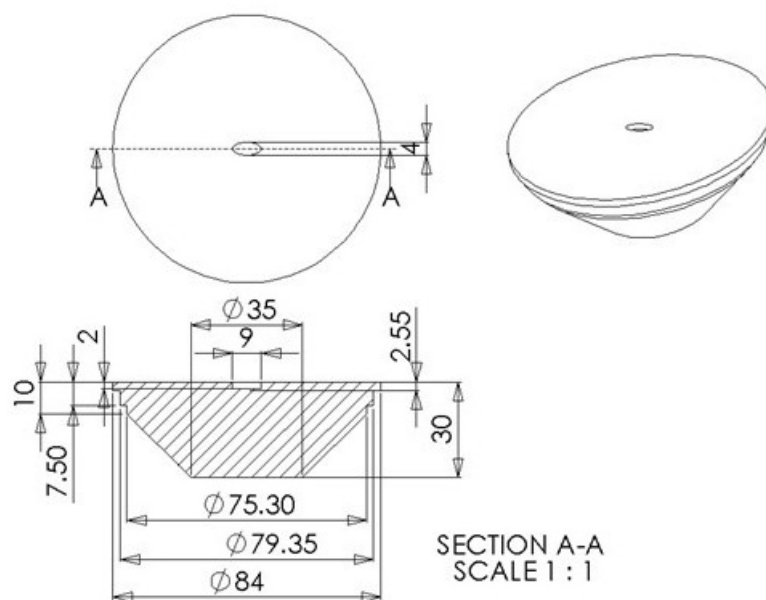


(a)



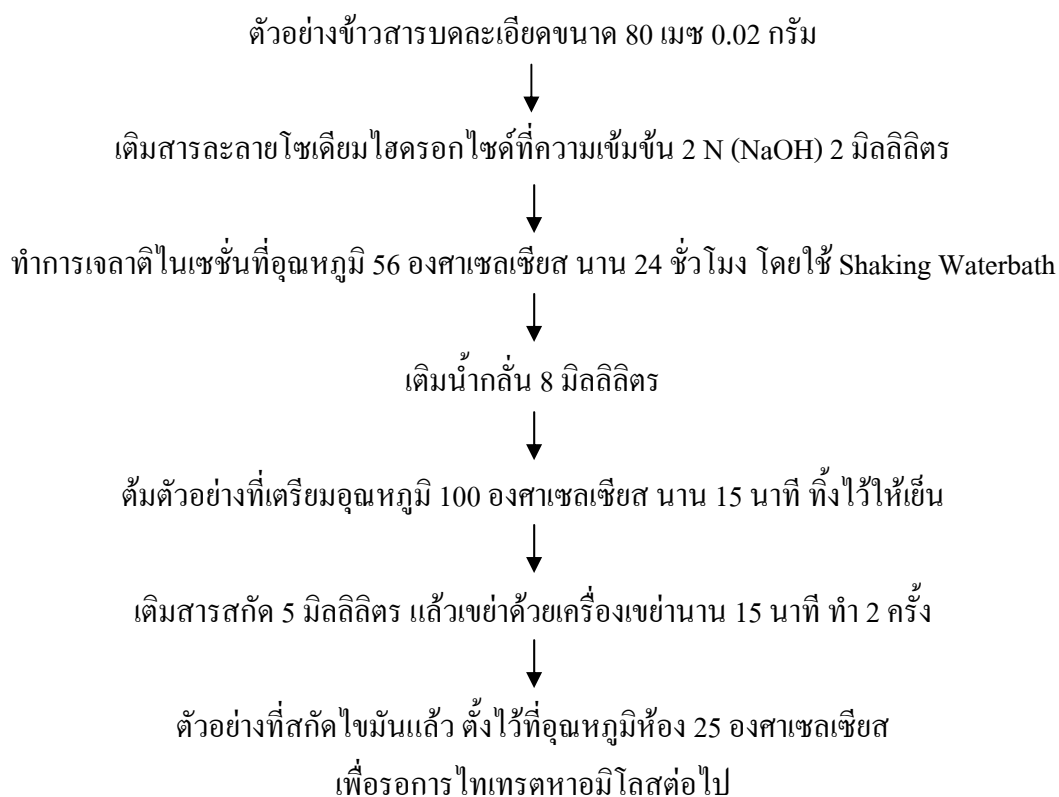
(b)

ภาพที่ 16 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสเปกตรัมข้าวสารไทย (a) เครื่อง NIR Spectrometer (BRAN+LUEBBE รุ่น InfraAlyzer 500) และ (b) ลิ้นชัก และเซลล์ใส่ตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ด



ภาพที่ 17 ภาพเขียนแบบบอกขนาดของเซลล์ใส่ตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ดที่พัฒนาขึ้น

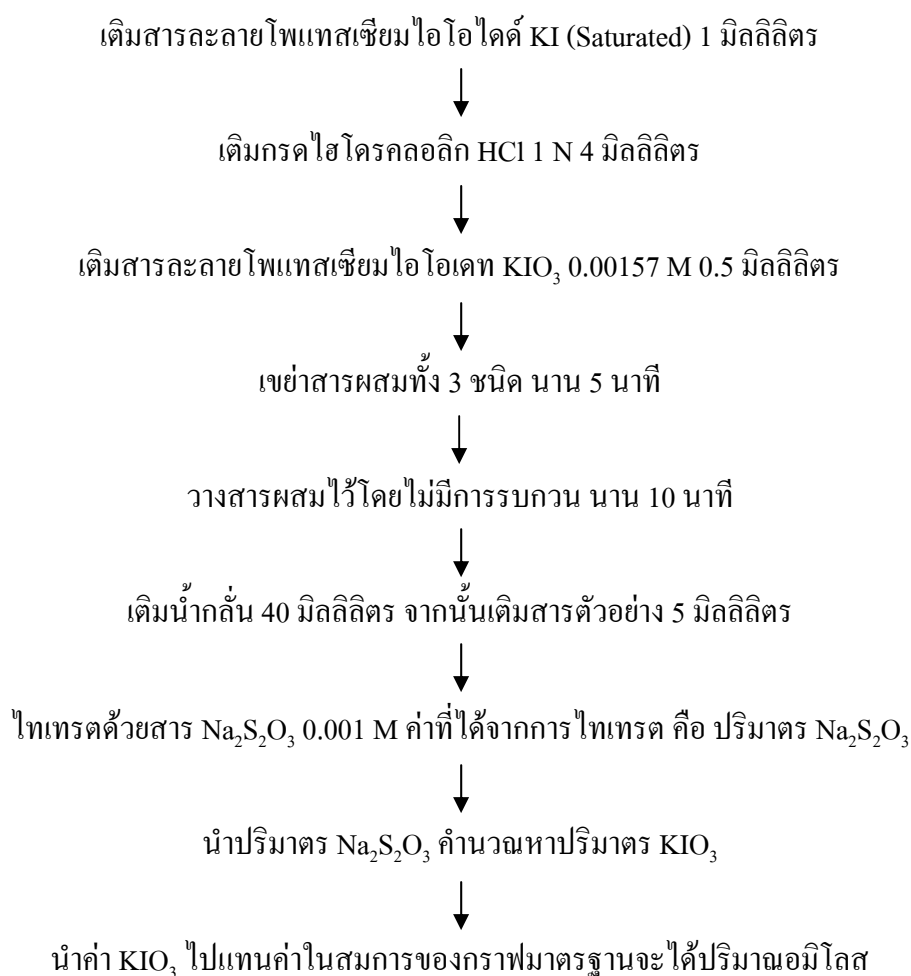
แผนผังขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนการไทเทรต



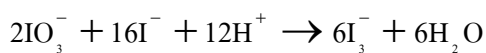
โดยในการทดลองจะใช้ตัวอย่างข้าวสารบดละเอียดสำหรับการทดลองเพื่อหาค่าความผิดพลาดมาตรฐานในผู้ปฏิบัติงาน และวิธีทดลอง หรือ Standard error of laboratory (SEL) แต่สำหรับการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการนั้นจะใช้ตัวอย่างข้าวสารที่ละเอียด

ขั้นตอนการเตรียมสารผสม และไทเทรตเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสต่อไป ขั้นตอนการไทเทรตต้องเตรียมสารผสมด้วยการเติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ KI (Saturated) 1 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริก HCl 1 N 4 มิลลิลิตร และเติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดต KIO_3 0.00157 M 0.5 มิลลิลิตร เขย่าสารผสมทิ้ง 3 นาที นาน 5 นาที วางสารผสมไว้โดยไม่มีการรบกวน นาน 10 นาที เติมน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร เติมสารตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร สารผสมตัวอย่างทั้งหมดประมาณ 50 มิลลิลิตร ไทเทรตด้วยสาร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.001 M คำนวณหาค่าปริมาตรของ KIO_3 ไปแทนค่าในสมการของกราฟมาตรฐานจะได้ปริมาณอมิโลส ด้วยเครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ รุ่น T 50 (METTLER TOLEDO) โดยกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร 0.00157M KIO_3 กับร้อยละปริมาณอมิโลส (%AC) ซึ่งเตรียมจากสาร Amylose from potatoes และ Amylopectin from potatoes ยี่ห้อ Fluka โดยขั้นตอนแสดงดังแผนผังนี้

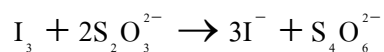
แผนผังขั้นตอนการเตรียมสารผสม และไทเทรต



การวิเคราะห์หาปริมาณมิโอสด้วยวิธี Iodine titration ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นของการไทเทรตเป็นดังนี้ (M526 METTER TOLEDO, 2008)



และ



ค่าที่ได้จากการไทเทรต คือ ค่าปริมาตรของ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ หรือ $V(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3)$ ในหน่วย มิลลิลิตร
แล้วนำค่าปริมาตรไป คำนวณหาจำนวน $\text{mole}(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3)$

$$2 \times \text{mole}(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3) = \frac{V(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3) \times 0.001\text{M}}{1000}$$

นำค่า $\text{mole}(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3)$ ที่ได้ไปหาค่า $\text{mole}(\text{KIO}_3)$

$$6 \times \text{mole}(\text{KIO}_3) = \text{mole}(\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3)$$

นำค่า $\text{mole}(\text{KIO}_3)$ ที่ได้ไปหาค่าปริมาตรของ KIO_3 หรือ $V(\text{KIO}_3)$

$$V(\text{KIO}_3) = \frac{\text{mole}(\text{KIO}_3) \times 1000}{0.00157\text{M}}$$

จากนั้นนำค่าปริมาตรของ KIO_3 หรือ $V(\text{KIO}_3)$ ที่ได้จากการคำนวณไปลบออกจากปริมาตรที่เติม 0.5 มิลลิลิตรในขั้นตอนการเตรียมสารผสม และไทเทรต จะได้ปริมาตรของ 0.00157 M KIO_3 แล้วนำไปอ่านค่าปริมาณมิโอสจากกราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้น

$$V(0.00157\text{M KIO}_3) = 0.5 - V(\text{KIO}_3)$$

6. การสร้างสมการทำนาย

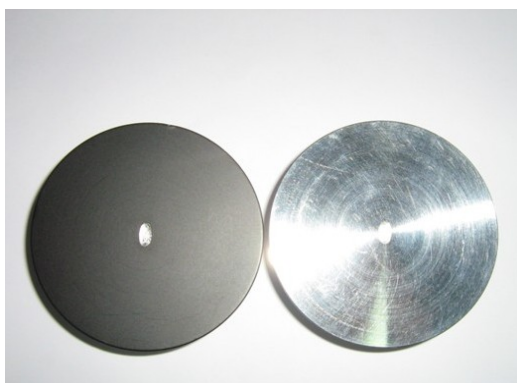
เมื่อได้สเปกตรัมและค่าปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของข้าวสารแต่ละเมล็ดแล้วสร้างสมการทำนายด้วยวิธี Partial Least Square Regression (PLSR) โดยใช้โปรแกรม The Unscrambler ® 7.01 (Camo AS, Norway) ซึ่งก่อนทำการวิเคราะห์ข้อมูลต้องทำการปรับแต่งสเปกตรัมเพื่อลดสัญญาณรบกวน (noise), กำจัด baseline shift และแยกแถบสเปกตรัมที่ซ้อนทับออกจากกัน วิธีปรับแต่งสเปกตรัมที่ใช้ ได้แก่ วิธี Smoothing, Multiplicative Scatter Correction (MSC), Derivative, Baseline และ Normalize

