ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พืชไร่)

ปริญญา

พืชไร่ | พืชไร่นา

สาขา | **ภาควิชา**

เรื่อง การประเมินปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดโดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

Determination of Total Oil Content in Corn Seeds Using Near Infrared Spectroscopy

นามผู้วิจัย นางสาวรื่นฤดี แก้วชื่นชัย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิเชียร กีรตินิจกาล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ....

(อาจารย์ศุมาพร เกษมสำราญ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(รองศาสตราจารย์รังสฤษดิ์ กาวีต๊ะ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดโดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

Determination of Total Oil Content in Corn Seeds Using Near Infrared Spectroscopy

โดย

นางสาวรื่นฤดี แก้วชื่นชัย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พืชไร่)
พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รื่นฤดี แก้วชื่นชัย 2553: การประเมินปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดโดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พืชไร่) สาขาพืชไร่ ภาควิชาพืชไร่นา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิเชียร กีรตินิจกาล, Ph.D. 133 หน้า

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ คือ นำเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีมาใช้สร้างและพัฒนาสมการมาตรฐานสำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการประเมินหาปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดน้ำมันสูง ซึ่งเป็นเทคนิคที่รวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่าง ทำให้เมล็ดที่นำมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันด้วยเทคนิคนี้สามารถนำไปปลูกเพื่อปรับปรุงประชากรในรอบการคัดเลือกต่อไปได้ โดยเริ่มจากนำตัวอย่างข้าวโพด 102 ตัวอย่าง มาวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 1200-2400 นาโนเมตร(ค่า X) แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดโดยวิธีการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ (ค่า Y) หลังจากนั้นคำนวณหาความสัมพันธ์ของข้อมูลด้วยวิธี partial least squares regression (PLSR) พบว่า สมการที่คำนวณจากสเปกตรัมที่ปรับแต่งด้วยวิธีอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่ง ให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องภายในสมการ (RMSECV) ต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.6810 % w/w หลังจากนั้นนำสมการเบื้องต้นไปใช้ทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่มี SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้น แล้วคัดเลือกข้าวโพดโปรแกรมละ 20 ตัวอย่าง สำหรับนำไปหาปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดโดยวิธีการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ นำข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดและค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มเข้าไปในสมการเบื้องต้น เพื่อปรับปรุงสมการในทุกรอบของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ได้เป็น สมการปรับปรุงครั้งที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยค่า RMSECV และค่าสหสัมพันธ์ (R_c) คือ 0.6052, 0.5785 และ 0.5667 % w/w และ 0.8936, 0.9011 และ 0.9045 ตามลำดับ เมื่อพัฒนาสมการโดยคัดเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี moving window partial least squares regression (MWPLSR) พบว่า สมการ MWPLSR ที่ดีที่สุดคำนวณจากสเปกตรัมที่ปรับแต่งด้วยวิธีอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งและใช้ความยาวคลื่นในช่วง 1200-1440 นาโนเมตร ซึ่งตรวจสอบความถูกต้องด้วยกลุ่มตัวอย่างที่เป็นข้าวโพดจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้อง (RMSEP) และค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายได้จากสมการกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริง (bias) เท่ากับ 0.3610 % w/w และ -0.0162 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าสมการปรับปรุงครั้งที่ 3 อย่างไรก็ตาม ถ้านำสมการดังกล่าวไปใช้ทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดกลุ่มตัวอย่างอื่นนอกเหนือจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ พบว่า ให้ค่า RMSEP และ ค่า bias เพิ่มขึ้นเป็น 0.9147 % w/w และ 0.3220 ตามลำดับ

_____________________ _____________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Reunreudee Kaewcheenchai 2010: Determination of Total Oil Content in Corn Seeds Using Near Infrared Spectroscopy. Master of Science (Agronomy), Major Field: Agronomy, Department of Agronomy. Thesis Advisor: Assistant Professor Vichien Keeratinijakal, Ph.D. 133 pages.

The objective of this research is to develop the calibration model for prediction of total oil content in corn seeds using near infrared (NIR) spectroscopy, which will be used as a criterion to evaluate high oil corn in breeding program. NIR spectroscopy is a rapid and non-destructive method. Thus, it preserves the seed for propagation in next cycle. Pre-calibration model was developed from 102 corn samples. The NIR absorptions were collected in the region of 1200-2400 nm (X values) and the total oil content was determined by soxhlet extraction with petroleum ether (Y values). Calibration equations were calculated using partial least squares regression (PLSR). The pre-calibration model built using first derivative pretreated NIR spectra provided the lowest root mean square error of cross-validation (RMSECV) of 0.6810% w/w. Subsequently, this pre-calibration model was employed to predict the total oil content in corn seeds from 4 breeding programs, in which SW04L-336 and SW04L-337 were used as base populations. From the NIR prediction results of total oil content, 20 corn samples of each breeding program were selected for re-calculation of the model. The pre-calibration model was re-calibrated by adding NIR spectral and total oil content data of 20 corn samples of each program, in which the pre-calibration model was updated following 1^{st}, 2^{nd} and 3^{rd} re-calibration models, respectively. The RMSECV and correlation of calibration (R_c) of 1^{st}, 2^{nd} and 3^{rd} re-calibration models were 0.6052, 0.5785 and 0.5667 % w/w and 0.8936, 0.9011 and 0.9045, respectively. Moving window partial least squares regression (MWPLSR) is the wavelength interval selection method applied to optimize predictive performance of calibration model. The best MWPLS calibration model was developed from first derivative pretreated NIR spectra in the region of 1200-1440 nm which was tested using a validation sample set from four breeding programs. The root mean square error of prediction (RMSEP) and bias of MWPLS calibration model were 0.3610 % w/w and -0.0162, respectively, which were lower than those obtained from the 3^{rd} re-calibration model. However, when applied this MWPLSR calibration model to predict total oil content in another samples, the results showed that the RMSEP and bias values became higher which were 0.9147 % w/w and 0.3220, respectively.

_______________________	_______________________	___ / ___ / ___
Student's signature	Thesis Advisor's signature	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร กีรตินิจกาล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ดร.ศุมาพร เกษมสำราญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ คุณวารุณี ธนะแพสย์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ที่ช่วยให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และกราบขอบพระคุณ ดร.ธานี ศรีวงศ์ชัย ประธานการสอบ และ ดร.เอนก ศิลปพันธุ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีการตรวจสอบสินค้าโดยวิธีไม่ทำลาย และหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีเอ็นไซม์และการจัดการของเสีย ฝ่ายนาโนเทคโนโลยี และเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ที่ให้คำปรึกษาและความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในงานวิจัย และขอขอบคุณนางสาวสุพัฒนา บุรีรัตน์ และ นายวัฒนา อาจวิชัย รวมทั้งพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกท่าน ที่ช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน ตลอดจนให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจในการดำเนินงานวิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ และพี่สาว ที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือ ตลอดจนให้กำลังใจจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

รื่นฤดี แก้วชื่นชัย

เมษายน 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	34
วิธีการ	35
ผลและวิจารณ์	45
ผล	45
วิจารณ์	68
สรุปและข้อเสนอแนะ	71
สรุป	71
ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	72
ภาคผนวก	81
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด	82
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด	86
ภาคผนวก ค ผลการคัดเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี MWPLSR	129
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	133

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบภายในอาหารกับช่วงเนียร์อินฟราเรด	13
2	แนวทางการแปลความหมายค่าสหสัมพันธ์ (R)	26
3	อุตสาหกรรมอาหารที่มีการนำเครื่อง NIR spectrometer มาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ	31
4	ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 102 ตัวอย่าง	48
5	ผลทางสถิติของสมการเบื้องต้นสำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด	49
6	ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_S0, IHO_S0, Alex_FS0 และ IHO_FS0 จากการทำนายด้วยสมการเบื้องต้น	51
7	ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_FS1 และ IHO_FS1 จากการทำนายด้วยสมการปรับปรุงครั้งที่ 1	52
8	ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_S1, IHO_S1, Alex_FS2 และ IHO_FS2 จากการทำนายด้วยสมการปรับปรุงครั้งที่ 2	52
9	ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 80 ตัวอย่างจาก Alex_S0, IHO_S0, Alex_FS0 และ IHO_FS0	53
10	ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 182 ตัวอย่าง	53
11	ผลทางสถิติของสมการปรับปรุงครั้งที่ 1 สำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด	55

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
12	ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 40 ตัวอย่าง จาก Alex_FS1 และ IHO_FS1	55
13	ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 222 ตัวอย่าง	56
14	ผลทางสถิติของสมการปรับปรุงครั้งที่ 2 สำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด	57
15	ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 80 ตัวอย่าง จาก Alex_S1, IHO_S1, Alex_FS2 และ IHO_FS2	58
16	ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 302 ตัวอย่าง	58
17	ผลทางสถิติของสมการปรับปรุงครั้งที่ 3 สำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด	59
18	ผลทางสถิติของสมการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดโดยใช้ความยาวคลื่นตลอดทั้งช่วงกับการคัดเลือกช่วงความยาวคลื่น โดยกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องเป็นประชากรข้าวโพดจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ในรอบการคัดเลือกที่ 0, 1 และ 2 ที่ปลูกในฤดูทดสอบผลผลิต	63
19	ผลทางสถิติของการตรวจสอบความถูกต้องของสมการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด โดยกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องเป็นตัวอย่างประชากรข้าวโพด 23 ตัวอย่าง ลูกผสม 2 ตัวอย่าง และสายพันธุ์แท้ 5 ตัวอย่าง รวม 30 ตัวอย่าง	66

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ หน้า

ตารางผนวกที่		หน้า
ข1	รายชื่อและปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของประชากรข้าวโพด 102 ตัวอย่าง สำหรับใช้ในการสร้างสมการเบื้องต้น	87
ข2	ผลการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_S0 และ IHO_S0 ประชากรละ 200 ตัวอย่าง รวม 400 ตัวอย่าง ด้วยสมการเบื้องต้น	91
ข3	ผลการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_FS0 และ IHO_FS0 ประชากรละ 200 ตัวอย่าง รวม 400 ตัวอย่าง ด้วยสมการเบื้องต้น	98
ข4	ผลการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_FS1 และ IHO_FS1 ประชากรละ 200 ตัวอย่าง รวม 400 ตัวอย่าง ด้วยสมการปรับปรุงครั้งที่ 1	105
ข5	ผลการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_S1 และ IHO_S1 ประชากรละ 200 ตัวอย่าง รวม 400 ตัวอย่าง ด้วยสมการปรับปรุงครั้งที่ 2	112
ข6	ผลการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_FS2 และ IHO_FS2 ประชากรละ 200 ตัวอย่าง รวม 400 ตัวอย่าง ด้วยสมการปรับปรุงครั้งที่ 2	119
ข7	ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดที่ทำนายด้วยสมการ MWPLSR และวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งเป็นประชากรข้าวโพดจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ในรอบการคัดเลือกที่ 0, 1 และ 2 ที่ปลูกในฤดูทดสอบผลผลิต	126
ข8	ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดที่ทำนายด้วยสมการ MWPLSR และวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างข้าวโพดที่นอกเหนือจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์	128

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมันชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว	9
2	การกระทำกับสารในแบบต่าง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	10
3	การดูดกลืนของโมเลกุล X-H (X = O, C, H, N เป็นต้น) ทำให้เกิดพีคในสเปคตรัมเนียร์อินฟราเรด	13
4	ไดอะแกรมแสดงรายละเอียดการทำงานภายในเครื่อง NIR spectrometer รุ่น InfraAlyzer 500 ของ Bran+Luebbe	14
5	เครื่อง NIR spectrometer ที่เชื่อมต่อกับโปรแกรมสำเร็จรูปทางคอมพิวเตอร์	15
6	เทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสงแบบต่าง ๆ	16
7	ขั้นตอนการสร้างสมการทำนายและการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้น	17
8	อนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งและสองของสเปกตรัมเริ่มต้น	19
9	การใช้อนุพันธ์ลำดับที่สองแก้ปัญหาการซ้อนทับกันของจุดยอดในสเปกตรัม	19
10	การใช้อนุพันธ์ลำดับที่สองแก้ปัญหาการเพิ่มขึ้นของความชันของสเปกตรัมที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น	20
11	(ก) สเปกตรัมเริ่มต้น และ (ข) สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งโดยวิธี MSC	21
12	การสร้างสมการแบบ partial least squares regression (PLSR)	24
13	แผนภาพการสร้างสมการแบบ moving window partial least squares regression (MWPLSR)	25
14	ขั้นตอนการสร้างสมการเบื้องต้นสำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด	37
15	การประยุกต์ใช้สมการทำนายประเมินปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้ประชากรข้าวโพด SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้นโดยใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบคัดเลือกรวมประยุกต์	39
16	การประยุกต์ใช้สมการทำนายประเมินปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้ประชากรข้าวโพด SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้นโดยใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบ full sib ประยุกต์	40

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ | หน้า

ภาพที่		หน้า
17	ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการทำนายที่สร้างขึ้น	44
18	ขั้นตอนการวัดค่าการดูดกลืนแสงของเมล็ดข้าวโพดด้วยเครื่อง NIR spectrometer โดยการบรรจุเมล็ดข้าวโพดลงใน rotating cup	46
19	สเปกตรัมเริ่มต้นของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 1200-2400 นาโนเมตร ของข้าวโพด 102 ตัวอย่าง	46
20	การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดต่อจำนวนตัวอย่าง ข้าวโพด 102 ตัวอย่าง	47
21	สเปกตรัมเริ่มต้นและสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธีแตกต่างกัน	50
22	การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดต่อจำนวนตัวอย่าง ข้าวโพด 182 ตัวอย่าง	54
23	การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดต่อจำนวนตัวอย่าง ข้าวโพด 222 ตัวอย่าง	56
24	การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดต่อจำนวนตัวอย่าง ข้าวโพด 302 ตัวอย่าง	58
25	สเปกตรัมของเมล็ดข้าวโพดที่ได้จากตัวอย่างที่มีขนาดของเมล็ดแตกต่างกัน	61
26	Scatter plot ระหว่างปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ด (% w/w) ที่ทำนายด้วยสมการ MWPLSR (NIR predicted values) (แกน Y) และวิเคราะห์โดยการสกัดด้วย ปิโตรเลียมอีเทอร์ (actual values) (แกน X) ของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องซึ่งเป็นประชากรข้าวโพดจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ในรอบการคัดเลือกที่ 0, 1 และ 2 ที่ปลูกในฤดูทดสอบผลผลิต	65
27	Scatter plot ระหว่างปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ด (% w/w) ที่ทำนายด้วยสมการ MWPLSR (NIR predicted values) (แกน Y) และวิเคราะห์โดยการสกัดด้วย ปิโตรเลียมอีเทอร์ (actual values) (แกน X) ของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งเป็นตัวอย่างประชากรข้าวโพด 23 ตัวอย่าง ลูกผสม 2 ตัวอย่าง และสายพันธุ์แท้ 5 ตัวอย่าง รวม 30 ตัวอย่าง	68

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก1	เครื่องสกัดน้ำมัน (soxhlet extraction apparatus) และเครื่องทำความเย็น (refrigerated circulator)	85
ค1	กราฟระหว่างค่า log (SSR) กับช่วงความยาวคลื่น จากวิธี MWPLSR โดยคำนวณจากสเปกตรัมเริ่มต้น	130
ค2	กราฟระหว่างค่า log (SSR) กับช่วงความยาวคลื่น จากวิธี MWPLSR โดยคำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี 1^{st} derivative	130
ค3	กราฟระหว่างค่า log (SSR) กับช่วงความยาวคลื่น จากวิธี MWPLSR โดยคำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี 2^{nd} derivative	131
ค4	กราฟระหว่างค่า log (SSR) กับช่วงความยาวคลื่น จากวิธี MWPLSR โดยคำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี MSC	131
ค5	กราฟระหว่างค่า log (SSR) กับช่วงความยาวคลื่น จากวิธี MWPLSR โดยคำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี MSC ร่วมกับ 1^{st} derivative	132
ค6	กราฟระหว่างค่า log (SSR) กับช่วงความยาวคลื่น จากวิธี MWPLSR โดยคำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี MSC ร่วมกับ 2^{nd} derivative	132

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

NIR	=	Near infrared
PLSR	=	Partial least squares regression
MWPLSR	=	Moving window partial least squares regression
PC	=	Principal component
R_c	=	Correlation of calibration
R_{cv}	=	Correlation of cross validation
RMSEC	=	Root mean square error of calibration
RMSECV	=	Root mean square error of cross validation
RMSEP	=	Root mean square error of prediction
MSC	=	Multiplicative scatter correction
1^{st} derivative	=	First derivative
2^{nd} derivative	=	Second derivative
Alex_S	=	โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้ข้าวโพดสายพันธุ์ SW04L-336 เป็นประชากรเริ่มต้นโดยใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบคัดเลือกรวมประยุกต์
IHO_S	=	โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้ข้าวโพดสายพันธุ์ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้นโดยใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบคัดเลือกรวมประยุกต์
Alex_FS	=	โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้ข้าวโพดสายพันธุ์ SW04L-336 เป็นประชากรเริ่มต้นโดยใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบ full sib ประยุกต์
IHO_FS	=	โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้ข้าวโพดสายพันธุ์ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้นโดยใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบ full sib ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การประเมินปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด
โดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

Determination of Total Oil Content in Corn Seeds
Using Near Infrared Spectroscopy

คำนำ

ข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันในเมล็ดสูงนิยมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบผลิตเป็นอาหารมนุษย์และสัตว์ นอกจากนั้นน้ำมันจากข้าวโพดยังถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด ทำให้ข้าวโพดน้ำมันสูงกลายเป็นธัญพืชที่มีมูลค่าสูง (Lambert, 2001) นักปรับปรุงพันธุ์จึงมีความต้องการที่จะปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดให้มีปริมาณน้ำมันในเมล็ดสูงขึ้น โดยวิธีการปรับปรุงประชากรข้าวโพดที่นิยมวิธีหนึ่ง คือ การคัดเลือกแบบวงจร (recurrent selection) ซึ่งในขั้นตอนการประเมินประชากรสำหรับนำไปใช้เป็นข้อมูลในการคัดเลือกประชากรที่มีปริมาณน้ำมันในเมล็ดสูง ต้องนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดโดยการสกัดด้วยสารเคมี (soxhlet extraction method) (AOAC, 2000) โดยวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีมาตรฐาน มีความถูกต้องและแม่นยำสูง แต่มีข้อจำกัด คือ มีการบดเมล็ด ค่าใช้จ่ายสูง ใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน และรายงานผลล่าช้า (Font *et al*., 2006) จึงมีการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดโดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (near infrared (NIR) spectroscopy) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างข้าวโพดได้เป็นจำนวนมากในเวลาอันรวดเร็ว นอกจากนี้ยังเป็นเทคนิคที่ประหยัดค่าใช้จ่าย เนื่องจากไม่ใช้สารเคมี รวมทั้งเป็นวิธีที่ไม่ทำลายตัวอย่าง ดังนั้นจึงสามารถนำเมล็ดไปวิเคราะห์ด้านอื่น ๆ หรือนำไปขยายพันธุ์ต่อไปได้ (Osborne *et al*., 1993; Font *et al*., 2006) เทคนิคนี้จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง ทั้งการวิเคราะห์ด้านคุณภาพและปริมาณ (Murray and Cowe, 1992) โดยมีงานวิจัยที่ได้นำเทคนิคนี้มาใช้ทำนายองค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดพืชเศรษฐกิจหลายชนิด เช่น ข้าวโพด (Orman and Schumann, 1991; Berardo *et al*., 2004; Welle *et al*., 2005; Montes *et al*., 2006; Jiang *et al*., 2007) เมล็ดงา (Sato *et al*., 2003; Kim *et al*., 2006) ถั่วเหลือง (Panford *et al*., 1988; Tajuddin *et al*., 2002) ถั่วลิสง (Misra *et al*., 2000 ; Tillman *et al*., 2006) ทานตะวัน (Velasco *et al*., 1999; Fassio and Cozzolino, 2004) ข้าวสาลี (Delwiche, 1998; Sissons *et al*., 2006) และข้าว (Choi and Kim, 2000; Wu and Shi, 2004)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ คือ นำ NIR spectroscopy มาใช้สร้างและพัฒนาสมการมาตรฐาน สำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการประเมินหาปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดน้ำมันสูงที่มี SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้น ซึ่งทำให้โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว และสามารถนำเมล็ดที่มีปริมาณน้ำมันสูงไปปลูกเพื่อคัดเลือกในรอบการคัดเลือกต่อไปได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อวิจัยและพัฒนาการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดด้วย NIR spectroscopy สำหรับใช้ทดแทนการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน

2. เพื่อพัฒนาสมการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดที่ได้จาก NIR spectroscopy ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

3. เพื่อประยุกต์ใช้สมการทำนายในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพด สำหรับใช้ในการประเมินประชากรเพื่อคัดเลือกข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันในเมล็ดสูงได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

1. การปรับปรุงประชากรพืช (population improvement)

การปรับปรุงประชากร คือ การปรับปรุงความสามารถและคุณลักษณะของพันธุ์พืชให้ดีขึ้นกว่าเดิมโดยวิธีการคัดเลือกแบบวงจร (recurrent selection) แบบต่าง ๆ เพื่อเพิ่มอัตราส่วนของยีนหรือยีโนไทป์ที่ต้องการ โดยการปรับปรุงนี้เหมาะสมสำหรับพืชผสมข้าม แต่ก็อาจใช้กับพืชผสมตัวเองที่สามารถผสมข้ามได้สะดวก เช่น พวกที่มียีนควบคุมการเป็นหมันของดอกตัวผู้ ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถภายในพันธุ์ เมื่อปรับปรุงแล้วสามารถใช้เป็นพันธุ์การค้าได้ทันทีหรือใช้ในการผลิตลูกผสม โดยพันธุ์พืชที่จะนำเข้าสู่โครงการปรับปรุงพันธุ์อาจเป็นพันธุ์ผสมเปิด พันธุ์สังเคราะห์ ลูกผสมคู่ ลูกผสมสามทาง และลูกผสมเดี่ยว (ไพศาล, 2525)

การคัดเลือกแบบวงจร หมายถึง การคัดเลือกใด ๆ ก็ตามที่นำสายพันธุ์ที่ได้รับการคัดเลือกมาผสมรวมหลังสิ้นสุดรอบ และดำเนินการเช่นเดียวกันซ้ำหลาย ๆ รอบ การดำเนินงานมีขั้นตอนดังนี้คือ 1) การสกัดหรือสร้างสายพันธุ์จากประชากรของพืชที่ต้องการปรับปรุงที่เรียกว่า ประชากรพื้นฐาน (base population) 2) การทดสอบสายพันธุ์ และ 3) การผสมรวมสายพันธุ์ดีที่คัดเลือกไว้เพื่อประกอบเป็นพันธุ์ปรับปรุงใหม่ และใช้เป็นประชากรพื้นฐานเพื่อดำเนินการคัดเลือกต่อไป (สุทัศน์, 2552)

2. การปรับปรุงภายในประชากร (intrapopulation improvement)

ไพศาล (2525) กล่าวว่า การปรับปรุงภายในประชากร หมายถึง การปรับปรุงความสามารถของกลุ่มพืชหรือพันธุ์พืชพันธุ์ใดพันธุ์หนึ่งโดยเฉพาะ เป็นการยกระดับของกลุ่มหรือพันธุ์พืชนั้น เช่น ให้มีผลผลิตเพิ่มขึ้น มีเปอร์เซ็นต์โปรตีน ไขมัน หรือคุณค่าทางอาหารดีขึ้น ให้มีการต้านทานโรคดีขึ้นกว่าเดิม เมื่อปรับปรุงประชากรแล้วอาจใช้เป็นพันธุ์ หรือนำไปใช้ในการสกัดพันธุ์ ซึ่งการคัดเลือกแบบวงจรมีหลายวิธี ดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. การคัดเลือกโดยดูจากลักษณะภายนอก (mass selection หรือ recurrent selection for phenotype)

2. การคัดเลือกโดยดูลูกร่วมพ่อหรือแม่ (half sib selection) เป็นการคัดเลือกระหว่างแถวพืชในแต่ละแถวมีพ่อหรือแม่ร่วมกัน การคัดเลือกแบบนี้มีการทดสอบรุ่นลูก ซึ่งอาจเป็นลูกจากการผสมข้าม หรือลูก top cross แบ่งวิธีการคัดเลือกแบบนี้ออกได้ 2 วิธี ดังนี้

2.1 วิธีฝักต่อแถวแบบประยุกต์ (modified ear-to-row)

2.2 วิธีผสมกับพันธุ์ทดสอบ (half sib family selection)

3. การคัดเลือกโดยดูจากพี่น้องพ่อแม่เดียวกัน (full sib selection)

4. การคัดเลือกโดยดูจากลูก S_1 (S_1 or selfed progeny selection)

3. องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวโพด

เมล็ดข้าวโพดประกอบด้วย 4 ส่วน คือ pericarp (hull หรือ bran), embryo, endosperm และ tip cap ในอัตราส่วน 5, 12, 82 และ 1 % ตามลำดับ (Inglett, 1970) เมื่อเมล็ดข้าวโพดสุกแก่แล้ว จะมีสัดส่วนของแป้ง 70-75 % โปรตีน 10 % และน้ำมัน 4-5 % (Boyer and Hannah, 2001) รวมทั้งมีรายงานของประเทืองศรี และคณะ (2526); ไพจิตร (2530) ว่า เมล็ดข้าวโพดที่ความชื้น 10 % จะมีปริมาณโปรตีน 10-12 % แป้ง 65-70 % เถ้า 9.38 % และน้ำมัน 3-9 % แต่ถ้าแยกเอา germ หรือ embryo ออก พบว่า มีปริมาณน้ำมัน 50-54 % ของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ด ซึ่งสอดคล้องกับ Corn Industries Research Foundation (1960) ที่รายงานว่า เอมบริโอเป็นแหล่งน้ำมันที่สำคัญ โดยพันธุ์ข้าวโพดที่มีเอมบริโอขนาดใหญ่จะมีปริมาณน้ำมันในเมล็ดสูงกว่าพันธุ์ข้าวโพดที่มีเอมบริโอขนาดเล็กกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าเอนโดสเปิร์มไม่มีผลต่อปริมาณน้ำมันในเมล็ด (ชเนษฎ์, 2541)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การจำแนกชนิดข้าวโพดตามองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ด

ชูศักดิ์ และ ทิวา (2541) จำแนกชนิดข้าวโพดตามองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ด ดังนี้

1. ข้าวโพดแป้ง (field corn หรือ starchy corn) เป็นข้าวโพดที่ใช้ประโยชน์จากแป้งในเมล็ด ได้แก่ ข้าวโพดหัวแข็ง ข้าวโพดหัวบุบ และข้าวโพดแป้ง

2. ข้าวโพดน้ำมันสูง (high oil corn) เป็นข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันในส่วนของคัพภะสูง ซึ่งพันธุ์ปกติมีปริมาณน้ำมันร้อยละ 1.2-5.0 ส่วนข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันในเมล็ดสูงกว่านี้จัดเป็นข้าวโพดน้ำมันสูง

3. ข้าวโพดคุณภาพโปรตีนสูง (high lysine corn) โดยปกติเมล็ดข้าวโพดมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 7-10 แต่ข้าวโพดชนิดนี้มียีน 1 คู่ ที่เป็นยีนด้อยของ Opaque-2 อยู่บนโครโมโซมคู่ที่ 7 ซึ่งควบคุมการสังเคราะห์ไลซีนให้ได้ปริมาณสูงกว่าปกติ ลักษณะแป้งเป็นแป้งอ่อนและทึบแสง น้ำหนักเมล็ดเบา ทำให้เชื้อราและแมลงเข้าทำลายเมล็ดได้ง่าย

5. ข้าวโพดน้ำมันสูง

การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมของข้าวโพดนั้นไม่ได้ส่งผลแต่เพียงปริมาณผลผลิต และลักษณะทางเกษตรอื่น ๆ เท่านั้น แต่ยังมีผลต่อคุณค่าทางสารอาหาร และคุณสมบัติในทางอุตสาหกรรมด้วย เช่น การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์น้ำมัน โปรตีน แป้ง คุณภาพของโปรตีน และชนิดของแป้งในเมล็ดข้าวโพด ความเข้มข้นของน้ำมันในเมล็ดมักกล่าวเป็นปริมาณน้ำมันในเมล็ดซึ่งมีความแปรปรวนมาก จากการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำมันที่พบต่ำสุดในประชากรข้าวโพด Burr's white เท่ากับ 1.2 % และสูงสุดเท่ากับ 21.3 % ในชั่วที่ 87 ของการคัดเลือก สายพันธุ์แท้ที่พบในเขต Corn belt ของสหรัฐอเมริกา มีปริมาณน้ำมันอยู่ในช่วง 2.5-5.5 % และพันธุ์ลูกผสมที่ปลูกเป็นการค้ามีปริมาณน้ำมัน 4-5 % (Alexander, 1988)

ในด้านการปรับปรุงพันธุ์ พบว่า ถึงแม้จะมีประชากรข้าวโพดที่มีน้ำมันสูงอยู่แล้ว แต่ก็ยังมีปัญหาอยู่ว่าจะปรับปรุงพันธุ์อย่างไรจึงจะได้ปริมาณน้ำมันสูงขึ้นกว่าเดิม จากหลักทฤษฎีที่ว่าการสังเคราะห์น้ำมัน 1 หน่วยแคลอรีนั้น ต้องใช้พลังงานถึง 2 แคลอรี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการสังเคราะห์แป้ง พบว่า ใช้พลังงานน้อยกว่า แต่พลังงานที่ได้จากน้ำมัน 1 หน่วยน้ำหนัก จะให้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พลังงานมากกว่าแป้งและโปรตีนถึง 2.25 เท่า ดังนั้นข้าวโพดน้ำมันสูงจึงให้ผลผลิตต่อพื้นที่ต่ำ (Alexander, 1988)

6. ประโยชน์ของข้าวโพดน้ำมันสูง

Alexander (1987) ได้กล่าวถึงข้อได้เปรียบของข้าวโพดน้ำมันสูง เรื่องสารอาหารและคุณค่าทางเศรษฐกิจ ดังนี้

1. ถ้าใช้ข้าวโพดน้ำมันสูงเป็นอาหารสัตว์ สัตว์จะได้รับพลังงานสูงขึ้น และใช้ปริมาณน้อยลง เนื่องจากน้ำมันให้พลังงานสูงกว่าแป้ง 2.25 เท่า โดยถ้ามีเปอร์เซ็นต์น้ำมันเพิ่มขึ้น 1 หน่วย สามารถลดปริมาณอาหารลงได้ 1.5 %

2. เมื่อน้ำมันในเมล็ดเพิ่มขึ้นจะทำให้โปรตีนเพิ่มสูงขึ้นด้วย ถ้าน้ำมันเพิ่มขึ้น 3 หน่วย (%) โปรตีนเพิ่มขึ้น 1 หน่วย (%)

3. ข้าวโพดน้ำมันสูงมีคุณภาพของโปรตีนดีกว่าข้าวโพดธรรมดา เนื่องจากมีปริมาณไลซีนสูงกว่า

4. ข้าวโพดน้ำมันสูงมีแคโรทีนอย (carotenoids) สูง ถ้านำมาใช้เป็นอาหารของไก่เนื้อและไก่ไข่ จะทำให้สีหนังสวยและสีของไข่แดงเข้มขึ้น

5. เมื่อใช้ข้าวโพดน้ำมันสูงเป็นอาหารสัตว์ สัตว์จะเจริญเติบโตได้ดีกว่าข้าวโพดธรรมดา

7. น้ำมันข้าวโพด

น้ำมันข้าวโพดประกอบด้วย triglycerides เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งประกอบด้วย กรดไขมัน 2 ชนิด คือ กรดไขมันอิ่มตัว และกรดไขมันไม่อิ่มตัว มีโครงสร้างโมเลกุลดังภาพที่ 1 โดย กรดไขมันอิ่มตัว ได้แก่ palmitic, stearic และ arachidic acid ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัว ได้แก่ oleic, linoleic และ linolenic acid กรดไขมันไม่อิ่มตัวนี้ เป็นกรดไขมันที่เป็นประโยชน์ และเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของกรดไขมันในข้าวโพด (Corn Industries Research Foundation, 1960) คุณภาพน้ำมันในเมล็ดธัญพืชอาจเสื่อมได้ 2 รูปแบบ คือ การเสื่อมโดยกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) จาก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอนไซม์ไลเพส (lipase) ซึ่งมีในเมล็ดโดยธรรมชาติอยู่แล้ว และการเสื่อมโดยกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) จากเอนไซม์ลิพอซิเดส (lipoxidase) ในสภาพปกติน้ำมันกับเอนไซม์ในเมล็ดอยู่กันคนละส่วนและไม่เข้าทำปฏิกิริยากัน เมื่อมีการเก็บเมล็ดในสภาพที่ดีความเสื่อมจะเกิดขึ้นได้น้อย แต่ถ้าเมล็ดเกิดความเสียหายหรือเกิดรอยแผล ซึ่งอาจเกิดจากขั้นตอนการขัด สี หรือบดเป็นแป้ง มีผลทำให้เอนไซม์ทำปฏิกิริยากับน้ำมัน เกิดเป็นสารกลีเซอรอล และกรดไขมันอิสระเป็นสาเหตุให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนได้ (อรอนงค์, 2538)

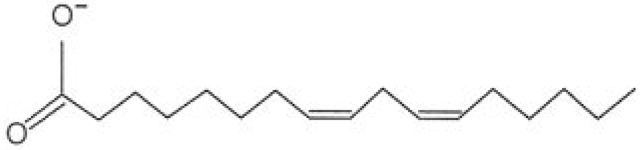
ประเทืองศรี และ วิมลศรี (2528); ไพจิตร (2530) รายงานว่า น้ำมันข้าวโพด ประกอบด้วยกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว และกรดไขมันชนิดอิ่มตัว โดยมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวทั้งหมด 82.67 % ประกอบด้วย oleic acid 27.38 %, linoleic acid 53.67 % และ linolenic acid 1.62 % ส่วนกรดไขมันชนิดอิ่มตัวมีทั้งหมด 17.33 % ประกอบด้วย palmitic acid 13.95 %, stearic acid 2.50 % และ arachidic acid 0.88 %

Beadle *et al*. (1965) รายงานว่า องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันข้าวโพดที่ขายตามท้องตลาดสหรัฐอเมริกา ประกอบด้วย linoleic, oleic, linolenic, palmitic, stearic และ arachidic acid ในอัตรา 58.7, 26.6, 0.8, 11.5, 2.2 และ 0.2 % ตามลำดับ

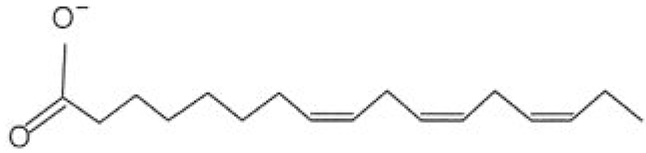
Alexander (1988) รายงานว่า คุณภาพของข้าวโพดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวกับกรดไขมันอิ่มตัว ถ้าหากมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่าจะจัดว่ามีคุณภาพดี โดยข้าวโพดที่ปลูกในเขต Corn belt ของสหรัฐอเมริกา พบว่า มี linoleic acid 60 %, oleic acid 20 %, palmitic acid 18 %, stearic acid 2 % และ linolenic acid รวมกับกรดไขมันอื่น ๆ อีกเพียงเล็กน้อย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

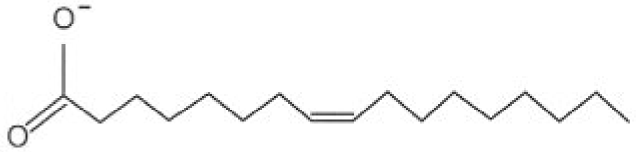
ก) Linoleic acid



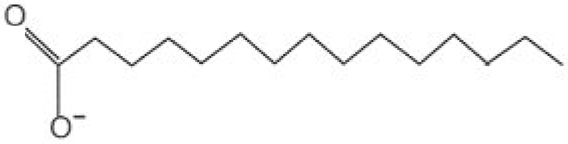
ข) Linolenic acid



ค) Oleic acid



ง) Palmitic acid



ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมันชนิดอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว

ที่มา: Ramírez-Tortosa *et al*. (2006)

8. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน

ไขมันหรือน้ำมัน เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ไม่ละลายน้ำ ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้สกัดน้ำมัน ได้แก่ ไดเอทิลอีเทอร์ ปิโตรเลียมอีเทอร์ และคลอโรฟอร์ม เป็นต้น จากคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำของน้ำมันทำให้สามารถแยกออกจากโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และน้ำในเมล็ดพืชได้ หลักการในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน คือ การหาน้ำหนัก โดยสกัดน้ำมันออกจากเมล็ดพืชด้วยตัวทำละลายอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องสกัดน้ำมัน (soxhlet extraction apparatus) (ภาพผนวกที่ ก1) เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นระเหยเพื่อกำจัดตัวทำละลาย แล้วชั่งน้ำหนักหาปริมาณน้ำมันที่เหลือ (AOAC, 2000) คำนวณหาปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดได้ดังสมการที่ (1)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\text{ปริมาณน้ำมัน (\%)} = \frac{(W_2 - W_1)}{W} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ W = น้ำหนักของตัวอย่างอบแห้ง หน่วยเป็นกรัม (g)

W_1 = น้ำหนักของขวดแก้วก้นกลมที่นำไปอบจนได้น้ำหนักคงที่ หน่วยเป็นกรัม (g)

