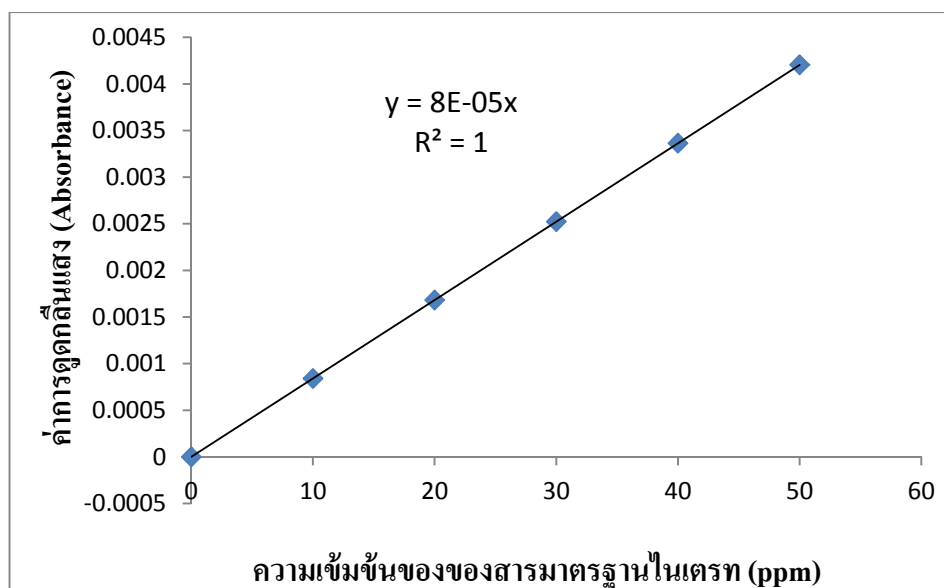


บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ด้วยเทคนิค Brucine method (AOAC, 2000)

4.1.1 การหา Linearity ของสารมาตรฐานไนเตรท



ภาพที่ 4.1 Linearity ของสารมาตรฐานไนเตรทความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm

จากการวิเคราะห์และคำนวณค่า Linearity ของสารมาตรฐานไนเตรทโดยที่ระดับความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 ppm ความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ นำค่าการดูดกลืนแสงและค่าความเข้มข้นของสารมาตรฐานไปสร้างกราฟมาตรฐาน หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) เพื่อศึกษาความเป็นเส้นตรง (Linearity) พบว่าค่า Linearity ของสารมาตรฐานไนเตรทได้ค่า $R^2 = 1$ ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ($R^2 \geq 0.995$) จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงว่าความเข้มข้น ของสารมาตรฐานไนเตรทในช่วง ความเข้มข้น 10 - 50 ppm มีความเหมาะสมในการใช้เป็นกราฟมาตรฐานดังแสดงในภาพที่ 4.1