ผลและวิจารณ์

ผล

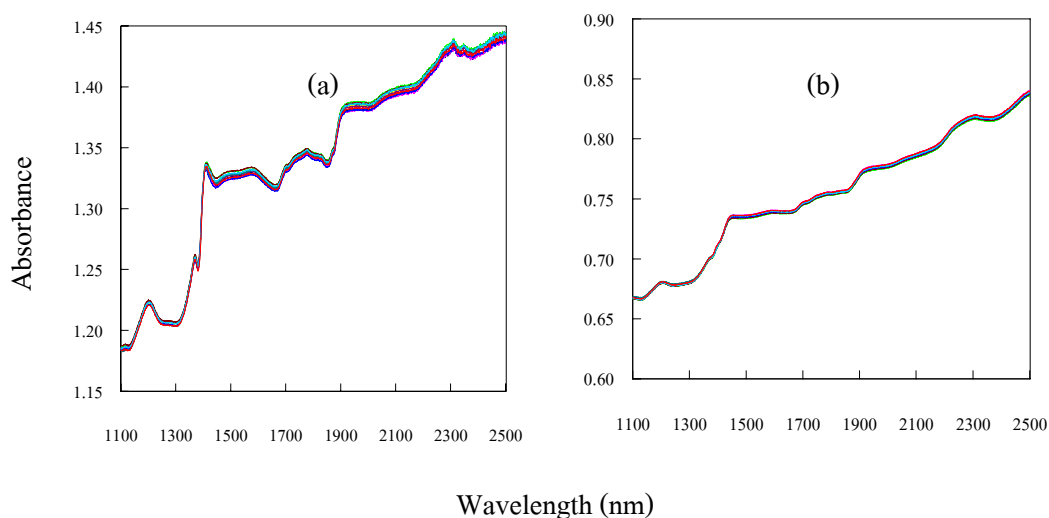
1. การทดสอบเซลล์ใส่ตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ดที่พัฒนา

เซลล์ใส่ตัวอย่างทั้งแบบทาสีดำ และไม่ทาสีดำ ตามภาพเขียนแบบในภาพที่ 17 เมื่อทำการสร้างแล้วแสดงดังภาพที่ 18 การทดสอบเซลล์ทำโดยการวัดสเปกตรัมของข้าวสารหนึ่งเมล็ดซึ่งเป็นตัวอย่างเดียวกัน 10 ครั้ง สเปกตรัมที่ได้ของตัวอย่างที่ใส่ในเซลล์แบบทาสีดำด้านบนดังภาพที่ 19 (a) และสเปกตรัมของตัวอย่างที่ใส่ในเซลล์แบบไม่ทาสีดำดังภาพที่ 19 (b)



ภาพที่ 18 เซลล์ตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ดที่พัฒนาแบบทาสีดำด้านบน (ซ้าย) และไม่ทาสีดำด้านบน (ขวา)

จากการเปรียบเทียบสเปกตรัมของตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ดที่ใส่ในเซลล์ใส่ตัวอย่างทั้ง 2 แบบ พบว่าสเปกตรัมที่ได้มีความแตกต่างกัน คือ แบบทาสีดำด้านบนมี peak ที่ชัดเจนกว่า และมีค่าการดูดกลืน (absorbance) ที่สูงกว่า เนื่องจากแสงที่สะท้อนภายหลังจากดูดกลืนด้วยข้าวสารเท่านั้นที่จะสะท้อนออกมาสู่ตัวตรวจวัดทั้งหมด ส่วนแสงที่ไม่เกี่ยวข้องจะถูกดูดกลืนด้วยสีดำที่ทาไว้ด้านบน ในขณะที่เซลล์ใส่ตัวอย่างแบบไม่ทาสีดำ แสงที่สะท้อนออกมาจากข้าวสาร และแสงสะท้อนอื่น ๆ อาจจะสะท้อนกลับไปมาบริเวณด้านบนของเซลล์ใส่ตัวอย่าง ทำให้มีแสงที่สะท้อนออกมาสู่ตัวตรวจวัดมากเกินไป เป็นผลให้ค่าการดูดกลืนของข้าวสารน้อย ดังนั้นจึงเลือกเซลล์ใส่ตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ดแบบทาสีดำด้านบนเพื่อใช้ในการวัดสเปกตรัมของตัวอย่างข้าวสารต่อไป

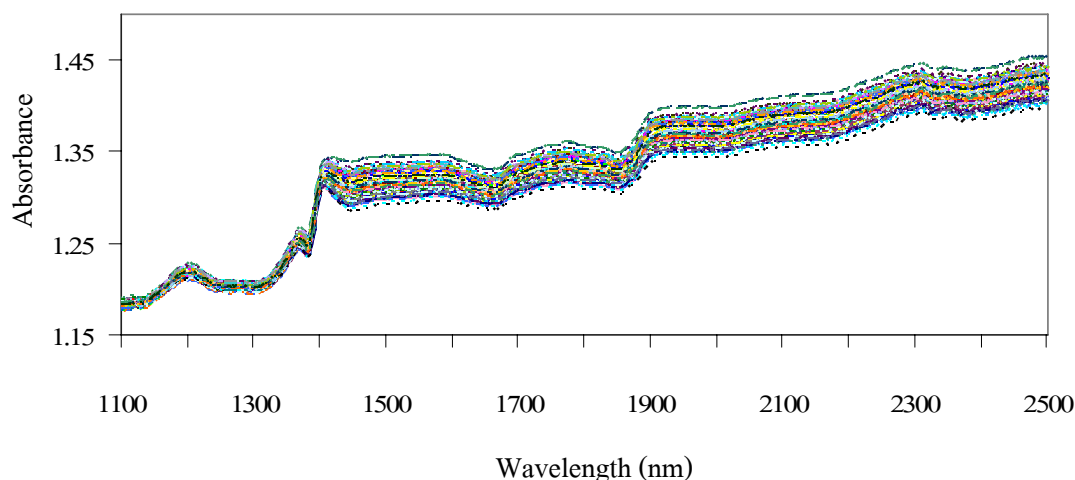


ภาพที่ 19 สเปกตรัมของข้าวสารหนึ่งเมล็ดที่ใส่ในเซลล์ใส่ตัวอย่าง ซึ่งทำการวัดสเปกตรัมจำนวน 10 ครั้งในเซลล์ใส่ตัวอย่าง (a) แบบทาสีดำด้านบน และ (b) แบบไม่ทาสีดำ

2. การสร้างระบบการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในข้าวสารไทยที่ละเมล็ด

2.1 สเปกตรัมของข้าวสารไทยที่ละเมล็ดสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน

ข้าวสารที่ผ่านการวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเซลล์ใส่ตัวอย่างที่พัฒนาในข้อ 1 โดยใช้เครื่อง NIR Spectrometer (BRAN+LUEBBE รุ่น InfraAlyzer 500) จำนวน 193 ตัวอย่าง จะได้สเปกตรัมของตัวอย่างข้าวสารที่ความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร ดังภาพที่ 20 จะสังเกตเห็นตำแหน่งการดูดกลืนของน้ำ และ starch ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของข้าว ที่ความยาวคลื่น 1450 นาโนเมตร และ 1900 นาโนเมตร ตามลำดับ (Osborne *et al.*, 1993) และยังสังเกตเห็น noise, baseline shift และ baseline tangent เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากขนาดอนุภาคที่ไม่เท่ากันของตัวอย่างอีกทั้งแสงสะท้อนจากพื้นผิวภายในร่องเซลล์ใส่ตัวอย่างที่ไม่เรียบทำให้ระยะที่ส่องผ่านในเมล็ดข้าวสารที่แตกต่างกัน (Osborne *et al.*, 1993)



ภาพที่ 20 ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ด ในเซลล์ใส่ตัวอย่างที่พัฒนา ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร

2.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในข้าวสารไทยทีละเมล็ด

นำตัวอย่างข้าวสารที่ผ่านการวัดสเปกตรัมแต่ละเมล็ดนั้น ไปวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนโดยใช้วิธี Dumas Combustion ตามวิธีการวิเคราะห์มาตรฐาน AACC 46 - 30 โดยใช้เครื่อง Combustion Analyzer รุ่น Leco FP – 528 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนจำนวน 193 ตัวอย่าง พบว่าปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 3.68 – 10.95 โดยมีค่าทางสถิติของโปรตีนของตัวอย่างในกลุ่ม calibration set สำหรับการสร้างสมการทำนาย และกลุ่ม validation set สำหรับทดสอบสมการทำนาย ดังตารางที่ 15

2.3 การสร้างสมการทำนายเพื่อวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในข้าวสารไทยทีละเมล็ด

เนื่องจากสเปกตรัมได้รับอิทธิพลจากภายนอกทำให้เกิด noise, baseline shift และ baseline tangent จึงต้องปรับแต่งสเปกตรัมก่อนนำสเปกตรัมไปวิเคราะห์หาสมการทำนายปริมาณโปรตีน จากการสร้างสมการทำนายเบื้องต้นโดยใช้ค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร จะให้ผลดีที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) และค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการสร้างสมการ (SEC) ของตัวอย่างในกลุ่ม calibration ค่าความผิดพลาดมาตรฐานจากการทำนาย (SEP) และค่า Bias ในกลุ่ม Validation ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 15 ค่าทางสถิติของปริมาณโปรตีนของตัวอย่างข้าวสารในกลุ่ม Calibration และ Validation Sample Set

พารามิเตอร์	Calibration Sample Set	Validation Sample Set
จำนวนตัวอย่าง (N)	98	95
Min (%)	3.68	3.71
Max (%)	10.95	10.15
Mean (%)	7.03	7.19
Standard deviation (%)	1.63	1.48

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์หาสมการทำนายปริมาณโปรตีนในข้าวสารหนึ่งเมล็ดจากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการต่างๆ ที่ช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร

Pretreatment	F	R	SEC (%)	SEP ¹ (%)	Bias (%)
Smoothing	12	0.93	0.61	1.00 ^{ns}	-0.24
Smoothing + MSC	6	0.82	0.94	1.08 [*]	-0.34
Smoothing + 1 st Derivative	7	0.91	0.67	0.92 ^{ns}	-0.37
Smoothing + MSC + 2 nd Derivative	6	0.91	0.69	0.91 ^{ns}	-0.37

¹: เปรียบเทียบค่า SEP (Fearn, 1996) กับ SEP ของสมการที่พัฒนาโดยการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับ MSC และอนุพันธ์อันดับ 2 (SM+MSC+2nd Derivative)

^{ns}: ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

^{*}: มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 16 พบว่าสมการทำนายที่ดีที่สุดจะได้จากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับ MSC และอนุพันธ์อันดับ 2 มีจำนวนแฟกเตอร์ เท่ากับ 6 โดยมีค่า R เท่ากับ 0.91, SEC เท่ากับ 0.69%, SEP เท่ากับ 0.91% และ Bias เท่ากับ -0.37% ภาพที่ 21 และ ภาพที่ 22 แสดง Scatter plot ระหว่างปริมาณโปรตีนที่ทำนายด้วย NIR และค่าปริมาณโปรตีนจริงของตัวอย่างในกลุ่ม calibration sample set และ validation sample set เมื่อทดสอบ paired t-test ของสมการทำนายที่พัฒนาโดยการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับ MSC และอนุพันธ์อันดับ 2 พบว่าสมการทำนายสามารถทำนายปริมาณโปรตีนได้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณโปรตีนจริงที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นสมการทำนายที่ได้สามารถทำนายปริมาณโปรตีนของข้าวสารไทยที่ละหนึ่งเมล็ดได้อย่างถูกต้อง