W_2 = น้ำหนักของขวดแก้วก้นกลมและน้ำมันหลังอบแห้งจนน้ำหนักคงที่ หน่วยเป็นกรัม (g)

ถึงแม้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดโดยการสกัดด้วยสารเคมี จะมีความถูกต้องแม่นยำสูง แต่กรณีที่มีจำนวนตัวอย่างในการวิเคราะห์มาก และมีข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลาการปลูก ทำให้ได้ข้อมูลไม่ทันกับการคัดเลือกเพื่อนำไปปลูกในฤดูถัดไป รวมทั้งเมล็ดที่นำมาวิเคราะห์โดยวิธีการสกัดด้วยสารเคมีต้องบดจึงไม่สามารถนำไปปลูกได้ ดังนั้นการนำ NIR spectroscopy มาประยุกต์ใช้ในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์เพื่อประเมินปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจะช่วยประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ได้อย่างมาก และไม่ทำลายตัวอย่างอีกด้วย

9. หลักการของสเปกโตรสโกปี

หลักการของสเปกโตรสโกปี คือ เมื่อลำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุจะมีแสงบางส่วนที่ถูกดูดกลืน (absorbed) บางส่วนผ่านทะลุออกไป (transmitted) บางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ (reflected) บางส่วนเกิดการวาวแสงหรือการเรืองแสง (fluorescence or phosphorescence) และบางส่วนอาจเกิดการกระเจิงแสง (scattered) (นิพนธ์, 2545) แสดงดังภาพที่ 2

ภาพที่ 2 การกระทำกับสารในแบบต่าง ๆ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: นิพนธ์ (2545)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Workman (2001); Heise and Winzen (2002) ได้กล่าวถึงกฎการดูดกลืนแสงที่เกี่ยวข้องกับสเปกโตรสโกปี 2 กฎ คือ กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) และกฎของเบียร์ (Beer's law) ดังนี้

1. กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) กล่าวว่า เมื่อแสงสีเดียว (monochromatic light) คือแสงความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว (homogeneous) สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน

2. กฎของเบียร์ (Beer's law) กล่าวว่า เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดียวผ่านตัวกลางเนื้อเดียวสัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรผันตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น

ในทางปฏิบัติความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืน ขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลาย และความหนาของสารละลายที่สำแสงส่องผ่าน จึงต้องรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกันเรียกว่า กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต เขียนในรูปสมการได้ดังสมการที่ (2)

$$\mathrm{A} = \log\frac{I_0}{I} = \varepsilon bc \qquad (2)$$

เนื่องจาก T (transmittance) เท่ากับ $\frac{I}{I_0}$ ดังนั้นสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3)

$$\mathrm{A} = \log\frac{I_0}{I} = \varepsilon bc = \log\frac{1}{T} \qquad (3)$$

เมื่อ I = ความเข้มของแสงเมื่อผ่านตัวกลาง

ε = สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง ปกติเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น และอุณหภูมิ (molar absorptivity of compound) หน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อโมล (cm^2/mol)

I_0 = ความเข้มของแสงก่อนผ่านตัวกลาง

b = ความหนาของตัวกลาง หน่วยเป็นเซนติเมตร (cm)

c = ความเข้มข้นของสาร หน่วยเป็นโมลต่อลิตร (mol/l)

A = ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance)

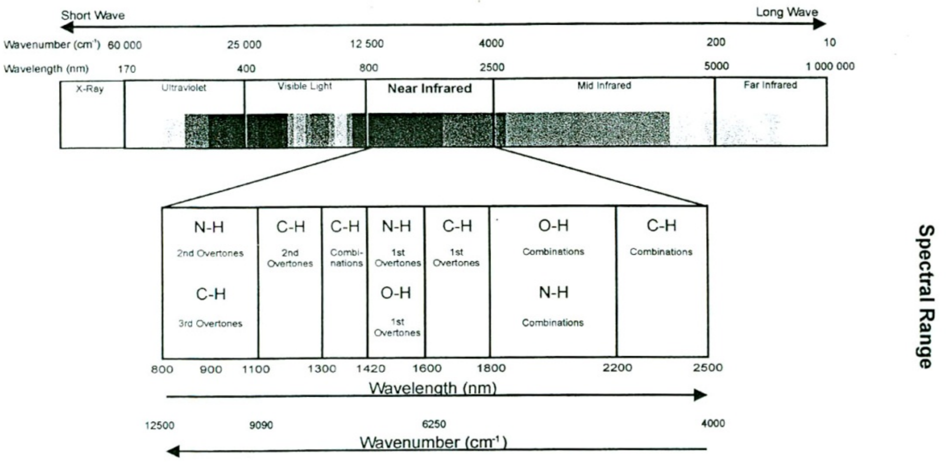
T = ค่าการส่องผ่านของแสง (transmittance)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

10. หลักการพื้นฐานของเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (theory and principle of near infrared spectroscopy)

แสงเนียร์อินฟราเรด (near infrared; NIR) เป็นคลื่นแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 780-2500 นาโนเมตร หรือเลขคลื่น 12800-4000 cm^{-1} โดยมีหลักการ คือ เมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปยังสารละลายหรือวัตถุแล้วสารเกิดการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงเนียร์อินฟราเรด ทำให้โมเลกุลของสารเกิดการสั่นที่ความถี่สูง ในการสั่นของพันธะต่าง ๆ เกิดขึ้นที่ช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของแต่ละพันธะ รวมทั้งตำแหน่งของโมเลกุล และช่วงการดูดกลืนแสงก็เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชันด้วย ดังนั้นเมื่อโมเลกุลได้รับแสงเนียร์อินฟราเรด ที่มีความยาวคลื่นตรงกับพันธะในโมเลกุลก็จะเกิดการสั่นและดูดกลืนแสงไว้ ทำให้มีพลังงานมากกว่าปกติ จากเดิมที่โมเลกุลอยู่ในสภาวะพื้น (ground vibration level) เมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited vibration level) อย่างไรก็ตามเมื่อโมเลกุลกลับสู่สภาวะพื้นจะปล่อยพลังงานที่รับเพิ่มเข้าไปออกมาในรูปพลังงานความร้อน ปริมาณการดูดกลืนพลังงานแสง (absorbance; A) เป็นไปตามกฎของ เบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert’s law) พลังงานของคลื่นแสงเมื่อผ่านเข้าไปในตัวอย่าง พลังงานจะถูกดูดกลืนไว้โดยองค์ประกอบทางเคมีในตัวอย่าง ความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีนั้น (Osborne *et al*., 1993) สารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้จะมี H-atom เป็นองค์ประกอบ เช่น O-H พบในแป้ง น้ำ น้ำตาล, N-H พบในโปรตีน และ C-H พบในน้ำมัน (นิพนธ์, 2545) โดยโมเลกุลของสารแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์กับช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 3 และตารางที่ 1 ซึ่งในแต่ละโมเลกุลอาจมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นมากกว่า 1 ช่วง เช่น โมเลกุลของน้ำ (H_2O) มีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น 4 ช่วง คือ 760, 970, 1450 และ 1940 นาโนเมตร (Osborne *et al*., 1993)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 3 การดูดกลืนของโมเลกุล X-H (X = O, C, H, N เป็นต้น) ทำให้เกิดพีคในสเปคตรัมเนียร์อินฟราเรด

ที่มา: นิพนธ์ (2545)

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบภายในอาหารกับช่วงเนียร์อินฟราเรด

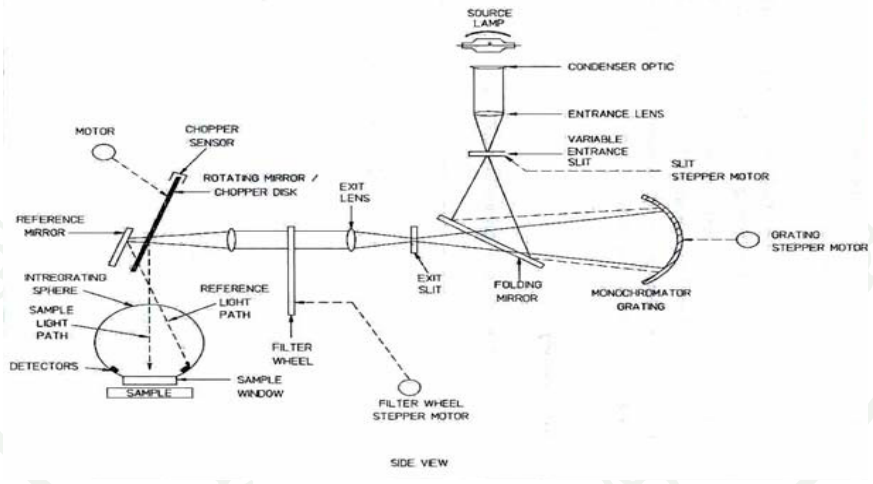
องค์ประกอบ	โมเลกุลที่เกี่ยวข้อง	ช่วงที่เกี่ยวข้อง	
		ความยาวคลื่น (nm)	เลขคลื่น (cm^{-1})
น้ำ	-OH	1920-1950, 1400-1450	5208-5128, 7142-6896
โปรตีน	-NH	2080-2220, 1560-1670	4807-4504, 6410-5988
ไขมัน	Methylene, -CH, $-CH_2$, $-CH_3$	2300-2350, 1680-1760	4347-4255, 5952-5681
คาร์โบไฮเดรต	-CO, -CH combination	2060-2150	4854-4651

ที่มา: Osborne *et al*. (1993)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

11. การทำงานของเครื่อง NIR spectrometer รุ่น InfraAlyzer 500 ของ Bran + Luebbe

เครื่อง NIR spectrometer ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นเครื่องรุ่น InfraAlyzer 500 ของ Bran + Luebbe ซึ่งมีหลักการทำงานดังภาพที่ 4 โดยแสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่เป็น tungsten halogen เดินทางผ่านเลนส์ และ slit เข้ามาที่ folding mirror สะท้อนมาที่ monochromator grating ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้โดยมี grating stepper motor ควบคุมให้แสงออกมาแต่ละความยาวคลื่นตั้งแต่ 1100-2500 นาโนเมตร จากนั้นแสงจะเดินทางผ่าน slit และเลนส์ เพื่อให้แน่ใจว่าแสงที่ผ่านออกมาเป็นความยาวคลื่นที่ต้องการเพียงความยาวคลื่นเดียว ผ่านเข้าไปที่ reference mirror ส่งผ่านไปยังบริเวณ intregrating sphere ภายในประกอบด้วย lead sulfide photodetectors 2 ตัว ทำหน้าที่รับแสงที่สะท้อนออกมาจากตัวอย่าง ในการตรวจวัดตัวอย่างด้วยเครื่อง NIR spectrometer ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของสเปกตรัมที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความยาวคลื่น (นาโนเมตร) โดยเครื่อง NIR spectrometer มีการต่อเชื่อมกับโปรแกรมสำเร็จรูปทางคอมพิวเตอร์ แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 4 ไดอะแกรมแสดงรายละเอียดการทำงานภายในเครื่อง NIR spectrometer รุ่น InfraAlyzer 500 ของ Bran+Luebbe

ที่มา: Anonymous (2001)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 5 เครื่อง NIR spectrometer ที่เชื่อมต่อกับโปรแกรมสำเร็จรูปทางคอมพิวเตอร์

12. รูปแบบที่ตัวอย่างมีปฏิกิริยาต่อแสงเนียร์อินฟราเรด

แสงเนียร์อินฟราเรดเมื่อผ่านไปยังตัวอย่างจะเกิดการกระทำกับโมเลกุลของสารได้หลายแบบ เช่น การดูดกลืน (absorbtion) การส่องผ่าน (transmission) การสะท้อน (reflection) การเรืองแสง (fluorescence) และการกระเจิงแสง (scattering) (อนุพันธ์, 2545) ดังนั้นควรมีการจัดวางตัวอย่างในการใช้เทคนิค NIR spectroscopy เพื่อให้ได้สเปกตรัมที่สัมพันธ์กับปริมาณค่าทางเคมีที่สนใจ (ศุมาพร, 2545) ได้แก่

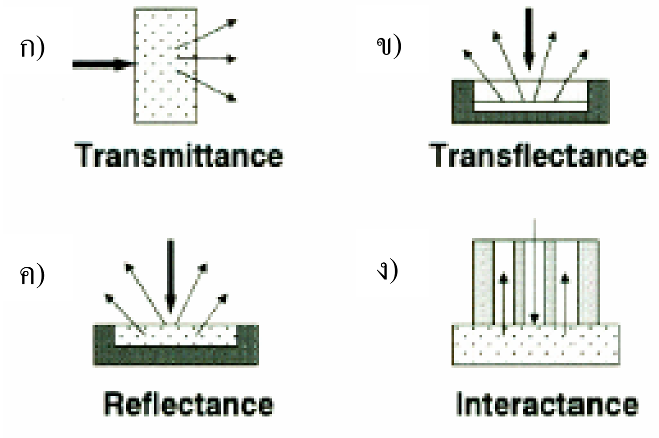
1. Transmission เป็นการวัดปริมาณแสงที่ผ่านออกมาในด้านตรงกันข้ามกับด้านที่แสงตกกระทบ แสดงดังภาพ 6ก

2. Reflection แสงตกกระทบที่พื้นผิวของตัวอย่าง วัดปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาโดยรวมถึงแสงที่สะท้อนจากเนื้อตัวอย่างส่วนที่ใกล้ผิวตัวอย่างได้อีกด้วย แสดงดังภาพ 6ข

3. Transflection แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบตัวอย่าง ผ่านตัวอย่างลงไปตกกระทบแผ่นเซรามิก ทอง หรืออะลูมิเนียมในชั้นใต้สุด แล้วสะท้อนกลับมายัง detector แสดงดังภาพ 6ค

4. Interaction ใช้ในกรณี fiber optics probe แสงจากแหล่งกำเนิดแสงเนียร์อินฟราเรดส่องผ่านลงมายังตัวอย่างในวงแหวนด้านนอก แล้วแสงที่สะท้อนออกมาจากเนื้อตัวอย่างถูกส่งไปยัง detector บริเวณส่วนกลาง fiber optics probe แสดงดังภาพ 6ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



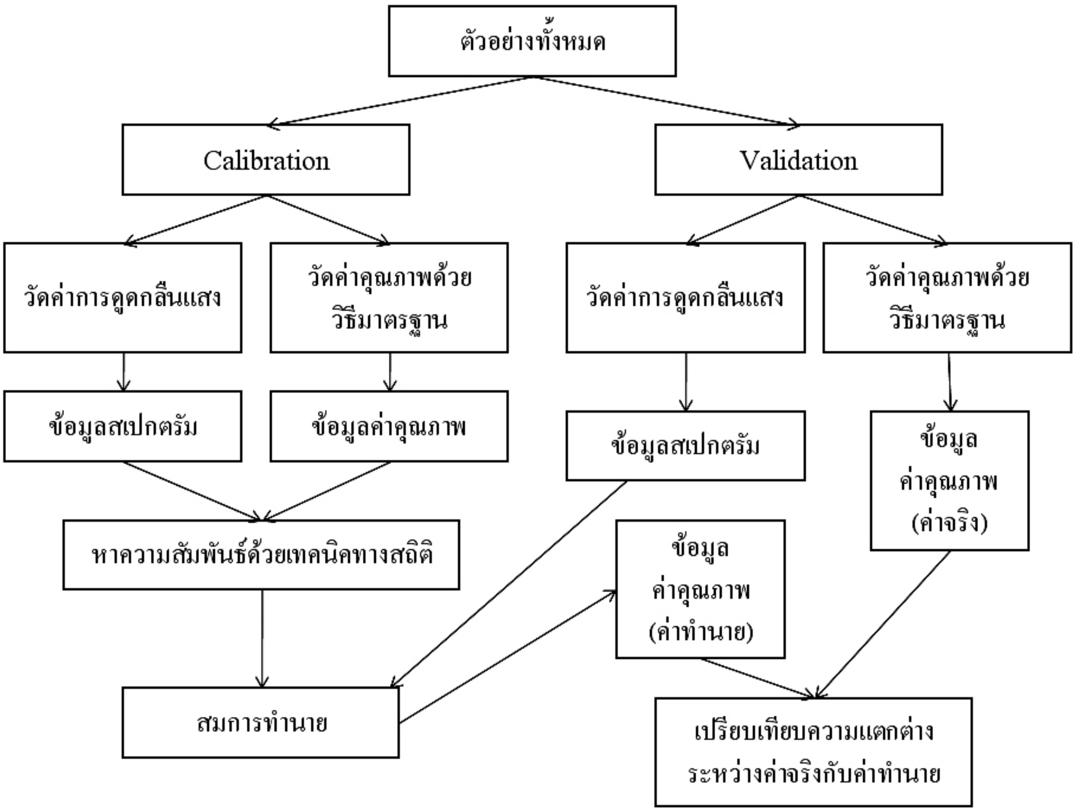
ภาพที่ 6 เทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสงแบบต่าง ๆ

ที่มา: Siesler *et al*. (2002)

13. การวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเนียร์อินฟราเรด

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างสมการทำนายประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักที่สำคัญ คือ ขั้นตอนการสร้างสมการทำนาย (calibration) และขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้น (validation) แสดงดังภาพที่ 7 การสร้างสมการเพื่อให้ได้สมการมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายค่าทางเคมีของตัวอย่างมีรายละเอียดของขั้นตอนการสร้างสมการทำนาย และการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้นดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 7 ขั้นตอนการสร้างสมการทำนายและการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้น

ที่มา: ดัดแปลงจาก Hruschka (1990)

13.1 ขั้นตอนการสร้างสมการทำนาย

เป็นขั้นตอนการสร้างสมการมาตรฐานที่ใช้ในการทำนายค่าทางเคมีที่ต้องการทราบ และเรียกสมการที่สร้างขึ้นว่า สมการทำนาย โดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การกำหนดตัวแปร 2) การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์ และ 3) การสร้างสมการทำนาย

1) การกำหนดตัวแปร ประกอบด้วย

1.1 ตัวแปรอิสระ (independent variables) หรือ ตัวแปร X คือ ค่าที่อ่านได้จากสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด (NIR data) เช่น ค่าการดูดกลืนแสง (log(1/R))

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2 ตัวแปรตาม (dependent variables) หรือ ตัวแปร Y คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (standard methods) เช่น ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดที่วิเคราะห์โดยวิธีการสกัดด้วยสารเคมี (soxhlet extraction)

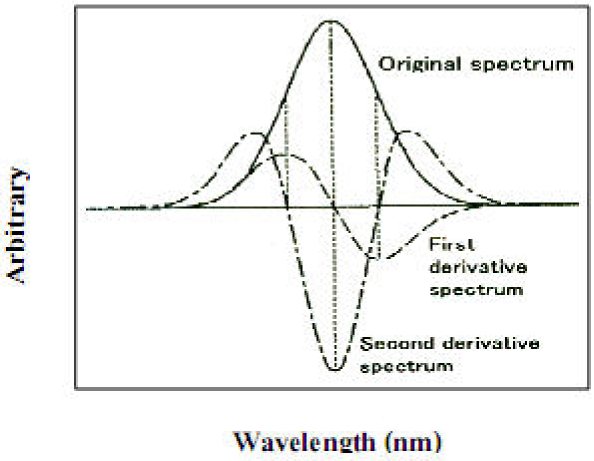
2) การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์

สเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดเกิดจากการรวมกันของโอเวอร์โทน และคอมบิเนชั่นของกลุ่มฟังก์ชั่นต่าง ๆ ทำให้สเปกตรัมมีความซับซ้อนมาก (อนุพันธ์, 2545) และบางครั้งข้อมูลสเปกตรัมที่ได้มีความแปรปรวนมาก อันเนื่องมาจากมีสิ่งรบกวนอื่น ๆ ที่จะบิดเบือนข้อมูลขององค์ประกอบทางเคมีที่สนใจ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ก่อนการวิเคราะห์ เพื่อกำจัดความแปรปรวนดังกล่าว (ธงชัย, 2545) โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

2.1 อนุพันธ์ลำดับที่หนึ่ง (first derivative) เป็นการคำนวณหาความชันของสเปกตรัม ช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น (การเลื่อนตัวของสเปกตรัมตามแกน Y) เนื่องจากอิทธิพลของความชื้น และขนาดอนุภาค การทำอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งจุดยอดของสเปกตรัมเริ่มต้นจะเป็นจุดที่มีความชันมากที่สุด ซึ่งทำให้การแปลความหมายยากแสดงดังภาพที่ 8 ดังนั้นจึงนิยมใช้อนุพันธ์ลำดับที่สอง (second derivative) มากกว่าอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่ง โดยนิยมใช้กับตัวอย่างที่มีเนื้อสารสม่ำเสมอ และการกระจายตัวของอนุภาคทั่วถึง เช่น แป้งสาลีที่บดละเอียด (อนุพันธ์, 2545)

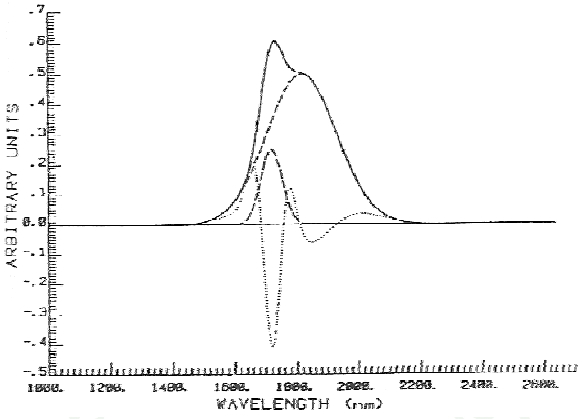
2.2 อนุพันธ์ลำดับที่สอง (second derivative) เป็นวิธีการคำนวณผลลบระหว่างสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของ segment ที่อยู่ติดกัน และมีช่วงเท่ากันจะมีรูปร่างที่แตกต่างจากสเปกตรัมเริ่มต้น (original spectrum) แสดงดังภาพที่ 8 พบว่า สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธีอนุพันธ์ลำดับที่สองที่ได้ มีจุดยอดเป็นบวกในด้านซ้ายและด้านขวา ส่วนจุดยอดตรงกลางอยู่ด้านตรงข้ามที่มีค่ามากที่สุดและตรงกับจุดยอดเริ่มต้น การคำนวณการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัมสามารถแยกจุดยอดของสเปกตรัมที่เหลื่อมซ้อนกันของสเปกตรัมเริ่มต้นได้ แสดงดังภาพที่ 9 นอกจากนี้การใช้วิธีอนุพันธ์ลำดับที่สองยังสามารถลดผลกระทบจากการกระเจิงแสงทั้งผลเชิงบวกและผลเชิงคูณได้ เนื่องจากอนุพันธ์ลำดับที่สองของเส้นตรงมีค่าเป็นศูนย์ แสดงดังภาพที่ 10 ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีอนุพันธ์ลำดับที่สองจึงเป็นที่นิยมมากกว่าวิธีอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่ง (Hruschka, 1990; Siesler *et al*., 2002)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 อนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งและสองของสเปกตรัมเริ่มต้น

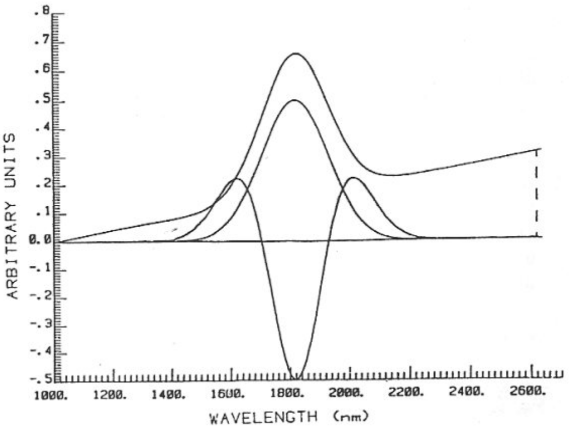
ที่มา: Kawano and Saranwong (2004)



ภาพที่ 9 การใช้อนุพันธ์ลำดับที่สองแก้ปัญหาการซ้อนทับกันของจุดยอดในสเปกตรัม

ที่มา: Hruschka (1990)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



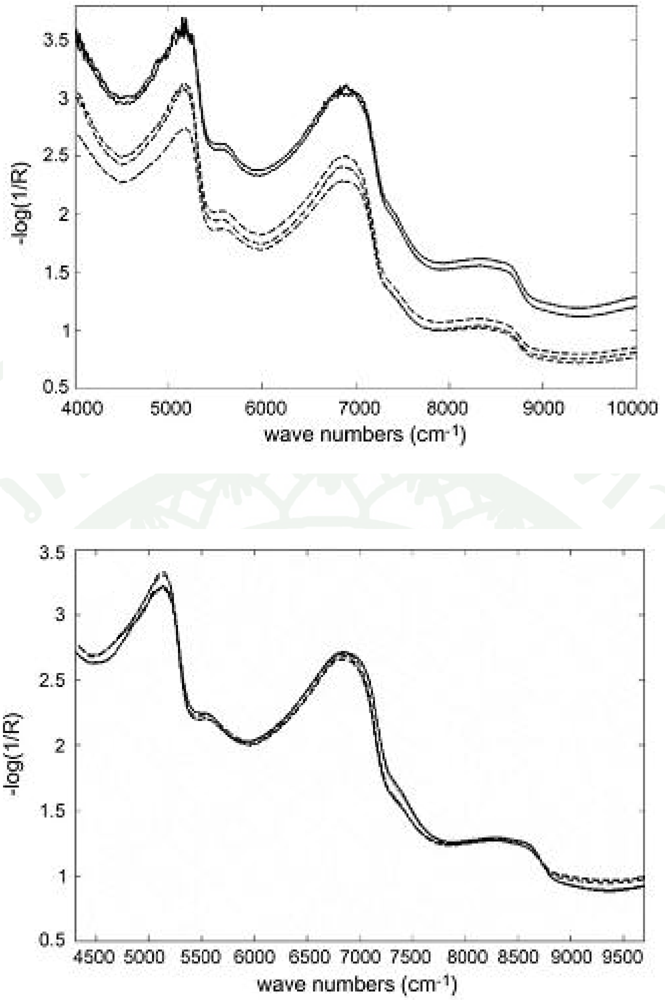
ภาพที่ 10 การใช้อนุพันธ์ลำดับที่สองแก้ปัญหาการเพิ่มขึ้นของความชันของสเปกตรัมที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น

ที่มา: Hruschka (1990)

2.3 Multiplicative scatter correction (MSC)

สเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงเนียร์อินฟราเรด แบบการสะท้อนแสง และแบบการส่องผ่านมักจะเกิดการกระเจิงแสง (scattered light) จึงได้มีการเสนอแนวทางโดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า MSC มาปรับแต่งสเปกตรัมเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ถูกต้องมากขึ้น การกระเจิงแสงจะทำให้ความชันโดยรวมของสเปกตรัมเปลี่ยนไป ตัวอย่างเช่น ถ้าสเปกตรัมเป็นเส้นตรงก็เหมือนกับว่าสเปกตรัมถูกทำให้หมุนรอบจุดที่ความยาวคลื่นต่ำสุดของสเปกตรัม (multiplicative effect) ทำให้สเปกตรัมที่ได้มีความชันต่างไปจากเดิม หรือทำให้ผลกระทบที่ทำให้สเปกตรัมทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่ากันตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งเรียกว่า additive effect ในทางปฏิบัติ MSC ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อลดผลที่เกิดจาก multiplicative effect แต่ก็สามารถลดผลจาก additive effect ได้ (อนุพันธ์, 2545) ทำให้สเปกตรัมเปลี่ยนแปลงไปดังภาพที่ 11

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 11 (ก) สเปกตรัมเริ่มต้น และ (ข) สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งโดยวิธี MSC

ที่มา: Pedro and Ferreira (2007)

3) การสร้างสมการทำนาย

การสร้างสมการทำนาย เป็นการหาตัวแปรอิสระ (ตัวแปร X ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ คือ ความยาวคลื่น) ที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรตาม (ตัวแปร Y ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ คือ ค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด) ที่ต้องการทำนาย ในการคัดเลือกตัวแปรอิสระสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.1 วิธีการคัดเลือกความยาวคลื่น (wavelength selection methods) เป็นวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระเฉพาะความยาวคลื่นที่น่าจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม โดยอาจคัดเลือกจากเอกสารอ้างอิง หรือใช้เทคนิคทางสถิติ เช่น การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple regression analysis) หรือการสร้าง correllelogram หลังจากนั้นสร้างสมการทำนายโดยอาศัยหลักและวิธีการทางสถิติ เช่น การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (simple linear regression; SLR) และการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (multiple linear regression; MLR) เป็นต้น แต่การเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดอาจเกิดข้อผิดพลาด ทำให้ได้สมการที่มีประสิทธิภาพในการทำนายต่ำ เนื่องจากในการคัดเลือกตัวแปรอิสระหรือความยาวคลื่นที่เหมาะสมจากความยาวคลื่นทั้งหมดมาสร้างสมการอาจได้ข้อมูลที่ไม่ครอบคลุมมากพอทำให้ค่าที่ทำนายได้จากวิธีนี้มีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่แท้จริง หรือเกิดจากจำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้ในการสร้างสมการน้อยเกินไป ทำให้ได้สมการที่มีตัวแปรอิสระมากเกินไปส่งผลให้ข้อมูลที่ได้ไม่น่าเชื่อถือ (ธงชัย และ ปิติพร, 2552)

3.2. วิธีการใช้ความยาวคลื่นตลอดช่วง (full spectrum methods) เป็นวิธีการคัดเลือกหาช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม (selective wavelength) จากความยาวคลื่นทั้งหมดที่มีในสเปกตรัม หรือความยาวคลื่นตลอดช่วงทั้งหมด (full spectrum) มาใช้ในการสร้างสมการทำนายโดยใช้วิธีการทางสถิติในการจัดกลุ่มตัวแปรอิสระหรือความยาวคลื่นที่มีความเกี่ยวข้องกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน หรือทำการสร้างตัวแปรใหม่จากตัวแปรเดิม ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถช่วยแก้ปัญหาการเกิด multicollinearity วิธีการทางสถิติที่นิยมใช้ ได้แก่ การถดถอยโดยใช้องค์ประกอบหลัก (principal components regression; PCR) และการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least squares regression; PLSR) (ธงชัย และ ปิติพร, 2552)

3.2.1 การถดถอยโดยใช้องค์ประกอบหลัก (principal components regression; PCR)

การทำ PCR จะเริ่มจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis; PCA) กับข้อมูลที่เป็นตัวแปรอิสระ (X_i) ที่ได้มาจากข้อมูลของสเปกตรัมเพื่อลดจำนวนตัวแปรเดิมลงโดยสร้างองค์ประกอบหรือตัวแปรใหม่ ที่เรียกว่า องค์ประกอบหลัก (principal component; PC) หรือ แฟกเตอร์ (factor) ก่อนแล้วจึงนำค่าของตัวแปรใหม่ที่สร้างขึ้นมาหาความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม (Y) ที่ได้มาจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน (reference method) เพื่อสร้างสมการโดยใช้หลักการของการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple regression analysis) (ธงชัย และ ปิติพร, 2552)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

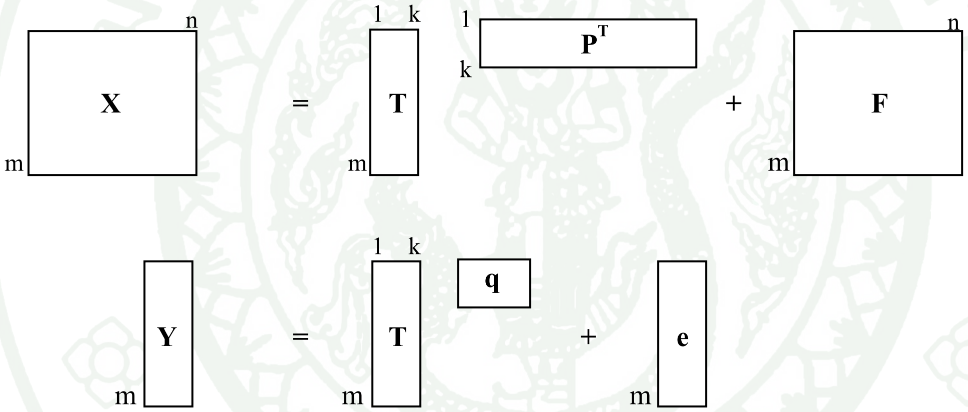
3.2.2 การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least squares regression; PLSR)

PLSR เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หลายตัวแปร (multivariate analysis) ซึ่งเป็นเทคนิคในการลดจำนวนตัวแปรเทคนิคหนึ่งเช่นเดียวกับวิธี PCR แต่ PLSR เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัม โดยการนำข้อมูลตัวแปรตาม (Y) เข้ามาร่วมในการสร้างตัวแปรใหม่ หรือกล่าวได้ว่าการจัดกลุ่มของตัวแปรอิสระจะแปรผันตามค่าตัวแปรตาม ซึ่ง Kasemsumran (2005) กล่าวว่า PLSR เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบหลายตัวแปร โดยการสร้างแฟกเตอร์แบบสมการเชิงเส้นตรงจากข้อมูลของสเปกตรัมเริ่มต้น และนำแฟกเตอร์ที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการถดถอย โดยแฟกเตอร์ที่ได้จากการสร้างสมการด้วยวิธี PLSR ต้องสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลและเกี่ยวข้องกับการประเมินค่าทางเคมีในเวลาเดียวกัน วัตถุประสงค์ของ PLSR คือต้องการลดจำนวนข้อมูลสเปกตรัมให้ได้เฉพาะข้อมูลสเปกตรัมที่มีความสำคัญกับค่าทางเคมีเท่านั้นที่จะถูกนำมาใช้ในการทำนายค่าทางเคมี เพื่อสามารถประเมินค่าทางเคมีได้ถูกต้องมากขึ้น ซึ่งมีแผนภาพการคำนวณด้วยวิธี PLSR แสดงดังภาพที่ 12

เนื่องจากการสร้างสมการ PLSR โดยใช้ความยาวคลื่นทั้งหมด เป็นการนำข้อมูลทั้งหมดของความยาวคลื่นมาใช้ในการทำนายค่าคุณภาพ ซึ่งอาจใช้ช่วงที่ไม่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลที่ต้องการทำนาย (non informative region) ทำให้สมการมีประสิทธิภาพในการทำนายต่ำ ด้วยเหตุนี้ Jiang *et al.* (2002) จึงได้พัฒนาวิธีการคัดเลือกหาช่วงความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลตัวแปรตาม (Y) ด้วยโปรแกรม in-house-written in MATLAB และเรียกวิธีการดังกล่าวว่า moving window partial least squares regression (MWPLSR) ซึ่ง Kasemsumran (2005) ได้อธิบายว่า คือ วิธีการเลือกช่วงความยาวคลื่นสำหรับวิเคราะห์สเปกตรัมที่มีความซับซ้อนเนื่องจากเป็นสเปกตรัมของตัวอย่างที่มีหลายองค์ประกอบ วิธีนี้ได้มีการพิสูจน์แล้วว่าสามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ให้สมการที่มีประสิทธิภาพสูง และมีความเสถียรต่อการแทรกสอดของข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้อง วิธี MWPLSR จะมีการกำหนดให้มี 1 หน้าต่างสเปกตรัมขนาด X_i (X_i data points) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด m แถว h คอลัมน์ แล้วให้หน้าต่างสเปกตรัมเคลื่อนที่ไปตามสเปกตรัมตลอดช่วงความยาวคลื่น (ในที่นี้สเปกตรัมคือเมตริกซ์ขนาด m แถว n คอลัมน์) โดยที่หน้าต่างสเปกตรัมจะเลื่อนที่ไปทีละ 1 data point ตำแหน่งข้อมูลที่หน้าต่างเคลื่อนที่ไปถึงจะนำไปสร้างสมการด้วยวิธี PLSR ที่ค่าแฟกเตอร์ต่าง ๆ จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่า log (sum of squared residual; SSR) ในแต่ละหน้าต่างสเปกตรัมที่แต่ละแฟกเตอร์จากสมการ PLSR ที่ได้ และนำไปเขียนกราฟโดยให้แกน X เป็นความยาวคลื่น และแกน Y เป็นค่า log (SSR) กราฟแต่ละเส้นแสดงค่า log (SSR) ที่ได้

จากการคำนวณในแต่ละแฟกเตอร์ แล้วทำการพิจารณาเพื่อเลือกช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมที่มีความสัมพันธ์กับค่าทางเคมีโดยเลือกช่วงกราฟที่มีค่า log (SSR) ต่ำ ๆ เพื่อนำมาสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุด ซึ่งแผนภาพการคำนวณแสดงดังภาพที่ 13

ประสิทธิภาพของสมการทำนายที่สร้างขึ้นควรพิจารณาจากระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ (X) และตัวแปรตาม (Y) โดยวัดจากค่าสหสัมพันธ์ (correlation; R) ซึ่งมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 ซึ่งแนวทางการแปลความหมายค่า R แสดงดังตารางที่ 2 และพิจารณาความน่าเชื่อถือของการประมาณค่าของสมการจากค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยจากการทำนายด้วยตัวอย่างกลุ่มสร้างสมการ (root mean square error of calibration; RMSEC) ซึ่งจะต้องมีค่าต่ำ ๆ โดยวิธีการคำนวณหาค่า R และ RMSEC แสดงดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ



ภาพที่ 12 การสร้างสมการแบบ partial least squares regression (PLSR)