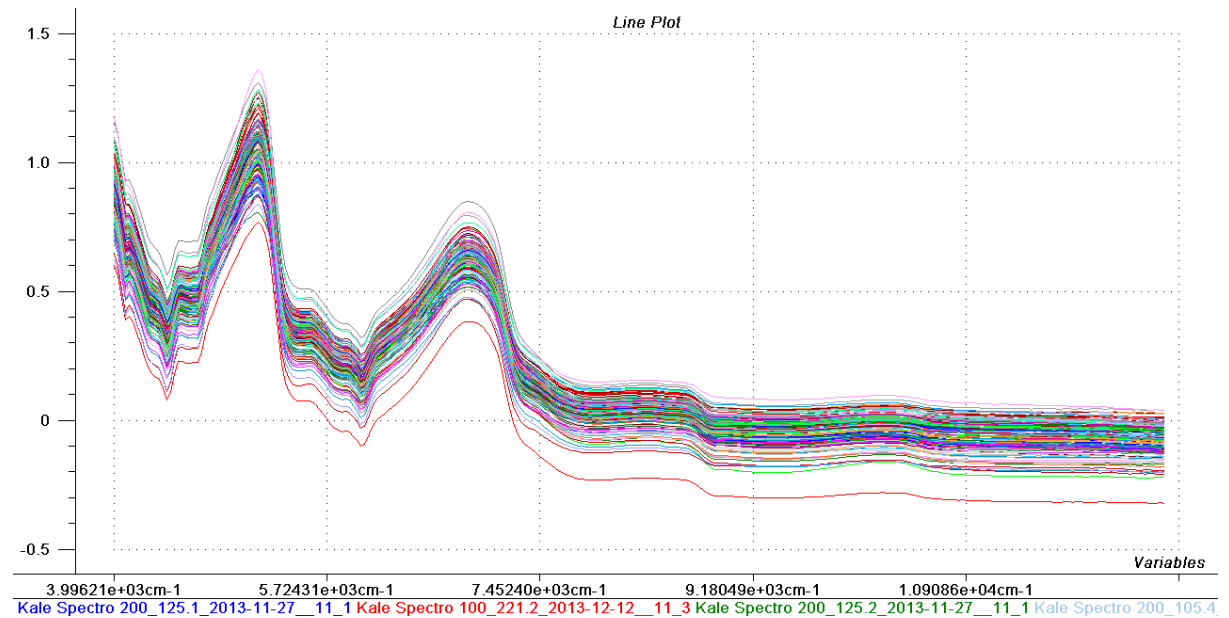
จากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณไนเตรทในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ที่ปลูกโดยฝ่ายเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ด้วยเทคนิค Brucine method พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 719–1,367.60 ppm และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 995.7ppm ตามลำดับ (ตารางภาคผนวกที่ ข.1) แสดงว่าตัวอย่างมีความปลอดภัยต่อการบริโภคเนื่องจากปริมาณไนเตรทไม่เกินเกณฑ์กำหนด (ค่า ADI ของไนเตรทเท่ากับ 3.7 mg/kg b.w./day (Dich และคณะ 1996) เนื่องจากการเก็บเกี่ยวผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ได้มีการลดความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารและให้น้ำประปาแทนสารละลายธาตุอาหารก่อนการเก็บเกี่ยวส่งผลทำให้ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์มีปริมาณลดลง และมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค

นฤมล และคณะ (2554) ศึกษาการตรวจวัดปริมาณไนเตรทในผักกาดหอมพันธุ์ Green oak ที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ พบว่าการให้น้ำแทนสารละลายธาตุอาหารก่อนการเก็บเกี่ยว 2 – 3 วัน จะทำให้ปริมาณไนเตรทลดลงประมาณ 60 – 65% ของค่าที่ได้จากต้นที่เก็บเกี่ยวจากสารละลายธาตุอาหารทันที สอดคล้องกับงานวิจัยของดิเรก (2547) ซึ่งได้รายงานไว้ถึงการจัดการการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเพื่อลดปริมาณไนเตรทตกค้างในพืช สามารถทำได้โดยลดความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่ใช้ปลูกในสัปดาห์สุดท้าย และให้น้ำประปาแทนสารละลายธาตุอาหารก่อนการเก็บเกี่ยว 1 – 2 วัน นอกจากนี้ควรให้พืชได้รับแสงอย่างเต็มที่ก่อนการเก็บเกี่ยว 1 สัปดาห์เนื่องจากเอนไซม์ไนเตรทรีดักเทส (Nitrate reductase) จะถูกกระตุ้นให้ทำงานด้วยแสงแดด ทำให้ไนเตรทเปลี่ยนเป็นไนไตรท์และแอมโมเนียก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นอินทรีย์สารเพื่อสังเคราะห์เป็นกรดอะมิโนและโปรตีนในที่สุด และในสารละลายธาตุอาหารควรมีธาตุโมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) ด้วย เนื่องจากเป็นธาตุที่กระตุ้นในการทำงานของเอนไซม์ไนเตรทรีดักเทส

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเข้มข้นของปริมาณไนเตรทในตัวอย่างใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์จากการวิเคราะห์บางส่วน (ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ)

Sample	ความเข้มข้นของไนเตรท (ppm)	ความเข้มข้นของไนเตรท (%)
1	673.36	0.0673
2	836.16	0.0836
3	1072.87	0.1073
4	1341.17	0.1341
5	1091.79	0.1092
6	939.13	0.0939
7	613.55	0.0614
8	611.57	0.0612
9	1079.57	0.1080
10	1196.80	0.1197

4.2 การสร้างสมการในการทำนายปริมาณไนเตรทในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์จากข้อมูลสเปกตรัมโดยใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด

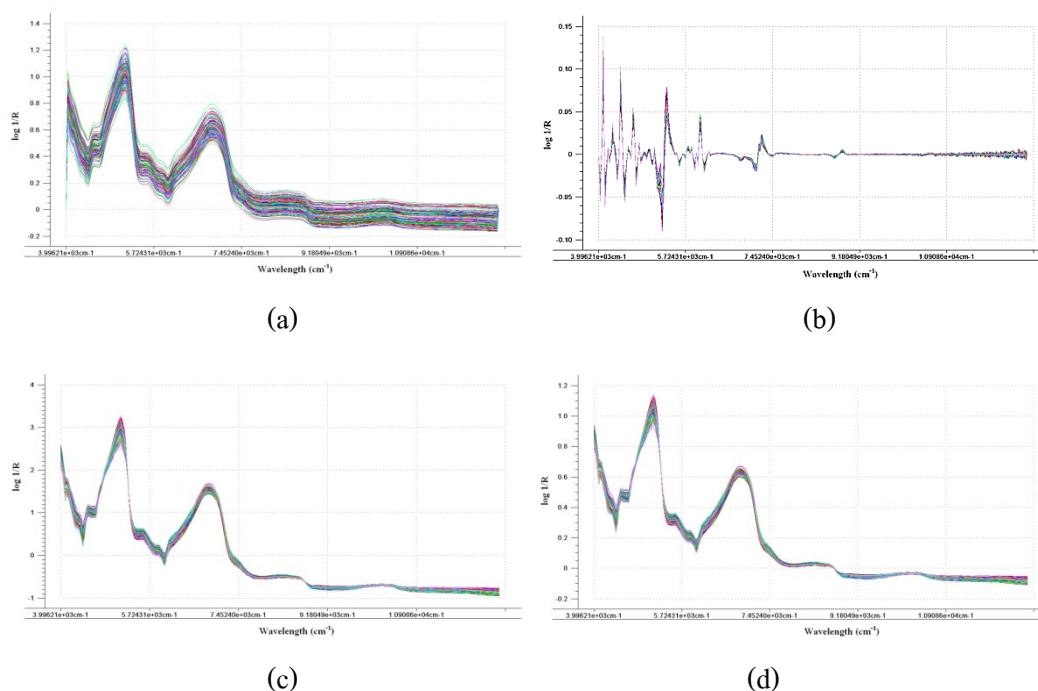


ภาพที่ 4.2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแบบ Original spectra ของกลุ่มใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ที่ใช้ในการทำนายปริมาณไนเตรท

ข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากการวัดไบผักค่น้ำไฮโดรโปนิคส์ในทุกชุดการทดลองด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงย่านใกล้อินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่นที่ 800–2,500 nm แสดงดังภาพที่ 4.2 โดยแกน Y แสดงค่าดูดกลืนแสง ($\log 1/R$) และแกน X แสดงความยาวคลื่นในหน่วยเซนติเมตร ลักษณะของข้อมูลสเปกตรัมที่ได้มีค่าการดูดกลืนที่สูง (Peak) และครอบคลุมช่วงกว้าง (Board band) ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1,869 - 2,139 nm และช่วงความยาวคลื่นประมาณ 1,382 - 1,667 nm ซึ่งเป็นช่วงค่าการดูดกลืนที่ซ้อนทับกัน (Overlap) ของน้ำและองค์ประกอบคาร์โบไฮเดรต (First overtone ของหมู่ OH) และองค์ประกอบไนโตรเจน (Second overtone ของหมู่ NH) ในช่วงคลื่น NIRs (วิชัย, 2555)

ลักษณะการซ้อนทับกัน (Overlap) ของการดูดกลืนแสงที่ได้ทำให้ข้อมูลสเปกตรัม ไม่สามารถบอกรายละเอียดข้อมูลสมบัติทางเคมีของไบผักค่น้ำไฮโดรโปนิคส์ได้ ดังนั้นการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัม (Pretreatment) ก่อนนำไปหาความสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ (Reference value) จึงมีความสำคัญ