3. การสร้างระบบการวิเคราะห์ปริมาณอมิโลสในข้าวสารไทยที่ละเมล็ด

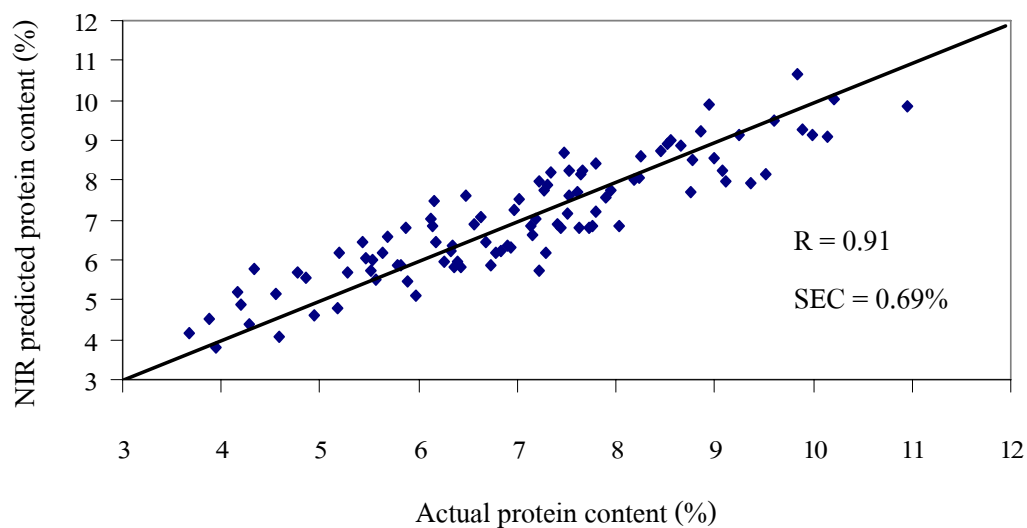
3.1 กราฟมาตรฐานปริมาณอมิโลส

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสสามารถหาได้จากกราฟมาตรฐานภาพที่ 23 ด้วยวิธี Iodine titration โดยการสร้างตัวอย่างมาตรฐานจากสาร Amylose และ Amylopectin ที่ 3%, 5%, 10%, 15%, 25% และ 35% โดยได้ค่า KIO_3 จากเครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ รุ่น T 50 (METTLER TOLEDO) แล้วนำไปแทนค่าในสมการ (20) ข้อมูลการสร้างกราฟมาตรฐานดูในภาคผนวก ข

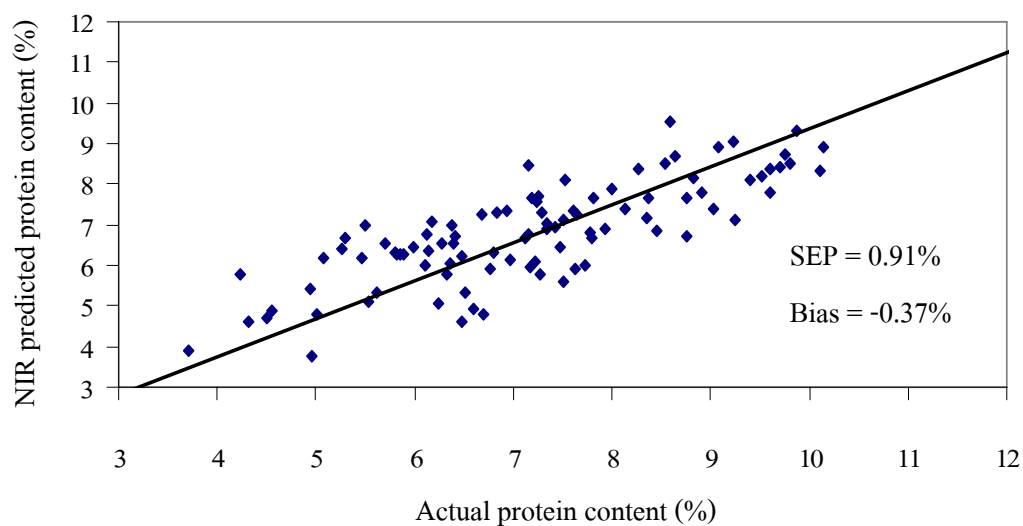
$$\%AC = 526.3x - 69.306 \quad (20)$$

เมื่อ x คือ ปริมาตร KIO_3 (มิลลิลิตร)

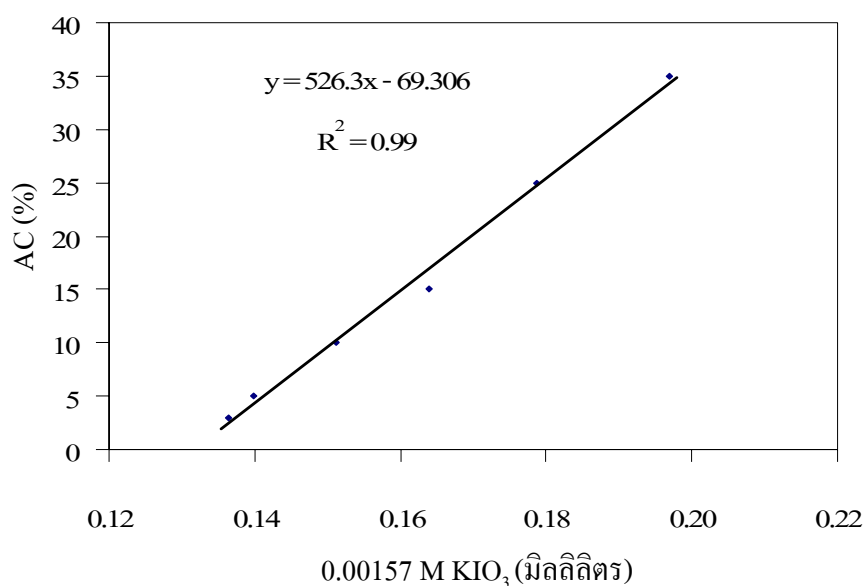
$\%AC$ คือ % Amylose content



ภาพที่ 21 Scatter plot ระหว่างปริมาณโปรตีนที่ทำนายด้วย NIR และค่าปริมาณโปรตีนจริงของตัวอย่างในกลุ่ม calibration sample set



ภาพที่ 22 Scatter plot ระหว่างปริมาณโปรตีนที่ทำนายด้วย NIR และค่าปริมาณโปรตีนจริงของตัวอย่างในกลุ่ม validation sample set



ภาพที่ 23 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ 0.00157M KIO₃ กับร้อยละปริมาณ
อมีโลส (%AC)

3.2 การทดลองหาค่าความผิดพลาดมาตรฐานในผู้ปฏิบัติงาน และวิธีการทดลอง (SEL)

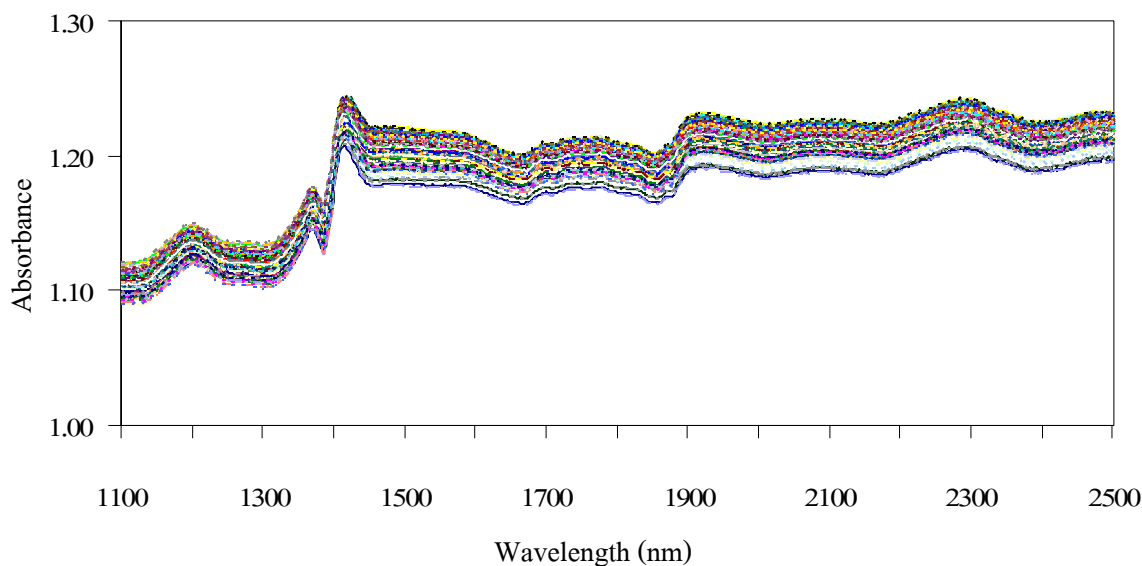
ก่อนการวิเคราะห์ข้าวสารที่ละเมียดได้ทำการทดสอบหาค่าความผิดพลาดมาตรฐานในผู้ปฏิบัติงาน และวิธีการทดลอง หรือ Standard error of laboratory (SEL) โดยนำตัวอย่างข้าวสารไทย 4 พันธุ์ ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105, กข 23, ปทุมธานี 1 และ ชัยนาท 1 พันธุ์ละ 3 ตัวอย่าง ดังนั้นตัวอย่างข้าวสาร (n) คือ 12 ตัวอย่าง การทำซ้ำ (r) จำนวน 2 ซ้ำ นำตัวอย่างมาบดละเอียดขนาด 80 เมช แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณอมีโลสในข้าวสารโดยใช้วิธี Iodine titration พบว่าปริมาณอมีโลสมีค่าอยู่ในช่วง (Range) ร้อยละ 11.48 – 33.33 ค่าเฉลี่ยของปริมาณอมีโลส (Mean) มีค่าร้อยละ 21.55 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) มีค่าร้อยละ 8.45 แสดงดังตารางที่ 17 ข้อมูลการวิเคราะห์ SEL คู่มือภาคผนวก ค

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ Standard error of laboratory (SEL) ของวิธีวิเคราะห์ปริมาณอมิโลส

พารามิเตอร์	N	r	Range (%)	Mean (%)	SD (%)	SEL (%)
Amylose content	12	2	11.48 – 33.22	21.55	8.45	2.17

3.3 สเปกตรัมของข้าวสารไทยที่ละเมียดสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลส

เนื่องจากการวัดสเปกตรัมของข้าวสารที่ละเมียดสำหรับการสร้างสมการทำนายโปรตีนในเซลล์ไต้ตัวอย่างที่พัฒนาสังเกตพบว่ามี noise และอิทธิพลภายนอกรบกวนทำให้เกิด baseline tangent ขึ้น จึงได้ปรับปรุงผิวด้านในของร่องที่ไต้ตัวอย่าง โดยการขัดผิวด้านในให้เรียบซึ่งเซลล์นี้ใช้สำหรับการวัดสเปกตรัมข้าวสารสำหรับสร้างสมการทำนายอมิโลส จำนวน 160 ตัวอย่าง จะได้สเปกตรัมของตัวอย่างข้าวสาร ดังภาพที่ 24 เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของข้าวสารที่วัดได้จากเซลล์ไต้ตัวอย่างที่ปรับปรุงจะพบว่าลักษณะของสเปกตรัมคล้ายกัน แต่อิทธิพลของ baseline tangent ถูกกำจัดลงเหลือเพียง noise และ baseline shift เท่านั้น



ภาพที่ 24 ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ด ที่ทำการวัดด้วยเซลล์ไต้ตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสแบบทาสีด้านบน ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณอมิโอสในข้าวสารไทยที่ละเมียด

นำตัวอย่างข้าวสารที่ผ่านการวัดสเปกตรัมแต่ละเมล็ดนั้นไปวิเคราะห์หาปริมาณอมิโอสโดยใช้วิธี Iodine titration และอาศัยกราฟมาตรฐาน พบว่าปริมาณอมิโอสอยู่ในช่วงร้อยละ 8.34 – 32.48 โดยมีค่าทางสถิติของอมิโอสของตัวอย่างในกลุ่ม calibration set สำหรับการสร้างสมการทำนาย และกลุ่ม validation set สำหรับทดสอบสมการทำนาย ดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ค่าทางสถิติของปริมาณอมิโอสของตัวอย่างข้าวสารในกลุ่ม Calibration และ Validation Sample Set

พารามิเตอร์	Calibration Sample Set	Validation Sample Set
จำนวนตัวอย่าง (N)	80	80
Min (%)	8.34	9.24
Max (%)	32.48	32.17
Mean (%)	20.49	20.61
Standard deviation (%)	5.56	5.10