โดยที่ X หมายถึง ข้อมูลสเปกตรัม | Y หมายถึง ค่าทางเคมี

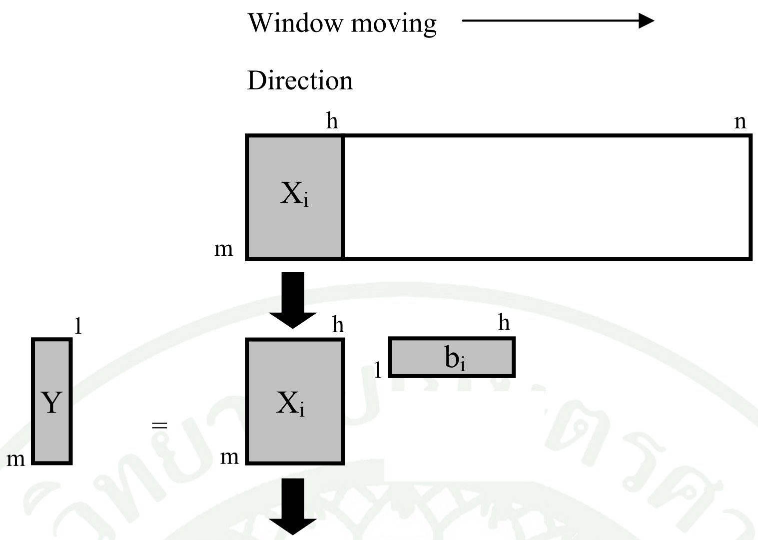
T หมายถึง Score | P หมายถึง Loading ของ X

q หมายถึง Loading ของ Y | F หมายถึง Error ของ X

E หมายถึง Error ของ Y

ที่มา: Williams and Norris (1990)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



$$SSR = \left(Y - X_i\hat{b}_i\right)^T \left(Y - X_i\hat{b}_i\right)$$

ภาพที่ 13 แผนภาพการสร้างสมการแบบ moving window partial least squares regression (MWPLSR)

โดยที่ X หมายถึง ข้อมูลสเปกตรัม

Y หมายถึง ค่าทางเคมี

b_i หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

ที่มา: Kasemsumran (2005)

$$R = \frac{\mathrm{cov}(x, y)}{S_x S_y} \qquad (4)$$

โดยที่ $S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{n-1}}$ และ $\mathrm{cov}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1}$

เมื่อ S_x คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)

$\mathrm{cov}(x, y)$ คือ ความแปรปรวนร่วมของ x และ y

x คือ ค่าที่ได้จากการทำนาย

y คือ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน

n คือ จำนวนตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$RMSEC = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \qquad (5)$$

เมื่อ y_i คือ ค่าจริงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน

$\hat{y}_i$ คือ ค่าทำนายที่ได้จากสมการ

n คือ จำนวนตัวอย่าง

ตารางที่ 2 แนวทางการแปลความหมายค่าสหสัมพันธ์ (R)

ค่า R	ความหมาย
± 0.5	ไม่ควรนำมาใช้ในการทำนาย (not usable)
± 0.51 - 0.70	ไม่ดี ไม่สามารถใช้เป็นสมการทำนายได้ (poor correlation)
± 0.71 - 0.80	สามารถใช้ในการคัดเลือกเบื้องต้นได้ (rough screening)
± 0.81 - 0.90	สามารถใช้ในการคัดเลือก หรือตรวจคุณภาพบางอย่างได้ (screening)
± 0.91 - 0.95	สามารถใช้ได้ในงานหลายประเภท รวมทั้งงานวิจัย แต่ต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง
± 0.96 - 0.98	สามารถใช้ได้ในงานหลายประเภท รวมทั้งงานประกันคุณภาพ (quality assurance)
± 0.99 ขึ้นไป	สามารถใช้ได้ดีมากในงานทุกประเภท (any application)

ที่มา: Williams (2007)

13.2 ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้น (validation)

Hruschka (1990) ได้อธิบายว่า การตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างด้วยกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง มีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการวัดประสิทธิภาพของสมการว่าสามารถใช้ในการทำนายค่าคุณภาพได้แม่นยำมากน้อยเพียงใด โดยวิธีการตรวจสอบความถูกต้องที่นิยมใช้ในเทคนิค NIR spectroscopy มี 2 วิธี ได้แก่

13.2.1 วิธี cross validation เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้น โดยเป็นวิธีการตรวจสอบภายใน (internal validation) ซึ่งกลุ่มตัวอย่างที่นำมาใช้ในการตรวจสอบต้องเป็นตัวอย่างชุดเดียวกับตัวอย่างในกลุ่มที่ใช้สร้างสมการ วัดผลจากการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย และค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากทำนายด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สมการที่สร้างขึ้นกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี ถ้าข้อมูลที่ได้จากวิธีทั้งสองมีค่าไม่แตกต่างกันแสดงว่าสมการที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูง การตรวจสอบความแม่นยำด้วยวิธีนี้มักใช้กับการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ PLSR ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้นโดยพิจารณาจาก ค่า RMSECV (root mean square error of cross validation) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6)

$$RMSECV = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_{cv,i})^2} \qquad (6)$$

เมื่อ y_i คือ ค่าจริงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน
$\hat{y}_{cv,i}$ คือ ค่าทำนายที่ได้จากสมการ
n คือ จำนวนตัวอย่าง

13.2.2 วิธี prediction testing เป็นวิธีการทดสอบโดยนำกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง (test set) มาประเมินค่าของสมการทำนายที่สร้างขึ้น โดยกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีวิธีการเตรียมตัวอย่าง การวัดค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัม สภาวะในการทดลอง รวมถึงวิธีการแปลงข้อมูลสเปกตรัมเหมือนกับชุดข้อมูลของตัวอย่างในกลุ่มสร้างสมการและที่สำคัญกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องจะต้องมีค่าคุณภาพที่ต้องการประเมินอยู่ในช่วงของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ การตรวจสอบความแม่นยำในลักษณะนี้เรียกว่า การทดสอบแบบภายนอก (external validation) ซึ่งการพิจารณาค่าที่ทำนายได้จาก NIR spectroscopy กับค่าที่วิเคราะห์ได้จริงจากวิธีมาตรฐาน ถ้ามีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายต่ำแสดงว่าสมการทำนายที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำสูง การตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้น เพื่อใช้ในการทำนายค่าคุณภาพมีรายละเอียดของขั้นตอนดังนี้

1) นำกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องของสมการมาทำการทดสอบความแม่นยำของสมการที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการทางสถิติ

2) คัดเลือกสมการทำนายที่เหมาะสม และมีความถูกต้องในการทำนายโดยพิจารณาประสิทธิภาพของสมการที่สร้างขึ้นด้วยค่าทางสถิติได้แก่ ค่า SEP (standard error of prediction) หรือ RMSEP (root mean square error of prediction) และค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างค่าที่ทำนายได้จากสมการที่สร้างขึ้นกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริง (bias) ซึ่งผลของค่าที่ทำนายได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากสมการมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วิเคราะห์ได้จริง คือ ค่า SEP, RMSEP และ bias ต้องมีค่าต่ำ ๆ (Hruschka, 1990; Cozzolino *et al*., 2005) ซึ่งหมายถึงสมการที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพ และมีความแม่นยำสูง สามารถนำไปใช้ในการประเมินค่าคุณภาพตัวอย่างอื่น ๆ ได้ วิธีการคำนวณค่า SEP, RMSEP และ bias สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7), (8) และ (9) ตามลำดับ

$$SEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 - \frac{1}{n}(\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i))^2}{n}} \quad (7)$$

$$RMSEP = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (8)$$

$$bias = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i) \quad (9)$$

เมื่อ y_i คือ ค่าจริงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน

$\hat{y}_i$ คือ ค่าทำนายที่ได้จากสมการ

n คือ จำนวนตัวอย่าง

14. ข้อได้เปรียบของ NIR spectroscopy

Osborne *et al*. (1993) กล่าวว่า เครื่องมือแต่ละประเภทต่างก็มีข้อจำกัดในการใช้งาน แต่เครื่อง NIR spectrometer มีประโยชน์และข้อดีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ทางเคมี หรือการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่น สำหรับการนำ NIR spectroscopy มาประยุกต์ใช้มีข้อได้เปรียบมากมาย ได้แก่

1. ง่ายต่อการเตรียมตัวอย่าง ไม่จำเป็นต้องชั่งตัวอย่างก่อนนำมาวัดค่า

2. มีความรวดเร็วในการวัดค่า

3. การตรวจสอบเป็นแบบไม่ทำลาย ทำให้ตัวอย่างที่นำมาตรวจสอบ สามารถจำหน่าย ส่งออก หรือบริโภคต่อได้ เป็นการประหยัดต้นทุนของผลิตภัณฑ์อีกทางหนึ่ง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่มีการใช้สารเคมี ทำให้ลดต้นทุนในการดูแลรักษาสภาพแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมี

5. สะดวกต่อการใช้งาน เนื่องจากในการปฏิบัติงานไม่จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีประสบการณ์หรือต้องได้รับการฝึกฝนโดยเฉพาะ ซึ่งสามารถปฏิบัติตามคู่มือการใช้งานได้ทันที

6. ลดต้นทุนในเรื่องสารเคมี และอุปกรณ์เครื่องแก้ว

7. เป็นวิธีการที่เหมาะสำหรับนำไปควบคุมคุณภาพในกระบวนการผลิต

15. ข้อจำกัดของ NIR spectroscopy

ในการวิเคราะห์ด้วย NIR spectroscopy ถึงแม้มีข้อได้เปรียบอยู่หลายประการ แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงควรตรวจสอบอย่างระมัดระวังเพื่อให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำ (ศุมาพร, 2545; Gunasekaran, 2001) โดย NIR spectroscopy มีข้อจำกัด ได้แก่

1. ข้อมูลการสะท้อนกลับของแสงขึ้นอยู่กับขนาดของตัวอย่าง รูปร่าง การบรรจุ และความเป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่าง ถ้าตัวอย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกันจะทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความแตกต่างกันส่งผลให้ความแม่นยำและความถูกต้องของการวิเคราะห์ต่ำลง รวมทั้งการสุ่มตัวอย่างที่ไม่ครอบคลุม และความชื้นที่สูญเสียไประหว่างการเตรียมตัวอย่างก็มีผลต่อความแม่นยำเช่นกัน (Stermer *et al.*, 1977)

2. การรบกวนอันเนื่องมาจากกลุ่มไฮดรอกซิล (O-H) หรือมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความชื้นภายในตัวอย่าง ดังนั้นในการตรวจสอบต้องมีการควบคุมความชื้น ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่าง เช่น ตัวอย่างที่มีคุณสมบัติไม่ดูดความชื้น หรือมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นยาก การควบคุมความชื้นจึงไม่จำเป็น แต่ถ้าเป็นตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสูงต้องหาภาชนะที่ปิดมิดชิดเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากเมื่อความชื้นในตัวอย่างเปลี่ยนจะมีผลทำให้สเปกตรัมที่ได้แตกต่างไปจากเดิม (Gunasekaran, 2001)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. การตรวจสอบขึ้นกับอุณหภูมิในการวิเคราะห์ ถึงแม้ว่าเป็นตัวอย่างเดียวกันแต่วัดที่อุณหภูมิต่างกัน มีผลทำให้ได้สเปกตรัมที่มีระดับ base line แตกต่างกัน ผลการทดสอบที่ได้จะเกิดการเบี่ยงเบน ดังนั้นจึงควรมีการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างขณะทำการวิเคราะห์โดยเฉพาะตัวอย่างประเภทของเหลว เนื่องจากสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดของน้ำค่อนข้างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตัวอย่างที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายจึงต้องควบคุมอุณหภูมิเป็นพิเศษ รวมทั้งต้องคำนึงถึงอุณหภูมิที่ใช้ขณะทำการวัดตัวอย่างจริง เนื่องจากอุณหภูมิจะมีผลต่อความแม่นยำของข้อมูลที่ได้ (Psotka, 1999)

16. การประยุกต์ใช้ NIR spectroscopy ในด้านการเกษตร

Kawano (1995) กล่าวว่า NIR spectroscopy เป็นเทคนิคหนึ่งที่มีการนำมาใช้มากกว่า 30 ปี โดย Karl Norris เป็นคนแรกที่ศึกษาด้าน NIR spectroscopy ซึ่งในช่วงแรกใช้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของธัญพืชต่างๆ เช่น เมล็ดข้าว และเมล็ดถั่ว เป็นต้น หลังจากนั้นเป็นต้นมาเทคนิคนี้ก็ได้พัฒนาขึ้นมาอย่างรวดเร็วโดยมีการศึกษาในด้านอื่น เช่น ยา ดิน ไม้ อาหารคนและอาหารสัตว์ เป็นต้น ส่วนในทวีปเอเชียมีการนำ NIR spectroscopy มาใช้ในช่วงปี 1970 โดยนำมาประยุกต์ใช้ในการผสมพันธุ์ของถั่วเหลืองที่สถาบันการทดลองทางด้านการเกษตรในเมืองฮอกไกโด ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเทคนิคนี้ยังไม่แพร่หลาย เนื่องจากข้อมูลที่ได้ออกมาทำความเข้าใจยาก และเป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำต่ำ ต่อมาได้มีการปรับปรุงให้มีความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น และใช้งานได้ง่ายมากขึ้น ทำให้ NIR spectroscopy เริ่มแพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 3 ต่อมาในปี 1990 ญี่ปุ่นได้มีการนำเครื่อง NIR spectrometer มาประยุกต์ใช้ในโรงงานในเชิงการค้าเพิ่มมากขึ้น เช่น อุตสาหกรรมแป้ง อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ โรงงานน้ำมัน ในช่วงเดียวกันจีนมีการขยายโรงงานโดยนำเครื่อง NIR spectrometer ประยุกต์ใช้ในการประเมินและควบคุมคุณภาพในโรงงานข้าวสาลี และอุตสาหกรรมอาหาร นอกจากนี้ประเทศต่าง ๆ ในเอเชียได้ให้ความสนใจในการประยุกต์ใช้เครื่อง NIR spectrometer เพิ่มขึ้น เช่น ฟิลิปปินส์นำไปใช้ในโรงงานมะพร้าวและเนื้อมะพร้าวแห้ง ไต้หวันนำเครื่อง NIR spectrometer ไปใช้ในงานประจำที่สถาบันค้นคว้าและพัฒนาทางด้านอาหารและอาหารสัตว์ อีกทั้งยังใช้ควบคุมคุณภาพของการผลิตถั่วเหลืองในระดับอุตสาหกรรม ประเทศเกาหลีใช้ในการควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น แป้งและกาแฟ ในตุรกีประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยาสูบ สำหรับในปัจจุบันเครื่อง NIR spectrometer ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานที่เฉพาะเจาะจงมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้ยังมีความซับซ้อนอยู่มาก นอกจากนี้ยังมีการนำเครื่อง NIR spectrometer มาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพโดยติดตั้งไว้ในกระบวนการผลิต เพื่อให้มีการตรวจสอบคุณภาพที่ต่อเนื่อง ไม่ต้องทำการสุ่มตัวอย่างไปตรวจสอบในห้องปฏิบัติการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 อุตสาหกรรมอาหารที่มีการนำเครื่อง NIR spectrometer มาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ

อุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์	คุณลักษณะที่ศึกษา
เมล็ดพืชและเมล็ดถั่ว	ข้าว	แป้ง แอมิโลส โปรตีน ความชื้น เถ้า กรดอะมิโน
	ข้าวบาร์เล่ย์	โปรตีน ความชื้น ไลซีน กรดอะมิโน
	ข้าวสาลี	แป้ง โปรตีน ความชื้น เถ้า ความแข็ง กลูเตน
ผลิตภัณฑ์นม	ชีส	ไขมัน โปรตีน ปริมาณของแข็ง ความชื้น
	นม	ไขมัน โปรตีน ความชื้น แลกโตส เคซีน
เนื้อสัตว์	เนื้อปลา	ปริมาณน้ำ
	เนื้อหมู	ไขมัน โปรตีน ความชื้น แคลอรี่
ผักและผลไม้	แอปเปิ้ล	บริกซ์ ความเป็นกรด
	แคนตาลูป	ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ
	มะเขือเทศ	สี ความแก่อ่อน คลอโรฟิลล์ แคโรทีน

ที่มา: Kawano (1995); Murray (1990)

ประเทศไทยได้นำเครื่อง NIR spectrometer เข้ามาใช้ครั้งแรกในอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อควบคุมคุณภาพของแป้งมันและมันอัดเม็ดเพื่อตรวจสอบวัตถุดิบให้มีคุณภาพก่อนนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ (วารุณี, 2545) จากการสำรวจในปี พ.ศ. 2549 พบว่า อุตสาหกรรมเกษตรและอาหารมีการนำเครื่อง NIR spectrometer มาใช้มากถึง 72.86 % รองลงมา คือ การนำมาใช้ในงานวิจัยและบริการ 18 % อุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเลียม 4.52 % สำหรับอุตสาหกรรมประเภทอื่นยังมีการใช้งานอยู่น้อย เช่น อุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมสิ่งทอและโพลีเมอร์ รวมทั้งอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เมื่อพิจารณาภาพรวมของประเทศไทยกับงานทางด้านวิจัยและพัฒนา พบว่า มีความเกี่ยวข้องกับเครื่อง NIR spectrometer อยู่น้อยมาก เนื่องจากขาดความรู้เกี่ยวกับเครื่อง NIR spectrometer รวมทั้งเครื่องมือมีต้นทุนสูง ทำให้ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ NIR spectroscopy ในประเทศไทยยังมีน้อยอยู่ (วารุณี, 2550) แต่มีงานวิจัยจากต่างประเทศจำนวนมากที่เสนอเกี่ยวกับการใช้เทคนิคนี้ทำนายองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดพืช อาทิเช่น ปริมาณโปรตีน แป้ง น้ำมัน และความชื้นของเมล็ดงา (Sato *et al*., 2003; Kim *et al*., 2006) ถั่วเหลือง (Panford *et al*., 1988; Tajuddin *et al*., 2002) ถั่วลิสง (Misra *et al*., 2000; Tillman *et al*., 2006) ทานตะวัน (Velasco *et al*., 1999; Fassio and Cozzonlino, 2004) ข้าวสาลี (Delwiche, 1998; Sissons *et al*., 2006) และข้าว (Choi and

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Kim, 2000; Wu and Shi, 2004) นอกจากนี้ยังมีการใช้ NIR spectroscopy เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของข้าวโพด ดังนี้

ในปี 1991 Orman and Schumann เปรียบเทียบวิธีการเตรียมตัวอย่างและช่วงความยาวคลื่นของ NIR 3 แบบ คือ แบบแรก วัดเมล็ดข้าวโพดแบบบดด้วยแสง NIR ชนิดสะท้อนกลับ (reflectance) ในช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร แบบที่สอง วัดเมล็ดข้าวโพดทั้งเมล็ด (whole grain) ด้วยแสง NIR ชนิดสะท้อนกลับ ในช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร และแบบสุดท้าย วัดเมล็ดข้าวโพดทั้งเมล็ดด้วยแสง NIR ชนิดส่องผ่าน (transmission) ในช่วงความยาวคลื่น 680-1235 นาโนเมตร เพื่อใช้ทำนายปริมาณโปรตีน น้ำมัน และแป้งที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวโพดให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้วิธี partial least squares regression ในการสร้างสมการ จากการศึกษาพบว่า วิธีที่ดีที่สุดในการนำข้อมูลไปสร้างสมการเพื่อใช้ทำนายค่าทางเคมี คือ การใช้สมการที่ได้ข้อมูลสเปกตรัมที่วัดเมล็ดข้าวโพดแบบบด ด้วยแสง NIR ชนิดสะท้อนกลับ ในช่วงความยาวคลื่น 1100-2500 นาโนเมตร เนื่องจากสมการทำนายปริมาณโปรตีน น้ำมัน แป้ง มีค่า r^2 เท่ากับ 0.97, 0.76 และ 0.73 ตามลำดับ ในขณะที่การพัฒนาสมการจากการวัดเมล็ดข้าวโพดทั้งเมล็ดด้วยแสง NIR ชนิดส่องผ่าน และสมการจากการวัดเมล็ดข้าวโพดทั้งเมล็ด ด้วยแสง NIR ชนิดสะท้อนกลับ มีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายค่าทางเคมีสูง และค่า r^2 ต่ำกว่า

Berardo *et al*. (2004) ศึกษาการประเมินความเข้มข้นของ carotenoids ในข้าวโพดแต่ละสายพันธุ์โดยใช้ NIR spectroscopy โดยบดเมล็ดข้าวโพดให้มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-2498 นาโนเมตร พบว่า สมการสำหรับทำนายค่า α-cryptoxanthin, β-cryptoxanthin, isolutein, lutein, zeaxanthin และ carotenoids ให้ค่า r^2 เท่ากับ 0.89, 0.93, 0.86, 0.82, 0.94 และ 0.85 ตามลำดับ

Welle *et al*. (2005) สร้างสมการเพื่อทำนายหาความชื้นโดยใช้ข้าวโพดทั้งหมด 2,117 ตัวอย่าง เก็บตัวอย่างตั้งแต่ปี 2001-2003 ซึ่งสมการนี้ให้ค่า SECV เท่ากับ 0.56 และค่า r^2 เท่ากับ 0.99 เมื่อทำนายความชื้นของกลุ่มตัวอย่างจากเครื่อง NIR ที่ติดตั้งในเครื่องเก็บเกี่ยว 6 เครื่อง พบว่ามีค่า SEP อยู่ระหว่าง 0.59-0.99 และค่า r^2 อยู่ระหว่าง 0.92-0.98 ผลการทำนายความชื้นด้วยเครื่อง NIR ทั้ง 6 เครื่อง มีแนวโน้มในทางเดียวกัน คือ มีค่า r^2 สูง และค่า bias ต่ำ การหาค่าความชื้นโดยวิธี NIR spectroscopy มีความถูกต้องแม่นยำ โดยดูจากการวิเคราะห์ค่าความผันแปร ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างระหว่างค่าทำนายกับค่าจริงน้อย การศึกษานี้เป็นการแสดงให้เห็นถึง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความสำเร็จในการใช้ on-combine NIR spectroscopy สำหรับการวัดค่าความชื้น ซึ่งเป็นค่าที่ต้องการหาเป็นประจำทุกครั้งในการเก็บเกี่ยว

Montes *et al.* (2006) รายงานถึงประสิทธิภาพของ NIR spectroscopy ในการทำนายน้ำหนักแห้ง ปริมาณโปรตีน และแป้งในเมล็ดข้าวโพด โดยสร้างสมการด้วยวิธี modified partial least squares (MPLS) ใช้สเปกตรัมในช่วง 960-1690 นาโนเมตร บันทึกข้อมูลการดูดกลืนแสงทุก ๆ 6 นาโนเมตร

Jiang *et al*. (2007) ประยุกต์ใช้ NIR spectroscopy ชนิดสะท้อนกลับในการสร้างสมการสำหรับทำนายปริมาณโปรตีน แป้ง และไขมัน ในเมล็ดข้าวโพดทีละเมล็ด เพื่อนำมาใช้ในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ โดยสมการถูกสร้างขึ้นจากเมล็ดข้าวโพด 309 ตัวอย่าง ๆ ละ 10 เมล็ด พบว่า สมการที่ถูกสร้างขึ้นมีประสิทธิภาพในการทำนายปริมาณโปรตีน แป้ง และไขมันสูง เนื่องจากมีค่า r^2 ของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องโดยวิธีการตรวจสอบภายใน (cross validation) เท่ากับ 0.91, 0.90 และ 0.94 ตามลำดับ และค่า r^2 ของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องโดยวิธีการตรวจสอบภายนอก (external validation) เท่ากับ 0.94, 0.89 และ 0.95 ตามลำดับ

รวมทั้งมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัม NIR กับปริมาณน้ำมันในเมล็ดพืช โดย Golebiowski *et al*. (2005) รายงานว่า ช่วงความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำมันในเมล็ด canola คือ 1130-1220, 1350-1390 และ 1650-1800 นาโนเมตร เห็นได้ว่า NIR spectroscopy มีบทบาทสำคัญตั้งแต่การปรับปรุงพันธุ์พืช เพื่อใช้ในการคัดเลือกเมล็ดพันธุ์ จนถึงการควบคุมคุณภาพเพื่อการเก็บรักษา รวมทั้งการตรวจสอบและคัดแยกคุณภาพเพื่อสามารถนำธัญพืชไปใช้ประโยชน์ตามความต้องการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

1.1 เมล็ดประชากรข้าวโพด 100 ตัวอย่าง สำหรับใช้ในการสร้างสมการเบื้องต้น (ตารางผนวกที่ ข1)

1.2 เมล็ดประชากรข้าวโพดที่ใช้เป็นประชากรเริ่มต้นในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดน้ำมันสูง และใช้ในการสร้างสมการเบื้องต้น

1.2.1 [{SW5(s)C_4 × Alex syn. C_{23}}-F_2 × KS23(s)C_3]-F_5 หรือ SW04L-336

1.2.2 [{SW1(s)C_{11} × IHO}-F_2 × SW1(s)C_{12}]-F_5 หรือ SW04L-337

1.3 เมล็ดประชากรข้าวโพด 23 ตัวอย่าง สายพันธุ์แท้ 5 ตัวอย่าง และลูกผสม 2 ตัวอย่าง สำหรับใช้ในขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้น (ตารางผนวกที่ ข8)

1.4 เมล็ดประชากรข้าวโพดจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้ข้าวโพด SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้น โดยใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบ full sib ประยุกต์ (modified full sib selection) และแบบคัดเลือกรวมประยุกต์ (modified mass selection)

2 อุปกรณ์และสารเคมีในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

2.1 เครื่อง NIR spectrometer รุ่น InfraAlyzer 500 และเซลล์ใส่ตัวอย่างแบบ rotating cup ของ Bran+Luebbe, Norderstedt, Germany

2.2 เครื่องสกัดน้ำมัน (soxhlet extraction apparatus) ของ ISOPAD, Germany

2.3 สารเคมีปิโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether) ของ LAB-SCAN

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.4 เครื่องชั่งวิเคราะห์อย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น TB 214 ของ Denver instruments, USA

2.5 ตู้อบไฟฟ้า ของ Memmert, Germany

2.6 เครื่องปั่นตัวอย่าง รุ่น MX-337N ของ Panasonic

2.7 กระดาษกรอง เบอร์ 1 ของ WHATMAN

2.8 ถุงพลาสติก และเครื่องแก้ว

3. เครื่องมือที่ใช้คำนวณและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

3.1 เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์

3.2 โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการคำนวณผลทางสถิติ The Unscrambler version 9.8 ของ CAMO, Norway

3.3 โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการคำนวณผลทางสถิติ MATLAB® version 6.5

วิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่างเมล็ดข้าวโพด

ใช้เมล็ดข้าวโพดจากประชากรข้าวโพด 102 ตัวอย่าง (วัตถุดิบข้อ 1.1 และ 1.2) ซึ่งถูกเก็บรักษาไว้ที่โรงเก็บเมล็ดพันธุ์ ณ ศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ มีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 10-14 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 45 %

2. การวัดค่าการดูดกลืนแสง NIR

วัดค่าการดูดกลืนแสง NIR ของเมล็ดข้าวโพด 102 ตัวอย่าง (วัตถุดิบข้อ 1.1 และ 1.2) โดยนำเมล็ดข้าวโพดตัวอย่างละ 100 กรัม บรรจุในเซลล์ชนิด rotating cup แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ด้วยเครื่อง NIR spectrometer (IA 500, Bran+Luebbe) ด้วยระบบสะท้อนแสง (reflectance) โดยใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1200-2400 นาโนเมตร บันทึกข้อมูลการดูดกลืนแสงทุก ๆ 2 นาโนเมตร และวัดค่าการดูดกลืนแสงตัวอย่างละ 2 ครั้ง

3. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

นำเมล็ดข้าวโพด 102 ตัวอย่าง ที่ผ่านการวัดค่าการดูดกลืนแสงไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดโดยวิธีการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ (soxhlet extraction method) ตามวิธีมาตรฐานของ AOAC (2000) ดังภาคผนวก ก

4. การสร้างสมการเบื้องต้นสำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

4.1 การสร้างสมการเบื้องต้นสำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด (ดังภาพที่ 14) เริ่มจากนำค่าการดูดกลืนแสงและปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด 102 ตัวอย่างจากข้อ 2 และ 3 มาคำนวณหาความสัมพันธ์ด้วยวิธี partial least squares regression (PLSR) โดยใช้โปรแกรม The Unscrambler version 9.8 ตลอดการทดลอง

4.2 เปรียบเทียบสมการที่ได้จากสเปกตรัมเริ่มต้น (original spectrum) และสเปกตรัมที่ปรับแต่ง (pre-treatment spectrum) ด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

1) First derivative (1^{st} derivative) โดยใช้วิธี Savizky Golay ที่ smoothing point 10:10 และ polynormial order = 2

2) Second derivative (2^{nd} derivative) โดยใช้วิธี Savizky Golay ที่ smoothing point 10:10 และ polynormial order = 2

3) Multiplicative scattering correction (MSC) แบบ Full MSC (X = (X-a)/b)

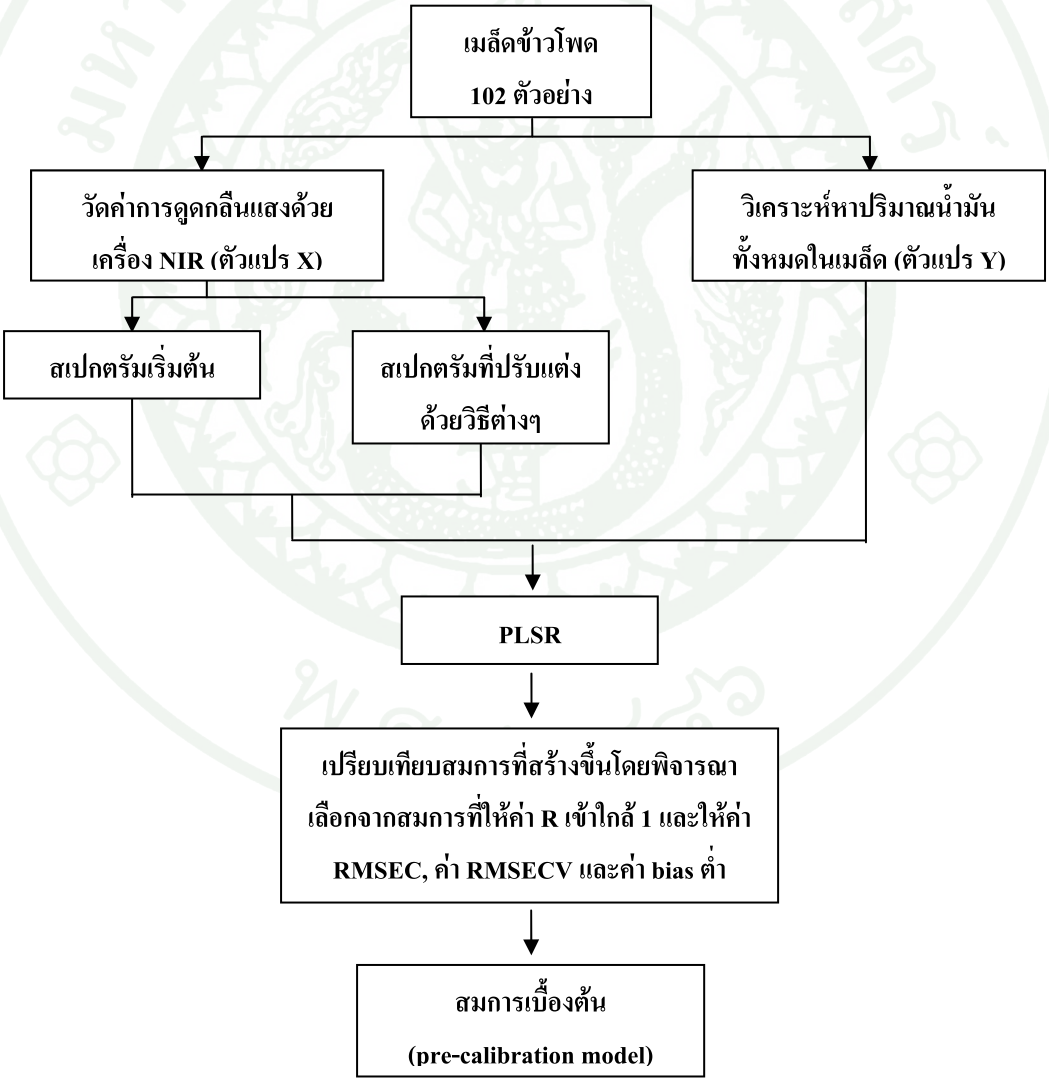
4) MSC ร่วมกับ 1^{st} derivative

5) MSC ร่วมกับ 2^{nd} derivative

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.3 บันทึกค่าสหสัมพันธ์ (correlation; R) ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ (root mean square error of calibration; RMSEC) ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องภายในสมการ (root mean square error of cross validation; RMSECV) และค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายได้จากสมการกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริง (bias) ของแต่ละสมการที่สร้างขึ้น

4.4 คัดเลือกสมการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทำนายค่าได้ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด โดยพิจารณาเลือกจากสมการที่ให้ค่า R เข้าใกล้ 1 มากที่สุด และให้ค่า RMSEC ค่า RMSECV และค่า bias ต่ำ



ภาพที่ 14 ขั้นตอนการสร้างสมการเบื้องต้นสำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. การประยุกต์ใช้สมการทำนายในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์

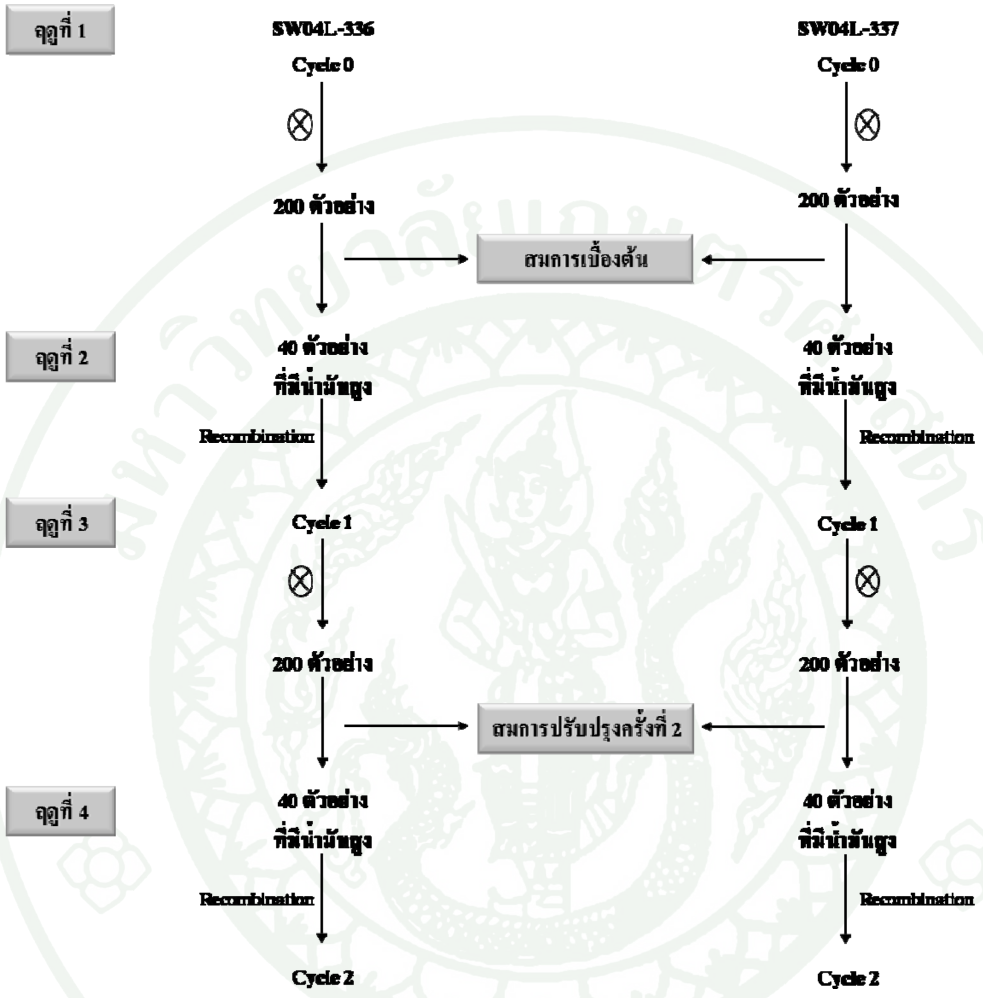
5.1 นำเมล็ดข้าวโพดที่ได้จากการผสมตัวเองของประชากรรอบการคัดเลือกที่ 0 (cycle 0) ของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบคัดเลือกรวมประยุกต์ ซึ่งมี SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้น (Alex_S0 และ IHO_S0 ตามลำดับ) จำนวน 200 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ รวม 400 ตัวอย่าง และเมล็ดข้าวโพดที่ได้จากการผสมต้นต่อต้นของ cycle 0 ของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบ full sib ประยุกต์ ซึ่งมี SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้น (Alex_FS0 และ IHO_FS0 ตามลำดับ) จำนวน 200 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ รวม 400 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 800 ตัวอย่าง มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง NIR spectrometer แล้วทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดด้วยสมการเบื้องต้น (pre-calibration model) จากข้อ 4 โดยใช้ค่าการดูดแสงมาคำนวณ แล้วคัดเลือกตัวอย่างข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดสูงไปใช้ในการปรับปรุงประชากรข้าวโพดให้มีน้ำมันสูงต่อไป