สมการทำนายปริมาณไนเตรทในไบผักค่น้ำไฮโดรโปนิคส์สร้างจากสเปกตรัมของไบผักค่น้ำไฮโดรโปนิคส์จำนวนหลายสเปกตรัมซึ่งมีความแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อน (Error) ของสมการทำนายจึงจำเป็นต้องแยกข้อมูลที่มีความแตกต่างจากข้อมูลส่วนใหญ่ออกเสียก่อน (Outliers) จากนั้นจึงนำข้อมูลสเปกตรัมที่เหลืออยู่มาแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ข้อมูลสเปกตรัมที่ใช้ในการสร้างสมการ (Calibration set) และข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสมการ (Validation set) ในอัตราส่วน 3:1 ตามลำดับ ข้อมูลสเปกตรัมจะถูกนำมาปรับแต่งด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ได้แก่ Savitzky – Golay Smoothing, Savitzky – Golay 2nd derivative, SNV และ MSC ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 แสดงลักษณะของข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยเทคนิคต่าง ๆ

- (a) Savitzky – Golay Smoothing
- (b) Savitzky – Golay 2nd derivative
- (c) SNV
- (d) MSC

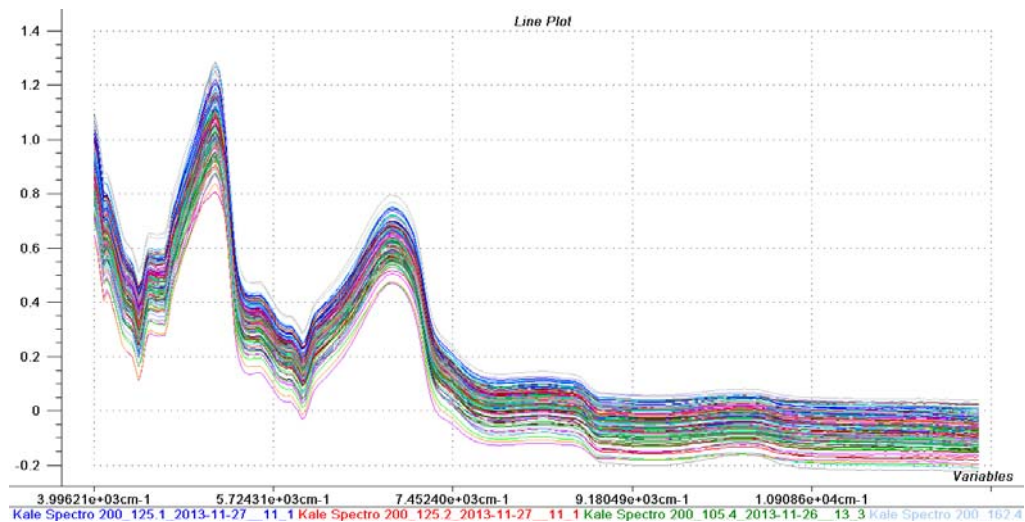
การสร้างสมการในการทำนายปริมาณไนเตรทในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ ทำโดยการเก็บข้อมูลใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ จำนวน 209 ตัวอย่าง นำมาวิเคราะห์โดยแบ่งใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการโมเดล (Calibration set) จำนวน 140 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ (Prediction set) จำนวน 69 ตัวอย่าง วิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง NIRS ในช่วงความยาวคลื่น 800 – 2,500 นาโนเมตร แล้ววิเคราะห์หาปริมาณไนเตรท หลังจากนั้นสร้างสมการในการทำนายไนเตรทโดยคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัม NIRs กับปริมาณไนเตรทโดยใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Partial least squares regression (PLSR) และเปรียบเทียบแบบ Cross - validation ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ Unscamler (version 9.7, CAMO AS,

Trondheim, Norway) โดยกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการโมเดลจะต้องมีค่าปริมาณไนเตรทสูงสุดและต่ำสุดอยู่ในกลุ่มนี้ซึ่งตารางที่ 4.2 จะแสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายปริมาณไนเตรท

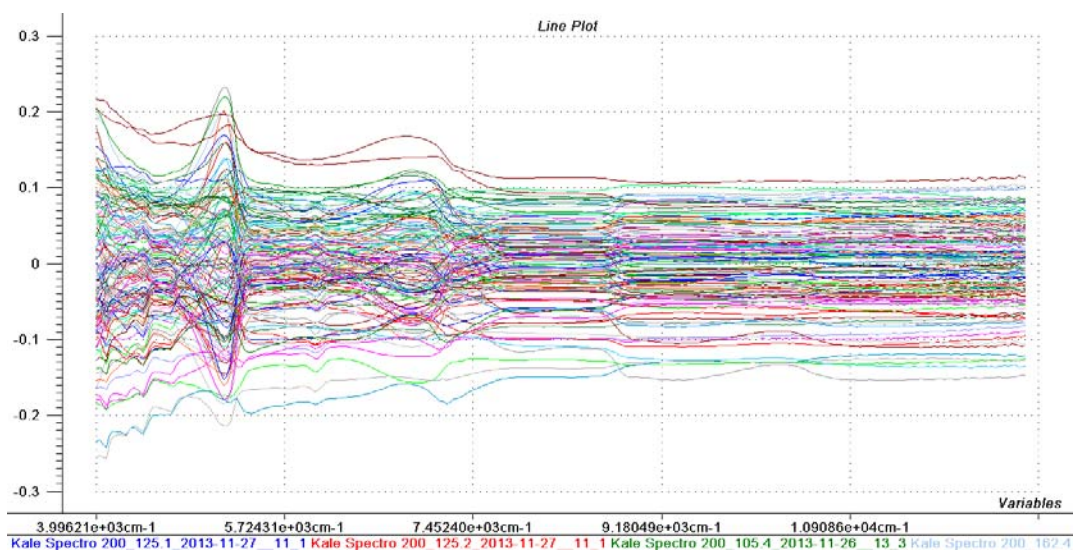
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าทางสถิติของกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการและกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการของการทำนายปริมาณไนเตรทในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

Items	The calibration set	The prediction set
number of sample	140	69
unit	ppm	ppm
range	719.16 – 1,367.64	745.41 – 1,340.12
mean	993.68	993.26
standard deviation (SD)	137.98	133.46
wavelength	800 – 2,500 nm	800 – 2,500 nm

จากภาพที่ 4.4 เป็นภาพการแสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแบบ Original spectra ช่วงความยาวคลื่น 800 – 2,500 นาโนเมตร เมื่อทำการแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และพบว่าข้อมูลสเปกตรัมดั้งเดิม (Original spectra) และการแปลงข้อมูลสเปกตรัมดั้งเดิม (Original spectra) ด้วยวิธี Center and scale (Mean center) ให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนายกลุ่มที่ใช้ในการสร้างสมการได้ดีที่สุดโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการทำนายไม่แตกต่างกัน และภาพที่ 4.5 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยด้วยวิธี Center and scale (Mean center) ของกลุ่มใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ที่ใช้ในการทำนายปริมาณไนเตรท



ภาพที่ 4.4 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยแบบ Original spectra ของกลุ่มใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ที่ใช้ในการทำนายปริมาณไนเตรท