3.5 การสร้างสมการทำนายเพื่อวิเคราะห์ปริมาณอมิโอสในข้าวสารไทยที่ละเมียด

เนื่องจากสเปกตรัมได้รับอิทธิพลจากภายนอกทำให้เกิด noise และ baseline shift จึงต้องปรับแต่งสเปกตรัมก่อนนำสเปกตรัมไปวิเคราะห์หาสมการทำนายปริมาณอมิโอส จากการสร้างสมการทำนายเบื้องต้นโดยใช้ค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร จะทำให้ได้ผลดีที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) และค่าความผิดพลาดมาตรฐานในการสร้างสมการ (SEC) ของตัวอย่างในกลุ่ม calibration ค่าความผิดพลาดมาตรฐานจากการทำนาย (SEP) และค่า Bias ในกลุ่ม Validation ดังตารางที่ 19 จากตารางพบว่าสมการทำนายที่ดีที่สุดจะได้จากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วย Smoothing ร่วมกับอนุพันธ์อันดับ 2 ซึ่งมีแฟกเตอร์เท่ากับ 5, ค่า R เท่ากับร้อยละ 0.84, SEC เท่ากับร้อยละ 3.06, SEP เท่ากับร้อยละ 4.33 และ Bias เท่ากับร้อยละ 0.28

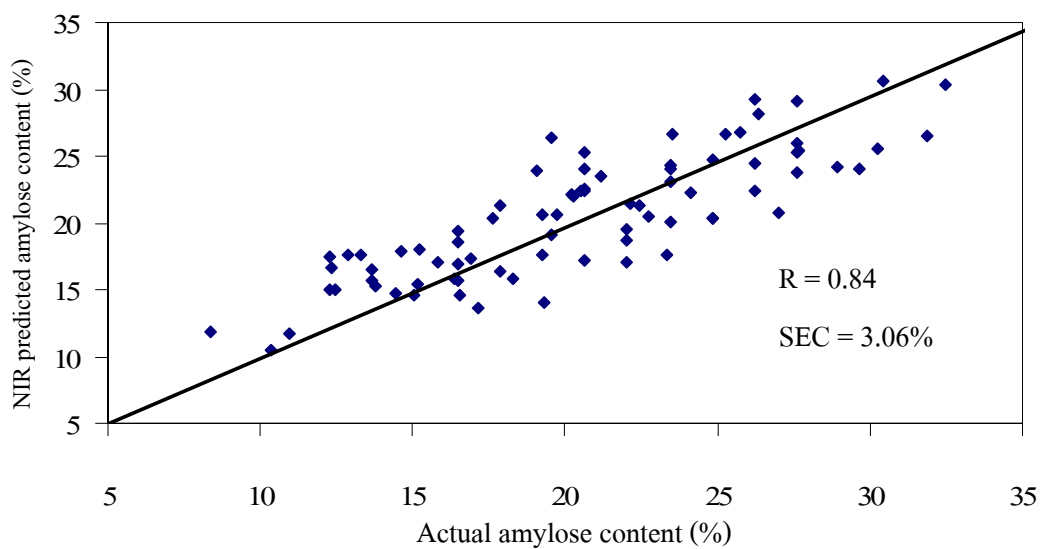
Scatter plot ระหว่างปริมาณอมิโอสที่ทำนายด้วย NIR และค่าปริมาณอมิโอสจริงของตัวอย่างในกลุ่ม calibration sample set แสดงดังภาพที่ 25 และ Scatter plot ของตัวอย่างในกลุ่ม validation sample set แสดงดังภาพที่ 26 เมื่อทดสอบ paired t-test ของสมการที่ดีที่สุดพบว่าสามารถทำนายปริมาณอมิโอสได้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับค่าปริมาณอมิโอสจริงที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์หาสมการทำนายปริมาณอมิโอสในข้าวสารหนึ่งเมล็ดจากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการต่างๆ ที่ช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร

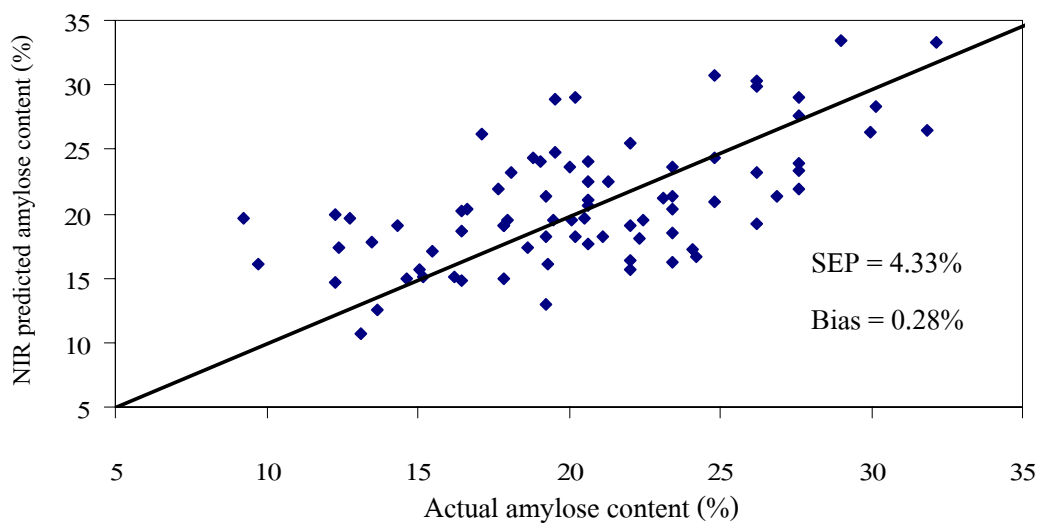
Pretreatment	F	R	SEC (%)	SEP ¹ (%)	Bias (%)
Smoothing	4	0.63	4.34	4.44 ^{ns}	0.16
Smoothing + MSC	3	0.60	4.46	4.39 ^{ns}	0.01
Smoothing + 1 st Derivative	4	0.63	4.34	4.44 ^{ns}	0.16
Smoothing + 2 nd Derivative	5	0.84	3.06	4.33 ^{ns}	0.28

¹: เปรียบเทียบค่า SEP (Fearn, 1996) กับ SEP ของสมการที่พัฒนาโดยการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับอนุพันธ์อันดับ 2

^{ns}: ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพที่ 25 Scatter plot ระหว่างปริมาณอมิโลสที่ทำนายด้วย NIR และค่าปริมาณอมิโลสจริงของตัวอย่างในกลุ่ม Calibration sample set



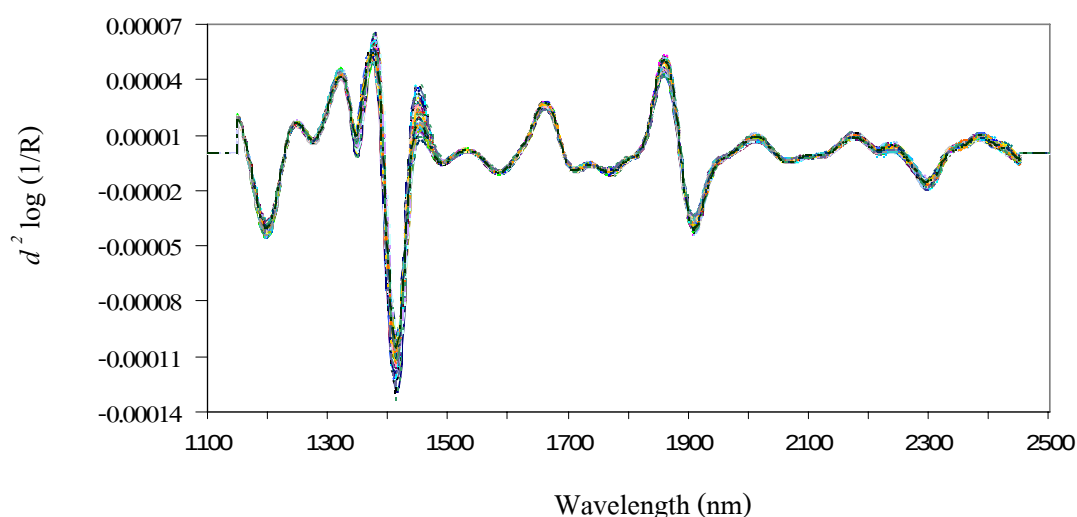
ภาพที่ 26 Scatter plot ระหว่างปริมาณอมิโลสที่ทำนายด้วย NIR และค่าปริมาณอมิโลสจริงของตัวอย่างในกลุ่ม validation sample set

วิจารณ์

1. ระบบการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในข้าวสารไทยที่ละเมียด

1.1 การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์

จากสเปกตรัมของข้าวสารก่อนปรับแต่ง (ภาพที่ 20) จะเห็นว่าสเปกตรัมได้รับอิทธิพลจาก noise, baseline shift และ baseline tangent เมื่อทดสอบการสร้างสมการทำนายโปรตีนด้วยการปรับแต่งต่าง ๆ กัน พบว่าการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับ MSC และอนุพันธ์อันดับ 2 ที่แก้ไข offset และ Amplification ให้ผลการสร้างสมการทำนายดีที่สุด (ตารางที่ 15) โดยมีลักษณะสเปกตรัมหลังปรับแต่งดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 สเปกตรัมของตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ดภายหลังจากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับ MSC และอนุพันธ์อันดับ 2 ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร

จากภาพที่ 27 จะเห็นว่าสเปกตรัมอยู่ชิดกันมากขึ้น อิทธิพลของ baseline shift และ baseline tangent ถูกกำจัดลง ดังนั้น การเลือกการปรับแต่งสเปกตรัมให้เหมาะสม ตามอิทธิพลที่สเปกตรัมได้รับ ทำให้สามารถนำข้อมูลการดูดกลืนที่ถูกต้องไปหาความสัมพันธ์กับองค์ประกอบที่สนใจทำได้ การทำนายที่มีความแม่นยำ

1.2 การเลือกสมการทำนายปริมาณโปรตีน

การเลือกสมการทำนายปริมาณโปรตีนจะพิจารณาจากสมการที่มีค่า SEP ที่ต่ำกว่าสมการอื่น ๆ และเมื่อทำการเปรียบเทียบ SEP ของแต่ละสมการกับสมการที่มี SEP ต่ำที่สุด (ตารางที่ 16) คือ สมการที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับ MSC และอนุพันธ์อันดับ 2 พบว่าสมการเหล่านั้นมีค่า SEP แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นจึงเลือกสมการที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับ MSC และอนุพันธ์อันดับ 2 เมื่อพิจารณาค่า R ของสมการ มีค่าเท่ากับ 0.91 แสดงว่าสามารถนำสมการไปใช้ในงานวิจัย สำหรับการทำนายปริมาณโปรตีน ดังตารางที่ 20 นอกจากนี้ เมื่อทดสอบสมการด้วย t-test พบว่าสมการทำนายสามารถทำนายค่าปริมาณโปรตีนได้อย่างถูกต้องไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณโปรตีนจริงที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

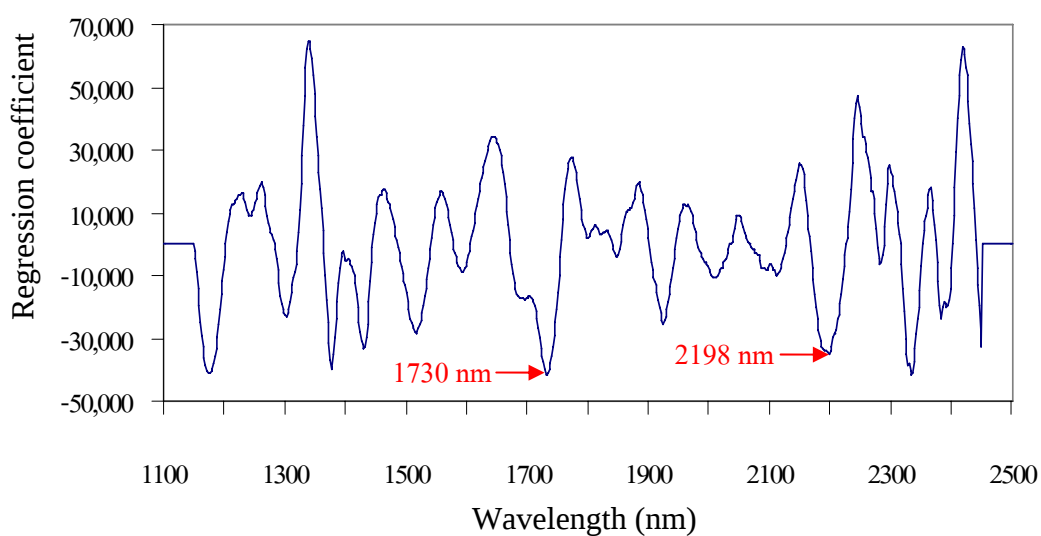
ตารางที่ 20 การประเมินสมการทำนายสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R)