5.2 นำเมล็ดข้าวโพดรอบการคัดเลือกที่ 1 (cycle 1) ที่ได้จากการผสมต้นต่อต้นของข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดสูงของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบ full sib ประยุกต์ ซึ่งมี SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้น (Alex_FS1 และ IHO_FS1 ตามลำดับ) จำนวน 200 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ รวม 400 ตัวอย่าง มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง NIR spectrometer แล้วทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดด้วยสมการปรับปรุงครั้งที่ 1 จากข้อ 6.1 โดยใช้ค่าการดูดแสงมาคำนวณ แล้วคัดเลือกตัวอย่างข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดสูงไปใช้ในการปรับปรุงประชากรข้าวโพดให้มีน้ำมันสูงต่อไป

5.3 นำเมล็ดข้าวโพดที่ได้จากการผสมตัวเองของประชากรรอบการคัดเลือกที่ 1 (cycle 1) ของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบคัดเลือกรวมประยุกต์ ซึ่งมี SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้น (Alex_S1 และ IHO_S1 ตามลำดับ) จำนวน 200 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ รวม 400 ตัวอย่าง และเมล็ดข้าวโพดรอบการคัดเลือกที่ 2 (cycle 2) ที่ได้จากการผสมต้นต่อต้นของข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดสูงของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบ full sib ประยุกต์ ซึ่งมี SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้น (Alex_FS2 และ IHO_FS2 ตามลำดับ) จำนวน 200 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ รวม 400 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 800 ตัวอย่าง มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง NIR spectrometer แล้วทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดด้วยสมการ

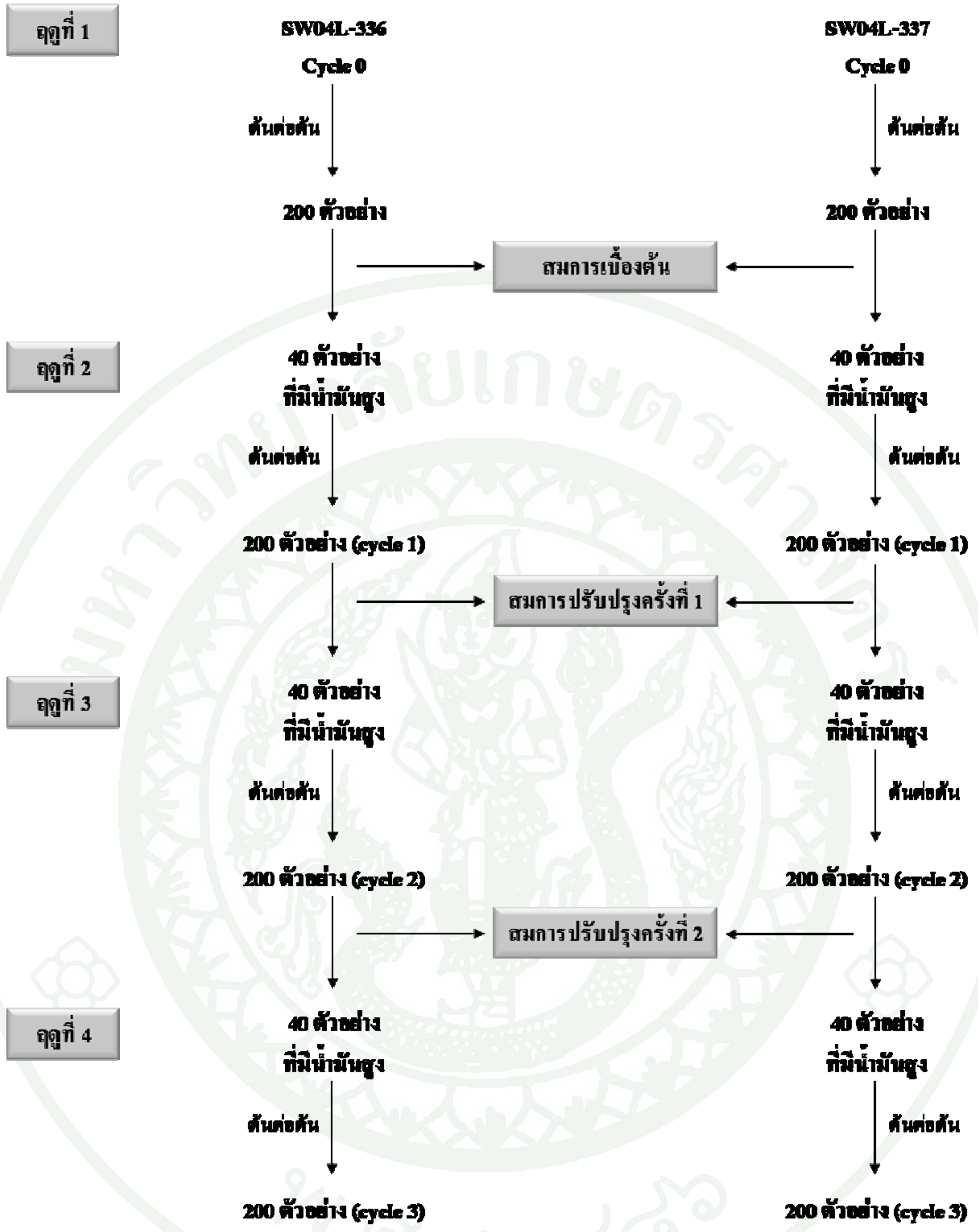
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรับปรุงครั้งที่ 2 จากข้อ 6.2 โดยใช้ค่าการดูดแสงมาคำนวณ แล้วคัดเลือกตัวอย่างข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดสูงไปใช้ในการปรับปรุงประชากรข้าวโพดให้มีน้ำมันสูงต่อไป



ภาพที่ 15 การประยุกต์ใช้สมการทำนายประเมินปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้ประชากรข้าวโพด SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้นโดยใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบคัดเลือกรวมประยุกต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 16 การประยุกต์ใช้สมการทำนายประเมินปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้ประชากรข้าวโพด SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้นโดยใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบ full sib ประยุกต์

6. การพัฒนาสมการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

6.1 การพัฒนาสมการปรับปรุงครั้งที่ 1

6.1.1 คัดเลือกข้าวโพด 20 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์จากข้อ 5.1 รวม 80 ตัวอย่าง นำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดโดยวิธีการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ เกณฑ์การคัดเลือกจะพิจารณาจากการกระจายตัวของข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของสมการเบื้องต้น โดยคัดเลือกตัวอย่างข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันในระดับที่สมการเบื้องต้นมีการกระจายตัวของข้อมูลอยู่น้อยหรือไม่มีตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำมันอยู่ในช่วงนั้นเลย

6.1.2 นำค่าการดูดกลืนแสงและค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของ 80 ตัวอย่าง (จากข้อ 5.1 และข้อ 6.1.1 ตามลำดับ) เพิ่มเข้าไปในชุดข้อมูลของสมการเบื้องต้นที่มีอยู่เดิม รวมเป็น 182 ตัวอย่าง แล้วคำนวณหาความสัมพันธ์ใหม่ด้วยวิธี PLSR

6.1.3 เปรียบเทียบสมการที่ได้จากสเปกตรัมเริ่มต้น (original spectrum) และสเปกตรัมที่ปรับแต่ง (pre-treatment spectrum) ตามข้อ 4.2 แล้วคัดเลือกสมการที่สามารถทำนายค่าได้ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด โดยพิจารณาเลือกจากสมการที่ให้ค่า R เข้าใกล้ 1 มากที่สุด และให้ค่า RMSEC, ค่า RMSECV และค่า bias ต่ำ ได้เป็นสมการปรับปรุงครั้งที่ 1

6.2 การพัฒนาสมการปรับปรุงครั้งที่ 2

6.2.1 คัดเลือกข้าวโพด 20 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์จากข้อ 5.2 รวม 40 ตัวอย่าง นำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดโดยวิธีการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ โดยคัดเลือกตัวอย่างข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันในระดับที่สมการปรับปรุงครั้งที่ 1 มีการกระจายตัวของข้อมูลอยู่น้อยหรือไม่มีตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำมันอยู่ในช่วงนั้นเลย

6.2.2 นำค่าการดูดกลืนแสงและค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของ 40 ตัวอย่าง (จากข้อ 5.2 และข้อ 6.2.1 ตามลำดับ) เพิ่มเข้าไปในชุดข้อมูลของสมการปรับปรุงครั้งที่ 1 รวมเป็น 222 ตัวอย่าง คำนวณหาความสัมพันธ์ใหม่ด้วยวิธี PLSR แล้วทำตามข้อ 6.1.3 ได้เป็นสมการปรับปรุงครั้งที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.3 การพัฒนาสมการปรับปรุงครั้งที่ 3

6.3.1 คัดเลือกข้าวโพด 20 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์จากข้อ 5.3 รวม 80 ตัวอย่าง นำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดโดยวิธีการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ โดยคัดเลือกตัวอย่างข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันในระดับที่สมการปรับปรุงครั้งที่ 2 มีการกระจายตัวของข้อมูลอยู่น้อยหรือไม่มีตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำมันอยู่ในช่วงนั้นเลย

6.3.2 นำค่าการดูดกลืนแสงและค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของ 80 ตัวอย่าง เพิ่มเข้าไปในชุดข้อมูลของสมการปรับปรุงครั้งที่ 2 รวมเป็น 302 ตัวอย่าง (จากข้อ 5.3 และข้อ 6.3.1 ตามลำดับ) คำนวณหาความสัมพันธ์ใหม่ด้วยวิธี PLSR แล้วทำตามข้อ 6.1.3 ได้เป็นสมการปรับปรุงครั้งที่ 3

7. การพัฒนาสมการทำนายโดยคัดเลือกช่วงความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ด และการตรวจสอบความถูกต้องของสมการทำนายที่สร้างขึ้น

7.1 นำข้อมูลสเปกตรัมเริ่มต้นและค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของข้าวโพด 302 ตัวอย่าง มาคำนวณหาความสัมพันธ์เพื่อคัดเลือกช่วงความยาวคลื่นโดยใช้โปรแกรม in-house-written in MATLAB ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า moving window partial least squares regression (MWPLSR) แล้วนำไปสร้างสมการทำนายด้วยวิธี PLSR โดยใช้เฉพาะช่วงความยาวคลื่นที่คัดเลือกจาก MWPLSR

7.2 นำข้อมูลสเปกตรัมที่ปรับแต่งแต่ละวิธีและค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของข้าวโพด 302 ตัวอย่าง มาคำนวณหาความสัมพันธ์เพื่อคัดเลือกช่วงความยาวคลื่น ตามข้อ 7.1

7.3 ตรวจสอบความถูกต้องของสมการในการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดของสมการปรับปรุงครั้งที่ 3 ซึ่งคำนวณจากความยาวคลื่นตลอดช่วง (full spectrum method) และสมการที่คำนวณจากช่วงความยาวคลื่นที่คัดเลือกจาก MWPLSR ด้วยกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งเป็นประชากรข้าวโพดจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ในรอบการคัดเลือกที่ 0, 1 และ 2 ที่ปลูกในฤดูทดสอบผลผลิต (yield trial) จำนวน 42 ตัวอย่าง (ดังภาพที่ 17) โดยการตรวจสอบความถูกต้องของสมการจะพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายด้วยกลุ่มตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตรวจสอบความถูกต้อง (root mean square error of prediction; RMSEP) และค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายได้จากสมการกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริง (bias) ของแต่ละสมการที่สร้างขึ้น

7.4 ตรวจสอบความถูกต้องของสมการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดด้วยกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งเป็นตัวอย่างประชากรข้าวโพด 23 ตัวอย่าง ลูกผสม 2 ตัวอย่าง และสายพันธุ์แท้ 5 ตัวอย่าง รวม 30 ตัวอย่าง (ดังภาพที่ 17) โดยทั้งหมดเป็นตัวอย่างจากโรงเก็บเมล็ดพันธุ์ ณ ศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ

8. สถานที่ทำการวิจัย

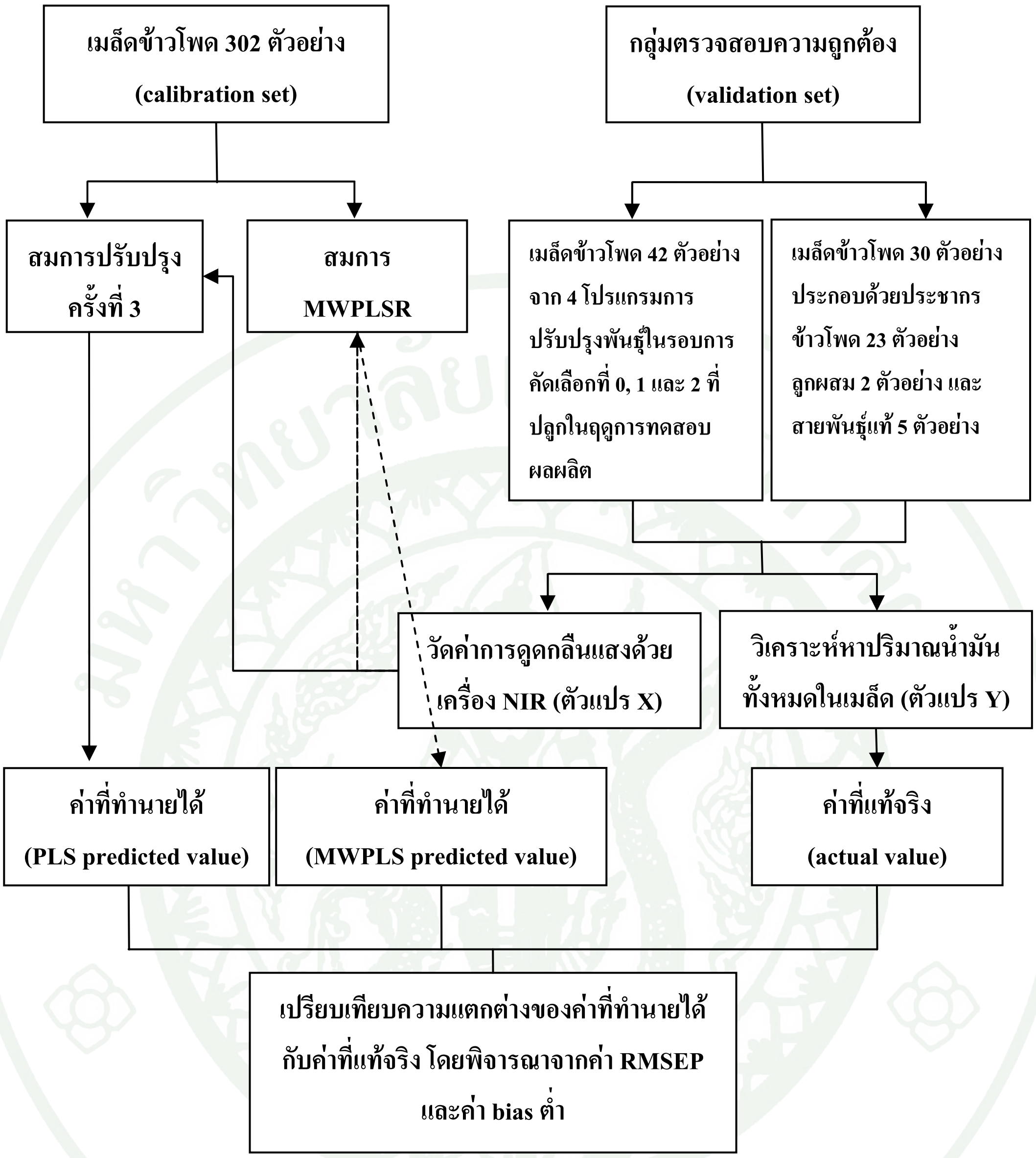
1. หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีการตรวจสอบสินค้าโดยวิธีไม่ทำลาย ฝ่ายนาโนเทคโนโลยีและเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. หน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีเอ็นไซม์และการจัดการของเสีย ฝ่ายนาโนเทคโนโลยีและเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

9. ระยะเวลาการทำวิจัย

ตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2551 ถึงเดือนธันวาคม 2552

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 17 ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของสมการทำนายที่สร้างขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

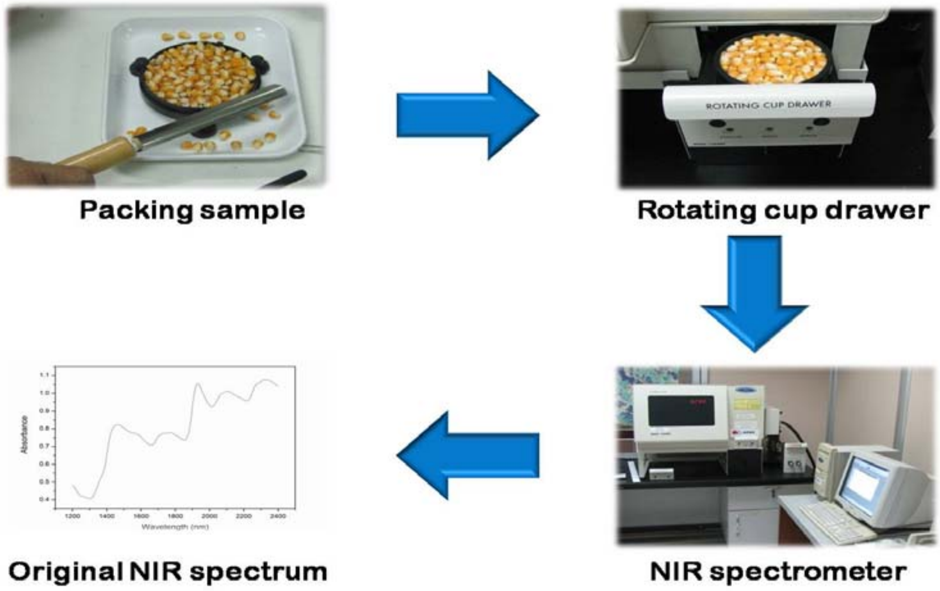
ผลและวิจารณ์

ผล

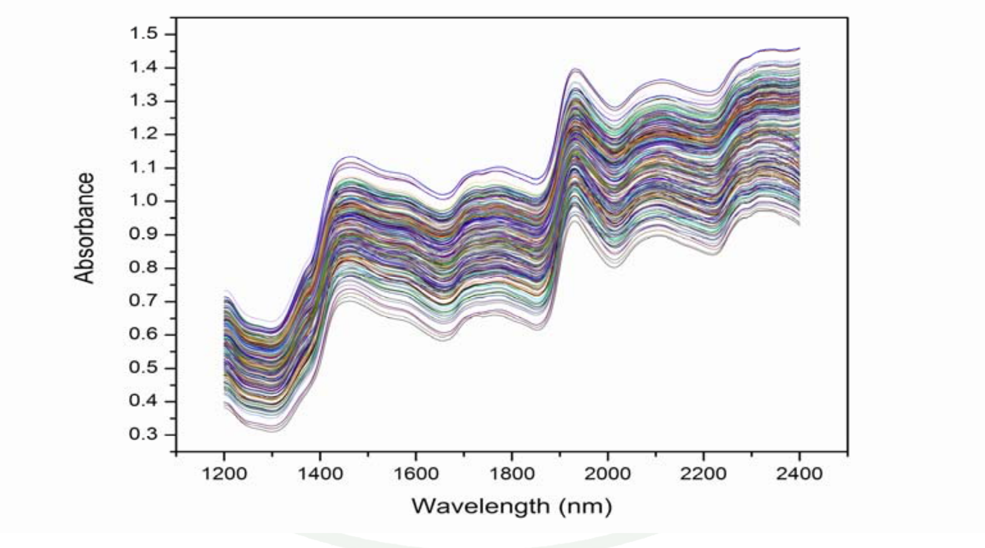
1. ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสง NIR

ภาพที่ 18 แสดงการวัดค่าการดูดกลืนแสงของเมล็ดข้าวโพดด้วยเครื่อง NIR spectrometer โดยการบรรจุเมล็ดข้าวโพดลงใน rotating cup แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1200-2400 นาโนเมตร บันทึกข้อมูลการดูดกลืนแสงทุก ๆ 2 นาโนเมตร และวัดค่าการดูดกลืนแสงตัวอย่างละ 2 ครั้ง พบว่า ลักษณะรูปแบบของสเปกตรัมที่ได้จากการวัดค่าด้วยเครื่อง NIR spectrometer มีการดูดกลืนแสงหรือค่า log 1/R มากขึ้นเมื่อความยาวคลื่นมากขึ้นจาก 1200-2400 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 19 สอดคล้องกับการทดลองของ Norris and Williams (1984) และ Gaines and Windham (1998) ซึ่งทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงในตัวอย่างข้าวสาลีด้วยเครื่อง NIR spectrometer แล้วพบว่า เมื่อความยาวคลื่นมากขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และค่าการดูดกลืนแสงของสเปกตรัมที่มีความสูงต่ำแตกต่างกัน อาจมีผลเนื่องมาจากโมเลกุลของสารประกอบภายในของข้าวโพดที่ดูดกลืนแสงในช่วง NIR ซึ่งรวมถึงโมเลกุลของไขมันหรือน้ำมันที่สนใจศึกษาด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 18 ขั้นตอนการวัดค่าการดูดกลืนแสงของเมล็ดข้าวโพดด้วยเครื่อง NIR spectrometer โดยการบรรจุเมล็ดข้าวโพดลงใน rotating cup

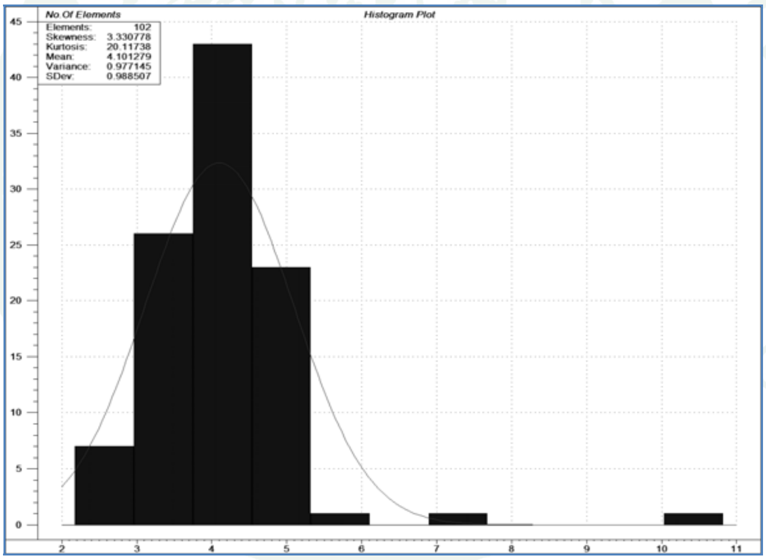


ภาพที่ 19 สเปกตรัมเริ่มต้นของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 1200-2400 นาโนเมตร ของข้าวโพด 102 ตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

จากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดโดยวิธีการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ (soxhlet extraction method) ตามวิธีมาตรฐานของ AOAC (2000) พบว่า SW04L-336 และ SW04L-337 ซึ่งใช้เป็นประชากรเริ่มต้นในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์มีปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ด เท่ากับ 4.80 และ 3.86 % w/w ตามลำดับ และประชากรข้าวโพด 100 ตัวอย่าง ที่คัดเลือกมาใช้สร้างสมการเริ่มต้นมีช่วงปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดตั้งแต่ 2.18-10.82 % w/w โดยข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด 102 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4 โดยมีการกระจายตัวของข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดต่อจำนวนตัวอย่างข้าวโพด ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดต่อจำนวนตัวอย่างข้าวโพด 102 ตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 102 ตัวอย่าง

	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	2.18	4.10	10.82	0.99

3. ผลการสร้างสมการเบื้องต้นสำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

นำข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง NIR spectrometer และข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดที่ได้จากการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 102 ตัวอย่าง มาคำนวณความสัมพันธ์ด้วยวิธี PLSR โดยใช้โปรแกรม The Unscrambler version 9.8 แล้วเปรียบเทียบสมการที่สร้างจากสเปกตรัมเริ่มต้น (original spectrum) และสเปกตรัมที่ปรับแต่ง (pre-treatment spectrum) ด้วยวิธี 1) 1^{st} derivative 2) 2^{nd} derivative 3) MSC 4) MSC ร่วมกับ 1^{st} derivative และ 5) MSC ร่วมกับ 2^{nd} derivative โดยลักษณะสเปกตรัมที่ปรับแต่งด้วยวิธีดังกล่าวทำให้สเปกตรัมเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงไปดังภาพที่ 21 เนื่องจากสมการที่ให้ผลทางสถิติดีโดยทั่วไปต้องสร้างโดยใช้องค์ประกอบหลัก (principal component; PC) ที่เหมาะสม จำนวน PC ที่น้อยไปจะทำให้เกิดการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดต่ำกว่าปริมาณที่แท้จริง (under fitting) ส่วนจำนวน PC มากไปทำให้เกิดการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดสูงกว่าปริมาณที่แท้จริง (over fitting) ซึ่งทั้ง 2 กรณี จะทำให้ประสิทธิภาพการทำนายมีความคลาดเคลื่อนไปจากปริมาณที่แท้จริง ดังนั้นการเลือกจำนวน PC ที่เหมาะสม ทำได้โดยเลือกจากการคำนวณวิธี cross validation แบบ systematic 123123123 โดยตำแหน่ง PC ที่เหมาะสมที่ใช้ในการสร้างสมการ คือ ตำแหน่งที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องภายในสมการ (RMSECV) ต่ำที่สุด และการเลือกสมการทำนายที่ดีที่สุด พิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการ (R_c) ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ (RMSEC) และค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายได้จากสมการกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริง (bias) มีค่าต่ำ

สมการเบื้องต้นสำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดทั้ง 6 สมการให้ผลทางสถิติต่าง ๆ ดังตารางที่ 5 โดยสมการที่สร้างขึ้นจากสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1200-2400 นาโนเมตร แล้วปรับแต่งสเปกตรัมด้วย 1^{st} derivative มีความเหมาะสมในการทำนายค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด เนื่องจากสมการดังกล่าวให้ค่า RMSECV ต่ำสุด คือ 0.6810 % w/w

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

และค่า bias เท่ากับ 0.0044 โดยใช้องค์ประกอบหลัก 13 PC ซึ่งให้ค่า RMSEC เท่ากับ 0.4333 % w/w และค่า R_c เท่ากับ 0.8821 แสดงว่า สมการสามารถใช้ในการคัดเลือกหรือตรวจคุณภาพบางอย่างได้ (screening) (ดังตารางที่ 2)

ตารางที่ 5 ผลทางสถิติของสมการเบื้องต้นสำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม	PC[1]	กลุ่มสร้างสมการ		กลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง		
		R_c[2]	RMSEC[3] (%w/w)	R_{cv}[4]	RMSECV[5] (%w/w)	Bias[6]
Original	14	0.8907	0.4472	0.7151	0.7028	0.0015
1st derivative*	13	0.8821	0.4633	0.7303	0.6810	0.0004
2nd derivative	9	0.8394	0.5346	0.6829	0.7251	-0.0012
MSC (Full MSC)	10	0.8393	0.5348	0.7080	0.7020	0.0011
MSC + 1st derivative	12	0.8804	0.4664	0.7218	0.6904	0.0044
MSC + 2nd derivative	9	0.8581	0.5051	0.7058	0.7039	0.0119

หมายเหตุ * หมายถึง สมการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนาย

[1] PC หมายถึง องค์ประกอบหลัก

[2] R_c หมายถึง ค่าสหสัมพันธ์ของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ

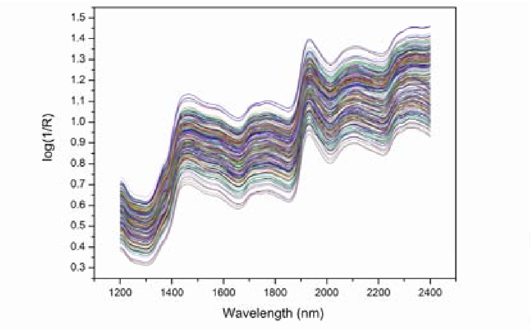
[3] RMSEC หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ

[4] R_{cv} หมายถึง ค่าสหสัมพันธ์ของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องภายในสมการ

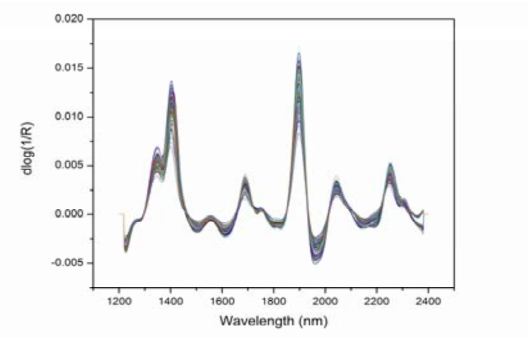
[5] RMSECV หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องภายในสมการ

[6] Bias หมายถึง ค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายได้จากสมการกับค่าทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จริง

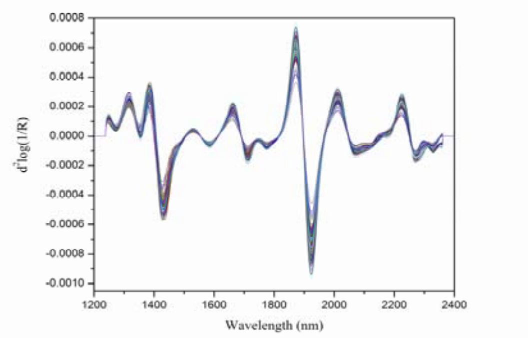
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



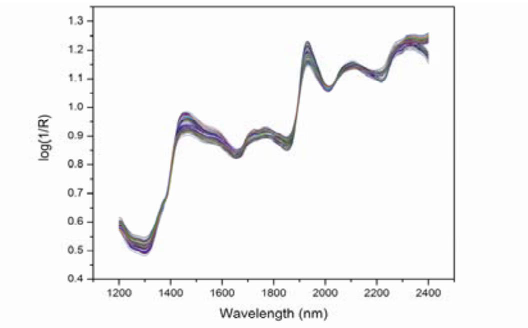
ก) สเปกตรัมเริ่มต้น



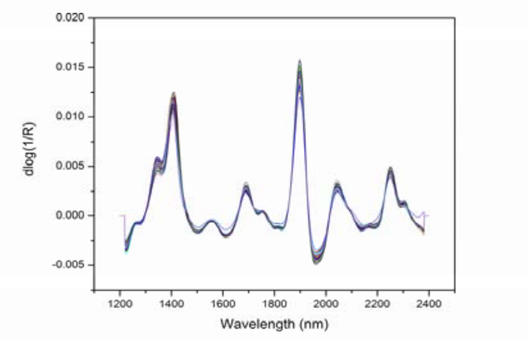
ข) 1st derivative



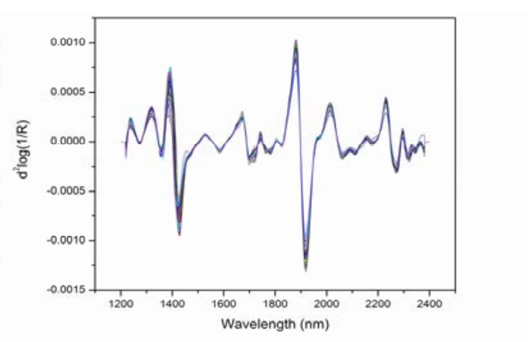
ค) 2nd derivative



ง) MSC



จ) MSC+1st derivative



ฉ) MSC+2nd derivative

ภาพที่ 21 สเปกตรัมเริ่มต้นและสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธีแตกต่างกัน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. ผลการประยุกต์ใช้สมการทำนายในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์

4.1 ผลการใช้สมการเบื้องต้นที่สร้างขึ้นมาทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดที่ได้จากการผสมตัวเองของประชากรรอบการคัดเลือกที่ 0 (cycle 0) ของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบคัดเลือกรวมประยุกต์ ซึ่งมี SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้น (Alex_S0 และ IHO_S0 ตามลำดับ) จำนวน 200 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ รวม 400 ตัวอย่าง และเมล็ดข้าวโพดที่ได้จากการผสมต้นต่อต้นของ cycle 0 ของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบ full sib ประยุกต์ ซึ่งมี SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้น (Alex_FS0 และ IHO_FS0 ตามลำดับ) จำนวน 200 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ รวม 400 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 800 ตัวอย่าง แสดงดังตารางผนวกที่ ข2 และ ข3 ซึ่งข้อมูลมีค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ด แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_S0, IHO_S0, Alex_FS0 และ IHO_FS0 จากการทำนายด้วยสมการเบื้องต้น

กลุ่มตัวอย่าง	ค่าต่ำสุด (% w/w)	ค่าเฉลี่ย (% w/w)	ค่าสูงสุด (% w/w)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Alex_S0	2.52	4.97	9.34	1.01
IHO_S0	1.79	4.17	7.24	0.88
Alex_FS0	2.22	5.14	8.96	0.97
IHO_FS0	1.36	4.51	7.07	0.86

4.2 ผลการใช้สมการปรับปรุงครั้งที่ 1 ทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดประชากรข้าวโพดรอบการคัดเลือกที่ 1 (cycle 1) ที่ได้จากการผสมต้นต่อต้นของข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดสูงของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบ full sib ประยุกต์ ซึ่งมี SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้น (Alex_FS1 และ IHO_FS1 ตามลำดับ) จำนวน 200 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ รวม 400 ตัวอย่าง แสดงในตารางผนวกที่ ข4 และมีข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ด แสดงดังตารางที่ 7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_FS1 และ IHO_FS1 จากการทำนายด้วยสมการปรับปรุงครั้งที่ 1

กลุ่มตัวอย่าง	ค่าต่ำสุด (% w/w)	ค่าเฉลี่ย (% w/w)	ค่าสูงสุด (% w/w)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Alex_FS1	4.61	5.77	7.34	0.52
IHO_FS1	3.80	5.28	7.52	0.54

4.5 ผลการใช้สมการปรับปรุงครั้งที่ 2 ในการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดที่ได้จากการผสมตัวเองของประชากรรอบการคัดเลือกที่ 1 (cycle 1) ของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบคัดเลือกรวมประยุกต์ ซึ่งมี SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้น (Alex_S1 และ IHO_S1 ตามลำดับ) จำนวน 200 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ รวม 400 ตัวอย่าง และเมล็ดประชากรข้าวโพดรอบการคัดเลือกที่ 2 (cycle 2) ที่ได้จากการผสมต้นต่อต้นของข้าวโพดที่มีปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดสูงของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ที่ใช้วิธีการคัดเลือกประชากรแบบ full sib ประยุกต์ ซึ่งมี SW04L-336 และ SW04L-337 เป็นประชากรเริ่มต้น (Alex_FS2 และ IHO_FS2 ตามลำดับ) จำนวน 200 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ รวม 400 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 800 ตัวอย่าง แสดงในตารางผนวกที่ ข5 และ ข6 ซึ่งข้อมูลมีค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ด แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_S1, IHO_S1, Alex_FS2 และ IHO_FS2 จากการทำนายด้วยสมการปรับปรุงครั้งที่ 2

กลุ่มตัวอย่าง	ค่าต่ำสุด (% w/w)	ค่าเฉลี่ย (% w/w)	ค่าสูงสุด (% w/w)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Alex_S1	4.54	5.87	7.34	0.52
IHO_S1	3.65	5.34	6.92	0.52
Alex_FS2	4.13	5.35	6.72	0.48
IHO_FS2	3.65	4.93	6.24	0.47

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. ผลการพัฒนาสมการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

5.1 ผลการพัฒนาสมการปรับปรุงครั้งที่ 1

คัดเลือกประชากรข้าวโพด 20 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ จาก Alex_S0, IHO_S0, Alex_FS0 และ IHO_FS0 รวม 80 ตัวอย่าง ไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดโดยวิธีการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ พบว่า มีข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ด แสดงดังตารางที่ 9 เมื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของข้าวโพด 80 ตัวอย่าง รวมกับ 102 ตัวอย่าง ในผลการทดลองข้อ 2 ทำให้จำนวนตัวอย่างเพิ่มเป็น 182 ตัวอย่าง ค่าทางสถิติและการกระจายตัวของข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจึงเปลี่ยนแปลงไปดังตารางที่ 10 และภาพที่ 22 ตามลำดับ

ตารางที่ 9 ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 80 ตัวอย่าง จาก Alex_S0, IHO_S0, Alex_FS0 และ IHO_FS0

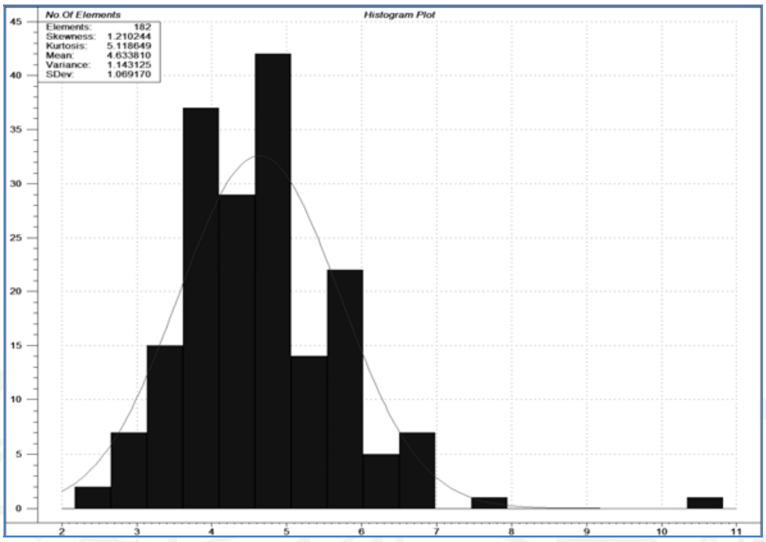
	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	3.55	5.31	6.91	0.73