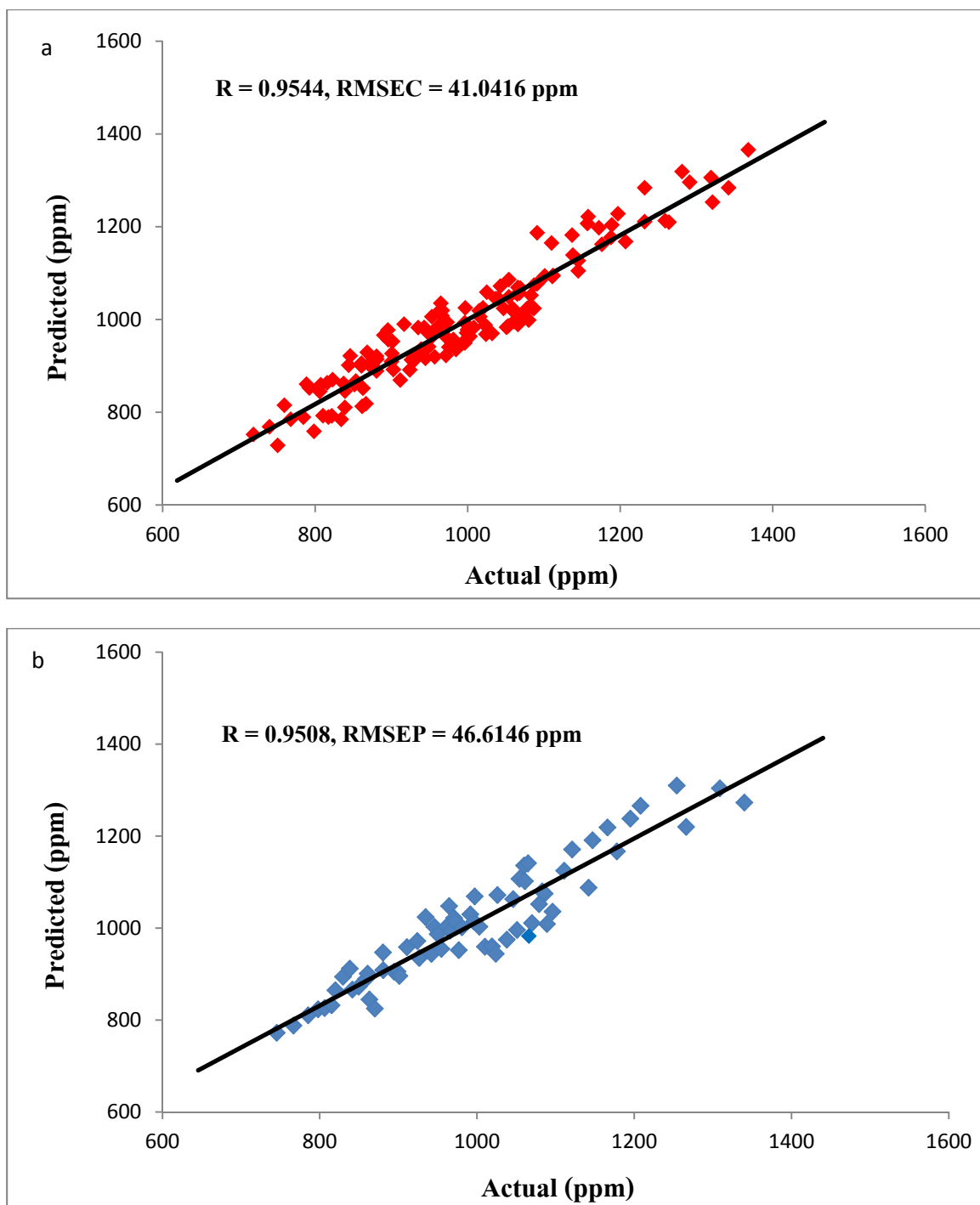


ภาพที่ 4.5 แสดงค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยด้วยวิธี Center and scale (Mean center) ของกลุ่มใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์ที่ใช้ในการทำนายปริมาณไนเตรท

หลังจากการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ แล้วพบว่าการสร้างสมการด้วยวิธี Center and scale (Mean center) ใน Cross-validation ให้ผลดีที่สุดไม่แตกต่างจากข้อมูลสเปกตรัมดั้งเดิม (Original spectra) จึงนำข้อมูลสเปกตรัมดั้งเดิม (Original spectra) มาสร้างสมการการทำนายไนเตรทโดยใช้วิธี Partial least squares regression (PLSR) ซึ่งได้ผลดังนี้ คือ $R = 0.9544$ และ $RMSEC = 41.0416$ ppm และนำโมเดลสมการที่สร้างได้ไปทดสอบในกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ พบว่าได้ค่า $R = 0.9421$ และ $RMSEP = 46.6146$ ppm ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 ส่วนภาพที่ 4.3 (a) แสดงผลการทำนายปริมาณไนเตรทในกลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ และภาพที่ 4.6 (b) แสดงผลการทำนายปริมาณไนเตรทในกลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PLSR ของการทำนายปริมาณไนเตรท

Model	Pretreatment	F	N	R	RMSEC (ppm)	RMSEP (ppm)	SEP	Bias
Calibration set	Original	3	140	0.9544	41.0416	-	41.1889	-9.591×10^{-6}
Prediction set	Original	1	69	0.9508	-	46.6146	44.8346	13.8404



ภาพที่ 4.6 แสดงผลการทำนายปริมาณไนเตรทในใบผักคะน้าไฮโดรโปนิคส์

a กลุ่มที่ใช้สำหรับสร้างสมการ b กลุ่มที่ใช้สำหรับทดสอบสมการ