Value of R	R ²	Interpretation
Up to ± 0.5	Up to 0.25	Not usable in NIRS calibration
$\pm 0.51 - 0.70$	0.26 – 0.49	Poor correlation, reasons should be researched
$\pm 0.71 - 0.80$	0.50 – 0.64	OK for rough screening
$\pm 0.81 - 0.90$	0.66 – 0.81	OK for screening and some other “approximate” calibration
$\pm 0.91 - 0.95$	0.83 – 0.90	Usable with caution for most applications, including research
$\pm 0.96 - 0.98$	0.92 – 0.96	Usable in most application, quality assurance
$\pm 0.99+$	0.98+	Excellent, usable in any application

ที่มา: Williams (2007)

1.3 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายปริมาณโปรตีน

จากสมการทำนายที่ดีที่สุด เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอย (Regression coefficient) ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นต่างกัน แสดงดังภาพที่ 28 จะเห็นตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับโปรตีนที่ความยาวคลื่น 1730 นาโนเมตร (William and Norris, 1987; Rittiron, 2004) ซึ่งเป็นตำแหน่งการดูดกลืนของพันธะ C-H stretch 1st overtone ของหมู่คาร์บอกซิลในโปรตีน และที่ความยาวคลื่น 2198 นาโนเมตร (Osborne *et al.*, 1993)

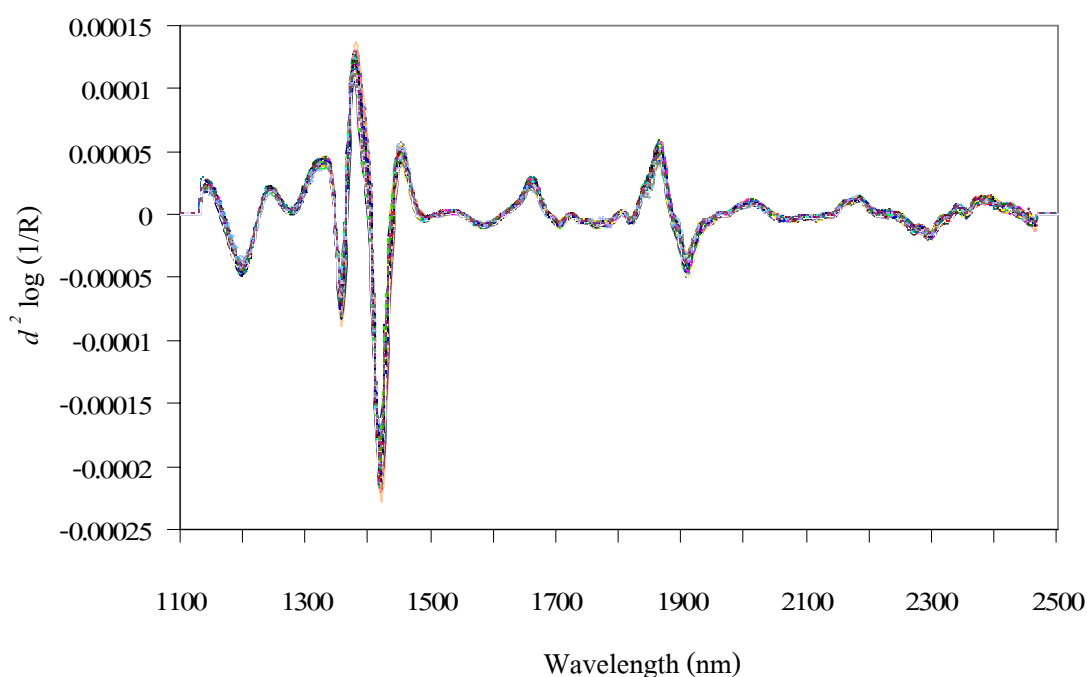


ภาพที่ 28 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) กับความยาวคลื่นในช่วง 1100 – 2500 นาโนเมตร ของสมการทำนายปริมาณโปรตีน

2. ระบบการวิเคราะห์ปริมาณอมิโอสในข้าวสารไทยที่ละเมียด

2.1 การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์

จากสเปกตรัมของข้าวสารก่อนปรับแต่ง (ภาพที่ 24) จะเห็นว่าสเปกตรัมได้รับอิทธิพลจาก noise และ baseline shift เมื่อทดสอบการสร้างสมการทำนายอมิโอสที่การปรับแต่งต่าง ๆ กัน พบว่าการปรับแต่งด้วย Smoothing ร่วมกับอนุพันธ์อันดับ 2 ให้ผลการสร้างสมการทำนายดีที่สุด (ตารางที่ 19) โดยมีลักษณะสเปกตรัมหลังปรับแต่งดังภาพที่ 29 ซึ่งสังเกตได้ว่าสเปกตรัมอยู่ชิดกันมากขึ้นอิทธิพลของ baseline shift ถูกกำจัดลง ด้วยการปรับแต่งด้วยอนุพันธ์อันดับ 2 รวมทั้งลดสัญญาณรบกวน หรือ noise ด้วย Smoothing ดังนั้น การเลือกการปรับแต่งสเปกตรัมให้เหมาะสม ตามอิทธิพลที่สเปกตรัมได้รับ ทำให้สามารถนำข้อมูลการดูดกลืนที่ถูกต้องไปหาความสัมพันธ์กับองค์ประกอบที่สนใจ เพื่อให้ได้สมการทำนายที่มีความแม่นยำ



ภาพที่ 29 สเปกตรัมของตัวอย่างข้าวสารหนึ่งเมล็ดภายหลังจากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วย Smoothing ร่วมกับอนุพันธ์อันดับ 2 ในช่วงความยาวคลื่น 1100 – 2500 นาโนเมตร

2.2 การเลือกสมการทำนายปริมาณอมิโอส

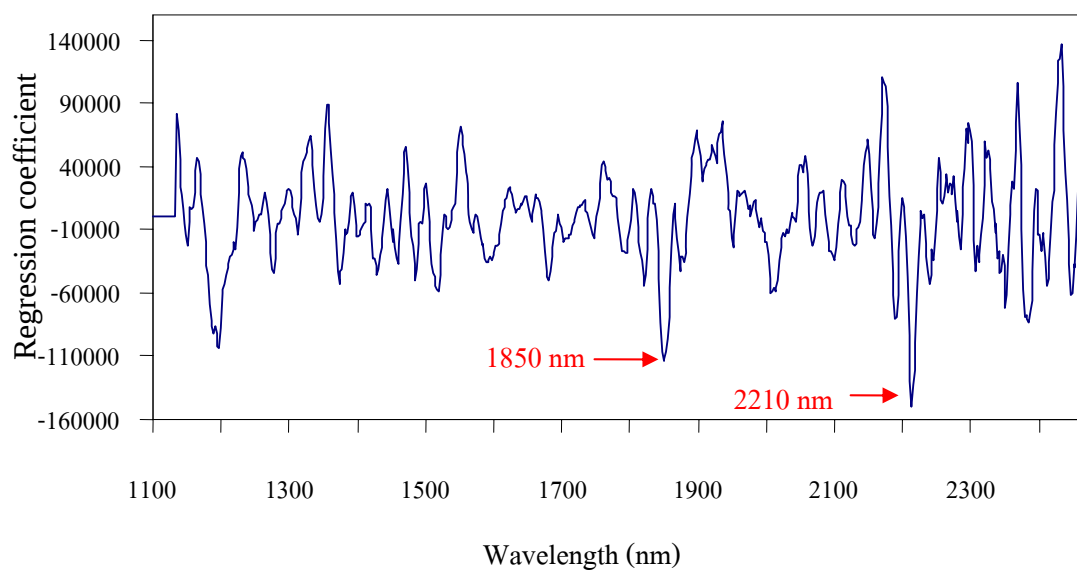
การเลือกสมการทำนายปริมาณอมิโอสพิจารณาจากสมการที่มีค่า SEP ที่ต่ำกว่าสมการอื่น ๆ และเมื่อทำการเปรียบเทียบ SEP ของแต่ละสมการกับสมการที่มี SEP ต่ำที่สุดจากตารางที่ 19 คือ สมการที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับอนุพันธ์อันดับ 2 พบว่าสมการเหล่านั้นมีค่า SEP ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่สมการที่ปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี Smoothing และอนุพันธ์อันดับ 2 มีค่า R สูงสุดเท่ากับ 0.84 แสดงว่าสามารถนำสมการไปใช้ สำหรับการทำนายปริมาณอมิโอสโดยประมาณ เพื่อการคัดแยกกลุ่มตัวอย่างตามปริมาณอมิโอส ดังตารางที่ 20 นอกจากนี้เมื่อทดสอบสมการด้วย t-test พบว่าสมการทำนายสามารถทำนายค่าปริมาณอมิโอสได้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณอมิโอสจริงที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อเปรียบเทียบค่า SEP ของงานวิจัยนี้มีค่า SEP เท่ากับ 4.33% ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่า SEP ของสมการทำนายที่พัฒนาโดย Wu *et al.*, 2004 ที่มีค่า SEP 5.13% สมการทำนายของงานวิจัยนี้มีผลดีกว่าเนื่องจากวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโอสด้วย Iodine titration มีความละเอียดสูง และถูกต้องกว่าวิธีวิเคราะห์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ colorimetry ซึ่งเป็นการวัดการดูดกลืนความเข้มของสีสารละลายที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ซึ่งวิเคราะห์หาปริมาณอมิโอสของข้าวกล้องจากนั้นคูณด้วย 0.90 จะได้ค่าปริมาณอมิโอสในข้าวสาร (หักลบปริมาณอมิโอสจากการขัดสี) ซึ่งในความเป็นจริงแต่ละเมล็ดจะมีระดับการขัดสีไม่เท่ากัน

เมื่อพิจารณาค่า SEP ของงานวิจัยนี้มีค่าประมาณสองเท่าของค่า SEL แสดงให้เห็นว่าสมการทำนายด้วยเทคนิค NIR สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณอมิโอสที่พัฒนามีความแม่นยำดี (ตารางที่ 12) เมื่อเปรียบเทียบกับความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ทางเคมีที่ใช้อ้างอิง ดังนั้นหากต้องการลดค่า SEP และเพิ่มค่า R ก็ควรฝึกผู้ปฏิบัติงานให้มีความชำนาญในการวิเคราะห์อมิโอสเพื่อที่จะทำให้ค่า SEL ของวิธีการ และผู้ปฏิบัติงานลดลง

2.3 สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายอมิโอส

จากสมการทำนายที่พัฒนา ด้วยวิธี PLRS เมื่อทำการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ของความยาวคลื่นในช่วง 1100 – 2500 นาโนเมตร ดังภาพที่ 29 (William and Norris, 1987) จะเห็นตำแหน่งที่มีความเกี่ยวข้องกับอมิโอส คือ ที่ความยาวคลื่น 1850 และ 2210 นาโนเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการดูดกลืนของ function group O-H stretch / C-O stretch second overtone combination และ O-H stretch/ O-H bending ของ Starch ในข้าว



ภาพที่ 30 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) กับความยาวคลื่นในช่วง 1100 – 2500 นาโนเมตร ของสมการทำนายปริมาณมิโดส

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

เซลล์ตัวอย่างที่พัฒนาสามารถวัดสเปกตรัมของข้าวสารไทยทำให้ได้สเปกตรัมที่มีข้อมูลการดูดกลืนขององค์ประกอบภายในข้าวหนึ่งเมล็ด ที่สามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการทำนายปริมาณโปรตีนของข้าวสารไทยหนึ่งเมล็ดได้อย่างแม่นยำ และสมการทำนายปริมาณอมิโลสสำหรับคัดแยกกลุ่มข้าวสารไทยทีละเมล็ดได้

ข้อเสนอแนะ

1. จากการพัฒนาเซลล์ใส่ตัวอย่างสำหรับข้าวสารไทยหนึ่งเมล็ดทั้งเซลล์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน และอมิโลสเมื่อได้ทำการวัดค่าการดูดกลืนของแสงพบว่าสเปกตรัมที่ได้ยังเกิด noise ดังนั้นจึงควรทำการปรับปรุงเซลล์ใส่ตัวอย่างข้าวสาร โดยการขัดผิวละเอียดด้านในร่องใส่เมล็ดข้าว หรือเคลือบผิวร่องด้วยทองคำ เพื่อให้ผิวเรียบ
2. ผู้วิเคราะห์หาปริมาณอมิโลสในข้าวสารไทยทีละเมล็ดควรฝึกฝนความชำนาญเพื่อให้ความผิดพลาดมาตรฐานของผู้ทดลอง และวิธีวิเคราะห์ หรือ Standard error of laboratory (SEL) ลดลง จะทำให้ได้ค่าปริมาณอมิโลสที่ถูกต้อง แม่นยำ นำมาใช้อ้างอิงสำหรับการสร้างสมการทำนาย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมการข้าว. 2550. คุณค่าทางโภชนาการของข้าว. ใน ๑ ปี กรมการข้าว. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

กรมการค้าต่างประเทศ. 2551. ปริมาณการส่งออกข้าวของไทย ปี 2545-2551. แหล่งที่มา:
[http://www.dft.moc.go.th/the_files/\\$\\$8/level4/Yc46.htm](http://www.dft.moc.go.th/the_files/$$8/level4/Yc46.htm), 20 กันยายน 2551.