ตารางที่ 10 ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 182 ตัวอย่าง

	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	2.18	4.63	10.82	1.07

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จำนวนตัวอย่าง



ปริมาณน้ำมัน (% w/w)

ภาพที่ 22 การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดต่อจำนวนตัวอย่างข้าวโพด 182 ตัวอย่าง

นำค่าการดูดกลืนแสงและค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของ 80 ตัวอย่าง เพิ่มเข้าไปในการคำนวณเพื่อสร้างสมการใหม่ รวมเป็น 182 ตัวอย่าง คำนวณหาความสัมพันธ์ด้วยวิธี PLSR แล้วเปรียบเทียบสมการที่คำนวณจากสเปกตรัมเริ่มต้น (original spectrum) และสเปกตรัมที่ปรับแต่ง (pre-treatment spectrum) ด้วยวิธี 1) 1^{st} derivative, 2) 2^{nd} derivative, 3) MSC, 4) MSC ร่วมกับ 1^{st} derivative และ 5) MSC ร่วมกับ 2^{nd} derivative หลังจากนั้นคัดเลือกสมการที่สามารถทำนายค่าได้ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด โดยผลทางสถิติของสมการปรับปรุงครั้งที่ 1 ที่สร้างขึ้นทั้ง 6 สมการ แสดงไว้ในตารางที่ 11 พบว่า สมการที่สร้างขึ้นจากสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1200-2400 นาโนเมตร แล้วทำการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี MSC ร่วมกับ 1^{st} derivative มีความเหมาะสมในการทำนายค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด โดยใช้องค์ประกอบหลัก 12 PC เนื่องจากให้ค่า RMSECV ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.6052 % w/w ซึ่งต่ำกว่าค่า RMSECV ของสมการเบื้องต้น ค่า R_c, RMSEC และ bias เท่ากับ 0.8936, 0.4786 % w/w และ -0.0044 ตามลำดับ ซึ่งค่า R_c ที่คำนวณได้แสดงว่า สมการสามารถใช้ในการคัดเลือกหรือตรวจคุณภาพบางอย่างได้ โดยค่า R_c สูงสุดของสมการปรับปรุงครั้งที่ 1 มีค่ามากกว่า R_c ของสมการเบื้องต้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 11 ผลทางสถิติของสมการปรับปรุงครั้งที่ 1 สำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม	PC[1]	กลุ่มสร้างสมการ		กลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง		
		R_c^2	RMSEC[3] (% w/w)	R_{cv}^4	RMSECV[5] (% w/w)	Bias[6]
Original	12	0.8771	0.5121	0.8042	0.6367	-0.0057
1st derivative	12	0.8836	0.4992	0.8145	0.6211	-0.0068
2nd derivative	10	0.8599	0.5443	0.7828	0.6667	-0.0023
MSC (Full MSC)	11	0.8798	0.5067	0.8141	0.6212	$-5.051e^{-05}$
MSC + 1st derivative*	12	0.8936	0.4786	0.8248	0.6052	-0.0044
MSC + 2nd derivative	9	0.8633	0.5381	0.7950	0.6487	-0.0021

หมายเหตุ สัญลักษณ์ [*, 1, 2, 3, 4, 5, 6] มีความหมายเช่นเดียวกับตารางที่ 5

5.2 ผลการพัฒนาสมการปรับปรุงครั้งที่ 2

คัดเลือกประชากรข้าวโพด 20 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ จาก Alex_FS1 และ IHO_FS1 รวม 40 ตัวอย่าง ไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดโดยวิธีการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ ซึ่งข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของข้าวโพด 40 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 12 เมื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของข้าวโพด 40 ตัวอย่าง รวมกับ 182 ตัวอย่าง ในผลการทดลองข้อ 5.1 รวมเป็น 222 ตัวอย่าง ทำให้ค่าทางสถิติ และการกระจายตัวของข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดเปลี่ยนแปลงไปตามตารางที่ 13 และภาพที่ 23 ตามลำดับ

ตารางที่ 12 ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 40 ตัวอย่าง จาก Alex_FS1 และ IHO_FS1

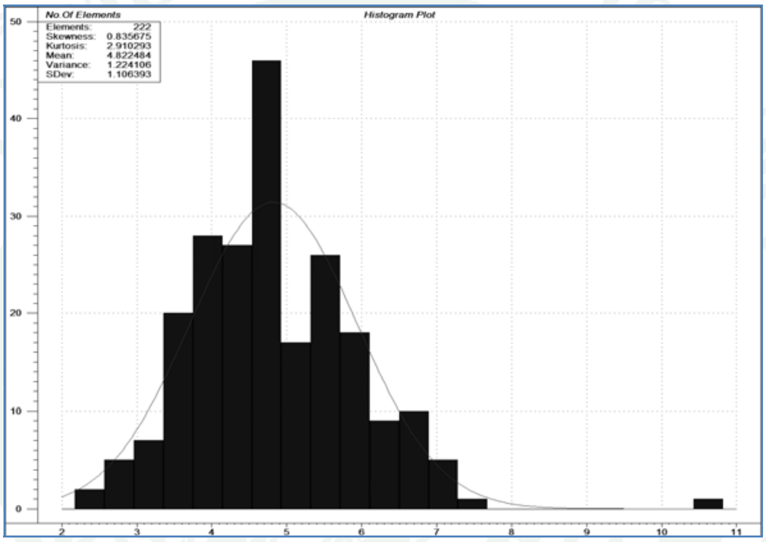
	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	4.23	5.68	7.26	0.84

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 13 ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 222 ตัวอย่าง

	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	2.18	4.82	10.82	1.11

จำนวนตัวอย่าง



ปริมาณน้ำมัน (% w/w)

ภาพที่ 23 การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดต่อจำนวนตัวอย่างข้าวโพด 222 ตัวอย่าง

นำค่าการดูดกลืนแสงและค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของ 40 ตัวอย่าง เพิ่มเข้าไปในการคำนวณเพื่อสร้างสมการใหม่ รวมเป็น 222 ตัวอย่าง คำนวณหาความสัมพันธ์ด้วยวิธี PLSR แล้วเปรียบเทียบสมการที่คำนวณจากสเปกตรัมเริ่มต้น (original spectrum) และสเปกตรัมที่ปรับแต่ง (pre-treatment spectrum) ด้วยวิธี 1) 1^{st} derivative 2) 2^{nd} derivative 3) MSC 4) MSC ร่วมกับ 1^{st} derivative และ 5) MSC ร่วมกับ 2^{nd} derivative โดยผลทางสถิติของสมการปรับปรุงครั้งที่ 2 ที่สร้างขึ้นทั้ง 6 สมการ แสดงไว้ในตารางที่ 14 พบว่า สมการที่สร้างขึ้นจากสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1200-2400 นาโนเมตร แล้วทำการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี MSC ร่วมกับ 1^{st} derivative มีความเหมาะสมในการทำนายค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด โดยใช้องค์ประกอบหลัก 12 PC ให้ค่า RMSECV ต่ำที่สุด และค่า bias เท่ากับ 0.5785 % w/w และ 0.0008 ตามลำดับ ซึ่งค่า

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

RMSECV ต่ำกว่าในสมการปรับปรุงครั้งที่ 1 รวมทั้งให้ค่า R_c และค่า RMSEC เท่ากับ 0.9011 และ 0.4787 % w/w ตามลำดับ ซึ่งค่า R_c ของสมการปรับปรุงครั้งที่ 2 มีค่ามากกว่า R_c ของสมการปรับปรุงครั้งที่ 1 โดยค่า R_c ที่คำนวณได้ แสดงว่า สมการสามารถใช้ในการคัดเลือกหรือตรวจคุณภาพบางอย่างได้

ตารางที่ 14 ผลทางสถิติของสมการปรับปรุงครั้งที่ 2 สำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม	PC[1]	กลุ่มสร้างสมการ		กลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง		
		R_c^2	RMSEC[3] (% w/w)	R_{cv}[4]	RMSECV[5] (% w/w)	Bias[6]
Original	13	0.8959	0.4905	0.8433	0.5954	0.0002
1st derivative	13	0.8997	0.4819	0.8490	0.5851	-0.0019
2nd derivative	9	0.8708	0.5427	0.8145	0.6433	-0.0119
MSC (Full MSC)	11	0.8916	0.4998	0.8423	0.5966	-0.0030
MSC + 1st derivative*	12	0.9011	0.4787	0.8524	0.5785	0.0008
MSC + 2nd derivative	9	0.8747	0.5350	0.8252	0.6248	-0.0020

หมายเหตุ สัญลักษณ์ *, 1, 2, 3, 4, 5, 6 มีความหมายเช่นเดียวกับตารางที่ 5

5.3 ผลการพัฒนาสมการปรับปรุงครั้งที่ 3

คัดเลือกประชากรข้าวโพด 20 ตัวอย่างต่อโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ จาก Alex_S1, IHO_S1, Alex_FS และ IHO_FS1 รวม 80 ตัวอย่าง ไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดโดยวิธีการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ ซึ่งข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของข้าวโพด 80 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 15 เมื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของข้าวโพด 80 ตัวอย่าง รวมกับ 222 ตัวอย่าง ในผลการทดลองข้อ 5.2 รวม 302 ตัวอย่าง ทำให้ค่าทางสถิติและการกระจายตัวของข้อมูลเปลี่ยนแปลงไปตามตารางที่ 16 และภาพที่ 24 ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

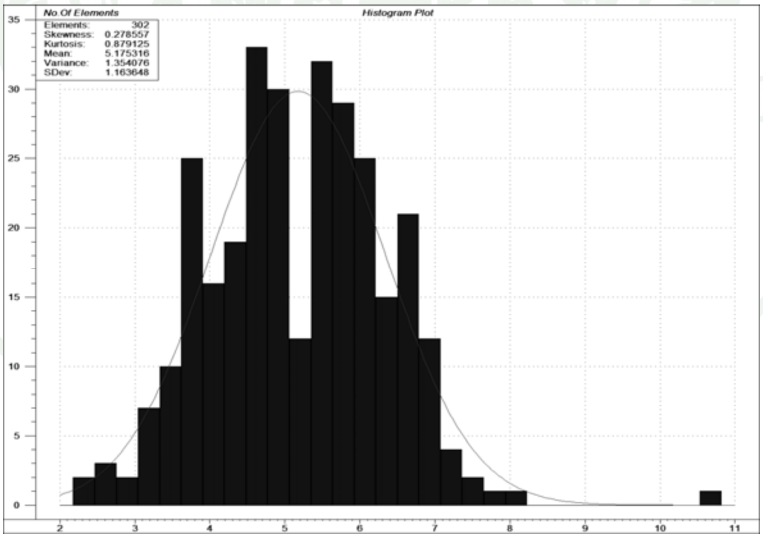
ตารางที่ 15 ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 80 ตัวอย่าง จาก Alex_S1, IHO_S1, Alex_FS2 และ IHO_FS2

	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	4.50	6.15	8.09	0.64

ตารางที่ 16 ข้อมูลค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากการวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของข้าวโพด 302 ตัวอย่าง

	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	2.18	5.18	10.82	1.16

จำนวนตัวอย่าง



ปริมาณน้ำมัน (% w/w)

ภาพที่ 24 การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดต่อจำนวนตัวอย่างข้าวโพด 302 ตัวอย่าง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นำค่าการดูดกลืนแสงและค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของ 80 ตัวอย่าง เพิ่มเข้าไปในการคำนวณเพื่อสร้างสมการใหม่ รวมเป็น 302 ตัวอย่าง คำนวณหาความสัมพันธ์ด้วยวิธี PLSR แล้วเปรียบเทียบสมการที่ได้จากสเปกตรัมเริ่มต้น (original spectrum) และสเปกตรัมที่ปรับแต่ง (pre-treatment spectrum) ด้วยวิธี 1) 1st derivative 2) 2nd derivative 3) MSC 4) MSC ร่วมกับ 1st derivative และ 5) MSC ร่วมกับ 2nd derivative โดยผลทางสถิติของสมการปรับปรุงครั้งที่ 3 ที่สร้างขึ้นทั้ง 6 สมการ แสดงไว้ในตารางที่ 17 พบว่า สมการที่สร้างขึ้นจากสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 1200-2400 นาโนเมตร โดยสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี MSC ร่วมกับ 1st derivative มีความเหมาะสมในการทำนายค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด โดยใช้องค์ประกอบหลัก 13 PC ให้ค่า RMSECV ต่ำที่สุด และค่า bias เท่ากับ 0.5667 % w/w และ -0.0033 ตามลำดับ ซึ่งค่า RMSECV ต่ำกว่าในสมการปรับปรุงครั้งที่ 2 รวมทั้งให้ค่า R_c และค่า RMSEC เท่ากับ 0.9045 และ 0.4954 % w/w ตามลำดับ ซึ่งค่า R_c ของสมการปรับปรุงครั้งที่ 3 มีค่ามากกว่า R_c ของสมการปรับปรุงครั้งที่ 2 โดยค่า R_c ที่คำนวณได้ แสดงว่า สมการสามารถใช้ในการคัดเลือก หรือตรวจคุณภาพบางอย่างได้

ตารางที่ 17 ผลทางสถิติของสมการปรับปรุงครั้งที่ 3 สำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

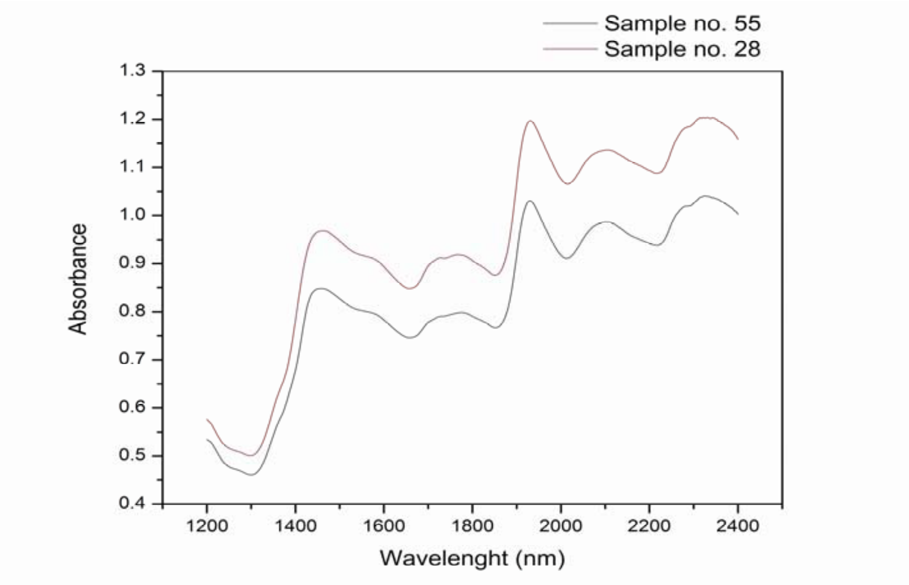
วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม	PC[1]	กลุ่มสร้างสมการ R_c[2]	กลุ่มสร้างสมการ RMSEC[3] (% w/w)	กลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง R_{cv}[4]	กลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง RMSECV[5] (% w/w)	กลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง Bias[6]
Original	14	0.9028	0.4995	0.8658	0.5825	-0.0065
1st derivative	14	0.9038	0.4972	0.8714	0.8710	-0.0039
2nd derivative	11	0.8816	0.5478	0.8436	0.6249	-0.0062
MSC (Full MSC)	14	0.9096	0.4827	0.8723	0.5693	-0.0057
MSC + 1st derivative*	13	0.9045	0.4954	0.8734	0.5667	-0.0033
MSC + 2nd derivative	10	0.8839	0.5432	0.8488	0.6150	-0.0050

หมายเหตุ สัญลักษณ์ [*, 1, 2, 3, 4, 5, 6] มีความหมายเช่นเดียวกับตารางที่ 5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การปรับปรุงสมการทั้ง 3 ครั้ง พบว่า สมการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดถูกสร้างขึ้นจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี MSC ร่วมกับ 1^{st} derivative ทั้งสิ้น เนื่องจากตัวอย่างที่มีขนาดของเมล็ดแตกต่างกัน ทำให้สเปกตรัมของค่าการดูดกลืนแสงแตกต่างกัน (ดังภาพที่ 25) จึงต้องมีการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ดังกล่าว เพื่อลดผลกระทบจากขนาดของเมล็ด โดยตัวอย่างที่มีเมล็ดขนาดใหญ่จะมีค่าการดูดกลืนแสงมากกว่าตัวอย่างที่มีเมล็ดขนาดเล็ก เนื่องจากถ้านำตัวอย่างบรรจุลงใน rotating cup ตัวอย่างที่มีขนาดเมล็ดเล็กจะเกิดช่องว่างระหว่างตัวอย่างน้อย เป็นผลให้แสงส่องผ่านเข้าไปได้น้อย เกิดการสะท้อนของแสงมาก ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จึงมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่มีขนาดเมล็ดใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับกฎของ Beer-Lambert แต่อย่างไรก็ตามค่าการดูกลืนแสงของสเปกตรัมที่แตกต่างกันอาจเนื่องจากปริมาณองค์ประกอบภายในของข้าวโพดแต่ละตัวอย่างที่แตกต่างกันร่วมด้วย (Osborne *et al.,* 1993)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 25 สเปกตรัมของเมล็ดข้าวโพดที่ได้จากตัวอย่างที่มีขนาดของเมล็ดแตกต่างกัน

(ก) สเปกตรัมเริ่มต้นของการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 1200-2400 นาโนเมตร ของเมล็ดข้าวโพดตัวอย่างที่ 28 และ 55

(ข) ขนาดเมล็ดข้าวโพดตัวอย่างที่ 55 เป็นตัวแทนของเมล็ดขนาดใหญ่

(ค) ขนาดเมล็ดข้าวโพดตัวอย่างที่ 28 เป็นตัวแทนของเมล็ดขนาดเล็ก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ผลการพัฒนาสมการโดยคัดเลือกช่วงความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดและผลการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่สร้างขึ้น

6.1 การคัดเลือกหาช่วงความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดด้วยโปรแกรม in-house-written in MATLAB โดยเรียกวิธีการดังกล่าวว่า MWPLSR ซึ่งเป็นวิธีการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ทำให้มีความผิดพลาดจากการทำนายต่ำที่สุด โดย MWPLSR จะแสดงค่าความผิดพลาดระหว่างค่าจริงและค่าทำนาย ในรูปของ log (sums of squares residues; SSR) ในการคำนวณ MWPLSR กำหนดขนาดหน้าต่างเป็น 30 สเปกตรัม เมตริกซ์มีขนาด 302 แถว 601 คอลัมน์ ตำแหน่งข้อมูลที่หน้าต่างเคลื่อนที่ไปถึงก็จะนำไปสร้างสมการด้วยวิธี PLSR ที่ค่า PC ต่าง ๆ ซึ่งจะได้หลายสมการย่อย หลังจากนั้นคำนวณหาค่า log SSR จากสมการ PLSR ที่ได้ทั้งหมด และนำไปเขียนกราฟโดยให้แกน X เป็นความยาวคลื่น และแกน Y เป็นค่า log (SSR) กราฟแต่ละเส้น แสดงค่า log (SSR) ที่ได้จากการคำนวณในแต่ละ PC แล้วพิจารณาเพื่อเลือกช่วงสเปกตรัมที่ให้ค่า log (SSR) ต่ำ เพื่อนำมาสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุด

ผลการคัดเลือกหาช่วงความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดจากวิธี MWPLSR แสดงดังภาพผนวกที่ ค1-ค6 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างค่า log (SSR) กับช่วงความยาวคลื่น โดยคำนวณจากสเปกตรัมเริ่มต้นและสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี 1st derivative, 2nd derivative, MSC, MSC ร่วมกับ 1st derivative และ MSC ร่วมกับ 2nd derivative ตามลำดับ จากกราฟทำให้สามารถคัดเลือกหาช่วงความยาวคลื่นสำหรับนำไปใช้ในการสร้างสมการได้ 2 ช่วงความยาวคลื่น และเมื่อเปรียบเทียบสมการปรับปรุงครั้งที่ 3 ซึ่งใช้ค่าการดูดกลืนแสงจากความยาวคลื่นตลอดทั้งช่วง (full spectrum method) กับสมการที่ใช้ช่วงความยาวคลื่นที่คัดเลือกจาก MWPLSR (ดังตารางที่ 18) พบว่า สมการที่ใช้ช่วงความยาวคลื่นที่คัดเลือกจาก MWPLSR ให้ค่าทางสถิติดีกว่าสมการที่ใช้ความยาวคลื่นตลอดช่วง โดยสมการที่คำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี 1st derivative และใช้ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 1200-1440 นาโนเมตร ให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำที่สุด คือ 0.3610 % w/w และ -0.0162 ตามลำดับ ซึ่งกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง (validation set) เป็นประชากรข้าวโพดจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ในรอบการคัดเลือกที่ 0, 1 และ 2 ที่ปลูกในฤดูทดสอบผลผลิต โดยค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ MWPLSR และวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องแสดงดังภาพที่ 26 และตารางผนวกที่ ข7

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 18 ผลทางสถิติของสมการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดโดยใช้ความยาวคลื่นตลอดทั้งช่วงกับการคัดเลือกช่วงความยาวคลื่น โดยกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องเป็นประชากรข้าวโพดจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ในรอบการคัดเลือกที่ 0, 1 และ 2 ที่ปลูกในฤดูทดสอบผลผลิต

วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม	ช่วงความยาวคลื่น	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	PC[1]	กลุ่มสร้างสมการ		กลุ่มตรวจสอบ ความถูกต้อง	
				R_c^2	RMSEC[3] (% w/w)	RMSEP[4] (% w/w)	Bias[5]
Original	Whole[6]	1200-2400	14	0.9028	0.4995	0.3884	0.1370
	MWPLS[7]	1200-1440	7	0.8521	0.6080	0.4102	-0.1107
	MWPLS[7]	1600-1880	11	0.8738	0.5648	0.4121	-0.1155
	MWPLS[7]	1200-1440, 1600-1880	12	0.8681	0.5767	0.4408	-0.0155
1st derivative	Whole[6]	1200-2400	14	0.9038	0.4972	0.4752	0.3133
	MWPLS[7]	1200-1440*	13	0.8826	0.5461	0.3610	-0.0162
	MWPLS[7]	1580-1880	9	0.8323	0.6440	0.4261	-0.1344
	MWPLS[7]	1200-1440, 1580-1880	10	0.8740	0.5645	0.3667	-0.0162
2nd derivative	Whole[6]	1200-2400	8	0.8650	0.5830	0.3988	-0.1435
	MWPLS[7]	1200-1440	10	0.8693	0.5743	0.3726	-0.1036
	MWPLS[7]	1580-1880	10	0.8540	0.6045	0.4331	-0.1561
	MWPLS[7]	1200-1440, 1580-1880	6	0.8505	0.6109	0.4261	-0.0821
MSC	Whole[6]	1200-2400	14	0.9096	0.4827	0.4122	0.1318
	MWPLS[7]	1200-1480	8	0.8599	0.5930	0.4006	-0.0088
	MWPLS[7]	1600-1880	6	0.8413	0.6281	0.4324	-0.0948
	MWPLS[7]	1200-1480, 1600-1880	10	0.8776	0.5569	0.4503	0.1591

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 18 (ต่อ)

วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม	ช่วงความยาวคลื่น	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	PC[1]	กลุ่มสร้างสมการ		กลุ่มตรวจสอบ ความถูกต้อง	
				R_c^2	RMSEC[3] (% w/w)	RMSEP[4] (% w/w)	Bias[5]
MSC +1st derivative	Whole[6]	1200-2400	13	0.9045	0.4954	0.4290	0.2314
	MWPLS[7]	1200-1440	8	0.8660	0.5808	0.3826	-0.0176
	MWPLS[7]	1580-1880	7	0.8443	0.6225	0.4055	-0.0350
	MWPLS[7]	1200-1440, 1580-1880	8	0.8681	0.5766	0.3997	0.0195
MSC +2nd derivative	Whole[6]	1200-2400	10	0.8839	0.5432	0.4510	-0.1511
	MWPLS[7]	1200-1440	9	0.8685	0.5759	0.3834	-0.0846
	MWPLS[7]	1580-1880	9	0.8584	0.5959	0.4066	-0.0546
	MWPLS[7]	1200-1440, 1580-1880	7	0.8626	0.5877	0.4001	-0.0530

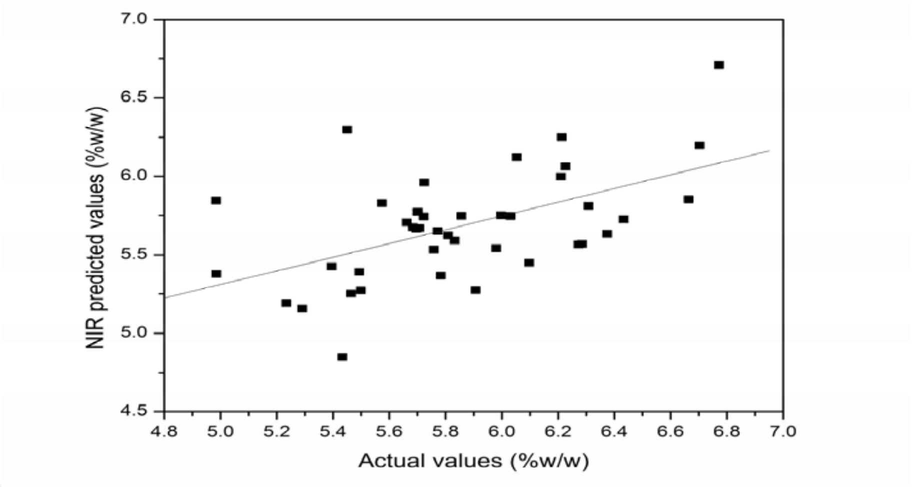
หมายเหตุ สัญลักษณ์ [*, 1, 2, 3, 5] มีความหมายเช่นเดียวกับตารางที่ 5

[4] RMSEP หมายถึง ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง

[6] Whole หมายถึง ความยาวคลื่นตลอดทั้งช่วง

[7] MWPLS หมายถึง ความยาวคลื่นที่คัดเลือกจากวิธี moving window partial least squares regression (MWPLSR)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 26 Scatter plot ระหว่างปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ด (% w/w) ที่ทำนายด้วยสมการ MWPLSR (NIR predicted values) (แกน Y) และวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ (actual values) (แกน X) ของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องซึ่งเป็นประชากรข้าวโพดจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ในรอบการคัดเลือกที่ 0, 1 และ 2 ที่ปลูกในฤดูทดสอบผลผลิต

6.2 ผลการตรวจสอบความแม่นยำของสมการที่สร้างขึ้นด้วยกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งเป็นประชากรข้าวโพด 23 ตัวอย่าง ลูกผสม 2 ตัวอย่าง และสายพันธุ์แท้ 5 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 30 ตัวอย่าง (ดังตารางที่ 19) พบว่า สมการที่ใช้ช่วงความยาวคลื่นที่คัดเลือกจาก MWPLSR ให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำกว่าสมการที่ใช้ความยาวคลื่นตลอดทั้งช่วง ซึ่งสมการที่คำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี 1st derivative ที่ความยาวคลื่นในช่วง 1200-1440 นาโนเมตร ให้ค่า RMSEP ต่ำที่สุด คือ 0.9483 % w/w โดยค่าปริมาณน้ำมันที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ MWPLSR และวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของตัวอย่างกลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง แสดงดังภาพที่ 27 และตารางผนวกที่ ข8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 19 ผลทางสถิติของการตรวจสอบความถูกต้องของสมการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด โดยกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้องเป็นตัวอย่างประชากรข้าวโพด 23 ตัวอย่าง ลูกผสม 2 ตัวอย่าง และสายพันธุ์แท้ 5 ตัวอย่าง รวม 30 ตัวอย่าง

วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม	ช่วงความยาวคลื่น	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	PC[1]	กลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง	
				RMSEP[2] (% w/w)	Bias[3]
Original	Whole[4]	1200-2400	14	1.0448	0.5193
	MWPLS[5]	1200-1440	7	1.1591	0.3990
	MWPLS[5]	1600-1880	11	1.2782	0.5422
	MWPLS[5]	1200-1440, 1600-1880	12	0.9869	0.3340
1st derivative	Whole[4]	1200-2400	14	1.1116	0.6066
	MWPLS[5]	1200-1440*	13	0.9147	0.3220
	MWPLS[5]	1580-1880	9	1.4041	0.5860
	MWPLS[5]	1200-1440, 1580-1880	10	1.1901	0.5765
2nd derivative	Whole[4]	1200-2400	8	1.2265	0.5322
	MWPLS[5]	1200-1440	10	1.1197	0.4336
	MWPLS[5]	1580-1880	10	1.2038	0.3587
	MWPLS[5]	1200-1440, 1580-1880	6	1.2553	0.4428
MSC	Whole[4]	1200-2400	14	1.0382	0.6186
	MWPLS[5]	1200-1480	8	1.0507	0.3021
	MWPLS[5]	1600-1880	6	1.0884	0.3909
	MWPLS[5]	1200-1480, 1600-1880	10	0.9625	0.4353

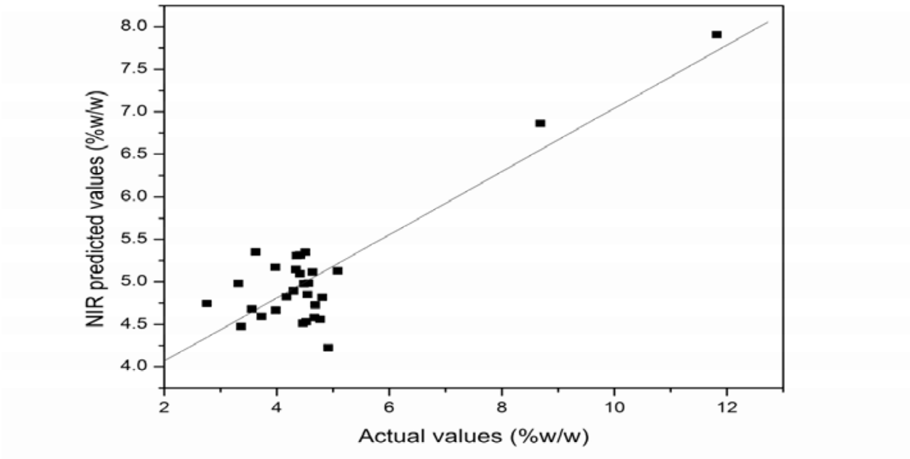
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 19 (ต่อ)

วิธีการปรับแต่งสเปกตรัม	ช่วงความยาวคลื่น	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	PC[1]	กลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง	
				RMSEP[2] (% w/w)	Bias[3]
MSC +1st derivative	Whole[4]	1200-2400	13	1.1028	0.7091
	MWPLS[5]	1200-1440	8	1.0979	0.3989
	MWPLS[5]	1580-1880	7	1.1908	0.5313
	MWPLS[5]	1200-1440, 1580-1880	8	1.1179	0.4937
MSC +2nd derivative	Whole[4]	1200-2400	10	1.1224	0.4438
	MWPLS[5]	1200-1440	9	1.1203	0.3816
	MWPLS[5]	1580-1880	9	1.2611	0.4821
	MWPLS[5]	1200-1440, 1580-1880	7	1.2586	0.5045

หมายเหตุ สัญลักษณ์ [*, 1, 3] มีความหมายเช่นเดียวกับตารางที่ 5
สัญลักษณ์ [2, 4, 5] มีความหมายเช่นเดียวกับตารางที่ 18

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 27 Scatter plot ระหว่างปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ด (% w/w) ที่ทำนายด้วยสมการ MWPLSR (NIR predicted values) (แกน Y) และวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ (actual values) (แกน X) ของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งเป็นตัวอย่างประชากรข้าวโพด 23 ตัวอย่าง ลูกผสม 2 ตัวอย่าง และสายพันธุ์แท้ 5 ตัวอย่าง รวม 30 ตัวอย่าง

วิจารณ์

การวัดค่าการดูดกลืนแสงของเมล็ดข้าวโพดด้วยเครื่อง NIR spectrometer โดยการบรรจุเมล็ดข้าวโพดลงใน rotating cup ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่ 1200-2400 นาโนเมตร พบว่า สเปกตรัมมีลักษณะซ้อนทับกันของจุดยอด และไม่เห็นจุดยอดแหลมแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นแบบโอเวอร์โทน และคอมบิเนชั่นโทนของการสั่นแบบพื้นฐาน การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี 1^{st} derivative และ 2^{nd} derivative วิธี Savizky Golay ที่ smoothing point 10:10 และ polynormial order = 2, 2 และการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี MSC แบบ Full MSC (X = (X-a)/b) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยลดผลจากการกระเจิงของแสง เนื่องจากการใช้เมล็ดข้าวโพดทั้งเมล็ดการกระเจิงแสงจะไม่เป็นระเบียบ และขนาดเมล็ดที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่าง ทำให้สเปกตรัมของค่าการดูดกลืนแสงแตกต่างกัน การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธีการดังกล่าวช่วยทำให้สมการทำนายที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำสูงขึ้น และค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สมการเบื้องต้นที่เหมาะสมสำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ด พบว่า ต้องปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี 1st derivative เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการทำนายให้น้อยลง ซึ่งสมการเบื้องต้นนี้ให้ค่า RMSECV เท่ากับ 0.6810 % w/w และ ค่า R_c เท่ากับ 0.8821 แสดงว่าสมการสามารถใช้ในการคัดเลือกหรือตรวจคุณภาพบางอย่างได้ เมื่อมีการพัฒนาสมการ โดยการนำข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงและค่าปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดเพิ่มเข้าไปในสมการทำนายเพื่อปรับปรุงสมการในทุกรอบของโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ โดยแต่ละครั้งนำสมการที่ดีที่สุดไปใช้ทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดจากโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ในฤดูถัดไป ซึ่งสมการที่ดีที่สุดของการปรับปรุงสมการทั้ง 3 ครั้ง พบว่า สมการทำนายคำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี MSC ร่วมกับ 1st derivative ทั้งสิ้น เนื่องจากการปรับแต่งด้วยวิธี MSC เป็นการช่วยลดผลกระทบจากการกระเจิงแสงซึ่งเป็นปัจจัยทำให้ความชันโดยรวมของสเปกตรัมเปลี่ยนไป และวิธี 1st derivative เป็นการช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น (การเลื่อนตัวของสเปกตรัมตามแกน Y) เนื่องจากอิทธิพลของความชื้น และขนาดอนุภาค ซึ่งมีผลทำให้ค่าทางสถิติของสมการปรับปรุงครั้งที่ 1, 2 และ 3 มีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนาย (RMSECV) ต่ำลงเป็นลำดับ คือ 0.6052, 0.5785 และ 0.5667 % w/w แสดงให้เห็นว่าการพัฒนาสมการปรับปรุงครั้งที่ 3 ให้ค่าทางสถิติดีขึ้น เนื่องจากมีการสร้างสมการจากฐานข้อมูลที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มข้อมูลปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดในระดับที่ไม่เคยมีอยู่ในสมการ หรือมีข้อมูลอยู่น้อยมาก รวมทั้งตัวอย่างเมล็ดข้าวโพดที่เพิ่มเข้าไปในสมการ มีลักษณะและขนาดของเมล็ดที่ใกล้เคียงกันมากขึ้น โดยสมการปรับปรุงครั้งที่ 3 ให้ค่า R_c เท่ากับ 0.9045 แสดงว่า สมการสามารถใช้ในการคัดเลือกหรือตรวจคุณภาพบางอย่างได้

ผลการพัฒนาสมการทำนายโดยคัดเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี MWPLSR พบว่า สมการที่ใช้ช่วงความยาวคลื่นที่คัดเลือกจาก MWPLSR ให้ค่า RMSEP ต่ำกว่าสมการที่ใช้ความยาวคลื่นตลอดทั้งช่วง โดยช่วงความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำมัน คือ 1200-1440 นาโนเมตร สอดคล้องกับ Osborne *et al.* (1993) ที่รายงานว่า การดูดกลืนแสงของน้ำมันมีความสัมพันธ์กับกรดไขมันที่เป็นสายยาวซึ่งจะให้ค่ามากที่ความยาวคลื่น 1200-1400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการสั่นแบบโอเวอร์โทนลำดับที่สอง และคอมบิเนชั่นโทนของพันธะ C-H และ Golebiowski *et al.* (2005) รายงานว่า ช่วงความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำมันในเมล็ด canola คือ 1130-1220, 1350-1390 และ 1650-1800 นาโนเมตร รวมทั้งมีรายงานความยาวคลื่นอื่นซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำมัน ดังนี้ ความยาวคลื่น 1734 และ 1765 นาโนเมตร มีความสัมพันธ์กับการสั่นแบบโอเวอร์โทนลำดับที่หนึ่งของพันธะ C-H และ 2310 และ 2345 นาโนเมตร มีความสัมพันธ์กับการสั่นแบบคอมบิเนชั่นของพันธะ C-H และ Murray (1986) รายงานว่า ความยาวคลื่นที่ 1720 และ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1764 นาโนเมตร มีความสัมพันธ์กับการสั่นแบบโอเวอร์โทนลำดับที่หนึ่งของพันธะ C-H และความยาวคลื่น 2278 นาโนเมตร มีความสัมพันธ์กับการสั่นแบบคอมบิเนชั่นของพันธะ C-H เมื่อตรวจสอบความแม่นยำของสมการที่สร้างขึ้นด้วยกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งเป็นประชากรข้าวโพดจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ในรอบการคัดเลือกที่ 0, 1 และ 2 ที่ปลูกในฤดูทดสอบผลผลิต พบว่า ให้ค่า RMSEP และ bias เท่ากับ 0.3610 % w/w และ -0.0162 ตามลำดับ แต่ถ้านำสมการดังกล่าวไปใช้ทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดกลุ่มตัวอย่างอื่นนอกเหนือจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ พบว่า ให้ค่า RMSEP และ ค่า bias เพิ่มขึ้นเป็น 0.9147 % w/w และ 0.3220 ตามลำดับ แสดงว่า เมื่อนำสมการที่พัฒนาขึ้นมาใช้ทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดที่มีฐานพันธุกรรมต่างกันอาจทำให้ค่าที่ได้จากการทำนายคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ดังนั้นหากต้องการใช้สมการนี้ในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดอื่น ควรพัฒนาสมการต่อโดยเพิ่มข้อมูลสเปกตรัมและปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของประชากรข้าวโพดใหม่เข้าไป เพื่อให้ได้สมการทำนายที่ใช้ในการประเมินได้แม่นยำกับประชากรข้าวโพดนั้น โดย Baye and Becker (2004) รายงานว่า NIR spectroscopy มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงพันธุกรรม แหล่งเพาะปลูก และฤดูปลูก จึงมีความจำเป็นในการปรับปรุงสมการอยู่เสมอ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การใช้ NIR spectroscopy ร่วมกับวิธี PLSR สามารถสร้างสมการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดสำหรับนำไปใช้ในการประเมินประชากรของโครงการปรับปรุงพันธุ์ได้ สมการทำนายที่มีขนาดของข้อมูลมากขึ้น ทำให้ความถูกต้องแม่นยำในการทำนายสูงขึ้นด้วย โดยสมการปรับปรุงครั้งที่ 1, 2 และ 3 ให้ค่า RMSECV ลดลง และค่า R_c เพิ่มขึ้นเป็นลำดับ

2. สมการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดที่สร้างจากการเลือกช่วงความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำมันในเมล็ด ด้วยวิธี MWPLSR สามารถทำนายได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยสมการที่คำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี 1^{st} derivative และใช้ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 1200-1440 นาโนเมตร ให้ค่า RMSEP และ bias ต่ำที่สุด

3. สมการที่สร้างขึ้นสามารถใช้ทำนายปริมาณน้ำมันในเมล็ดข้าวโพดที่มีฐานพันธุกรรมเดียวกันได้แม่นยำกว่าการนำสมการไปใช้ทำนายปริมาณน้ำมันในเมล็ดข้าวโพดที่มีฐานพันธุกรรมต่างกัน

ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาสมการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดควรกระทำอย่างต่อเนื่องเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการทำนายให้ต่ำที่สุด เพราะการนำสมการทำนายไปใช้ในรอบการคัดเลือกที่สูงขึ้นต้องการความถูกต้องแม่นยำในการทำนายสูงขึ้นด้วย และปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดเป็นลักษณะเชิงปริมาณ ดังนั้นสิ่งแวดล้อมมีผลต่อการแสดงออก ส่งผลให้ตัวอย่างมีความแปรปรวนเกิดขึ้น จึงต้องเพิ่มจำนวนตัวอย่างเข้าไปในการคำนวณเพื่อปรับปรุงสมการทำนายในทุกรอบการปรับปรุงพันธุ์เพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำให้กับสมการทำนาย โดย Fassiol and Cozzolino (2004) รายงานว่า การปรับปรุงสมการทำนายปริมาณน้ำมันมีความจำเป็น ถ้าต้องการนำสมการไปใช้ในฤดูกาลเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน เนื่องจากปริมาณน้ำมันเป็นพารามิเตอร์ที่อ่อนไหวต่อฤดูกาล และการเขตกรรม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชเนษฎ์ ม้าลำพอง. 2541. **การปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดลูกผสมน้ำมันสูง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชูศักดิ์ จอมพุก และ ทิวา จอมพุก. 2541. ข้าวโพด, น. 54-73. *ใน* **พืชเศรษฐกิจ**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ธงชัย สุวรรณสิชณน์. 2545. การวิเคราะห์สเปกตรัม NIR ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ, น. 99-129. *ใน* **การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค near infrared spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก 27-28 พฤศจิกายน 2545**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_______ และ ปิติพร ฤทธิเรืองเดช. 2552. การวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพ (qualitative and quantitative analysis), น. 1-33. *ใน* **เทคโนโลยีอินฟราเรดย่านใกล้ในอุตสาหกรรมเกษตร**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์. 2545. หลักพื้นฐานของเทคนิคอินฟราเรดย่านใกล้สเปกโตรสโกปี, น. 39-61. *ใน* **การอบรมเชิงปฏิบัติการการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค near infrared spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก 27-28 พฤศจิกายน 2545**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ประเทืองศรี สินชัยศรี และ วิมลศรี เทวะผลิน. 2528. การศึกษาน้ำมันและองค์ประกอบของกรดไขมันในเมล็ดพืชน้ำมันเพื่อบริโภค. **วารสารวิทยาศาสตร์การอาหาร** 16: 22-39.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประเทืองศรี สินชัยศรี, ______ และ สุรศักดิ์ โฆษะทัต. 2526. **รายงานประจำปี 2526 การศึกษาวิจัยคุณลักษณะและคุณสมบัติทางเคมีของพืชน้ำมันที่ปลูกในประเทศไทย**. กองเกษตรเคมี กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

ไพจิตร จันทรวงศ์. 2530. **พืชน้ำมันและน้ำมันพืช 52 ชนิด**. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.