งามชื่น คงเสรี. 2536. คุณภาพเมล็ดทางเคมี, น. 54-74. ใน เอกสารประกอบการบรรยาย ฝึกอบรม
วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ณ ศูนย์วิจัยข้าวพัทลุง. ฝ่ายฝึกอบรมสถาบันวิจัยข้าว กรม
วิชาการเกษตร กระทรวงเกษตร และสหกรณ์ กรุงเทพฯ.

_____. 2542. ข้าว: กลยุทธ์การเพิ่มศักยภาพการส่งออกสู่ตลาดคุณภาพ. ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี
สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. แหล่งที่มา:
http://www.charpa.co.th/bulletin/rice_potential_development.html, 12 ธันวาคม 2549.

_____. 2547. คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตร
และสหกรณ์ และสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

ธงชัย สุวรรณสิขณน์. 2545. การวิเคราะห์สเปกตรัม NIR ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ. น. 99-
130. ใน การเชิงปฏิบัติการ การควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค NIR Spectroscopy เพื่อ
การแข่งขันในเวทีการค้าโลก. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและ
อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 27 – 28 พฤศจิกายน, อาคารวิทยบริการ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.

ณัฐกานต์ นวเศรษฐวิสูตร. 2547. การทำนายคุณภาพข้าวเจ้าของไทยด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี
ย่านใกล้อินฟราเรด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นพมาศ พิมจุฬา. 2547. ผลของระยะเวลาการเก็บข้าวเปลือกต่อคุณสมบัติของข้าวสาร แป้งข้าว
และข้าวแผ่นกรอบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

นิรนาม. 2549. ข้าว. แหล่งที่มา: http://www.thaifta.com/thaifta/Portals/0/File/ascn_rice1.doc, 4 ธันวาคม 2549.

นิทัศน์ ตั้งพินิจกุล, วิบูลย์ เทเพนทร์ และ อารีทิมนกุล. 2548. วิจัยและพัฒนาเครื่องมือและวิธีการตรวจสอบคุณภาพการสีของข้าวเปลือก. กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี.

นุชจรินทร์ เกตุนิล. 2549. ข้าวและผลิตภัณฑ์แปรรูปของไทย. แผนวิเคราะห์ข้อมูล ฝ่ายบริการข้อมูล และสารสนเทศ สถาบันอาหาร กรุงเทพฯ.

บุญหงส์ จงคิด. 2547. ข้าวและเทคโนโลยีการผลิต. ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พิมล เรียนวัฒนา. 2524. สเปกโตรสโกปีขั้นพื้นฐานกับการประยุกต์ทางเคมี. ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์อักษรเจริญทัศน์, กรุงเทพฯ.

เพลงพิน ศิวาพรรักษ์. 2541. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอะไมโลสคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ภัทรานิ เลิศพัฒน์. 2544. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมคบเคี้ยวจากปลายข้าวหอมมะลิ ถั่วลิสง และปลากระตัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มุกดา จิรภูมิมนตรี. 2537. เคมีวิเคราะห์และปริมาณ เล่ม 2: การไทเทรต. โรงพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน.

รังสิณี โสธรวิทย์. 2550. เคมีและจุลชีววิทยาเบื้องต้นของอาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วรวิทย์ พาณิชพัฒน์. 2546. การปรับปรุงพันธุ์และขยายพันธุ์ข้าว. สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการ เกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

วลัยพร เตียประสิทธิ์. 2548. การทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และ ปริมาณกรดทั้งหมดของชมพูพันธุ์ทับทิมจันทร์ เพชรสามพราน และทุลเกล้า ด้วยเทคนิค Near Infrared Spectroscopy. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วารุณี ธนะแพสค์. 2548. สถานการณ์ปัจจุบันของงานวิจัยและพัฒนาและการใช้ประโยชน์จาก เทคนิค NIR Spectroscopy ในประเทศไทย. น. 1-7. ใน การตรวจสอบคุณภาพอาหารสัตว์ ด้วยเทคนิค NIR Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. หน่วยปฏิบัติการ เทคโนโลยีการตรวจสอบสินค้าโดยไม่ทำลาย สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ระหว่าง วันที่ 19-23 ธันวาคม 2548 ณ ห้องประชุมชั้น 5 อาคารปฏิบัติการวิจัยกลาง.

วาสนา วรมิสร์. 2538. การปรับปรุงพันธุ์ข้าวหอมของไทย. ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลก สถาบันวิจัย ข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ศิราพร ริพล, สงวนศักดิ์ ธนาพรพูนพงษ์, ปาริชาติ เทียนจุมพล และสุชาดา เวียร์ศิลป์. 2550ก. การหาปริมาณโปรตีนในข้าวสารด้วยเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี. ว. วิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 38 ฉบับที่ 5 (พิเศษ) กันยายน- ตุลาคม 2550 น. 160-163

ศิราพร ริพล, สงวนศักดิ์ ธนาพรพูนพงษ์, สุชาดา เวียร์ศิลป์ และปาริชาติ เทียนจุมพล. 2550ข. การหาปริมาณอมิเลสในข้าวสารด้วยเนียร์อินฟราเรดรีเฟรกแทนซ์สเปกโตรสโกปี.

แหล่งที่มา: 2[http://e-](http://e-service.agri.cmu.ac.th/publication/publication_file_download.asp?Ref_ID=2761)

service.agri.cmu.ac.th/publication/publication_file_download.asp?Ref_ID=2761

3www.oae.go.th, 11 กันยายน 2551.

สิริรัตน์ จำปาเงิน. 2547. การประยุกต์วิธีวิเคราะห์เนื้อสัมผัสและความหนืดเพื่อทำนายการปลอมปนในข้าวดอกมะลิ 105 การจัดกลุ่มอมิเลสและอายุการเก็บรักษาของข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. 2551. **ผู้ส่งออก (Exporters)**. สถิติการส่งออกข้าว (World rice trade). แหล่งที่มา: <http://www.riceexporters.or.th/world%20rice%20trade.htm>, 20 กันยายน 2551.

สุพรรณิกา เวียนทอง. 2548. การประเมินคุณภาพน้ำมันปาล์มโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. 2548. การปรับแต่ง NIR spectra ก่อนการวิเคราะห์. น. 67-98. ใน การตรวจสอบคุณภาพอาหารสัตว์ด้วยเทคนิค NIR Spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก. หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีการตรวจสอบสินค้าโดยไม่ทำลาย สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ระหว่าง วันที่ 19-23 ธันวาคม 2548 ณ ห้องประชุมชั้น 5 อาคารปฏิบัติการวิจัยกลาง.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. **ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 366น.

_____, สิริ ชัยเสรี และวราภา มหากาญจนกุล. 2542. ใน รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ **ทุนอุดหนุนวิจัย มก. ประจำปี 2542-2543 โครงการวิจัย การใช้ประโยชน์จากข้าว โครงการย่อยที่ 1 ผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องแช่เย็นและแช่เยือกแข็งเสริมกลิ่นหรือกลิ่นรส**. หน่วยงานวิจัย: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

AACC Method 46 – 30. 1999. **Crude Protein Combustion Method**. Available Source: www.aacnnettest.org/ApprovedMethods/methods/46-30.pdf, December 26, 2006.

AOAA Coastal Services Center. 2008. **Remote Sensing: The Logistics**. Available Source: <http://www.csc.noaa.gov/products/sccoasts/html/rsdetail.htm>, October 11, 2008.

Anonymous. 2008. **Distance Medical Biochemistry**. Available Source: <http://faculty.une.edu/com/courses/bionut/distbio/oldexams/finalexam.html>, October 11, 2008.

Bangweak, C. 2007. **Application of Near Infrared Spectroscopy for Determining Protein, Moisture and Water Activity in Rice.** UNU-Kirin Fellow from Thailand.

Nondestructive Evaluation Laboratory. Available Source:

www.nfri.affrc.go.jp/guidance/kankobutu/pdf/kanko_kikan71/p097.pdf -, October 11, 2008.

Bowen, R. 2006. **Starch: Amylose and Amylopectin.** Dietary Polysaccharides: Structure and Digestion. Available Source:
<http://www.vivo.colostate.edu/hbooks/pathphys/digestion/basics/polysac.html>, October 11, 2008.

Delwiche, S.R., Webb B.D., Bean M.M., Miller R.E. , and Williams P.C. 1995. Apparent Amylose Content of Milled Rice by Near Infrared Reflectance Spectrophotometry. **Cereal Chem.** 72(2): 182-187.

_____, _____, and McKenzie K.S. 1996. Qualities Characteristics in Rice near Infrared Reflectance Analysis of Whole-Grain Milled Samples. **Cereal Chem.** 73(2): 257-263.

Fearn, T. 1996. "Comparing standard deviation". **NIR news** Vol. 7 No. 5: 5-6.

Jerome, W. and Jr. Howard M. 2006. **Limitations in Analytical Accuracy**, Part I: Horwitz's Trumpet. Available source:
<http://spectroscopymag.findpharma.com/spectroscopy/article/articleDetail.jsp?id=373775>, July 24, 2008.

Juliano, B.O. 1971. **A simplified assay for milled-rice amylose.** Cereal Sci Today 16:334-336, 338, 360.

_____. 1985. **Rice: Chemistry and Technology.** Juliano, B.O. (ed.). American Association of Cereal Chemists, St. Pual, Minnesota.

- _____. 1993. **Rice in human nutrition**. FAO corporate document repository. Available
Source: <http://www.fao.org/docrep/t0567e/T0567E00.htm>, April 4, 2007.
- _____. 1994. **Rice: Chemistry and Technology**. Juliano, B.O. (ed.). American Association of
Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota.
- Ju, Z.Y., N.S., Hettiarachchy and T.J. Siebenmorgen. 1999. **Rice protein preparation, thermal
properties and denaturation**. Norman, R.J. and Beyrouthy, C.A. (ed.). B.R. Wells Rice
Research Studies.
- M526 METTLER TOLEDO. 2008. **Titer of Na₂S₂O₃ 0.1 mol/L**: Method for the standardization
of 0.1 mol/L sodium thiosulphate. With minor changes the method can be used for the
titer determination of many other reducing agents.
- Naes, T., Isaksson T., Fearn T. and Davies T. 2004. A user-friendly guide to Multivariate
Calibration and Classification. **NIR Publications**, Chichester, UK.
- Osborne, B. G., T. Fearn and P.H. Hindle. 1993. **Practical NIR Spectroscopy with
Applications in Food and Beverage Analysis**. 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc., New
York.
- Radomir, L. 1996. **The Chemistry of Cereal Proteins, Department of Biochemistry and
Food Technology**. Technical University Budapest Hungary, Second Edition.
- Rittiron, R., S. Saranwong and S. Kawano. 2004. Useful tips for constructing a near infrared-
based quality sorting system for single brown-rice kernels. **J. Near Infrared Spectrosc.**
12: 133-139.
- _____, _____ and _____. 2005. Detection of variety contamination in milled Japanese rice
using a single kernel near infrared technique in transmittance mode. **J. Near Infrared
Spectrosc.** 13: 19-25.