ไพศาล เหล่าสุวรรณ. 2525. **หลักการปรับปรุงพันธุ์พืช**. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

วารุณี ธนะแพสย์. 2545. สถานการณ์ปัจจุบันของงานวิจัยและพัฒนาและการใช้ประโยชน์จากเทคนิค NIR ในประเทศไทย, น. 25-37. *ใน* **การอบรมเชิงปฏิบัติการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค near infrared spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก 27-28 พฤศจิกายน 2545**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_______ . 2550. สถานการณ์และการใช้ประโยชน์ด้วยเทคนิค NIR ในประเทศไทย: แนวโน้มงานวิจัยในด้านเทคนิค NIR ในความต้องการของอุตสาหกรรมและมาตรฐานคุณภาพสินค้า, น. 21-31. *ใน* **โครงการสัมมนาวิชาการ การควบคุมมาตรฐานคุณภาพของสินค้าทางการเกษตรและอุตสาหกรรมโดยวิธีไม่ทำลาย เพื่อการแข่งขันบนเวทีการค้าโลก 4 กรกฎาคม 2550**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ร่วมกับสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

ศุมาพร เกษมสำราญ. 2545. ขั้นตอนการสร้างสมการประเมินค่าทางเคมีและทดสอบสมการในเทคนิคสเปกโตรสโกปีย่านใกล้อินฟราเรด, น. 131-151. *ใน* **การอบรมเชิงปฏิบัติการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค near infrared spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก 27-28 พฤศจิกายน 2545**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุทัศน์ ศรีวัฒนพงศ์. 2552. **การปรับปรุงพันธุ์พืช**. พิมพ์ครั้งที่ 2 สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อนุพันธ์ เทอดวงศ์สกุล. 2545. การปรับแต่งสเปกตรัมก่อนการวิเคราะห์, น. 67-98. *ใน* **การอบรมเชิงปฏิบัติการควบคุมคุณภาพสินค้าด้วยเทคนิค near infrared spectroscopy เพื่อการแข่งขันในเวทีการค้าโลก 27-28 พฤศจิกายน 2545**. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2538. **เคมีธัญญาหาร**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Alexander, D.E. 1987. **High Oil Corn**. University of Illinois, Illinois.

_______ . 1988. Breeding special nutritional and industrial types, pp. 869-880. *In* G.F. Sprague, ed. **Corn and Corn Improvement**. American Society of Agronomy, Inc. Pub., Madison, Wisconsin.

Anonymous. 2001. **InfraAlyzer 500 and SESAME-Software Version 3.10, Training Manual**. BRAN+LUEBBE, Norderstedt, Germany.

AOAC. 2000. **Official Methods of Analysis**. 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists, Arlington, Virginia.

Baye, T. and H.C. Becker. 2004. Analyzing seed weight, fatty acid composition, oil and protein contents in *Vernonia galamensis* germplasm by near-infrared reflectance spectroscopy. **JAOCS** 81: 641-645.

Beadle, J.B., D.E. Just, R.E. Morgan and R.A. Reiners. 1965. Composition of corn oil. **J. Am. Oil Chem. Soc**. 42: 90-95.

Berardo, N., O.V. Brenna, A. Amato, P. Valoti, V. Pisacane and M. Motto. 2004. Carotenoids concentration among maize genotypes measured by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). **Innovative Food Science & Emerging Technologies** 5: 393-398.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Boyer, C.D. and L.C.Hannah. 2001. Kernel mutants of corn, pp. 1-31. *In* A.R. Hallauer ed. **Specialty Corns**. CRC Press, USA.

Choi, C.H. and J.M. Kim. 2000. Measurement of moisture and protein content for single kernel rice by spectroscopy. *In* A.M.C. Davies and R. Giangiacomo, eds. **Near Infrared Spectroscopy Proceeding of 9th International Conference**. NIR Publications, U.K.

Corn Industries Research Foundstion. 1960. **Corn Oil**. 2nd ed. Corn Industrie Research Foundstion, Inc., Washington, D.C.

Cozzolino, D., I. Murray, A. Chree and J. R. Scaife. 2005. Multivariate determination of free fatty acid and moisture in fish oils by partial least-squares regression and near infrared spectroscopy. **J. LWT** 38: 821-828.

Delwiche, S.R. 1998. Protein content of single kernel of wheat by near infrared reflectance spectroscopy. **J. Cereal Sci**. 27: 241-254.

Fassio, A. and D. Cozzolino. 2004. Non-destructive prediction of chemical composition in sunflower seeds by near infrared spectroscopy. **Industrial Crops and Products** 20: 321-329.

Font, R., M. del Río Celestino and A. de Haro-Bailón. 2006. The use of near-infrared spectroscopy (NIRS) in the study of seed quality components in plant breeding programs. **Industrial Crops and Products** 24: 307-313.

Gaines, C.S. and W.R. Windham. 1998. Effect of wheat moisture content on meal apparent particle size and hardness scores determined by near-infrared reflectance spectroscopy. **Cereal Chem**. 75: 386-391.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Golebiowski, T., A.S. Leong and J.F. Panozzo. 2005. Near infrared reflectance spectroscopy of oil in intact canola seed (*Brassica napus*, L.) II. Association between principal components and oil content. **J. Near Infrared Spectrosc**. 13: 255-265.

Gunasekaran, S. 2001. **Nondestructive Food Evaluation: Techniques to Analyze Properties and Quality Food Science and Technology**. Marcel Dekker, Inc., New York.

Heise, H.M. and R. Winzen. 2002. Chemometrics in near-infrared spectroscopy, pp. 125-162. *In* H.W. Siesler, Y. Ozaki and S. Kawata, eds. **Near-Infrared Spectroscopy. Principles, Instruments, Applications**. WILEY-VCH, Germany.

Hruschka, W.R. 1990. Data analysis: wavelength selection methods, pp. 35-55. *In* P. Williams and K. Norris, eds. **Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries**. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota, USA.

Inglett, G.E. 1970. Corn kernel structure, pp. 123-137. *In* **Corn: Culture, Processing, Products**. The AVI publishing company, Inc., USA.

Jiang, H.Y., Y.J. Zhu, L.M. Wei, J.R. Dai, T.M. Song, Y.L. Yan and S.J. Chen. 2007. Analysis of protein, starch and oil content of single intact kernels by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) in maize (*Zea mays* L.). **Plant Breeding** 126: 429-497.

Jiang, J. H., R. J. Berry, H. W. Siesler and Y. Ozaki. 2002. Moving window partial least square regression. **J. Anal. Chem**. 74: 3555-3565.

Kasemsumran, S. 2005. **Nondestructive Quantitative Analysis of Biomedical Sample by Near-Infrared Spectroscopy with Chemometrics and Develpoment of Novel Chemometric Method for Quantitative Analysis**. Ph.D. Thesis, Kwansei Gakuin University, Japan.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Kawano, S. 1995. Progress in application of NIR and FT-IR in food characterization, pp. 185-199. *In* A.G. Gaonkar. ed. **Characterization of Food: Emerging Methods**. Elsevier Science B.V., Amsterdam.

_______ . and S. Saranwong. 2004. NIR instruments and sample presentation, pp. 10-19. *In* **The Second Workshop on NIR Spectroscopy in Thailand**. Kasetsart Agricutural and Agro-Industrail Product Improvement Institute, Kasetsart University, Bangkok.

Kim, K.S., S.H. Park and M.G. Choung. 2006. Nondestructive determination of lignans and lignan glycosides in sesame seeds by near infrared reflectance spectroscopy. **J. Agric. Food Chem**. 54: 4544-4550.

Lambert, R.J. 2001. High-oil corn hybrids, pp. 131-154. *In* A.R. Hallauer, ed. **Specialty Corns**. CRC Press, USA.

Misra, J.B., R.S. Mathur and D.M. Bhatt. 2000. Near-infrared transmittance spectroscopy: a potential tool for non-destructive determination of oil content in groundnuts. **J. Sci. Food Agric**. 80: 237-240.

Montes, J. M., H. F. Utz, W. Schipprack, B. Kusterer, J. Muminovic, C. Paul and A. E. Melchinger. 2006. Near-infrared spectroscopy on combine harvesters to measure maize grain dry matter content and quality parameters. **Plant Breeding** 125: 591-595.

Murray, I. 1986. The NIR spectra of homologous series of organic compounds, pp. 13-28. *In* J. Hollo, K.J. Kaffka and J.L. Gonczy, eds. **Proceedings of the NIR/NIT Conference**. Akademiai Kiado, Budapest.

_______ . 1990. Application of NIRS in agriculture, pp.11-20. *In* M. Iwamoto and S. Kawano, eds. **The Proceedings of The Second International Near Infrared Spectroscopy Conference**. Korin Publishing Co., Ltd., Japan.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Murray, I. and I.A. Cowe. 1992. **Making Light Work: Advances in Near Infrared Spectroscopy**. VCH Verlagsgesellschaft, Weinhem and VCH Publishers, New York.

Norris, K.H. and P.C. Williams. 1984. Optimization of mathematical treatment of raw near-infrared signal in the measurement of protein in hard red spring wheat I. Influence of particle size. **Cereal Chem**. 61: 158-165.

Orman, B.A. and R.A. Schumann. 1991. Comparision of near -infrared spectroscopy calibration methods for the prediction of protein, oil and starch in maize grain. **J. Agric. Food Chem**. 39: 883-886.

Osborne, B.G., T. Fearn and P.H. Hindle. 1993. **Practical NIR Spectroscopy with Application in Food and Beverage Analysis**. Longman Scientific & Technical, Singapore.

Panford, J.A., P.C. Williams and J.M. Deman. 1988. Analysis of oilseeds for protein, oil, fiber and moisture by near-infrared reflectance spectroscopy. **J. Am. Oil Chem. Soc**. 65: 1627-1634.

Pedro, A.K. and M.C. Ferreira. 2007 Simultaneously calibrating solids, sugars and acidity of tomato products using PLS2 and NIR spectroscopy. **Analytica Chimica Acta** 595: 221-227.

Psotka, J. 1999. What another article about near-infrared (NIR) spectroscopy. **Cereal Foods World** 44: 428-429.

Ramírez-Tortosa, M.C., S. Granados and J.L. Quiles. 2006. Chemical composition, types and characteristics of olive oil, pp. 45-62. *In* J.L. Quiles, M.C. Ramírez-Tortosa and P. Yaqoob, eds. **Olive Oil and Health**. Cromwell Press, Trowbridge, UK.

Sato, T., A. Maw and M. Katsuta. 2003. NIR reflectance spectroscopic analysis of the FA composition in sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds. **JAOCS** 80: 1157-1161.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Siesler, H.W., Y. Ozaki, S. Kawata and H.W. Heise. 2002. **Near-Infrared Spectroscopy: Principles, Instruments, Applications**. WILEY-VCH, Germany.

Sissons, R., B. Osborne and S. Sissons. 2006. Application of near infrared reflectance spectroscopy to a durum wheat in breeding program. **J. Near Infrared Spectrosc**. 14: 17-25.

Stermer, R.A., Y. Pomeranz and R.J. McGinty. 1977. Infrared reflectance spectroscopy for estimation of moisture of whole grain. **Cereal Chem**. 54: 345-351.

Tajuddin, T., S. Watanab, K. Harada and S. Kawano. 2002. Application of near infrared transmittance spectroscopy to the estimation of protein and lipid contents in single seeds of soybean recombinant inbred lines for quantitative trait analysis. **J. Near Infrared Spectrosc**. 10: 315-325.

Tillman, B.L., D.W. Gorbet and G. Person. 2006. Predicting oleic and linoleic acid content of single peanut seeds using near-infrared reflectance spectroscopy. **Crop Sci**. 46: 2121-2126.

Velasco, L., B. Perez-Vich and J.M. Fernandez-Martinez. 1999. Nondestructive screening for oleic and linoleic acid in single sunflower achenes by near-infrared reflectance spectroscopy. **Crop Sci**. 39: 219-222.

Welle, R., W. Greten, T. Muller, G. Weber and H. Wehrmann. 2005. Application of near infrared spectroscopy on-combine in corn grain breeding. **J. Near Infrared Spectrosc**. 13: 69-75.

Williams, P. 2007. **Near-infrared technology-getting the best out of light**. PDK Grain, Canada.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Williams, P. and K. Norris. 1990. **Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries**. American Association of Cereal Chemists, Inc., USA.

Workman, J.J. 2001. NIR spectroscopy calibration basics, pp. 91-128. *In* D.A. Burns and E.W. Ciurczak, eds. **Handbook of Near-Infrared Analysis**. 2nd ed. Revised and Expanded. Marcel Dekker, Inc., New York.

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

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน (AOAC, 2000)

1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์

1.1 ชั่งเมล็ดข้าวโพดประมาณ 10 กรัม บดละเอียดด้วยเครื่องปั่นนาน 1 นาที

1.2 ชั่งตัวอย่างบดละเอียดใส่กระป๋องอะลูมิเนียมที่อบแห้งแล้วปริมาณ 3 กรัม โดย 1 ตัวอย่างทำ 2 ซ้ำ

1.3 นำไปอบที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง 30 นาที

1.4 นำไปใส่โถแก้วดูดความชื้น นาน 30 นาที แล้วบันทึกข้อมูลน้ำหนักแห้ง

1.5 อบซ้ำอีกครั้งที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที

1.6 นำไปใส่โถแก้วดูดความชื้น นาน 30 นาที แล้วบันทึกข้อมูลน้ำหนักแห้ง เปรียบเทียบกับน้ำหนักในข้อ 1.4 ควรห่างกันไม่เกิน 0.002 กรัม

2 สารเคมี

2.1 ปิโตรเลียมอีเทอร์

3 ขั้นตอนการวิเคราะห์

3.1 อบขวดแก้วก้นกลม (flask) ขนาด 250 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง 30 นาที

3.2 นำไปใส่โถแก้วดูดความชื้น นาน 30 นาที

3.3 ชั่งน้ำหนักขวดแก้วก้นกลม บันทึกน้ำหนัก แล้วนำไปอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ100±5 องศาเซลเซียส 30 นาที

3.4 นำไปใส่โถแก้วดูดความชื้น นาน 30 นาที แล้วชั่งน้ำหนักขวดแก้วก้นกลม บันทึกน้ำหนัก (W_1) เปรียบเทียบกับน้ำหนักในข้อ 3.3 ควรห่างกันไม่เกิน 0.002 กรัม

3.5 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างข้าวโพดบดละเอียดที่อบแห้งแล้ว 2 กรัม (W) ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 1 พับกระดาษกรองให้เป็นรูปสี่เหลี่ยม เขียนรหัสตัวอย่างที่กระดาษกรอง นำกระดาษกรองใส่ลงในทิมเบิล (thimble) แล้วใส่ลงใน extraction tube

3.6 เติมปิโตรเลียมอีเทอร์ลงในขวดแก้วก้นกลมที่ชั่งน้ำหนักแล้ว ประมาณ 200 มิลลิลิตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3.7 ประกอบเครื่องมือชุดวิเคราะห์ปริมาณน้ำมัน แล้วกลั่นเป็นเวลานาน 16 ชั่วโมง

3.8 เมื่อครบ 16 ชั่วโมงให้ใช้คีมคีบเอาทิมเบิล ที่มีตัวอย่างออกจาก extraction tube

3.9 กลั่นปิโตรเลียมอีเทอร์อีก 1 รอบ เพื่อล้าง extraction tube จากนั้นกลั่นปิโตรเลียมอีเทอร์ในขวดแก้วก้นกลมให้เกือบหมด

3.10 นำขวดแก้วก้นกลมที่มีน้ำมันและปิโตรเลียมอีเทอร์ที่เหลือเล็กน้อย ไปอบที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง 30 นาที

3.11 นำไปใส่โถแก้วดูดความชื้น นาน 30 นาที ชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกน้ำหนัก

3.12 นำขวดแก้วก้นกลมไปอบเพิ่มที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที

3.13 นำไปใส่ในโถแก้วดูดความชื้น นาน 30 นาที ชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกน้ำหนัก (W_2) เปรียบเทียบกับน้ำหนักในข้อ 3.11 ควรห่างกันไม่เกิน 0.002 กรัม

3.14 คำนวณหาปริมาณน้ำมันจากสูตร

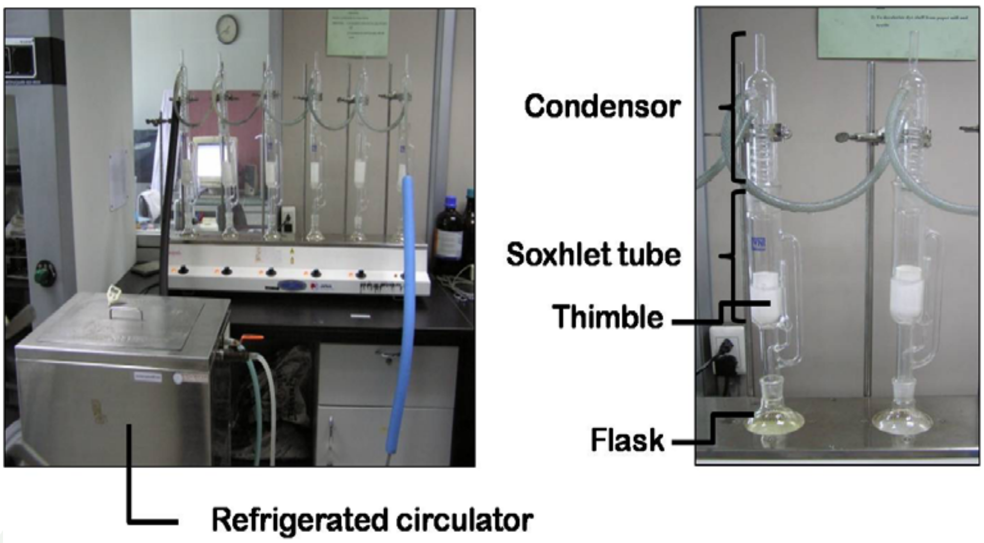
$$\text{ปริมาณน้ำมัน (\%)} = \frac{(W_2 - W_1)}{W} \times 100$$

เมื่อ W = น้ำหนักของตัวอย่างอบแห้ง มีหน่วยเป็นกรัม (g)

W_1 = น้ำหนักของขวดแก้วก้นกลมที่นำไปอบจนได้น้ำหนักคงที่ หน่วยเป็นกรัม (g)

W_2 = น้ำหนักของขวดแก้วก้นกลมและน้ำมันหลังอบแห้งจนน้ำหนักคงที่ หน่วยเป็นกรัม (g)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ก1 เครื่องสกัดน้ำมัน (soxhlet extraction apparatus) และเครื่องทำความเย็น (refrigerated circulator)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 รายชื่อและปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดของประชากรข้าวโพด 102 ตัวอย่าง สำหรับใช้ในการสร้างสมการเบื้องต้น

ตัวอย่างที่	ชื่อประชากร	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
1	SW00D 122 New Shaheen	4.7805
2	SW00D 53 SOAN	4.7619
3	SW00D 64 Trinidad 6	4.0748
4	SW00D 124 D-742	4.1164
5	SW00D 140 Harapan Baru	3.7675
6	SW00D 45 San Vicate 5D	3.7331
7	SW00D 65 Trinidad 10	2.9223
8	SW00D 10016 SI 17(h-2e) C8	2.7502
9	SW00D 58 Veracruz 184 (WD)	3.5857
10	SW03D-E5 120-4 Kei 0102-33 (unselected (bulk seed))	2.1792
11	SW01D-C10 103-8 Illinois High oil	7.6322
12	SW00D-10006 MoSQB(S8-H) C16	4.2436
13	SW00D 6 Kosmet Semiflints	4.1653
14	SW2000L-D3 KS 23(S) C3-F1	3.2898
15	SW00D 15 Phil.9 (HG. 10F2)#	3.5867
16	SW05L-F14 3050 KS24 (S) C3-F2	3.7134
17	SW00D 68 Kisan	3.6696
18	SW00D 83 C-3	3.7404
19	SW00D 46 San Vicate 6D	4.9940
20	SW00D 105 Veracruz 176	3.4595
21	SW00D 104 C-8	5.6495
22	SW00D 47 San Vicate 7D	3.8626
23	SW00D 16 Rep Dom 57 D	2.9566
24	SW00D 100 C6	2.3697
25	SW00D-10081 Big White (Tennessee. USA)	2.7491
26	SW00D 127 Diara Composite	4.8690
27	SW00D 128 Pirsabak-7734	4.8745
28	SW03E-F11 Kei 0102-16 (MBS) Ä	2.7401

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ชื่อประชากร	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
29	SW00D 5 Katumani	3.9851
30	SW00D 48 San Vicate Gpo. 3	5.0173
31	SW00D 131 EV. Hunius (GFS4)	3.4605
32	SW00D 66 VL-54	4.0065
33	SW05L-F14 3049 KS 23 (S) C5-F2	3.6780
34	SW00D 99 C-5	4.5336
35	SW00D 2 Dent, type USA corn Belt Dents	3.8105
36	SW00D 10 Macedonian Flints	3.2385
37	SW00D-10032 Indian Chief	3.9576
38	SW00D 9 Large-Eared Flints	4.3821
39	SW00D 141 IPB Bar 1	3.7100
40	SW00D 126 Deccan 101	4.2549
41	SW00D 73 Composite 15	4.3297
42	SW00D 55 Veracruz	3.2500
43	SW2000L USMVAR 5F	3.9687
44	SW01D-C10 103-7 Alex Syn 23	10.8233
45	SW00D 147 Rampur Composite	4.2351
46	SW00D 1 Dent type southery Area of U.S.A. Dents	4.0792
47	SW00D 3 Derived Dents	4.6168
48	SW03L-F13 244 SW3 (S) C7-F1	4.6059
49	SW00D 36 CM 500	3.9544
50	SW00D 121 DA 9-1	4.7151
51	SW2000L-D3 KS 27 (S) C1-F1	4.9964
52	SW00D 146 Rampur Yellow	4.6894
53	SW00D 72 V1.1 x Taiwan DMR comp.1	4.2414
54	SW03D-E5 120-5 Kei 0102-6 (unselected (bulk seed))	3.1034
55	SW2000L-D3 (SWS (S) C5 x SW2 (S) C7) F1	3.8115
56	SW00D 41 Saint Croix Gpo. 3	3.5488
57	SW00D 123 Pirsabak-7930	4.7130

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ชื่อประชากร	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
58	SW00D 135 EV. Super I (ZFS3)	4.4138
59	SW00D 138 Pool 3	4.5137
60	SW00D 142 J-1	3.9458
61	SW00D-10017 Leaming (S) C3	3.3905
62	SW00D-10021 Mexcan June (Texas, USA)	3.7658
63	SW00D Chengez	4.7027
64	SW00D 132 Pool 1	5.0601
65	SW00D 144 R. 786	4.5411
66	SW00D 37 Saint Croix 1D	3.6864
67	SW00D 70 Bihar Early x Ant. Gr. II	4.7070
68	SW00D 38 Saint Croix 4D	4.5757
69	SW00D 82 C-1	4.4944
70	SW00D 28 Rep Dom Gpo. 10	4.2772
71	SW00D 101 Veracruz 171	3.8016
72	SW00D 143 Pool	4.1607
73	SW00D 130 EV. C-2 (ZFSI)	3.8003
74	SW00D 30 Rep Dom Gpo. 13	4.4529
75	SW00D 133 EV. Super I (ZFS4)	3.9473
76	SW00D 84 Veracruz 122	4.7937
77	SW00D 95 Veracruz 161	3.8090
78	SW00D 106 Veracruz 177	3.6384
79	SW00D 136 FAISAL (Syn 551)	4.2845
80	SW00D 103 C-7	3.8931
81	SW00D 145 PC 1602	4.5816
82	SW00D 63 Thai DMR # 6	3.7529
83	SW00D 139 H. 159	4.4990
84	SW00D 67 Trinidad 14D	4.3085
85	SW00D 4 J-48	4.6679
86	SW00D 109 C-14	4.3675

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ตัวอย่างที่	ชื่อประชากร	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
87	SW00D 17 Rep Dom 59D	3.9210
88	SW00D 134 EV. Super II (ZFS1)	4.7004
89	SW00D 54 Veracruz Gpo. 22	3.7302
90	SW00D 93 Veracruz 159	3.2350
91	SW00D 88 Veracruz 141	3.7874
92	SW00D 108 Veracruz 180	3.7865
93	SW00D 86 Veracruz 132	3.4424
94	SW00D 33 Veracruz Gpo. 34	3.3297
95	SW00D 26 Rep Dom Gpo. 5	3.7783
96	SW00D 57 Veracruz Gpo. 25	3.6672
97	SW00D 20 Rep Dom 66D	3.3858
98	SW00D 34 Rep Dom Gpo. 35	4.6056
99	SW00D 8 Veracruz 84	3.4316
100	SW00D 21 Rep Dom 70D	3.0828
101	SW04L-336	4.7995
102	SW04L-337	3.8600

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_S0 และ IHO_S0 ประชากรละ 200 ตัวอย่าง รวม 400 ตัวอย่าง ด้วยสมการเบื้องต้น

Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S0-001	4.018	IHO_S0-001	3.427	Alex_S0-015	3.954	IHO_S0-015	3.265
Alex_S0-002	5.488	IHO_S0-002	3.743	Alex_S0-016	2.516	IHO_S0-016	3.886
Alex_S0-003	5.826	IHO_S0-003	4.848	Alex_S0-017	4.25	IHO_S0-017	3.066
Alex_S0-004	3.739	IHO_S0-004	4.672	Alex_S0-018	5.043	IHO_S0-018	3.761
Alex_S0-005	5.633	IHO_S0-005*	7.237	Alex_S0-019	5.071	IHO_S0-019	4.716
Alex_S0-006	4.721	IHO_S0-006	4.103	Alex_S0-020	4.73	IHO_S0-020	5.046
Alex_S0-007	5.463	IHO_S0-007	4.328	Alex_S0-021	5.432	IHO_S0-021*	2.679
Alex_S0-008	4.373	IHO_S0-008	3.987	Alex_S0-022	5.675	IHO_S0-022	2.397
Alex_S0-009	4.124	IHO_S0-009	3.889	Alex_S0-023	3.885	IHO_S0-023	4.241
Alex_S0-010	6.065	IHO_S0-010	5.016	Alex_S0-024	4.963	IHO_S0-024	3.254
Alex_S0-011	4.057	IHO_S0-011	2.263	Alex_S0-025	5.571	IHO_S0-025	4.598
Alex_S0-012	3.252	IHO_S0-012	4.117	Alex_S0-026	6.308	IHO_S0-026	3.754
Alex_S0-013	3.679	IHO_S0-013	4.125	Alex_S0-027	4.562	IHO_S0-027	3.634
Alex_S0-014	5.168	IHO_S0-014	4.208	Alex_S0-028	4.676	IHO_S0-028	4.743

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S0-029	5.989	IHO_S0-029	4.693	Alex_S0-044	5.760	IHO_S0-044	4.690
Alex_S0-030	5.826	IHO_S0-030	3.006	Alex_S0-045	4.893	IHO_S0-045	3.168
Alex_S0-031	5.401	IHO_S0-031	3.921	Alex_S0-046*	2.603	IHO_S0-046	4.838
Alex_S0-032	4.277	IHO_S0-032	3.727	Alex_S0-047	5.502	IHO_S0-047	3.889
Alex_S0-033	4.316	IHO_S0-033	3.986	Alex_S0-048	4.726	IHO_S0-048	5.095
Alex_S0-034*	4.699	IHO_S0-034	3.866	Alex_S0-049	6.332	IHO_S0-049	3.385
Alex_S0-035*	9.336	IHO_S0-035	3.039	Alex_S0-050	5.155	IHO_S0-050*	2.370
Alex_S0-036	4.025	IHO_S0-036	4.201	Alex_S0-051	4.959	IHO_S0-051	5.737
Alex_S0-037	4.821	IHO_S0-037*	2.679	Alex_S0-052	4.338	IHO_S0-052	4.605
Alex_S0-038	4.591	IHO_S0-038	3.981	Alex_S0-053*	3.731	IHO_S0-053	4.240
Alex_S0-039	3.871	IHO_S0-039	4.451	Alex_S0-054	4.420	IHO_S0-054	5.651
Alex_S0-040	4.615	IHO_S0-040	3.228	Alex_S0-055	5.109	IHO_S0-055	3.926
Alex_S0-041	4.009	IHO_S0-041	4.280	Alex_S0-056	4.170	IHO_S0-056	4.540
Alex_S0-042	5.377	IHO_S0-042*	4.755	Alex_S0-057	5.060	IHO_S0-057	6.418
Alex_S0-043	5.729	IHO_S0-043*	2.690	Alex_S0-058	4.868	IHO_S0-058*	5.357

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S0-059*	6.249	IHO_S0-059	4.259	Alex_S0-074	3.815	IHO_S0-074	3.434
Alex_S0-060	4.044	IHO_S0-060	4.594	Alex_S0-075	4.905	IHO_S0-075	3.715
Alex_S0-061	5.447	IHO_S0-061	2.993	Alex_S0-076	6.009	IHO_S0-076	4.175
Alex_S0-062	4.974	IHO_S0-062	3.017	Alex_S0-077	5.927	IHO_S0-077	4.690
Alex_S0-063	7.556	IHO_S0-063	3.429	Alex_S0-078	5.187	IHO_S0-078	4.352
Alex_S0-064	4.199	IHO_S0-064	4.373	Alex_S0-079	3.671	IHO_S0-079	4.047
Alex_S0-065	4.656	IHO_S0-065	3.695	Alex_S0-080*	6.746	IHO_S0-080	4.666
Alex_S0-066	4.768	IHO_S0-066	3.821	Alex_S0-081	5.558	IHO_S0-081	4.535
Alex_S0-067	4.766	IHO_S0-067*	3.326	Alex_S0-082	5.510	IHO_S0-082	4.847
Alex_S0-068*	5.058	IHO_S0-068	3.612	Alex_S0-083	4.388	IHO_S0-083	4.522
Alex_S0-069	5.760	IHO_S0-069	4.410	Alex_S0-084	3.977	IHO_S0-084	4.564
Alex_S0-070	4.802	IHO_S0-070	1.918	Alex_S0-085	4.491	IHO_S0-085	3.907
Alex_S0-071	5.854	IHO_S0-071	4.670	Alex_S0-086	5.484	IHO_S0-086	4.031
Alex_S0-072	4.904	IHO_S0-072*	4.567	Alex_S0-087	4.775	IHO_S0-087*	5.673
Alex_S0-073	5.749	IHO_S0-073	5.119	Alex_S0-088*	2.822	IHO_S0-088	5.153

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S0-089	3.612	IHO_S0-089	5.067	Alex_S0-104	4.139	IHO_S0-104	4.308
Alex_S0-090	5.297	IHO_S0-090	5.167	Alex_S0-105	5.827	IHO_S0-105	3.611
Alex_S0-091	4.979	IHO_S0-091	4.484	Alex_S0-106	4.166	IHO_S0-106	2.901
Alex_S0-092	4.088	IHO_S0-092	1.985	Alex_S0-107	4.51	IHO_S0-107	4.711
Alex_S0-093	4.959	IHO_S0-093*	5.474	Alex_S0-108	5.039	IHO_S0-108	3.561
Alex_S0-094	3.807	IHO_S0-094	3.430	Alex_S0-109*	3.571	IHO_S0-109	5.070
Alex_S0-095	3.767	IHO_S0-095	4.204	Alex_S0-110	3.473	IHO_S0-110	3.472
Alex_S0-096	5.115	IHO_S0-096	4.367	Alex_S0-111	4.577	IHO_S0-111*	5.338
Alex_S0-097*	6.792	IHO_S0-097	3.918	Alex_S0-112	5.269	IHO_S0-112	4.199
Alex_S0-098	5.401	IHO_S0-098*	5.152	Alex_S0-113	6.971	IHO_S0-113	4.282
Alex_S0-099	3.906	IHO_S0-099	3.338	Alex_S0-114	6.987	IHO_S0-114	4.087
Alex_S0-100*	6.093	IHO_S0-100	4.157	Alex_S0-115*	5.584	IHO_S0-115	5.161
Alex_S0-101	4.838	IHO_S0-101	4.574	Alex_S0-116	5.025	IHO_S0-116	5.368
Alex_S0-102	4.643	IHO_S0-102*	4.130	Alex_S0-117	4.792	IHO_S0-117	4.895
Alex_S0-103	7.048	IHO_S0-103	5.180	Alex_S0-118	4.123	IHO_S0-118	4.313

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S0-119	5.753	IHO_S0-119	3.642	Alex_S0-134	3.222	IHO_S0-134	2.852
Alex_S0-120	6.649	IHO_S0-120	3.797	Alex_S0-135	4.997	IHO_S0-135	4.467
Alex_S0-121	3.473	IHO_S0-121	4.227	Alex_S0-136	4.429	IHO_S0-136	3.829
Alex_S0-122	3.751	IHO_S0-122	4.605	Alex_S0-137	5.175	IHO_S0-137	4.307
Alex_S0-123	5.221	IHO_S0-123	4.620	Alex_S0-138	4.424	IHO_S0-138*	2.334
Alex_S0-124	5.825	IHO_S0-124	4.873	Alex_S0-139	6.217	IHO_S0-139	5.452
Alex_S0-125	3.939	IHO_S0-125	3.779	Alex_S0-140*	5.424	IHO_S0-140	3.547
Alex_S0-126	6.348	IHO_S0-126	4.769	Alex_S0-141	4.235	IHO_S0-141	5.250
Alex_S0-127	6.349	IHO_S0-127	4.393	Alex_S0-142	4.695	IHO_S0-142	4.628
Alex_S0-128	4.216	IHO_S0-128	4.615	Alex_S0-143*	6.461	IHO_S0-143	4.290
Alex_S0-129	5.63	IHO_S0-129*	3.692	Alex_S0-144	5.786	IHO_S0-144	4.517
Alex_S0-130*	7.113	IHO_S0-130	5.052	Alex_S0-145	4.083	IHO_S0-145	4.832
Alex_S0-131	5.690	IHO_S0-131	5.750	Alex_S0-146	4.959	IHO_S0-146	4.077
Alex_S0-132	6.106	IHO_S0-132	3.929	Alex_S0-147	5.175	IHO_S0-147	3.226
Alex_S0-133	4.542	IHO_S0-133	1.790	Alex_S0-148	5.450	IHO_S0-148	4.516

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S0-149	4.549	IHO_S0-149	3.010	Alex_S0-164	5.413	IHO_S0-164	5.325
Alex_S0-150	6.396	IHO_S0-150	4.804	Alex_S0-165	4.154	IHO_S0-165	2.410
Alex_S0-151	7.910	IHO_S0-151	3.176	Alex_S0-166	3.709	IHO_S0-166	3.670
Alex_S0-152*	5.390	IHO_S0-152	4.354	Alex_S0-167	3.940	IHO_S0-167	4.511
Alex_S0-153	6.799	IHO_S0-153	2.671	Alex_S0-168*	3.208	IHO_S0-168	5.202
Alex_S0-154	5.016	IHO_S0-154	4.446	Alex_S0-169	4.153	IHO_S0-169	2.396
Alex_S0-155	3.214	IHO_S0-155	4.850	Alex_S0-170	4.655	IHO_S0-170	4.726
Alex_S0-156	4.875	IHO_S0-156	3.799	Alex_S0-171	4.195	IHO_S0-171	4.132
Alex_S0-157	5.070	IHO_S0-157	4.853	Alex_S0-172	3.953	IHO_S0-172	2.909
Alex_S0-158	5.890	IHO_S0-158	5.095	Alex_S0-173	4.198	IHO_S0-173	4.530
Alex_S0-159	5.201	IHO_S0-159	3.230	Alex_S0-174	4.012	IHO_S0-174	4.222
Alex_S0-160	6.015	IHO_S0-160*	6.447	Alex_S0-175	3.733	IHO_S0-175	4.203
Alex_S0-161	4.466	IHO_S0-161	4.930	Alex_S0-176	4.924	IHO_S0-176	4.373
Alex_S0-162	5.698	IHO_S0-162	3.717	Alex_S0-177	5.325	IHO_S0-177*	5.469
Alex_S0-163	5.034	IHO_S0-163	3.635	Alex_S0-178	5.870	IHO_S0-178	2.902

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S0-179	4.961	IHO_S0-179	4.148	Alex_S0-190	4.207	IHO_S0-190	4.401
Alex_S0-180	5.552	IHO_S0-180	3.590	Alex_S0-191	4.278	IHO_S0-191	3.920
Alex_S0-181*	5.174	IHO_S0-181	3.994	Alex_S0-192	6.851	IHO_S0-192	2.689
Alex_S0-182	4.370	IHO_S0-182	4.251	Alex_S0-193	5.797	IHO_S0-193	4.244
Alex_S0-183	3.723	IHO_S0-183	5.269	Alex_S0-194	3.873	IHO_S0-194	3.159
Alex_S0-184	4.631	IHO_S0-184*	4.904	Alex_S0-195	4.571	IHO_S0-195	5.206
Alex_S0-185	5.138	IHO_S0-185	4.218	Alex_S0-196*	5.773	IHO_S0-196	3.640
Alex_S0-186	4.697	IHO_S0-186*	6.470	Alex_S0-197*	5.907	IHO_S0-197	2.945
Alex_S0-187	6.518	IHO_S0-187	4.713	Alex_S0-198	4.121	IHO_S0-198	4.064
Alex_S0-188	4.365	IHO_S0-188	3.609	Alex_S0-199	5.224	IHO_S0-199	4.374
Alex_S0-189	6.660	IHO_S0-189	3.589	Alex_S0-200	4.321	IHO_S0-200	4.871

หมายเหตุ * คือ ตัวอย่างที่เพิ่มเข้าไปในสมการเบื้องต้น เพื่อพัฒนาเป็นสมการปรับปรุงครั้งที่ 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_FS0 และ IHO_FS0 ประชากรละ 200 ตัวอย่าง รวม 400 ตัวอย่าง ด้วยสมการเบื้องต้น

Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS0-001	5.308	IHO_FS0-001	3.138	Alex_FS0-015	5.655	IHO_FS0-015*	6.716
Alex_FS0-002	6.757	IHO_FS0-002	3.713	Alex_FS0-016	4.862	IHO_FS0-016	4.267
Alex_FS0-003	5.368	IHO_FS0-003	4.436	Alex_FS0-017	5.786	IHO_FS0-017	2.645
Alex_FS0-004	4.427	IHO_FS0-004	4.616	Alex_FS0-018	4.464	IHO_FS0-018	4.070
Alex_FS0-005	5.551	IHO_FS0-005	4.482	Alex_FS0-019	5.629	IHO_FS0-019	6.151
Alex_FS0-006	5.306	IHO_FS0-006	4.376	Alex_FS0-020	6.114	IHO_FS0-020	3.962
Alex_FS0-007	5.257	IHO_FS0-007	4.330	Alex_FS0-021*	4.379	IHO_FS0-021	4.844
Alex_FS0-008	6.136	IHO_FS0-008	4.387	Alex_FS0-022	5.033	IHO_FS0-022	4.589
Alex_FS0-009	6.069	IHO_FS0-009	3.458	Alex_FS0-023	4.369	IHO_FS0-023	6.228
Alex_FS0-010	4.435	IHO_FS0-010	5.515	Alex_FS0-024	5.623	IHO_FS0-024	4.808
Alex_FS0-011	4.882	IHO_FS0-011	3.851	Alex_FS0-025	3.297	IHO_FS0-025	4.956
Alex_FS0-012	3.720	IHO_FS0-012	3.737	Alex_FS0-026	6.392	IHO_FS0-026	5.058
Alex_FS0-013	5.135	IHO_FS0-013	4.509	Alex_FS0-027	6.257	IHO_FS0-027*	5.108
Alex_FS0-014	5.522	IHO_FS0-014	3.280	Alex_FS0-028	5.598	IHO_FS0-028	4.225

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS0-029*	6.704	IHO_FS0-029	3.683	Alex_FS0-044	4.333	IHO_FS0-044*	4.275
Alex_FS0-030	5.208	IHO_FS0-030	4.477	Alex_FS0-045	4.567	IHO_FS0-045	4.634
Alex_FS0-031	6.356	IHO_FS0-031	3.882	Alex_FS0-046	5.462	IHO_FS0-046	3.801
Alex_FS0-032	6.535	IHO_FS0-032	3.943	Alex_FS0-047	5.190	IHO_FS0-047*	4.292
Alex_FS0-033	4.451	IHO_FS0-033	5.787	Alex_FS0-048	5.049	IHO_FS0-048	6.046
Alex_FS0-034	4.997	IHO_FS0-034	5.032	Alex_FS0-049	4.448	IHO_FS0-049	4.732
Alex_FS0-035*	6.397	IHO_FS0-035	4.223	Alex_FS0-050	4.717	IHO_FS0-050*	5.280
Alex_FS0-036	5.471	IHO_FS0-036	4.098	Alex_FS0-051	5.298	IHO_FS0-051	4.369
Alex_FS0-037	5.370	IHO_FS0-037	5.293	Alex_FS0-052	4.727	IHO_FS0-052	4.251
Alex_FS0-038	6.002	IHO_FS0-038	5.210	Alex_FS0-053	5.912	IHO_FS0-053	5.179
Alex_FS0-039	4.327	IHO_FS0-039	4.183	Alex_FS0-054	4.873	IHO_FS0-054	4.786
Alex_FS0-040	5.371	IHO_FS0-040	2.946	Alex_FS0-055	4.610	IHO_FS0-055	3.562
Alex_FS0-041	4.932	IHO_FS0-041*	5.250	Alex_FS0-056	4.106	IHO_FS0-056*	5.241
Alex_FS0-042	4.709	IHO_FS0-042	4.094	Alex_FS0-057	4.952	IHO_FS0-057	5.751
Alex_FS0-043	5.108	IHO_FS0-043	4.227	Alex_FS0-058	5.105	IHO_FS0-058*	5.050

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS0-059	4.639	IHO_FS0-059	4.931	Alex_FS0-074	5.995	IHO_FS0-074	3.256
Alex_FS0-060	5.654	IHO_FS0-060	4.518	Alex_FS0-075	5.920	IHO_FS0-075	4.373
Alex_FS0-061	7.007	IHO_FS0-061	4.298	Alex_FS0-076	6.386	IHO_FS0-076	4.230
Alex_FS0-062	4.830	IHO_FS0-062	4.899	Alex_FS0-077	4.973	IHO_FS0-077*	7.071
Alex_FS0-063*	6.158	IHO_FS0-063	4.473	Alex_FS0-078	5.522	IHO_FS0-078	3.621
Alex_FS0-064	3.537	IHO_FS0-064	4.677	Alex_FS0-079	5.280	IHO_FS0-079	4.464
Alex_FS0-065	5.709	IHO_FS0-065	5.317	Alex_FS0-080	5.484	IHO_FS0-080	4.648
Alex_FS0-066	3.880	IHO_FS0-066	3.106	Alex_FS0-081	4.407	IHO_FS0-081*	4.801
Alex_FS0-067	6.517	IHO_FS0-067	3.443	Alex_FS0-082	6.438	IHO_FS0-082	5.186
Alex_FS0-068	7.646	IHO_FS0-068	5.716	Alex_FS0-083	4.975	IHO_FS0-083	5.298
Alex_FS0-069	5.037	IHO_FS0-069	5.119	Alex_FS0-084	5.849	IHO_FS0-084	3.241
Alex_FS0-070	4.962	IHO_FS0-070	4.000	Alex_FS0-085	5.424	IHO_FS0-085	5.271
Alex_FS0-071	5.778	IHO_FS0-071	4.102	Alex_FS0-086	4.795	IHO_FS0-086	4.819
Alex_FS0-072*	7.033	IHO_FS0-072	5.523	Alex_FS0-087	5.664	IHO_FS0-087	4.507
Alex_FS0-073	4.442	IHO_FS0-073	4.135	Alex_FS0-088	5.079	IHO_FS0-088	4.591

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS0-089	8.167	IHO_FS0-089	4.423	Alex_FS0-104	4.491	IHO_FS0-104	4.196
Alex_FS0-090	4.665	IHO_FS0-090	3.948	Alex_FS0-105	5.108	IHO_FS0-105	5.269
Alex_FS0-091	4.137	IHO_FS0-091*	3.832	Alex_FS0-106	4.872	IHO_FS0-106	4.386
Alex_FS0-092	5.694	IHO_FS0-092	4.448	Alex_FS0-107	4.931	IHO_FS0-107	4.380
Alex_FS0-093	2.599	IHO_FS0-093	4.602	Alex_FS0-108	5.213	IHO_FS0-108*	2.867
Alex_FS0-094	6.040	IHO_FS0-094	4.644	Alex_FS0-109*	5.210	IHO_FS0-109	3.961
Alex_FS0-095	4.616	IHO_FS0-095	4.538	Alex_FS0-110*	4.013	IHO_FS0-110	4.091
Alex_FS0-096	3.706	IHO_FS0-096	3.982	Alex_FS0-111*	6.125	IHO_FS0-111	5.247
Alex_FS0-097	6.158	IHO_FS0-097	4.810	Alex_FS0-112	3.327	IHO_FS0-112	5.214
Alex_FS0-098	6.389	IHO_FS0-098	6.316	Alex_FS0-113	3.339	IHO_FS0-113	3.810
Alex_FS0-099	4.274	IHO_FS0-099	4.858	Alex_FS0-114	6.184	IHO_FS0-114*	3.105
Alex_FS0-100	5.333	IHO_FS0-100*	4.796	Alex_FS0-115	4.210	IHO_FS0-115*	1.361
Alex_FS0-101*	7.685	IHO_FS0-101	3.607	Alex_FS0-116	4.526	IHO_FS0-116	4.936
Alex_FS0-102	5.591	IHO_FS0-102	5.112	Alex_FS0-117	5.982	IHO_FS0-117	5.719
Alex_FS0-103	5.615	IHO_FS0-103	4.748	Alex_FS0-118	4.982	IHO_FS0-118	6.510

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS0-119	6.951	IHO_FS0-119	5.477	Alex_FS0-134	4.352	IHO_FS0-134	3.594
Alex_FS0-120	5.732	IHO_FS0-120	4.500	Alex_FS0-135	5.057	IHO_FS0-135	3.331
Alex_FS0-121	4.437	IHO_FS0-121	3.579	Alex_FS0-136	5.090	IHO_FS0-136	3.697
Alex_FS0-122	5.690	IHO_FS0-122*	5.558	Alex_FS0-137	4.673	IHO_FS0-137	4.913
Alex_FS0-123*	3.487	IHO_FS0-123	6.083	Alex_FS0-138*	5.357	IHO_FS0-138	3.768
Alex_FS0-124	5.732	IHO_FS0-124	4.573	Alex_FS0-139	5.026	IHO_FS0-139	5.539
Alex_FS0-125	5.181	IHO_FS0-125	3.922	Alex_FS0-140	5.363	IHO_FS0-140	3.566
Alex_FS0-126	5.805	IHO_FS0-126	5.662	Alex_FS0-141	5.213	IHO_FS0-141	4.088
Alex_FS0-127	4.460	IHO_FS0-127	2.865	Alex_FS0-142	4.771	IHO_FS0-142	3.947
Alex_FS0-128	4.667	IHO_FS0-128	2.679	Alex_FS0-143*	3.608	IHO_FS0-143	5.318
Alex_FS0-129	3.347	IHO_FS0-129	3.356	Alex_FS0-144	4.250	IHO_FS0-144	4.709
Alex_FS0-130	5.996	IHO_FS0-130	3.514	Alex_FS0-145	4.389	IHO_FS0-145*	3.246
Alex_FS0-131	4.963	IHO_FS0-131	3.910	Alex_FS0-146	4.752	IHO_FS0-146	3.777
Alex_FS0-132	6.434	IHO_FS0-132	4.880	Alex_FS0-147	4.480	IHO_FS0-147	5.251
Alex_FS0-133	3.312	IHO_FS0-133	4.257	Alex_FS0-148	5.323	IHO_FS0-148	4.455

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS0-149	5.394	IHO_FS0-149	4.814	Alex_FS0-164	4.906	IHO_FS0-164	4.207
Alex_FS0-150	4.255	IHO_FS0-150	3.838	Alex_FS0-165	4.718	IHO_FS0-165	4.110
Alex_FS0-151	6.385	IHO_FS0-151	4.283	Alex_FS0-166	3.501	IHO_FS0-166	4.591
Alex_FS0-152	5.450	IHO_FS0-152	4.647	Alex_FS0-167	6.026	IHO_FS0-167	3.580
Alex_FS0-153	4.063	IHO_FS0-153*	6.849	Alex_FS0-168	5.508	IHO_FS0-168	4.650
Alex_FS0-154	4.586	IHO_FS0-154	4.145	Alex_FS0-169	4.657	IHO_FS0-169	4.393
Alex_FS0-155	5.919	IHO_FS0-155	4.808	Alex_FS0-170	4.083	IHO_FS0-170	4.039
Alex_FS0-156	5.708	IHO_FS0-156	4.175	Alex_FS0-171*	5.996	IHO_FS0-171	3.947
Alex_FS0-157	5.182	IHO_FS0-157	4.892	Alex_FS0-172	3.778	IHO_FS0-172	3.280
Alex_FS0-158*	2.215	IHO_FS0-158	4.842	Alex_FS0-173	5.612	IHO_FS0-173	4.888
Alex_FS0-159	5.067	IHO_FS0-159	3.497	Alex_FS0-174	4.065	IHO_FS0-174	4.082
Alex_FS0-160	5.215	IHO_FS0-160*	2.380	Alex_FS0-175	5.352	IHO_FS0-175	4.959
Alex_FS0-161	5.598	IHO_FS0-161	4.964	Alex_FS0-176	4.703	IHO_FS0-176	5.194
Alex_FS0-162	4.212	IHO_FS0-162	4.839	Alex_FS0-177	4.180	IHO_FS0-177	4.815
Alex_FS0-163	6.457	IHO_FS0-163	4.895	Alex_FS0-178	6.631	IHO_FS0-178	6.480

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS0	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS0-179	5.153	IHO_FS0-179*	5.805	Alex_FS0-190	4.631	IHO_FS0-190	3.388
Alex_FS0-180*	5.003	IHO_FS0-180	3.056	Alex_FS0-191	3.858	IHO_FS0-191	5.494
Alex_FS0-181	4.510	IHO_FS0-181	4.501	Alex_FS0-192	5.950	IHO_FS0-192	4.832
Alex_FS0-182	4.788	IHO_FS0-182	4.734	Alex_FS0-193	4.560	IHO_FS0-193	4.069
Alex_FS0-183	4.135	IHO_FS0-183	4.981	Alex_FS0-194	4.648	IHO_FS0-194	3.887
Alex_FS0-184*	3.495	IHO_FS0-184	4.050	Alex_FS0-195	5.290	IHO_FS0-195	5.201
Alex_FS0-185*	5.024	IHO_FS0-185	4.207	Alex_FS0-196	3.628	IHO_FS0-196	4.517
Alex_FS0-186	5.507	IHO_FS0-186	5.244	Alex_FS0-197*	8.955	IHO_FS0-197	5.415
Alex_FS0-187	4.506	IHO_FS0-187	5.060	Alex_FS0-198	5.002	IHO_FS0-198	4.770
Alex_FS0-188	5.063	IHO_FS0-188	4.278	Alex_FS0-199*	3.585	IHO_FS0-199	5.138
Alex_FS0-189	5.474	IHO_FS0-189	6.227	Alex_FS0-200*	7.245	IHO_FS0-200	5.986

หมายเหตุ * คือ ตัวอย่างที่เพิ่มเข้าไปในสมการเบื้องต้น เพื่อพัฒนาเป็นสมการปรับปรุงครั้งที่ 1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 ผลการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_FS1 และ IHO_FS1 ประชากรละ 200 ตัวอย่าง รวม 400 ตัวอย่าง ด้วยสมการปรับปรุงครั้งที่ 1

Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS1-001**	5.243	IHO_FS1-001	5.714	Alex_FS1-015	6.301	IHO_FS1-015	5.124
Alex_FS1-002**	6.003	IHO_FS1-002	5.936	Alex_FS1-016	5.703	IHO_FS1-016	5.291
Alex_FS1-003	5.948	IHO_FS1-003	4.784	Alex_FS1-017	6.133	IHO_FS1-017**	5.105
Alex_FS1-004	5.537	IHO_FS1-004**	7.523	Alex_FS1-018	6.040	IHO_FS1-018	5.289
Alex_FS1-005	4.611	IHO_FS1-005**	6.234	Alex_FS1-019	5.231	IHO_FS1-019	4.948
Alex_FS1-006	6.395	IHO_FS1-006	5.610	Alex_FS1-020	5.244	IHO_FS1-020	4.702
Alex_FS1-007	7.335	IHO_FS1-007	4.515	Alex_FS1-021	4.889	IHO_FS1-021	4.217
Alex_FS1-008	5.886	IHO_FS1-008**	4.255	Alex_FS1-022	5.382	IHO_FS1-022**	4.465
Alex_FS1-009	6.297	IHO_FS1-009	4.927	Alex_FS1-023	5.547	IHO_FS1-023	5.236
Alex_FS1-010	5.253	IHO_FS1-010	6.228	Alex_FS1-024	6.000	IHO_FS1-024	4.849
Alex_FS1-011	6.392	IHO_FS1-011	5.170	Alex_FS1-025	5.629	IHO_FS1-025**	3.798
Alex_FS1-012	5.809	IHO_FS1-012	4.932	Alex_FS1-026	5.739	IHO_FS1-026	5.467
Alex_FS1-013	6.088	IHO_FS1-013	5.147	Alex_FS1-027	5.231	IHO_FS1-027	4.933
Alex_FS1-014	5.292	IHO_FS1-014	4.743	Alex_FS1-028	6.135	IHO_FS1-028	4.885

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS1-029	6.443	IHO_FS1-029	5.989	Alex_FS1-044	5.864	IHO_FS1-044	5.925
Alex_FS1-030**	6.801	IHO_FS1-030	5.793	Alex_FS1-045	5.010	IHO_FS1-045	5.801
Alex_FS1-031	5.086	IHO_FS1-031	5.562	Alex_FS1-046	6.208	IHO_FS1-046	5.084
Alex_FS1-032**	4.906	IHO_FS1-032	4.898	Alex_FS1-047**	7.187	IHO_FS1-047	5.122
Alex_FS1-033**	5.058	IHO_FS1-033	5.620	Alex_FS1-048	6.007	IHO_FS1-048	4.920
Alex_FS1-034	5.060	IHO_FS1-034	4.473	Alex_FS1-049	6.796	IHO_FS1-049	4.931
Alex_FS1-035	5.157	IHO_FS1-035**	6.049	Alex_FS1-050**	5.915	IHO_FS1-050	5.556
Alex_FS1-036	5.699	IHO_FS1-036	6.342	Alex_FS1-051	5.595	IHO_FS1-051	5.074
Alex_FS1-037	5.519	IHO_FS1-037	5.729	Alex_FS1-052	5.828	IHO_FS1-052	5.149
Alex_FS1-038	5.476	IHO_FS1-038	5.477	Alex_FS1-053	5.651	IHO_FS1-053	5.485
Alex_FS1-039	5.570	IHO_FS1-039**	6.593	Alex_FS1-054	6.603	IHO_FS1-054	5.338
Alex_FS1-040	5.393	IHO_FS1-040**	5.617	Alex_FS1-055	6.285	IHO_FS1-055	4.949
Alex_FS1-041	5.679	IHO_FS1-041	5.446	Alex_FS1-056	6.540	IHO_FS1-056	5.558
Alex_FS1-042	5.337	IHO_FS1-042	4.744	Alex_FS1-057	5.409	IHO_FS1-057	5.439
Alex_FS1-043	6.490	IHO_FS1-043	5.945	Alex_FS1-058**	6.094	IHO_FS1-058	4.761

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS1-059	6.185	IHO_FS1-059	6.113	Alex_FS1-074	5.648	IHO_FS1-074	5.231
Alex_FS1-060	5.948	IHO_FS1-060	4.898	Alex_FS1-075**	5.619	IHO_FS1-075	4.884
Alex_FS1-061	5.363	IHO_FS1-061	4.840	Alex_FS1-076	5.604	IHO_FS1-076	5.025
Alex_FS1-062	5.883	IHO_FS1-062	5.590	Alex_FS1-077	5.566	IHO_FS1-077	4.924
Alex_FS1-063	5.705	IHO_FS1-063	5.658	Alex_FS1-078	5.716	IHO_FS1-078	4.412
Alex_FS1-064	5.954	IHO_FS1-064	5.616	Alex_FS1-079	5.718	IHO_FS1-079	5.090
Alex_FS1-065	4.828	IHO_FS1-065	4.846	Alex_FS1-080	5.712	IHO_FS1-080	5.788
Alex_FS1-066	6.429	IHO_FS1-066	5.021	Alex_FS1-081	5.135	IHO_FS1-081	5.309
Alex_FS1-067	6.225	IHO_FS1-067	5.516	Alex_FS1-082	5.774	IHO_FS1-082	4.396
Alex_FS1-068	6.292	IHO_FS1-068	5.060	Alex_FS1-083	5.379	IHO_FS1-083**	6.137
Alex_FS1-069	5.461	IHO_FS1-069	5.889	Alex_FS1-084	5.848	IHO_FS1-084	5.474
Alex_FS1-070	5.991	IHO_FS1-070	4.647	Alex_FS1-085	6.113	IHO_FS1-085	5.470
Alex_FS1-071	5.604	IHO_FS1-071	5.121	Alex_FS1-086**	7.015	IHO_FS1-086	6.199
Alex_FS1-072	5.637	IHO_FS1-072	4.867	Alex_FS1-087	5.966	IHO_FS1-087	5.114
Alex_FS1-073	5.562	IHO_FS1-073**	4.567	Alex_FS1-088	5.165	IHO_FS1-088	5.041

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS1-089	5.329	IHO_FS1-089	5.317	Alex_FS1-104	5.824	IHO_FS1-104	5.015
Alex_FS1-090	5.363	IHO_FS1-090	6.229	Alex_FS1-105	6.327	IHO_FS1-105	4.981
Alex_FS1-091	4.987	IHO_FS1-091	4.993	Alex_FS1-106	5.638	IHO_FS1-106	4.812
Alex_FS1-092	5.701	IHO_FS1-092	4.961	Alex_FS1-107	5.301	IHO_FS1-107	4.990
Alex_FS1-093	5.454	IHO_FS1-093	5.032	Alex_FS1-108	5.891	IHO_FS1-108	6.023
Alex_FS1-094	4.945	IHO_FS1-094**	5.085	Alex_FS1-109	5.416	IHO_FS1-109	5.489
Alex_FS1-095	5.803	IHO_FS1-095	5.169	Alex_FS1-110	6.100	IHO_FS1-110	5.507
Alex_FS1-096	6.333	IHO_FS1-096	6.845	Alex_FS1-111	5.349	IHO_FS1-111	5.067
Alex_FS1-097	6.236	IHO_FS1-097	5.657	Alex_FS1-112	5.512	IHO_FS1-112	5.014
Alex_FS1-098	5.594	IHO_FS1-098	5.611	Alex_FS1-113	5.249	IHO_FS1-113	6.195
Alex_FS1-099	5.756	IHO_FS1-099	5.067	Alex_FS1-114	5.923	IHO_FS1-114**	6.033
Alex_FS1-100	6.339	IHO_FS1-100	5.036	Alex_FS1-115	5.608	IHO_FS1-115	4.887
Alex_FS1-101	4.903	IHO_FS1-101	5.181	Alex_FS1-116	6.075	IHO_FS1-116	4.895
Alex_FS1-102	5.557	IHO_FS1-102**	6.404	Alex_FS1-117	5.398	IHO_FS1-117	5.654
Alex_FS1-103	6.410	IHO_FS1-103	5.593	Alex_FS1-118	6.194	IHO_FS1-118	5.390

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS1-119	6.410	IHO_FS1-119	5.716	Alex_FS1-134	4.879	IHO_FS1-134	4.626
Alex_FS1-120	5.608	IHO_FS1-120	5.448	Alex_FS1-135	5.048	IHO_FS1-135	5.056
Alex_FS1-121**	6.873	IHO_FS1-121	4.920	Alex_FS1-136	6.023	IHO_FS1-136	5.605
Alex_FS1-122**	5.244	IHO_FS1-122	5.463	Alex_FS1-137	5.921	IHO_FS1-137	5.074
Alex_FS1-123	6.132	IHO_FS1-123**	6.280	Alex_FS1-138**	6.839	IHO_FS1-138	5.963
Alex_FS1-124	5.204	IHO_FS1-124	5.526	Alex_FS1-139	5.902	IHO_FS1-139	5.238
Alex_FS1-125	5.809	IHO_FS1-125	5.412	Alex_FS1-140	5.467	IHO_FS1-140	5.049
Alex_FS1-126	5.904	IHO_FS1-126	4.954	Alex_FS1-141	5.994	IHO_FS1-141	5.526
Alex_FS1-127	5.942	IHO_FS1-127	4.991	Alex_FS1-142	4.717	IHO_FS1-142	5.612
Alex_FS1-128**	5.075	IHO_FS1-128	5.752	Alex_FS1-143	5.815	IHO_FS1-143	4.401
Alex_FS1-129	6.049	IHO_FS1-129	5.099	Alex_FS1-144	4.889	IHO_FS1-144	5.594
Alex_FS1-130	4.668	IHO_FS1-130	5.379	Alex_FS1-145	5.852	IHO_FS1-145	4.966
Alex_FS1-131	5.351	IHO_FS1-131	6.300	Alex_FS1-146	6.378	IHO_FS1-146**	5.117
Alex_FS1-132	5.287	IHO_FS1-132	4.820	Alex_FS1-147	5.804	IHO_FS1-147	5.225
Alex_FS1-133	5.186	IHO_FS1-133**	6.782	Alex_FS1-148	5.950	IHO_FS1-148	5.351

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS1-149	5.371	IHO_FS1-149	5.704	Alex_FS1-164	5.634	IHO_FS1-164	5.369
Alex_FS1-150	5.691	IHO_FS1-150	5.263	Alex_FS1-165	5.441	IHO_FS1-165	5.452
Alex_FS1-151	6.007	IHO_FS1-151	5.938	Alex_FS1-166	5.417	IHO_FS1-166	4.772
Alex_FS1-152	6.203	IHO_FS1-152	4.936	Alex_FS1-167	5.325	IHO_FS1-167	5.376
Alex_FS1-153	5.661	IHO_FS1-153	4.897	Alex_FS1-168	6.072	IHO_FS1-168	4.911
Alex_FS1-154**	6.373	IHO_FS1-154	5.108	Alex_FS1-169	5.228	IHO_FS1-169	5.082
Alex_FS1-155	6.235	IHO_FS1-155	5.268	Alex_FS1-170	4.667	IHO_FS1-170	4.842
Alex_FS1-156	6.016	IHO_FS1-156	5.634	Alex_FS1-171	5.975	IHO_FS1-171	5.258
Alex_FS1-157	5.779	IHO_FS1-157	4.991	Alex_FS1-172	6.585	IHO_FS1-172	3.935
Alex_FS1-158**	5.072	IHO_FS1-158	5.816	Alex_FS1-173	5.891	IHO_FS1-173	4.910
Alex_FS1-159	5.692	IHO_FS1-159	5.465	Alex_FS1-174	6.050	IHO_FS1-174	4.271
Alex_FS1-160	5.670	IHO_FS1-160**	6.383	Alex_FS1-175**	5.653	IHO_FS1-175**	4.505
Alex_FS1-161	5.307	IHO_FS1-161	5.180	Alex_FS1-176	6.420	IHO_FS1-176	5.085
Alex_FS1-162	5.597	IHO_FS1-162	5.397	Alex_FS1-177	5.787	IHO_FS1-177	4.502
Alex_FS1-163	5.464	IHO_FS1-163	4.699	Alex_FS1-178	6.763	IHO_FS1-178	5.422

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS1-179	6.425	IHO_FS1-179	4.799	Alex_FS1-190	6.130	IHO_FS1-190	5.185
Alex_FS1-180	6.333	IHO_FS1-180	5.278	Alex_FS1-191	5.710	IHO_FS1-191	5.408
Alex_FS1-181	5.395	IHO_FS1-181	4.805	Alex_FS1-192	6.297	IHO_FS1-192	5.481
Alex_FS1-182	5.562	IHO_FS1-182	5.483	Alex_FS1-193**	6.947	IHO_FS1-193	5.539
Alex_FS1-183	5.196	IHO_FS1-183	4.980	Alex_FS1-194	6.341	IHO_FS1-194	5.347
Alex_FS1-184	5.981	IHO_FS1-184	4.578	Alex_FS1-195	5.793	IHO_FS1-195	5.296
Alex_FS1-185**	4.808	IHO_FS1-185	4.964	Alex_FS1-196	5.930	IHO_FS1-196	4.990
Alex_FS1-186	6.589	IHO_FS1-186	5.225	Alex_FS1-197	5.918	IHO_FS1-197	4.705
Alex_FS1-187	6.200	IHO_FS1-187	5.358	Alex_FS1-198**	6.374	IHO_FS1-198	4.349
Alex_FS1-188	4.951	IHO_FS1-188**	5.229	Alex_FS1-199	5.476	IHO_FS1-199	4.729
Alex_FS1-189	6.830	IHO_FS1-189	6.507	Alex_FS1-200	5.875	IHO_FS1-200	5.360

หมายเหตุ ** คือ ตัวอย่างที่นำไปเพิ่มในสมการปรับปรุงครั้งที่ 1 เพื่อพัฒนาเป็นสมการปรับปรุงครั้งที่ 2

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 ผลการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_S1 และ IHO_S1 ประชากรละ 200 ตัวอย่าง รวม 400 ตัวอย่าง ด้วยสมการปรับปรุงครั้งที่ 2

Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S1-001	6.183	IHO_S1-001	5.133	Alex_S1-015	5.413	IHO_S1-015	4.692
Alex_S1-002***	6.471	IHO_S1-002	5.886	Alex_S1-016	6.215	IHO_S1-016	6.658
Alex_S1-003	5.288	IHO_S1-003	5.985	Alex_S1-017	5.523	IHO_S1-017	5.078
Alex_S1-004	5.948	IHO_S1-004	5.791	Alex_S1-018	5.951	IHO_S1-018	5.877
Alex_S1-005	5.270	IHO_S1-005	5.380	Alex_S1-019	5.869	IHO_S1-019	4.579
Alex_S1-006	6.122	IHO_S1-006***	6.075	Alex_S1-020	5.411	IHO_S1-020	6.149
Alex_S1-007	6.130	IHO_S1-007	5.848	Alex_S1-021	4.535	IHO_S1-021	4.673
Alex_S1-008	5.338	IHO_S1-008	5.251	Alex_S1-022	6.711	IHO_S1-022	5.109
Alex_S1-009	5.243	IHO_S1-009***	6.514	Alex_S1-023	5.768	IHO_S1-023	4.518
Alex_S1-010	5.941	IHO_S1-010	5.554	Alex_S1-024	6.186	IHO_S1-024	5.424
Alex_S1-011	5.274	IHO_S1-011	5.791	Alex_S1-025	6.407	IHO_S1-025	5.153
Alex_S1-012	5.078	IHO_S1-012	6.052	Alex_S1-026	6.496	IHO_S1-026***	5.540
Alex_S1-013	6.292	IHO_S1-013	5.492	Alex_S1-027	5.249	IHO_S1-027	5.221
Alex_S1-014	5.947	IHO_S1-014	5.411	Alex_S1-028	5.272	IHO_S1-028	5.923

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S1-029	5.452	IHO_S1-029	5.239	Alex_S1-044	5.822	IHO_S1-044	5.835
Alex_S1-030	5.103	IHO_S1-030	5.522	Alex_S1-045	6.146	IHO_S1-045	5.416
Alex_S1-031	6.799	IHO_S1-031	5.027	Alex_S1-046	5.789	IHO_S1-046	5.493
Alex_S1-032	6.593	IHO_S1-032	5.642	Alex_S1-047***	6.875	IHO_S1-047	4.619
Alex_S1-033***	7.338	IHO_S1-033	6.089	Alex_S1-048	6.194	IHO_S1-048	5.624
Alex_S1-034	5.878	IHO_S1-034	5.360	Alex_S1-049	5.445	IHO_S1-049***	5.740
Alex_S1-035	5.228	IHO_S1-035***	6.215	Alex_S1-050	5.533	IHO_S1-050	5.246
Alex_S1-036	6.314	IHO_S1-036	5.323	Alex_S1-051	6.162	IHO_S1-051	5.243
Alex_S1-037	5.770	IHO_S1-037	5.297	Alex_S1-052	5.080	IHO_S1-052	4.326
Alex_S1-038	6.741	IHO_S1-038	4.894	Alex_S1-053	5.252	IHO_S1-053	5.193
Alex_S1-039***	6.275	IHO_S1-039***	5.805	Alex_S1-054	5.052	IHO_S1-054	5.609
Alex_S1-040***	5.680	IHO_S1-040	5.345	Alex_S1-055	6.117	IHO_S1-055	5.024
Alex_S1-041	5.732	IHO_S1-041	5.794	Alex_S1-056	6.276	IHO_S1-056	5.303
Alex_S1-042***	7.016	IHO_S1-042	5.340	Alex_S1-057***	6.235	IHO_S1-057	5.168
Alex_S1-043	5.516	IHO_S1-043	4.835	Alex_S1-058	6.821	IHO_S1-058	6.055

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S1-059***	6.314	IHO_S1-059	5.944	Alex_S1-074	5.963	IHO_S1-074	5.649
Alex_S1-060	5.958	IHO_S1-060	5.433	Alex_S1-075	5.564	IHO_S1-075	5.434
Alex_S1-061	5.234	IHO_S1-061	5.034	Alex_S1-076	5.436	IHO_S1-076	5.279
Alex_S1-062	5.653	IHO_S1-062	5.280	Alex_S1-077	6.938	IHO_S1-077	6.133
Alex_S1-063***	6.441	IHO_S1-063	5.580	Alex_S1-078	5.783	IHO_S1-078***	5.779
Alex_S1-064	5.729	IHO_S1-064	5.072	Alex_S1-079	6.003	IHO_S1-079	4.823
Alex_S1-065	5.710	IHO_S1-065***	5.474	Alex_S1-080	5.611	IHO_S1-080	5.754
Alex_S1-066	5.283	IHO_S1-066***	6.919	Alex_S1-081	5.091	IHO_S1-081	5.612
Alex_S1-067	7.173	IHO_S1-067	4.838	Alex_S1-082	5.290	IHO_S1-082	5.472
Alex_S1-068	6.197	IHO_S1-068	5.841	Alex_S1-083	4.928	IHO_S1-083	5.075
Alex_S1-069	4.972	IHO_S1-069	5.195	Alex_S1-084	6.075	IHO_S1-084	4.566
Alex_S1-070	6.184	IHO_S1-070	5.560	Alex_S1-085	5.770	IHO_S1-085	4.981
Alex_S1-071	5.807	IHO_S1-071	5.400	Alex_S1-086	6.143	IHO_S1-086	5.773
Alex_S1-072	5.545	IHO_S1-072	5.329	Alex_S1-087	5.541	IHO_S1-087	5.086
Alex_S1-073***	6.323	IHO_S1-073***	5.878	Alex_S1-088***	6.541	IHO_S1-088	4.878

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S1-089	5.803	IHO_S1-089	5.040	Alex_S1-104	5.428	IHO_S1-104	6.277
Alex_S1-090	5.832	IHO_S1-090	5.394	Alex_S1-105	6.142	IHO_S1-105	5.305
Alex_S1-091	5.200	IHO_S1-091	6.178	Alex_S1-106	6.180	IHO_S1-106	5.195
Alex_S1-092	5.493	IHO_S1-092	5.541	Alex_S1-107	6.002	IHO_S1-107	5.445
Alex_S1-093	5.949	IHO_S1-093***	6.295	Alex_S1-108	5.509	IHO_S1-108	5.666
Alex_S1-094	5.498	IHO_S1-094	5.330	Alex_S1-109	5.702	IHO_S1-109***	6.286
Alex_S1-095	5.763	IHO_S1-095	5.928	Alex_S1-110	5.095	IHO_S1-110	5.626
Alex_S1-096	5.361	IHO_S1-096	4.994	Alex_S1-111	5.309	IHO_S1-111	6.023
Alex_S1-097	6.090	IHO_S1-097	4.717	Alex_S1-112	6.261	IHO_S1-112***	6.037
Alex_S1-098	5.484	IHO_S1-098	5.719	Alex_S1-113***	6.034	IHO_S1-113	5.685
Alex_S1-099	5.819	IHO_S1-099	5.356	Alex_S1-114	6.109	IHO_S1-114	5.927
Alex_S1-100	5.922	IHO_S1-100	5.790	Alex_S1-115	5.641	IHO_S1-115	4.934
Alex_S1-101	6.077	IHO_S1-101	5.088	Alex_S1-116	5.926	IHO_S1-116	5.097
Alex_S1-102	5.004	IHO_S1-102	5.521	Alex_S1-117	5.805	IHO_S1-117	4.947
Alex_S1-103	6.095	IHO_S1-103	5.510	Alex_S1-118	5.735	IHO_S1-118	5.938

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S1-119	6.037	IHO_S1-119	6.300	Alex_S1-134	5.078	IHO_S1-134	4.943
Alex_S1-120	5.547	IHO_S1-120	4.423	Alex_S1-135	5.711	IHO_S1-135	5.779
Alex_S1-121***	6.386	IHO_S1-121	5.082	Alex_S1-136***	6.697	IHO_S1-136	4.724
Alex_S1-122	6.855	IHO_S1-122	4.931	Alex_S1-137	5.399	IHO_S1-137	5.275
Alex_S1-123***	6.797	IHO_S1-123***	5.451	Alex_S1-138***	6.667	IHO_S1-138	4.972
Alex_S1-124	6.126	IHO_S1-124	5.262	Alex_S1-139	6.090	IHO_S1-139	5.732
Alex_S1-125	6.291	IHO_S1-125	6.083	Alex_S1-140	6.881	IHO_S1-140	4.736
Alex_S1-126	6.011	IHO_S1-126	4.933	Alex_S1-141***	6.952	IHO_S1-141	5.132
Alex_S1-127	5.139	IHO_S1-127	4.561	Alex_S1-142	6.113	IHO_S1-142	5.608
Alex_S1-128	5.969	IHO_S1-128	5.498	Alex_S1-143	6.005	IHO_S1-143	5.146
Alex_S1-129	5.487	IHO_S1-129	6.032	Alex_S1-144	5.996	IHO_S1-144	5.548
Alex_S1-130***	7.000	IHO_S1-130	5.322	Alex_S1-145	5.421	IHO_S1-145	4.426
Alex_S1-131	5.965	IHO_S1-131	5.428	Alex_S1-146	5.995	IHO_S1-146	6.159
Alex_S1-132	4.690	IHO_S1-132	5.366	Alex_S1-147	5.553	IHO_S1-147	5.478
Alex_S1-133	5.928	IHO_S1-133	5.079	Alex_S1-148	5.712	IHO_S1-148	5.477

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S1-149	5.787	IHO_S1-149	5.176	Alex_S1-164	7.204	IHO_S1-164	4.245
Alex_S1-150	6.101	IHO_S1-150	5.018	Alex_S1-165	6.179	IHO_S1-165	5.282
Alex_S1-151***	6.251	IHO_S1-151	4.456	Alex_S1-166	6.109	IHO_S1-166	5.083
Alex_S1-152	6.216	IHO_S1-152	5.098	Alex_S1-167	5.506	IHO_S1-167	4.856
Alex_S1-153	6.320	IHO_S1-153	5.282	Alex_S1-168	5.524	IHO_S1-168***	6.191
Alex_S1-154	5.876	IHO_S1-154	4.428	Alex_S1-169	5.799	IHO_S1-169***	6.315
Alex_S1-155	6.037	IHO_S1-155	5.794	Alex_S1-170	6.182	IHO_S1-170	4.367
Alex_S1-156	4.987	IHO_S1-156	4.291	Alex_S1-171	5.433	IHO_S1-171	4.514
Alex_S1-157	6.028	IHO_S1-157	5.438	Alex_S1-172	5.185	IHO_S1-172***	5.392
Alex_S1-158	5.698	IHO_S1-158***	5.775	Alex_S1-173	6.365	IHO_S1-173	4.421
Alex_S1-159	6.065	IHO_S1-159	5.487	Alex_S1-174	5.729	IHO_S1-174	4.850
Alex_S1-160***	6.307	IHO_S1-160	4.890	Alex_S1-175	6.242	IHO_S1-175***	5.367
Alex_S1-161	5.385	IHO_S1-161	4.965	Alex_S1-176	5.663	IHO_S1-176	5.607
Alex_S1-162	6.030	IHO_S1-162	6.285	Alex_S1-177	6.322	IHO_S1-177	3.649
Alex_S1-163	7.099	IHO_S1-163	4.441	Alex_S1-178	5.540	IHO_S1-178	5.697

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข5 (ต่อ)

Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_S1	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_S1-179	6.564	IHO_S1-179	4.615	Alex_S1-190	6.000	IHO_S1-190	4.661
Alex_S1-180	5.991	IHO_S1-180	4.781	Alex_S1-191	6.143	IHO_S1-191	5.366
Alex_S1-181	6.257	IHO_S1-181	4.696	Alex_S1-192	5.805	IHO_S1-192	4.749
Alex_S1-182	5.483	IHO_S1-182	5.378	Alex_S1-193	6.317	IHO_S1-193	4.975
Alex_S1-183	5.449	IHO_S1-183	5.215	Alex_S1-194	5.412	IHO_S1-194	5.051
Alex_S1-184	5.475	IHO_S1-184	4.877	Alex_S1-195	5.645	IHO_S1-195	4.797
Alex_S1-185	5.851	IHO_S1-185	5.141	Alex_S1-196	5.414	IHO_S1-196	4.851
Alex_S1-186	5.696	IHO_S1-186	4.505	Alex_S1-197	5.864	IHO_S1-197***	5.832
Alex_S1-187	5.289	IHO_S1-187	5.053	Alex_S1-198	5.190	IHO_S1-198	5.063
Alex_S1-188	5.596	IHO_S1-188	4.801	Alex_S1-199	5.424	IHO_S1-199	5.364
Alex_S1-189	5.117	IHO_S1-189	4.760	Alex_S1-200	5.305	IHO_S1-200	5.139

หมายเหตุ *** คือ ตัวอย่างที่เพิ่มเข้าไปในสมการปรับปรุงครั้งที่ 2 เพื่อพัฒนาเป็นสมการปรับปรุงครั้งที่ 3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข6 ผลการทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพด Alex_FS2 และ IHO_FS2 ประชากรละ 200 ตัวอย่าง รวม 400 ตัวอย่าง ด้วยสมการปรับปรุงครั้งที่ 2

Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS2-001***	5.402	IHO_FS2-001***	5.257	Alex_FS2-015	5.033	IHO_FS2-015	4.413
Alex_FS2-002	5.476	IHO_FS2-002	4.823	Alex_FS2-016	5.237	IHO_FS2-016	4.938
Alex_FS2-003	5.360	IHO_FS2-003	4.495	Alex_FS2-017	5.433	IHO_FS2-017	4.426
Alex_FS2-004	4.804	IHO_FS2-004	5.024	Alex_FS2-018	5.159	IHO_FS2-018***	5.651
Alex_FS2-005	4.882	IHO_FS2-005	5.569	Alex_FS2-019***	5.587	IHO_FS2-019	4.888
Alex_FS2-006	5.592	IHO_FS2-006	4.299	Alex_FS2-020	5.368	IHO_FS2-020	4.164
Alex_FS2-007	4.730	IHO_FS2-007	4.216	Alex_FS2-021	5.339	IHO_FS2-021	5.034
Alex_FS2-008	5.575	IHO_FS2-008	4.669	Alex_FS2-022	5.960	IHO_FS2-022***	4.302
Alex_FS2-009	5.181	IHO_FS2-009	4.038	Alex_FS2-023	5.097	IHO_FS2-023	4.798
Alex_FS2-010	5.417	IHO_FS2-010***	5.903	Alex_FS2-024	5.557	IHO_FS2-024	5.368
Alex_FS2-011	5.336	IHO_FS2-011	5.333	Alex_FS2-025	5.442	IHO_FS2-025	5.180
Alex_FS2-012	5.439	IHO_FS2-012***	5.420	Alex_FS2-026	5.730	IHO_FS2-026	5.076
Alex_FS2-013	4.735	IHO_FS2-013	4.841	Alex_FS2-027***	6.066	IHO_FS2-027	5.485
Alex_FS2-014	4.837	IHO_FS2-014***	5.220	Alex_FS2-028	5.784	IHO_FS2-028	4.901

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข6 (ต่อ)

Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS2-029	6.591	IHO_FS2-029	4.653	Alex_FS2-044	6.011	IHO_FS2-044	5.102
Alex_FS2-030	5.910	IHO_FS2-030***	5.237	Alex_FS2-045***	6.404	IHO_FS2-045	5.074
Alex_FS2-031	5.514	IHO_FS2-031	4.959	Alex_FS2-046	5.671	IHO_FS2-046	5.715
Alex_FS2-032	5.183	IHO_FS2-032	4.643	Alex_FS2-047	4.936	IHO_FS2-047	4.379
Alex_FS2-033	4.619	IHO_FS2-033	5.031	Alex_FS2-048	5.956	IHO_FS2-048***	5.841
Alex_FS2-034	5.341	IHO_FS2-034	4.642	Alex_FS2-049	5.145	IHO_FS2-049	4.717
Alex_FS2-035***	6.056	IHO_FS2-035***	4.668	Alex_FS2-050	4.698	IHO_FS2-050	5.156
Alex_FS2-036	5.572	IHO_FS2-036	4.765	Alex_FS2-051	5.668	IHO_FS2-051	4.764
Alex_FS2-037	4.700	IHO_FS2-037	4.446	Alex_FS2-052	5.094	IHO_FS2-052	5.206
Alex_FS2-038	4.628	IHO_FS2-038	4.617	Alex_FS2-053	4.531	IHO_FS2-053	5.280
Alex_FS2-039	5.391	IHO_FS2-039	4.480	Alex_FS2-054	4.760	IHO_FS2-054	5.129
Alex_FS2-040	5.260	IHO_FS2-040	5.278	Alex_FS2-055	5.370	IHO_FS2-055	4.273
Alex_FS2-041	5.134	IHO_FS2-041	5.182	Alex_FS2-056	5.142	IHO_FS2-056	5.241
Alex_FS2-042	5.226	IHO_FS2-042	4.578	Alex_FS2-057	5.300	IHO_FS2-057	5.781
Alex_FS2-043	5.842	IHO_FS2-043	5.261	Alex_FS2-058	5.338	IHO_FS2-058	4.620

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข6 (ต่อ)

Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS2-059	5.219	IHO_FS2-059***	5.724	Alex_FS2-074	6.187	IHO_FS2-074***	3.917
Alex_FS2-060	5.847	IHO_FS2-060	4.846	Alex_FS2-075	5.233	IHO_FS2-075	4.931
Alex_FS2-061	5.417	IHO_FS2-061	4.965	Alex_FS2-076	5.733	IHO_FS2-076	5.127
Alex_FS2-062	5.078	IHO_FS2-062	4.115	Alex_FS2-077	4.555	IHO_FS2-077	5.134
Alex_FS2-063	6.072	IHO_FS2-063	4.702	Alex_FS2-078	5.253	IHO_FS2-078	5.366
Alex_FS2-064***	6.700	IHO_FS2-064	4.563	Alex_FS2-079***	6.449	IHO_FS2-079	4.943
Alex_FS2-065	5.439	IHO_FS2-065	4.456	Alex_FS2-080***	4.131	IHO_FS2-080	-
Alex_FS2-066	5.435	IHO_FS2-066***	4.752	Alex_FS2-081	5.624	IHO_FS2-081	5.198
Alex_FS2-067	5.475	IHO_FS2-067	4.392	Alex_FS2-082	5.560	IHO_FS2-082	5.199
Alex_FS2-068	5.669	IHO_FS2-068	4.788	Alex_FS2-083	5.191	IHO_FS2-083	3.654
Alex_FS2-069	5.457	IHO_FS2-069	4.624	Alex_FS2-084	5.892	IHO_FS2-084	4.262
Alex_FS2-070	5.238	IHO_FS2-070	4.235	Alex_FS2-085	5.280	IHO_FS2-085	4.568
Alex_FS2-071	5.846	IHO_FS2-071	5.559	Alex_FS2-086***	5.685	IHO_FS2-086	5.467
Alex_FS2-072	6.003	IHO_FS2-072***	3.940	Alex_FS2-087	4.775	IHO_FS2-087	5.502
Alex_FS2-073***	5.441	IHO_FS2-073	5.090	Alex_FS2-088	4.994	IHO_FS2-088	4.199

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข6 (ต่อ)

Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS2-089	5.905	IHO_FS2-089	4.528	Alex_FS2-104	5.662	IHO_FS2-104	4.022
Alex_FS2-090	5.301	IHO_FS2-090	5.192	Alex_FS2-105	4.915	IHO_FS2-105	5.442
Alex_FS2-091	4.533	IHO_FS2-091	4.502	Alex_FS2-106	4.927	IHO_FS2-106	4.581
Alex_FS2-092	4.843	IHO_FS2-092***	6.237	Alex_FS2-107	5.076	IHO_FS2-107	4.642
Alex_FS2-093	4.904	IHO_FS2-093	4.682	Alex_FS2-108	5.496	IHO_FS2-108	5.617
Alex_FS2-094	5.370	IHO_FS2-094	4.948	Alex_FS2-109***	4.644	IHO_FS2-109	5.248
Alex_FS2-095	5.719	IHO_FS2-095	5.428	Alex_FS2-110	5.604	IHO_FS2-110	5.130
Alex_FS2-096	4.570	IHO_FS2-096	4.970	Alex_FS2-111	5.650	IHO_FS2-111	4.520
Alex_FS2-097	5.605	IHO_FS2-097	4.594	Alex_FS2-112***	4.447	IHO_FS2-112***	5.475
Alex_FS2-098	5.573	IHO_FS2-098***	5.827	Alex_FS2-113	5.770	IHO_FS2-113	5.113
Alex_FS2-099	5.724	IHO_FS2-099	4.698	Alex_FS2-114	5.129	IHO_FS2-114	4.619
Alex_FS2-100	5.186	IHO_FS2-100	5.188	Alex_FS2-115	5.182	IHO_FS2-115	4.790
Alex_FS2-101	4.884	IHO_FS2-101	5.245	Alex_FS2-116***	6.716	IHO_FS2-116	5.332
Alex_FS2-102	4.751	IHO_FS2-102	4.403	Alex_FS2-117	6.011	IHO_FS2-117	5.594
Alex_FS2-103	5.283	IHO_FS2-103	4.618	Alex_FS2-118	5.450	IHO_FS2-118	5.312

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข6 (ต่อ)

Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS2-119	4.811	IHO_FS2-119	4.199	Alex_FS2-134	6.063	IHO_FS2-134	4.839
Alex_FS2-120	5.237	IHO_FS2-120	4.347	Alex_FS2-135	4.771	IHO_FS2-135	5.533
Alex_FS2-121	5.133	IHO_FS2-121	4.943	Alex_FS2-136	5.272	IHO_FS2-136	5.447
Alex_FS2-122	5.581	IHO_FS2-122	5.179	Alex_FS2-137	5.545	IHO_FS2-137	5.303
Alex_FS2-123	5.466	IHO_FS2-123***	5.521	Alex_FS2-138	5.786	IHO_FS2-138	4.311
Alex_FS2-124	4.844	IHO_FS2-124	4.737	Alex_FS2-139***	5.612	IHO_FS2-139	5.036
Alex_FS2-125	6.423	IHO_FS2-125	4.614	Alex_FS2-140	5.286	IHO_FS2-140	4.974
Alex_FS2-126	5.341	IHO_FS2-126	4.458	Alex_FS2-141	5.795	IHO_FS2-141	4.749
Alex_FS2-127	5.405	IHO_FS2-127	5.594	Alex_FS2-142	5.624	IHO_FS2-142	5.682
Alex_FS2-128	5.468	IHO_FS2-128	5.219	Alex_FS2-143	5.516	IHO_FS2-143	4.530
Alex_FS2-129	5.385	IHO_FS2-129	4.960	Alex_FS2-144	4.848	IHO_FS2-144	5.020
Alex_FS2-130	6.169	IHO_FS2-130	4.784	Alex_FS2-145	5.754	IHO_FS2-145	5.122
Alex_FS2-131***	4.525	IHO_FS2-131	5.047	Alex_FS2-146	5.701	IHO_FS2-146	5.315
Alex_FS2-132	5.232	IHO_FS2-132	4.592	Alex_FS2-147	5.459	IHO_FS2-147	5.339
Alex_FS2-133	4.569	IHO_FS2-133	5.240	Alex_FS2-148	4.667	IHO_FS2-148	5.452

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข6 (ต่อ)

Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS2-149	5.293	IHO_FS2-149***	5.952	Alex_FS2-164	5.092	IHO_FS2-164	4.712
Alex_FS2-150	5.466	IHO_FS2-150	4.545	Alex_FS2-165	4.856	IHO_FS2-165	4.667
Alex_FS2-151	4.624	IHO_FS2-151	4.854	Alex_FS2-166	4.689	IHO_FS2-166	4.685
Alex_FS2-152	5.503	IHO_FS2-152	4.840	Alex_FS2-167	4.744	IHO_FS2-167	4.567
Alex_FS2-153	4.976	IHO_FS2-153	4.339	Alex_FS2-168***	5.931	IHO_FS2-168	4.375
Alex_FS2-154	4.746	IHO_FS2-154	4.488	Alex_FS2-169	4.900	IHO_FS2-169***	5.858
Alex_FS2-155	5.111	IHO_FS2-155	5.384	Alex_FS2-170	5.316	IHO_FS2-170	5.214
Alex_FS2-156	5.126	IHO_FS2-156	5.307	Alex_FS2-171	5.376	IHO_FS2-171	4.626
Alex_FS2-157	5.396	IHO_FS2-157	4.741	Alex_FS2-172	5.277	IHO_FS2-172	4.689
Alex_FS2-158	4.998	IHO_FS2-158	4.545	Alex_FS2-173	5.587	IHO_FS2-173	5.184
Alex_FS2-159	5.328	IHO_FS2-159	4.631	Alex_FS2-174***	6.081	IHO_FS2-174	5.251
Alex_FS2-160	5.319	IHO_FS2-160	4.423	Alex_FS2-175	5.350	IHO_FS2-175	4.614
Alex_FS2-161	5.492	IHO_FS2-161	5.343	Alex_FS2-176	5.583	IHO_FS2-176	5.214
Alex_FS2-162	5.681	IHO_FS2-162	4.129	Alex_FS2-177	6.069	IHO_FS2-177	5.545
Alex_FS2-163	5.109	IHO_FS2-163	5.225	Alex_FS2-178	4.847	IHO_FS2-178	4.928

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข6 (ต่อ)

Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	Alex_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)	IHO_FS2	ปริมาณน้ำมัน (% w/w)
Alex_FS2-179	4.480	IHO_FS2-179	5.498	Alex_FS2-190	5.104	IHO_FS2-190	4.522
Alex_FS2-180	4.871	IHO_FS2-180	4.481	Alex_FS2-191***	4.837	IHO_FS2-191	5.267
Alex_FS2-181	5.008	IHO_FS2-181	5.655	Alex_FS2-192	5.372	IHO_FS2-192	5.321
Alex_FS2-182	4.201	IHO_FS2-182	5.011	Alex_FS2-193	4.808	IHO_FS2-193	4.108
Alex_FS2-183	4.498	IHO_FS2-183***	5.986	Alex_FS2-194	6.196	IHO_FS2-194	3.956
Alex_FS2-184	6.048	IHO_FS2-184	4.957	Alex_FS2-195	5.398	IHO_FS2-195	4.100
Alex_FS2-185	6.223	IHO_FS2-185	5.371	Alex_FS2-196	5.995	IHO_FS2-196	5.720
Alex_FS2-186***	6.254	IHO_FS2-186	4.864	Alex_FS2-197	4.870	IHO_FS2-197	4.898
Alex_FS2-187	5.860	IHO_FS2-187	4.673	Alex_FS2-198	5.054	IHO_FS2-198	4.857
Alex_FS2-188***	5.777	IHO_FS2-188	4.577	Alex_FS2-199	5.146	IHO_FS2-199	5.251
Alex_FS2-189	5.324	IHO_FS2-189	4.981	Alex_FS2-200	5.427	IHO_FS2-200	4.638

หมายเหตุ *** คือ ตัวอย่างที่เพิ่มเข้าไปในสมการปรับปรุงครั้งที่ 2 เพื่อพัฒนาเป็นสมการปรับปรุงครั้งที่ 3

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข7 ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดที่ทำนายด้วยสมการ MWPLSR และวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งเป็นประชากรข้าวโพดจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ในรอบการคัดเลือกที่ 0, 1 และ 2 ที่ปลูกในฤดูทดสอบผลผลิต

ตัวอย่าง	ค่าที่ได้จากการทำนาย (% w/w)	ค่าจริง (% w/w)	ตัวอย่าง	ค่าที่ได้จากการทำนาย (% w/w)	ค่าจริง (% w/w)
Alex_FS-C0	5.5920	5.8320	IHO_FS-C0	5.2720	5.4990
Alex_FS-C0.2	5.1560	5.2900	IHO_FS-C0.2	5.3790	4.9850
Alex_FS-C0.3	5.4270	5.3950	IHO_FS-C0.3	5.1920	5.2340
Alex_FS-C1	6.2980	5.4500	IHO_FS-C1	5.2740	5.9070
Alex_FS-C1.2	5.6520	5.7720	IHO_FS-C1.2	4.8500	5.4330
Alex_FS-C1.3	5.7440	5.7220	IHO_FS-C1.3	5.7730	5.7000
Alex_FS-C2	5.6340	6.3750	IHO_FS-C2	5.6760	5.6840
Alex_FS-C2.2	5.8110	6.3080	IHO_FS-C2.2	5.8450	4.9840
Alex_FS-C2.3	5.5700	6.2850	IHO_FS-C2.3	5.9600	5.7240
Alex_FS-C3	5.7260	6.4330	IHO_FS-C3	5.8290	5.5740
Alex_FS-C3.2	6.1980	6.7030	IHO_FS-C3.2	6.2510	6.2130
Alex_FS-C3.3	6.7090	6.7720	IHO_FS-C3.3	6.0620	6.2260

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข7 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ค่าที่ได้จากการทำนาย (% w/w)	ค่าจริง (% w/w)	ตัวอย่าง	ค่าที่ได้จากการทำนาย (% w/w)	ค่าจริง (% w/w)
Alex_S-C0	5.5670	6.2720	IHO_S-C0	5.3920	5.4930
Alex_S-C0.2	5.5430	5.9800	IHO_S-C0.2	5.3670	5.7830
Alex_S-C0.3	5.7470	6.0310	IHO_S-C0.3	5.7070	5.6620
Alex_S-C1	5.6240	5.8090	IHO_S-C1	5.2520	5.4640
Alex_S-C1.2	5.7520	5.9970	IHO_S-C1.2	5.6710	5.7070
Alex_S-C1.3	5.5350	5.7580	IHO_S-C1.3	5.7740	5.7020
Alex_S-C2	5.9980	6.2100	IHO_S-C2	5.7480	5.8560
Alex_S-C2.2	6.1210	6.0530	IHO_S-C2.2	5.4510	6.0970
Alex_S-C2.3	5.8520	6.6640	IHO_S-C2.3	5.6670	5.6960

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข8 ปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดที่ทำนายด้วยสมการ MWPLSR และวิเคราะห์โดยการสกัดด้วยปิโตรเลียมอีเทอร์ของกลุ่มตัวอย่างตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างข้าวโพดที่นอกเหนือจาก 4 โปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์

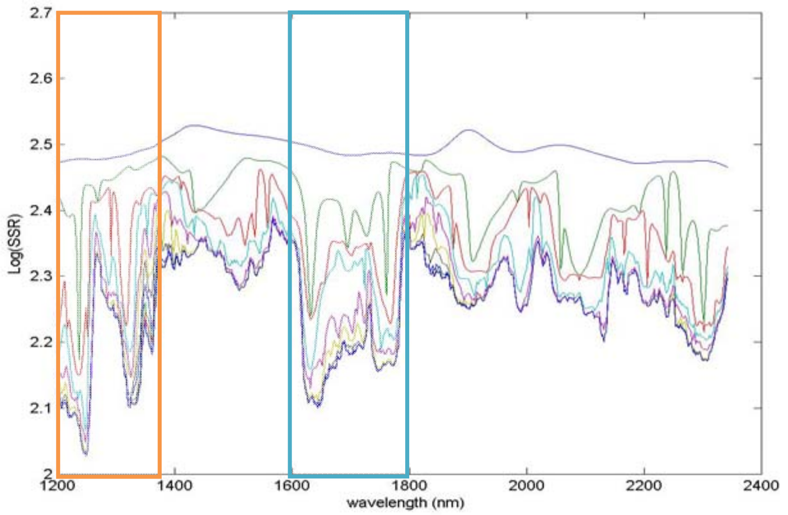
ตัวอย่าง	ค่าที่ได้จากการทำนาย (% w/w)	ค่าจริง (% w/w)	ตัวอย่าง	ค่าที่ได้จากการทำนาย (% w/w)	ค่าจริง (% w/w)	ตัวอย่าง	ค่าที่ได้จากการทำนาย (% w/w)	ค่าจริง (% w/w)
1. SW00D	4.8940	4.2960	11. SW00D_53	4.9820	4.5600	21. IHO C10	6.8610	8.6830
2. SW00D_2	5.3100	4.4180	12. SW00D_62	5.3510	3.6250	22. KS23 C3	5.0940	4.4100
3. SW00D_3	4.9760	4.4820	13. SW00D_72	4.5170	4.4630	23. SW1 C12	4.8510	4.5460
4. SW00D_5	4.7290	4.6820	14. SW00D_82	4.5820	4.6660	24. Ki_1	4.5610	4.7680
5. SW00D_6	5.1290	5.0810	15. SW00D_94	5.3140	4.4080	25. Ki_4	4.2220	4.9120
6. SW00D_9	4.8190	4.8060	16. SW00D_122	5.3480	4.5080	26. Ki_7	4.7450	2.7570
7. SW00D_24	4.6670	3.9820	17. SW00D_10016	5.1700	3.9740	27. Ki_16	4.6810	3.5550
8. SW00D_34	4.5330	4.5220	18. SW00D_10032	5.1150	4.6340	28. Ki_25	4.8260	4.1720
9. SW00D_49	4.5950	3.7280	19. SW2000D10198	5.1460	4.3390	29. SW4452	5.3070	4.3520
10. SW00D_51	4.9790	3.3180	20. Alex syn. C23	7.9060	11.8200	30. NK 40	4.4770	3.3650

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

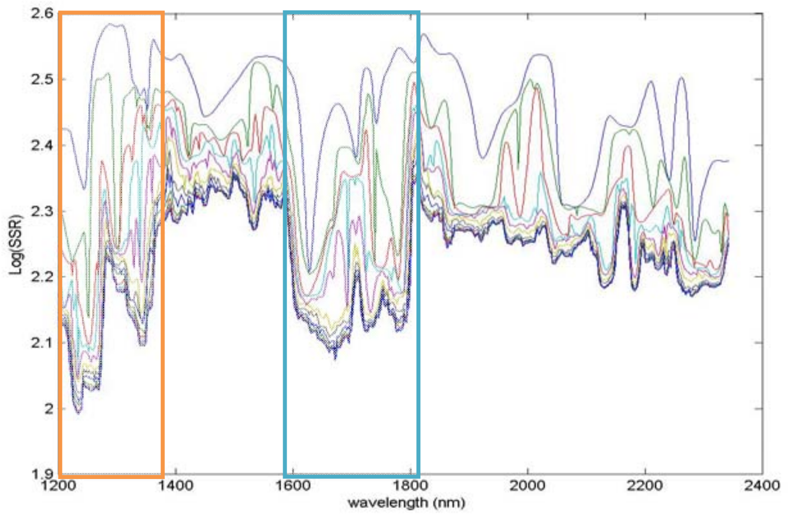
ภาคผนวก ค

ผลการคัดเลือกช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี MWPLSR

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

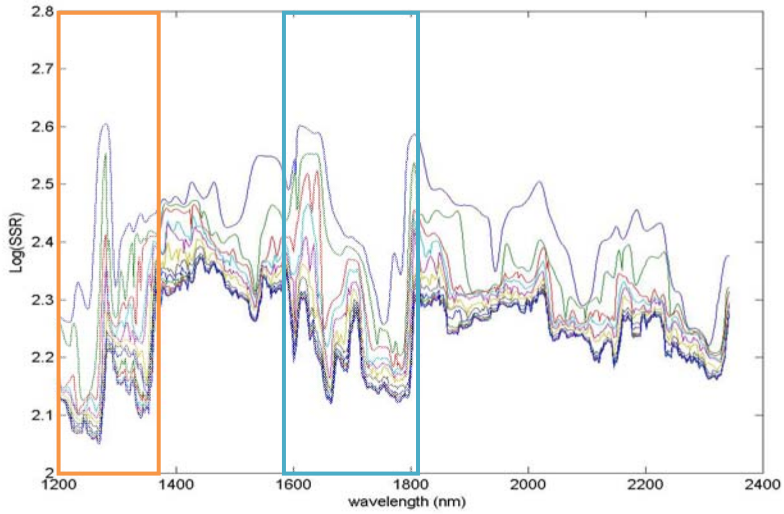


ภาพผนวกที่ ค1 กราฟระหว่างค่า log (SSR) กับช่วงความยาวคลื่น จากวิธี MWPLSR โดยคำนวณจากสเปกตรัมเริ่มต้น

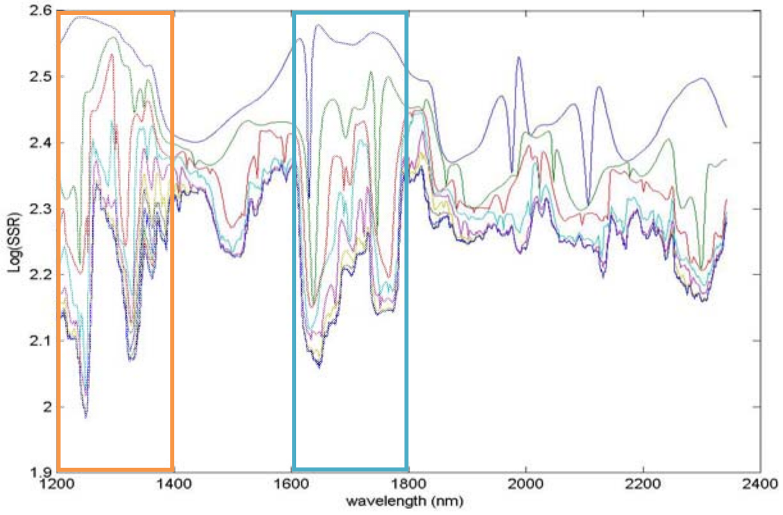


ภาพผนวกที่ ค2 กราฟระหว่างค่า log (SSR) กับช่วงความยาวคลื่น จากวิธี MWPLSR โดยคำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี 1st derivative

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

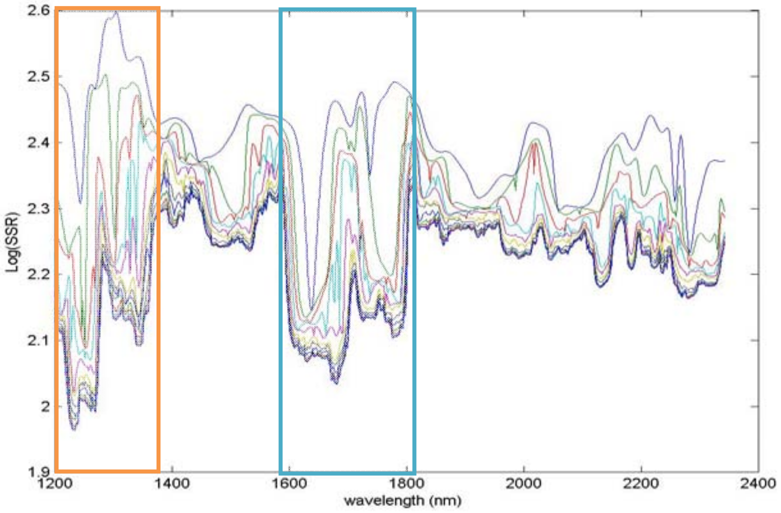


ภาพผนวกที่ ค3 กราฟระหว่างค่า log (SSR) กับช่วงความยาวคลื่น จากวิธี MWPLSR โดยคำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี 2nd derivative

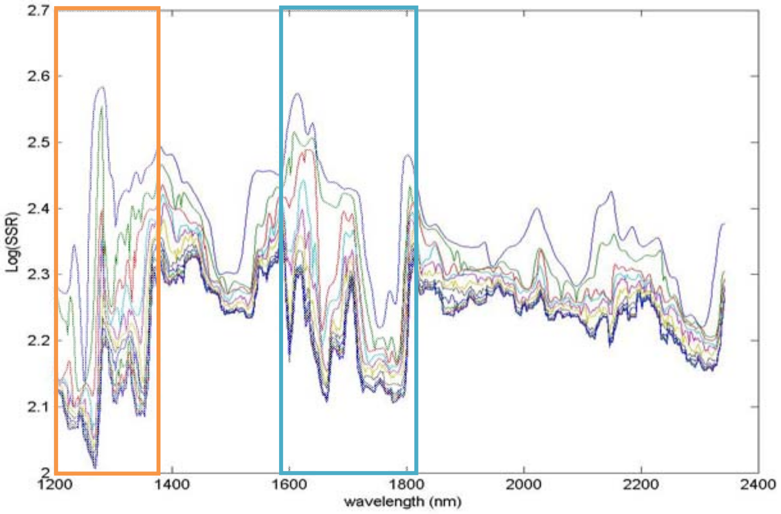


ภาพผนวกที่ ค4 กราฟระหว่างค่า log (SSR) กับช่วงความยาวคลื่น จากวิธี MWPLSR โดยคำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี MSC

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ค5 กราฟระหว่างค่า log (SSR) กับช่วงความยาวคลื่น จากวิธี MWPLSR โดยคำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี MSC ร่วมกับ 1st derivative



ภาพผนวกที่ ค6 กราฟระหว่างค่า log (SSR) กับช่วงความยาวคลื่น จากวิธี MWPLSR โดยคำนวณจากสเปกตรัมที่ถูกปรับแต่งด้วยวิธี MSC ร่วมกับ 2nd derivative

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวรื่นฤดี แก้วชื่นชัย
เกิดวันที่	8 กันยายน พ.ศ. 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	วท. บ. (เทคโนโลยีชีวภาพทางการเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานทางวิชาการ	งานวิจัยเรื่อง การพัฒนาสมการสำหรับทำนายปริมาณน้ำมันทั้งหมดในเมล็ดข้าวโพดด้วยเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปีสำหรับใช้ในโปรแกรมการปรับปรุงพันธุ์ งานวิจัยเรื่อง Determination of Total Oil Content in Corn Seeds Using Near Infrared Spectroscopy and Moving Window Partial Least Squares Regression
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์