- Sano, Y. 1984. Differential regulation of waxy gene expression in rice endosperm. **Theor Appl Gene** 68: 467 – 473. National Institute of Genetics, Misima 411, Japan
- Shimizu, N., J. Katsura and C.G. Eddison. 1998. Evaluating techniques for rice grain quality using near infrared transmission spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 6, (1-4), A111-A116.
- Shimizu, N., J. Katsura., T. Yanagisawa., S. Inoue, R.P. Withey, I.A. Cowe, C.G. Eddison, A.B. Blakeney, T. Kimura, S. Yoshizaki, H. Okadome., H. Toyoshima and Ohtsyo. 1999. Determination of Apparent Amylose Content in Japanese Milled Rice Using Near-infrared Transmittance Spectroscopy. **Food Sci. Technol. Res** 5(4): 337 – 342.
- Tain, R., Gong-Hao Jiang, Li-Huan Shen, Ling-Qiang Wang and Tu-Qing He. 2004. Mapping quantitative trait loci underlying the cooking and eating quality of rice using a DH population. **Molecular Breeding** (2005) 15: 117-124.
- Thamakorn, P., A. Lukin, A. Imsil and K. Wasantiwong. 2006. Amylose Analysis of Thai Milled Rice by Near Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy. *In Japan-Korea joint symposium on Near Infrared Spectroscopy*. June 28-30, 2006. Hanyang University, Korea.
- Urbano, M.D., L.D. Castro, P.M. Perez Juan and M. A. Gomez-Nieto. 2004. Comparison and joint use of near infrared spectroscopy and Fourier transform mid infrared spectroscopy for the determination of wine parameters. **Talanta** 66(2005). 218-224. Available source: www.sciencedirect.com.
- USDA. 2005. Research impact on USDA Rice Quality Evaluation. Available Source: http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=7062&pf=1&cg_id=0, December 1, 2007.

- USDA. 2005a. Research impact on USDA Rice Quality Evaluation. Available Source:
http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=7062&pf=1&cg_id=0, December 1,
 2007. *Cited* Bergman, C.J., Delgado, J.T., McClung, A.M. and Fjellstrom, R.G. An
 improved method for using a microsatellite in the rice waxy gene to determine amylose
 class. **Cereal Chem.**
- USDA. 2005b. Research impact on USDA Rice Quality Evaluation. Available Source:
http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=7062&pf=1&cg_id=0, December 1,
 2007. *Cited* BeMiller, J.N. 1964. Iodimetric determination of amylose: Amperometric
 titration. IN Methods in Carbohydrate Chemistry. **Academic Press**, NY, p. 165-168.
- USDA. 2005c. Research impact on USDA Rice Quality Evaluation. Available Source:
http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=7062&pf=1&cg_id=0, December 1,
 2007. *Cited* Delwiche, S.R., M.M. Bean, R.E. Miller, B.D. Webb and P.C.
 Williams. 1995. Apparent Amylose Content of Milled Rice by Near Infrared Reflectance
 Spectrophotometry. **Cereal Chem.** 72(2): 182-187.
- USDA. 2005d. Research impact on USDA Rice Quality Evaluation. Available Source:
http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=7062&pf=1&cg_id=0, December 1,
 2007. *Cited* Halick, J.V. and Keneaster, K.K. 1956. The use of a starch-iodine-blue test
 as a quality indicator of white milled rice. **Cereal Chem.** 33:315-319.
- USDA. 2005e. Research impact on USDA Rice Quality Evaluation. Available Source:
http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=7062&pf=1&cg_id=0, December 1,
 2007. *Cited* Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. **Cereal Sci
 Today** 16:334-336, 338, 360.
- Wang, L.Q. W.J. Liu, Y. Xu, Y.Q. He, L. J. Juo, Y. Z. Xing, C. G. Xu and Qifa Zhang. 2007.
**Genetic basis of 17 traits and viscosity parameters characterizing the eating and
 cooking quality of rice grain.** Theor Appl Genet (2007) 115:463-476

Williams, P. 2007. **Near-infrared Technology – Getting the Best Out of Light: A Short Course in the Practical Implementation of Near-infrared Spectroscopy for the User.** Edition 5. At Kasetsart University. July 5 – 10, 2007.

_____. and K.H. Norris. 1987. Near-Infrared Technology in Agricultural and Food Industries. American Association of Cereal Chemists, Monnesota, USA, p 246

Wongpornchai, S., K. Dumri, S. Jongkaewwattana and B. Siri. 2004. Effects of drying methods and storage time on the aroma and milling quality of rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khao Dawk Mali 105. **Food Chemistry** 87: 407-414.

Wu, J.G and C.H. Shi. 2004. Prediction of grain weight, brown rice weight and amylose content in single rice grain using near-infrared reflectance spectroscopy. **Field Crops Research** 87(2004): 13-21.

Zhang X. M., C. H. Shi, J. G. Wu, H. Hisamitsu, T. Katsura, S. Y. Feng, G. L. Bao and S. H. Ye. 2003. Analysis of Variations in the Amylose Content of Grains Locate at Different Position in the Rice Panicle and the Effect of Milling. **Starch/Starke** 55: 265-270.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ปริมาณโปรตีนและอิมูโนโกลบูลินของข้าวสารไทยแต่ละเมล็ดในกลุ่มตัวอย่าง Calibration และ Validation

ตารางผนวกที่ ก1 ปริมาณโปรตีนของข้าวสารไทยแต่ละเมล็ดในกลุ่มตัวอย่าง Calibration และ Validation

No.	Samples (Val)	PC (%)	No.	Samples (Cal)	PC (%)
1	CN-01	4.56	1	CN-01	3.68
2	CN-02	4.94	2	CN-02	4.55
3	CN-03	4.96	3	CN-03	4.58
4	CN-04	5.00	4	CN-04	4.86
5	CN-05	6.25	5	CN-05	5.56
6	CN-06	6.61	6	CN-06	5.87
7	CN-07	6.93	7	CN-07	6.32
8	CN-08	7.34	8	CN-08	6.34
9	CN-09	7.72	9	CN-09	6.40
10	CN-10	8.00	10	CN-10	6.48
11	CN-11	9.02	11	CN-11	6.69
12	CN-12	9.22	12	CN-12	6.78
13	CN-13	9.75	13	CN-13	7.53
14	KD-01	3.71	14	CN-14	8.03
15	KD-02	4.23	15	CN-15	9.60
16	KD-03	5.08	16	KD-01	4.20
17	KD-04	5.30	17	KD-02	5.17
18	KD-05	5.50	18	KD-03	5.20
19	KD-06	5.53	19	KD-04	5.51
20	KD-07	5.86	20	KD-05	5.54
21	KD-08	5.99	21	KD-06	5.64
22	KD-09	6.28	22	KD-07	5.68
23	KD-10	6.33	23	KD-08	5.97
24	KD-11	6.40	24	KD-09	6.16
25	KD-12	6.48	25	KD-10	6.91

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

No.	Samples (Val)	PC (%)	No.	Samples (Cal)	PC (%)
26	KD-13	6.51	26	KD-11	7.03
27	KD-14	6.68	27	KD-12	7.16
28	KD-15	6.97	28	KD-13	7.18
29	KD-16	7.16	29	KD-14	7.34
30	KD-17	7.18	30	KD-15	7.41
31	KD-18	7.19	31	KD-16	7.44
32	KD-19	7.22	32	KD-17	7.80
33	KD-20	7.26	33	KD-18	7.90
34	KD-21	7.34	34	KD-19	8.23
35	KD-22	7.47	35	KD-20	9.12
36	KD-23	7.65	36	KD-21	9.36
37	KD-24	8.27	37	PT-01	3.89
38	KD-25	8.35	38	PT-02	3.95
39	KD-26	8.59	39	PT-03	4.16
40	KD-27	9.88	40	PT-04	4.29
41	PT-01	4.31	41	PT-05	4.34
42	PT-02	4.50	42	PT-06	4.77
43	PT-03	5.27	43	PT-07	4.94
44	PT-04	5.46	44	PT-08	5.27
45	PT-05	5.62	45	PT-09	5.44
46	PT-06	5.70	46	PT-10	5.47
47	PT-07	5.80	47	PT-11	5.78
48	PT-08	5.83	48	PT-12	5.83
49	PT-09	5.88	49	PT-13	6.12
50	PT-10	6.11	50	PT-14	6.13

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

No.	Samples (Val)	PC (%)	No.	Samples (Cal)	PC (%)
51	PT-11	6.13	51	PT-15	6.26
52	PT-12	6.14	52	PT-16	6.36
53	PT-13	6.41	53	PT-17	6.42
54	PT-14	6.47	54	PT-18	6.56
55	PT-15	6.77	55	PT-19	6.63
56	PT-16	6.81	56	PT-20	6.72
57	PT-17	7.12	57	PT-21	6.94
58	PT-18	7.15	58	PT-22	6.96
59	PT-19	7.50	59	PT-23	7.22
60	PT-20	7.52	60	PT-24	7.23
61	PT-21	7.52	61	PT-25	7.27
62	PT-22	7.62	62	PT-26	7.29
63	PT-23	7.63	63	PT-27	7.30
64	PT-24	7.79	64	PT-28	7.48
65	PT-25	7.94	65	PT-29	7.52
66	PT-26	8.37	66	PT-30	7.62
67	PT-27	8.46	67	PT-31	7.62
68	PT-28	8.76	68	PT-32	7.72
69	PT-29	8.91	69	PT-33	7.94
70	PT-30	9.61	70	PT-34	8.45
71	PT-31	9.70	71	PT-35	8.78
72	PT-32	10.10	72	PT-36	9.00
73	PT-33	10.15	73	PT-37	9.07
74	RD-01	6.17	74	PT-38	9.25
75	RD-02	6.36	75	PT-39	9.84

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

No.	Samples (Val)	PC (%)	No.	Samples (Cal)	PC (%)
76	RD-03	6.37	76	PT-40	10.00
77	RD-04	6.69	77	PT-41	10.15
78	RD-05	6.84	78	PT-42	10.21
79	RD-06	7.24	79	PT-43	10.95
80	RD-07	7.28	80	RD-01	5.88
81	RD-08	7.30	81	RD-02	6.17
82	RD-09	7.43	82	RD-03	6.83
83	RD-10	7.78	83	RD-04	7.14
84	RD-11	7.81	84	RD-05	7.51
85	RD-12	8.13	85	RD-06	7.65
86	RD-13	8.53	86	RD-07	7.66
87	RD-14	8.65	87	RD-08	7.77
88	RD-15	8.75	88	RD-09	7.79
89	RD-16	8.82	89	RD-10	8.18
90	RD-17	9.08	90	RD-11	8.25
91	RD-18	9.25	91	RD-12	8.53
92	RD-19	9.40	92	RD-13	8.55
93	RD-20	9.53	93	RD-14	8.66
94	RD-21	9.60	94	RD-15	8.76
95	RD-22	9.81	95	RD-16	8.85
			96	RD-17	8.95
			97	RD-18	9.53
			98	RD-19	9.88

CN: ชัยนาท 1, KD: ขาวดอกมะลิ 105, PT: ปทุมธานี 1, และ RD: กข 23

PC (%): Protein content (%)

Samples (Val): Validation Sample Set

Samples (Cal): Calibration Sample Set

ตารางผนวกที่ ก2 ปริมาณมิโอสของข้าวสารไทยแต่ละเมล็ดในกลุ่มตัวอย่าง Calibration และ Validation

No.	Samples (Val)	AC (%)	No.	Samples (Cal)	AC (%)
1	CN-01	12.77	1	CN-01	17.85
2	CN-02	19.25	2	CN-02	20.28
3	CN-03	19.52	3	CN-03	20.65
4	CN-04	19.57	4	CN-04	20.65
5	CN-05	20.49	5	CN-05	22.04
6	CN-06	20.65	6	CN-06	23.44
7	CN-07	20.65	7	CN-07	23.49
8	CN-08	22.48	8	CN-08	25.28
9	CN-09	23.15	9	CN-09	25.76
10	CN-10	23.44	10	CN-10	26.23
11	CN-11	24.09	11	CN-11	26.23
12	CN-12	24.19	12	CN-12	27.63
13	CN-13	24.84	13	CN-13	27.63
14	CN-14	24.84	14	CN-14	27.63
15	CN-15	26.23	15	CN-15	29.65
16	CN-16	26.88	16	CN-16	30.26
17	CN-17	27.63	17	CN-17	31.87
18	CN-18	27.63	18	CN-18	32.48
19	CN-19	27.63	19	KD-01	12.26
20	CN-20	29.03	20	KD-02	12.45
21	CN-21	29.97	21	KD-03	12.87
22	CN-22	30.14	22	KD-04	13.27
23	CN-23	32.17	23	KD-05	13.66
24	C4-060	23.41	24	KD-06	14.42
25	KD-01	12.26	25	KD-07	14.63

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

No.	Samples (Val)	AC (%)	No.	Samples (Cal)	AC (%)
26	KD-02	13.10	26	KD-08	15.15
27	KD-03	14.31	27	KD-09	15.21
28	KD-04	15.06	28	KD-10	16.46
29	KD-05	16.24	29	KD-11	16.46
30	KD-06	16.46	30	KD-12	16.53
31	KD-07	16.66	31	KD-13	17.85
32	KD-08	17.12	32	KD-14	20.65
33	KD-09	17.65	33	KD-15	22.04
34	KD-10	17.84	34	KD-16	23.44
35	KD-11	17.85	35	KD-17	24.09
36	KD-12	17.94	36	KD-18	24.84
37	KD-13	18.12	37	PT-01	13.80
38	KD-14	18.83	38	PT-02	16.34
39	KD-15	19.09	39	PT-03	16.46
40	KD-16	19.25	40	PT-04	18.29
41	KD-17	22.04	41	PT-05	19.52
42	KD-18	22.04	42	PT-06	19.57
43	KD-19	23.44	43	PT-07	19.70
44	KD-20	26.23	44	PT-08	20.22
45	KD-21	27.63	45	PT-09	20.49
46	PT-01	31.82	46	PT-10	20.65
47	PT-02	21.13	47	PT-11	20.65
48	PT-03	22.04	48	PT-12	22.12
49	PT-04	22.36	49	PT-13	22.43
50	PT-05	23.44	50	PT-14	22.74

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

No.	Samples (Val)	AC (%)	No.	Samples (Cal)	AC (%)
51	PT-06	24.84	51	PT-15	23.44
52	PT-07	20.21	52	PT-16	24.82
53	PT-08	14.64	53	PT-17	24.84
54	PT-09	23.44	54	PT-18	26.23
55	PT-10	20.01	55	PT-19	26.37
56	PT-11	20.23	56	PT-20	27.63
57	PT-12	20.65	57	PT-21	27.67
58	PT-13	26.23	58	RD-01	8.34
59	PT-14	21.33	59	RD-02	10.37
60	PT-15	27.63	60	RD-03	10.96
61	PT-16	22.04	61	RD-04	12.26
62	PT-17	20.65	62	RD-05	12.32
63	RD-01	15.49	63	RD-06	13.65
64	RD-02	26.23	64	RD-07	15.06
65	RD-03	20.11	65	RD-08	15.83
66	RD-04	12.39	66	RD-09	16.46
67	RD-05	12.26	67	RD-10	16.91
68	RD-06	20.65	68	RD-11	17.15
69	RD-07	17.85	69	RD-12	17.61
70	RD-08	18.65	70	RD-13	19.09
71	RD-09	19.46	71	RD-14	19.25
72	RD-10	9.75	72	RD-15	19.25
73	RD-11	9.24	73	RD-16	19.30
74	RD-12	13.66	74	RD-17	21.17
75	RD-13	19.33	75	RD-18	22.04

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

No.	Samples (Val)	AC (%)	No.	Samples (Cal)	AC (%)
76	RD-14	19.25	76	RD-19	23.32
77	RD-15	13.50	77	RD-20	23.44
78	RD-16	16.46	78	RD-21	27.01
79	RD-17	16.46	79	RD-22	28.95
80	RD-18	15.18	80	RD-23	30.42

CN: ชัยนาท 1, KD: ขาวดอกมะลิ 105, PT: ปทุมธานี 1, และ RD: กข 23

AC (%): Amylose content (%)

Samples (Val): Validation Sample Set

Samples (Cal): Calibration Sample Set

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทำกราฟมาตรฐานปริมาณมิโอส

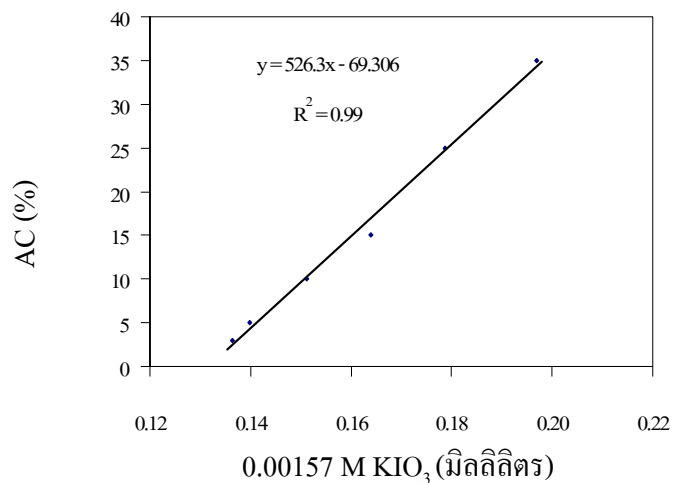
ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลการทำกราฟมาตรฐานปริมาณอมิไธส

AC (%)	Sample			Mean	mole $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	mole IO_3^-	ปริมาตร KIO_3 (ml)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 2				
	(ml)	(ml)	(ml)				
3	6.360	7.123	7.066	6.850	6.85E-06	0.364	0.136
5	6.335	6.932	7.087	6.785	6.785E-06	0.360	0.140
10	6.100	6.750	6.867	6.572	6.572E-06	0.349	0.151
15	6.100	6.400	6.500	6.333	6.333E-06	0.336	0.164
25	5.750	6.000	6.413	6.054	6.054E-06	0.321	0.179
35	5.833	5.650	5.650	5.711	5.711E-06	0.303	0.197

การสร้างสมการในการทำกราฟมาตรฐาน โดยการเตรียมสารมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 3, 5, 10, 15, 25 และ 35% ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Iodine titration แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอมิไธส กับปริมาตร KIO_3 (ml) ได้สูตร %AC เมื่อ x คือ ปริมาตร KIO_3 (ml)

$$\%AC = 526.3x - 69.306 \quad (20)$$

กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ 0.00157M KIO_3 กับ ร้อยละปริมาณอมิไธส (%AC)



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการหาค่าความผิดพลาดมาตรฐานของผู้ปฏิบัติงาน และวิธีการ หรือ Standard error
of laboratory (SEL)

ตารางผนวกที่ ค1 ข้อมูลการการหาค่าความผิดพลาดมาตรฐานของผู้ปฏิบัติงาน และวิธีการ หรือ
Standard error of laboratory (SEL)

No.	Name	ปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3(\text{ml})$	x_i	$x(\text{mean})_i$	$x(ij) - x(\text{mean})$	$[x(ij) - x(\text{mean})]^2$
1	KD01	6.414	14.66		2.04	4.15
2	KD01	6.560	10.58	12.62	-2.04	4.15
3	KD02	6.366	16.02		-1.70	2.90
4	KD02	6.244	19.42	17.72	1.70	2.90
5	KD03	6.500	12.26		-0.44	0.19
6	KD03	6.469	13.14	12.70	0.44	0.19
7	PT01	6.407	14.87		1.04	1.08
8	PT01	6.481	12.80	13.84	-1.04	1.08
9	PT02	6.528	11.48		-0.46	0.21
10	PT02	6.495	12.39	11.94	0.46	0.21
11	PT03	6.480	12.83		-1.11	1.24
12	PT03	6.400	15.06	13.95	1.11	1.24
13	CN01	5.750	33.22		0.00	0.00
14	CN01	5.750	33.22	33.22	0.00	0.00
15	CN02	5.771	32.63		3.85	14.85
16	CN02	6.047	24.92	28.77	-3.85	14.85
17	CN03	6.057	24.64		-0.80	0.63
18	CN03	6.000	26.23	25.44	0.80	0.63
19	RD01	5.750	33.22		0.95	0.91
20	RD01	5.818	31.31	32.26	-0.95	0.91
21	RD02	6.050	24.84		-1.40	1.95
22	RD02	5.950	27.63	26.23	1.40	1.95

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

No.	Name	ปริมาตร $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (ml)	x_i	$x(\text{mean})_i$	$x(ij) - x(\text{mean})$	$[x(ij) - x(\text{mean})]^2$
23	RD03	5.850	30.42		0.49	0.24
24	RD03	5.885	29.44	29.93	-0.49	0.24
				n = 12	SEL	2.17

ภาคผนวก ง

การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดมาตรฐานจากการทำนาย (SEP)

ตารางผนวกที่ ง1 การเปรียบเทียบค่า SEP¹ ระหว่างสมการทำนายโปรตีนที่พัฒนามาจากสมการที่ปรับแต่งด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับ MSC และอนุพันธ์อันดับ 2 (SM+MSC+2ndDerivative)

Pretreatment	SM	SM+MSC	SM+1 st Derivative	SM+MSC+2 nd Derivative
SEC %	0.61	0.94	0.91	0.91
Bias %	-0.24	-0.34	-0.37	-0.37
SEP %	1.00	1.08	0.91	0.91
t	2.00	2.00	2.00	2.00
n-2	93.00	93.00	93.00	93.00
r	0.74	0.71	0.89	1.00
r ²	0.55	0.50	0.79	1.00
1-r ²	0.45	0.50	0.21	0.00
$K = 1 + (2(1-r^2)t^2) / n-2$	1.04	1.04	1.02	1.00
K ²	1.08	1.09	1.04	1.00
(K ²)-1	0.08	0.09	0.04	0.00
SQRT (K ²)-1	0.28	0.29	0.19	0.00
K + SQRT (K ²)-1	1.32	1.34	1.21	1.00
$L = \text{SQRT}[K + \text{SQRT}(K^2)-1]$	1.15	1.16	1.10	1.00
SEP1	1.00	1.08	0.91	0.91
SEP2	0.91	0.91	0.91	0.91
SEP1/SEP2	1.09	1.19	1.00	1.00
(SEP1/SEP2) x (1/L)	0.95	1.03	0.91	1.00
(SEP1/SEP2) x L	1.26	1.37	1.10	1.00
Result	ns	sig	ns	ns

¹: การเปรียบเทียบค่า SEP ตามวิธีของ Fearn, 1996

ns: ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

sig: มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางผนวกที่ 2 การเปรียบเทียบค่า SEP¹ ระหว่างสมการทำนายอิมโกลิสที่พัฒนากับสมการที่ปรับแต่งด้วยวิธี Smoothing ร่วมกับอนุพันธ์อันดับ 2 (SM+2nd Derivative)

Pretreatment	SM	SM+MSC	SM+1 st Derivative	SM+2 nd Derivative
SEC %	4.34	4.46	4.34	3.06
Bias %	0.16	0.01	0.16	0.28
SEP %	4.44	4.39	4.44	4.33
t	2.00	2.00	2.00	2.00
n-2	78.00	78.00	78.00	78.00
r	0.86	0.86	0.84	1.00
r ²	0.73	0.73	0.71	1.00
1-r ²	0.27	0.27	0.29	0.00
$K = 1 + (2(1-r^2)t^2) / n-2$	1.03	1.03	1.03	1.00
K ²	1.06	1.06	1.06	1.00
(K ²)-1	0.06	0.06	0.06	0.00
SQRT (K ²)-1	0.24	0.24	0.24	0.00
K + SQRT (K ²)-1	1.26	1.26	1.27	1.00
$L = \text{SQRT}[K + \text{SQRT}(K^2)-1]$	1.12	1.12	1.13	1.00
SEP1	4.44	4.39	4.44	4.33
SEP2	4.33	4.33	4.33	4.33
SEP1/SEP2	1.02	1.01	1.02	1.00
(SEP1/SEP2) x (1/L)	0.91	0.90	0.91	1.00
(SEP1/SEP2) x L	1.15	1.14	1.16	1.00
Result	ns	ns	ns	ns

¹: การเปรียบเทียบค่า SEP ตามวิธีของ Fearn, 1996

ns: ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวจำเนียร นิลพวง
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 4 มิถุนายน 2524
สถานที่เกิด	กาญจนบุรี
ประวัติการศึกษา	วศบ. สาขาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	รางวัลระดับดี สาขาวิศวกรรมศาสตร์ รางวัลผลงาน คุณภาพงานวิจัยในการประชุมวิชาการ ครั้งที่ 4 ประจำปี 2550 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เรื่อง : การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในข้าวสารไทยที่ละ เม็ลล์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด