



โครงการ การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ	การทำนายความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ด้วยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	
	Prediction of eggshell thickness and strength using near-infrared spectroscopy	
ชื่อนิสิต	นายศุกลพัชร ยิ่งโสภณพิทักษ์	เลขประจำตัว 5933097623
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2562	

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทำนายความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่
ด้วยวิธีเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

Prediction of eggshell thickness and strength using
near-infrared spectroscopy

โดย

นายศุกลพัชร ยิ่งโสภณพิทักษ์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

โครงการ การทำนายความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ด้วยวิธีเอนไซม์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

โดย นายศุภพัชร์ ยิงโสภณพิทักษ์

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

- | | |
|---|----------------------|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ สมพรพิสุทธิ์ | ประธานกรรมการ |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัสสรพล งามอุโฆษ | กรรมการ |
| 3. ศาสตราจารย์ ดร.สนอง เอกสิทธิ์ | อาจารย์ที่ปรึกษา |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.คณศ วังษ์ระวี | อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม |

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี



.....
(ศาสตราจารย์ ดร.สนอง เอกสิทธิ์)
อาจารย์ที่ปรึกษา



.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)
หัวหน้าภาควิชาเคมี

วันที่ 23 เดือน ธันวาคม พ.ศ.2562

ชื่อโครงการ การทำนายความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ด้วยวิธีเนียร์
อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
ชื่อนิสิตในโครงการ นายศุภกมลพัชร ยิ่งโสภณพิทักษ์ เลขประจำตัว 5933097623
ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.สนอง เอกสิทธิ์
ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.คณศ วังษ์ระวี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

เนื่องด้วยบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ทำการผลิตและจำหน่ายไข่ไก่และไข่ไก่แปรรูปที่มีคุณภาพ ดังนั้นการควบคุมคุณภาพของไข่ไก่เป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมการแปรรูปไข่ไก่ สำหรับการแปรรูปไข่ไก่นั้นการตรวจสอบคุณภาพของเปลือกไข่ไก่จากความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่นั้นมีความสำคัญมาก วิธีการวิเคราะห์คุณภาพของเปลือกไข่ไก่นั้นยังเป็นวิธีการที่ทำลายตัวอย่างจึงทำการตรวจสอบโดยการส้อมตัวอย่างเท่านั้น ซึ่งมีโอกาสสูงที่ไข่ไก่ที่ไม่ผ่านมาตรฐานบางส่วนอาจหลุดเข้าไปในสายการผลิตและก่อให้เกิดมูลค่าความเสียหายในระหว่างการแปรรูปได้ งานวิจัยนี้สนใจในการประยุกต์เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและการคำนวณทางเคโมเมทริกซ์ในการทำนายค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ โดยจะศึกษาความสัมพันธ์ของสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากไข่ไก่ทั้ง 4 ตำแหน่ง (ตำแหน่งด้านข้าง, ด้านแหลมและด้านข้างทั้งสองด้าน) กับค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ที่ได้จากการวัด จากการสร้างแบบจำลองและสมการสอบเทียบโดยใช้วิธีการถดถอยกำลังสองน้อยสุด พบว่าการทำนายค่าความหนาของเปลือกไข่ไก่โดยพิจารณาจากเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของการวัดทุกตำแหน่งและตำแหน่งด้านแหลม จะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9071 และ 0.8857 ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยของความคาดเคลื่อนเท่ากับ 0.0230 และ 0.0259 ตามลำดับ ในส่วนของการทำนายค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่โดยพิจารณาจากสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมจากทุกตำแหน่งและตำแหน่งด้านข้าง จะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.7644 และ 0.8440 ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยของความคาดเคลื่อนเท่ากับ 6.1266 และ 6.7869 ตามลำดับ

คำสำคัญ: เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี, ค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่, เคโมเมทริกซ์

Project title Prediction of eggshell thickness and strength using near-infrared spectroscopy

Student name Mr. Sukolapatch Yingsoponpitak Student ID 5933097623

Advisor name Professor Sanong Ekgasit, Ph.D.

Co-advisor name Associated Professor Kanet Wongravee, Ph.D.

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2019

Abstract

Charoen Pokphand Food (Thailand) public Co. Ltd (CPF) manufactures well quality fresh eggs and products of eggs, hence the quality control of eggs is an imperative procedure in cooked egg manufacturing. Eggshell thickness and eggshell strength are the important indicators to determine the quality of egg prior to transfer them in the process. However, conventional methods to define these indicators are invasive which could not be performed for all samples. Therefore, some below standard eggs might liberate into the production line causing profit loss. In this study, near-infrared spectroscopy technique combined with chemometrics was used to predict eggshell thickness and eggshell strength. The signal correlation of near-infrared spectrums from four positions of egg; including bottom, top and two sides of eggs with eggshell thickness and eggshell strength was calculated. By creating PLS regression model, the root mean square of error (*RMSE*) are 0.0230 – 0.0259 with correlation coefficient of $R = 0.8857 - 0.9071$ were obtained for eggshell thickness prediction. In predicting eggshell strength, the root mean square of error (*RMSE*) are 6.1266 – 6.7869 with correlation coefficient of $R = 0.7644 - 0.8440$ were obtained. From the prediction, this suggests that the near-infrared spectrums are appropriate to be used for prediction of eggshell thickness and eggshell strength with an acceptable accuracy.

Keywords: Near-infrared spectroscopy, eggshell thickness, eggshell strength, chemometrics

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและเล่มรายงานฉบับนี้จะไม่สำเร็จได้หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ศาสตราจารย์ ดร.สนอง เอกสิทธิ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.คณศ วงษ์ระวี อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำต่าง ๆ รวมถึงแนวทางการดำเนินงานวิจัย อีกทั้งสละเวลาในการช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอดเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและนวัตกรรมอาหารสัตว์ บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ตั้งอยู่ที่อำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี ที่ให้การอนุเคราะห์ใช้ไก่สำหรับการทำวิจัย

ขอขอบคุณคุณฉวีวรรณ อุทัย (พี่ม่วย), คุณอรจิรา เครือวิหิต (พี่หมี), คุณปิยพร บุรณะ (พี่แหว), คุณอุบล ดวงแสนจันทร์ (พี่เซียว), คุณทองแดง นະธิไทย (พี่ทอง), คุณศราวดี ยอดออน (พี่เอิญ) และ คุณณภัทรวรรณ กระจง (พี่เปิ้ล) พี่ ๆ หน่วยไก่ไข่จากศูนย์วิจัยและนวัตกรรมอาหารสัตว์ ที่ให้ความรู้ และคำแนะนำเกี่ยวกับการจัดการดูแลไก่ การใช้เครื่องมือ ตลอดจนให้การช่วยเหลือในระหว่างการทำงาน งานวิจัย และการใช้ชีวิตตลอดการระยะเวลาการทำสหกิจศึกษา

ขอขอบคุณนายสัตวแพทย์ ดร.มนุศักดิ์ วงศ์พัชรชัย (พี่แจ๊ค), สัตวแพทย์หญิง ดร.ณัฐวัลย์ นนทเบญจวรรณ (พี่นัท) และ ดร.พิชญา จริยหัตถะกิจ (พี่แยม) พี่ ๆ จากสำนักวิชาการอาหารสัตว์ ศูนย์วิจัย และนวัตกรรมอาหารสัตว์ ที่ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ การช่วยเหลือในงานวิจัย รวมไปถึงการดูแลอย่างดี ตลอดระยะเวลาการทำสหกิจศึกษา

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณกำลังใจและการสนับสนุนจากครอบครัว รวมทั้งทั้งเพื่อน ๆ พี่ ๆ และ น้อง ๆ ในภาควิชาเคมี ทางผู้วิจัยระลึกในความกรุณาของทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้นและบุคคลที่มีได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้

ผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญคำย่อ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ไข่ไก่	8
2.2 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	10
2.3 วิเคอโมเมทริกซ์	13
บทที่ 3 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย	16
3.1 การเก็บไข่ไก่	16
3.2 การวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของไข่ไก่	17
3.3 การวัดความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่	19
3.4 การวัดความหนาของเปลือกไข่ไก่	20
3.5 การเตรียมข้อมูลก่อนการวิเคราะห์	21
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมแมทแล็บ	21
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปราย	23
4.1 ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของเปลือกไข่ไก่	23
4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม	25
4.4 การวิเคราะห์ความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ด้วยวิธีเคโมเมทริกซ์	29
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	36
เอกสารอ้างอิง	38
ประวัติผู้วิจัย	39

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงข้อมูลค่าความหนาของเปลือกไขไก่ในแต่ละสายพันธุ์	4
ตารางที่ 1.2 แสดงข้อมูลค่าความแข็งแรงของเปลือกไขไก่ในแต่ละสายพันธุ์	4
ตารางที่ 3.1 แสดงวันที่เก็บไข่ จำนวนไขไก่ทดลองที่เก็บในแต่ละวัน และกลุ่มไขไก่	16
ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลลักษณะทางกายภาพ ค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไขไก่	23
ตารางที่ 4.2 แสดงสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของไขไก่	28

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงอัตราการบริโภคไข่ไก่ของคนไทยในช่วงปี พ.ศ.2556 ถึง พ.ศ.2561	1
รูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไข่ไก่ที่จัดจำหน่าย ของบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)	2
รูปที่ 1.3 แสดงการเคลื่อนย้ายไข่ไก่บนสายพานในโรงคัดไข่	3
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบภายในของไข่ไก่	8
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของเปลือกไข่ไก่	10
รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงช่วงเนียร์อินฟราเรด	11
รูปที่ 2.4 แสดงโหมดในการวิเคราะห์เนียร์อินฟราเรด (a) Transmittance (b) Transflectance (c) Reflectance และ (d) Interactance	12
รูปที่ 2.5 แสดงแถบการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชันในช่วงความยาวคลื่น 700 – 2500 นาโนเมตร	13
รูปที่ 3.1 แสดงตำแหน่งในการวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของไข่ไก่แต่ละฟอง	17
รูปที่ 3.2 (a) แสดงการจัดวางไข่ไก่เพื่อวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม และ (b) แสดงการขีดกำหนดตำแหน่งเพื่อวัดความหนาของเปลือกไข่ไก่	18
รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์โมเดล Nicolet iS5N ในรูปแบบสะท้อน โดยใช้ aperture slit ขนาด 10 มม.	18
รูปที่ 3.4 (a) แสดงลักษณะเครื่องทดสอบแรงอัดโมเดล 5965 และ (b) แสดงการจัดเครื่องมือเพื่อวัดค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่	19
รูปที่ 3.5 แสดงผลการวัดแรงอัดสูงสุด (Maximum load) บนโปรแกรม Bluehill 3	20
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะไข่ไก่หลังจากการวัดความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่	20
รูปที่ 3.7 แสดงเครื่อง digital micrometer ขณะทำการวัดความหนาของเปลือกไข่ไก่	21
รูปที่ 3.8 แสดงแผนผังการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ	22
รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่	25
รูปที่ 4.2 แสดงเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมเฉลี่ยของไข่ไก่จากการวัดทั้ง 4 ตำแหน่ง โดยแบ่งตามเกรดของค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่	26

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ Score plot (T) ของเปลือกไข่ไก่โดยใช้เกณฑ์ตาม ค่าความหนาของเปลือกไข่ไก่เป็นเกรด A (สีน้ำเงิน) เกรด B (สีแดง) เกรด C (สีเขียว) จาก (a) สเปกตรัมทุกตำแหน่ง (ด้านแหลมและด้านข้างทั้งสองด้าน) และ (b) สเปกตรัม จากตำแหน่งด้านแหลม	30
รูปที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ Loading plot (P) ที่ PC2 คำนวณจากความสัมพันธ์ของ ความหนาของเปลือกไข่ไก่กับสัญญาณเนียร์อินฟราเรดด้านแหลม	31
รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ Score plot (T) ของเปลือกไข่ไก่โดยใช้เกณฑ์ตาม ค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่เป็นเกรด A (สีน้ำเงิน) เกรด B (สีแดง) เกรด C (สีเขียว) จาก (a) สเปกตรัมทุกตำแหน่ง (ด้านป้าน ด้านแหลม และด้านข้างทั้งสองด้าน) และ (b) สเปกตรัมจากตำแหน่งด้านป้าน	32
รูปที่ 4.6 แสดงการทำนายความหนาของเปลือกไข่โดยอาศัยสัญญาณเนียร์อินฟราเรดด้วยวิธีการ Partial Least Square Regression จาก (a) สเปกตรัมทุกตำแหน่ง และ (b) สเปกตรัม จากตำแหน่งด้านแหลม	33
รูปที่ 4.7 แสดงการทำทำนายความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่โดยอาศัยสัญญาณอินฟราเรดด้วย วิธีการ Partial Least Square Regression จาก (a) สเปกตรัมทุกตำแหน่ง และ (b) สเปกตรัมจากตำแหน่งป้าน	34

สารบัญย่อ

มม.	มิลลิเมตร
NIR	Near-infrared
Str	Strength
Tkn	Thickness
mm.	Millimeter
nm.	Nanometer
g.	gram
N	Newton
kgf	Kilogram-force
cm ²	Square centimeter
CSV	Comma-Separated Value
MATLAB	Matrix Laboratory
<i>sd</i>	Standard Deviation
μ	Mean of data
SNV	Standard Normal Variate
<i>R</i>	Correlation Coefficient
PCA	Principle Component Analysis
PC	Principle Component
<i>T</i>	Score plot
<i>P</i>	Loading plot
PLS	Partial Least Square
NIPALS	Non-linear Iterative Partial Least Squares
<i>RMSE</i>	Root Mean Square of Error

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไข่ไก่เป็นหนึ่งในวัตถุดิบที่สำคัญในการประกอบอาหารซึ่งสามารถนำมาแปรรูปหรือนำมาบริโภคได้ในหลากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบของไข่สดหรือไข่แปรรูป เช่น ไข่ต้ม ไข่เจียว ไข่ดาว ไข่ตุ๋น เป็นต้น เนื่องจากไข่ไก่มีคุณค่าทางอาหารที่หลากหลาย ผู้คนสามารถซื้อมาบริโภคได้ง่ายและมีราคาไม่แพง อีกทั้งยังสามารถแปรรูปให้เหมาะสมกับอาหารหลากหลายประเภทและเชื้อชาติได้ ทำให้ในปัจจุบันไข่ไก่สดและไข่ไก่แปรรูปจึงเป็นที่ต้องการของตลาดผู้บริโภคอย่างมาก เมื่อพิจารณาจากข้อมูลทางสถิติของสมาคมผู้ผลิต ผู้ค้า และส่งออกไข่ไก่^[1] จะเห็นได้ว่าอัตราการบริโภคไข่ไก่ของคนไทยที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 1.1 โดยอัตราการบริโภคไข่ไก่ของคนไทยจากการสำรวจในปีที่ 2561 คือ 300 ฟองต่อคนต่อปี ด้วยอัตราการบริโภคที่มีแนวโน้มสูงขึ้นขนาดนี้ ทำให้เกิดการแข่งขันกันในห้องตลาดซึ่งส่งผลให้เกิดการคิดค้นการแปรรูปไข่ไก่ให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการบริโภคและเพิ่มความหลายเพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางการบริโภคของผู้คนในปัจจุบัน



รูปที่ 1.1 แสดงอัตราการบริโภคไข่ไก่ของคนไทยในช่วงปี พ.ศ.2556 ถึง พ.ศ.2561

อย่างไรก็ตามก่อนที่ไข่ไก่แปรรูปจะถูกนำออกจำหน่ายในห้องตลาดได้นั้น กระบวนการผลิตจะต้องมีมาตรฐาน โดยเริ่มจากขั้นตอนการคัดกรองไข่ไก่สดโดยการวิเคราะห์คุณภาพของไข่ไก่ก่อน

ในส่วนของบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) หรือ ซีพีเอฟ หนึ่งในบริษัทที่มีธุรกิจจัดการ การเกษตรและจัดจำหน่ายผลิตภัณฑ์จากปศุสัตว์ในประเทศไทย[2] นั้นจะมีรับไข่ไก่สดเข้ามาเพื่อแปรรูป จากสองส่วน ส่วนแรกคือไข่ไก่สดที่รับมาจากฟาร์มไก่ไข่ขนาดย่อมจากฟาร์มทั่วไปและฟาร์มที่อยู่ใน โครงการของบริษัท (Contract farming) ส่วนที่สองคือไข่ไก่สดจากฟาร์มไก่ไข่ของทางบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่มีการจัดการระบบการเลี้ยงไก่ไข่ที่อยู่ในระดับมาตรฐาน ในส่วนของไข่ไก่ ที่รับมาจากเกษตรกรรายย่อยนั้นทางโรงงานไม่ได้ทำการตรวจสอบคุณภาพของไข่ไก่ทุกฟอง แต่จะ ตรวจสอบคุณภาพโดยการสุ่มตัวอย่างเท่านั้น ไข่ไก่จากทั้งสองส่วนจะถูกลำเลียงเข้าสู่โรงคัดไข่และโรงงาน แปรรูปไข่เพื่อจัดจำหน่ายในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ ไข่ไก่สด ไข่ไก่เสริมวิตามินต่าง ๆ ไข่ต้ม ไข่ลวก ไข่ยาง มะตูม ไข่อ่อนเชิ่น ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไข่ไก่ที่จัดจำหน่ายของบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)

สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพของไข่ไก่สดก่อนการนำไปแปรรูปนั้น มีการวิเคราะห์ในหลากหลาย รูปแบบด้วยกัน ได้แก่ การวิเคราะห์ความสด วิเคราะห์สีของเปลือกไข่ การวิเคราะห์จุดเลือดและจุดเนื้อใน ไข่ไก่ การวิเคราะห์ความหนาและการวิเคราะห์ความแข็งแรงของเปลือกไข่ ในส่วนของความหนาและ ความแข็งแรงของเปลือกไข่จะมีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการ คัดและแปรรูปไข่ไก่ เนื่องจากใน กระบวนการแปรรูปไข่ไก่จะมีการออกแบบสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปไข่สำหรับไข่ไก่ที่มีคุณภาพ ผ่านมาตรฐาน เช่น อุณหภูมิ ความดัน ระยะเวลาการให้ความร้อน ซึ่งหากมีไข่ไก่ที่คุณภาพไม่ผ่าน มาตรฐานเข้าไปในสายการผลิต จะทำให้เกิดการสูญเสียไข่ไก่ได้หลายรูปแบบ เช่น

1. การขนส่งไข่ไก่สดเข้าสู่โรงคัดและแปรรูป ในการขนส่งไข่ไก่ที่มีปริมาณไข่ไก่มาก ไข่ไก่ที่มี เปลือกไข่ที่บางหรือไม่แข็งแรงอาจเกิดแตกหรือร้าวระหว่างการขนส่งได้ ส่งผลให้ไข่ไก่ฟอง อื่นในถาดเดียวกันเกิดการปนเปื้อนทำให้ไม่สามารถนำไปแปรรูปได้

2. การเคลื่อนย้ายไข่ไก่บนสายพานในโรงคัดและโรงแปรรูปไข่ไก่ ดังรูปที่ 1.3 หากมีไข่ไก่บางส่วนที่ไม่ผ่านมาตรฐานและเกิดการแตกขึ้นระหว่างการเคลื่อนย้าย จะส่งผลให้ไข่ไก่ฟองอื่น ๆ เกิดการปนเปื้อนและไม่สามารถนำไปจัดจำหน่ายหรือแปรรูปได้
3. การแปรรูปไข่ไก่ ซึ่งได้แก่ ไข่ต้ม ไข่ลวก ไข่ยางมะตูม ไข่อ่อนเซ็น การแปรรูปไข่เหล่านี้จะมีการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ คือการควบคุมอุณหภูมิและความดัน การกำหนดระยะเวลาการให้ความร้อน ซึ่งสภาวะต่าง ๆ นี้ถูกกำหนดโดยขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ไข่ที่จะแปรรูป หากมีไข่ไก่ที่ไม่ผ่านมาตรฐานในส่วนของความหนาเข้าไป จะทำให้ได้ไข่ไก่ที่แปรรูปแล้วไม่ได้คุณภาพ เช่น การทำไข่ลวก ไข่ไก่ที่บางจะได้รับความร้อนมากกว่าปกติ จนทำให้กลายเป็นไข่ยางมะตูมหรือไข่ต้มได้ ส่วนไข่ไก่ที่ไม่ผ่านมาตรฐานในส่วนของความแข็งแรงนั้นจะทำให้ไข่ไก่ใบอื่นเกิดการปนเปื้อน จนทำให้ต้องทิ้งไข่แปรรูปชุดนั้นทั้งหมด เช่น การทำไข่ต้ม ไข่ไก่ที่เปลือกไม่แข็งแรงจะได้รับความร้อนมากพอที่จะทำให้เปลือกแตกหรือร้าวได้ ทำให้เกิดการปนเปื้อนในไข่ไก่ชุดนั้น และไม่สามารถนำไปจัดจำหน่ายได้ เป็นต้น



รูปที่ 1.3 แสดงการเคลื่อนย้ายไข่ไก่บนสายพานในโรงคัดไข่

จากปัญหาที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์คุณภาพของเปลือกไข่ทั้งการวิเคราะห์ความหนาและความแข็งแรงนั้นมีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมการคัดและแปรรูปไข่ไก่ สำหรับการวิเคราะห์ความหนาของเปลือกไข่ไก่ โดยทั่วไปจะทำการวัดจากเฉพาะเปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการล้างเปลือกของไข่ไก่และทำให้แห้งก่อนนำมาวิเคราะห์มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.) ส่วนของการวิเคราะห์ความแข็งแรงของเปลือกไข่ จะทำโดยการใช้แม่แรงกดลงบนไข่ไก่เพื่อวัดแรงอัดที่ไข่ไก่สามารถรับได้ก่อนที่เปลือกไข่จะแตก

โดยมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) โดยที่ในแต่ละฟาร์ม แต่ละสายพันธุ์ของแม่ไก่ก็จะให้ผลผลิตไข่ไก่ที่ความหนาและความแข็งแรงแตกต่างกันไป ดังในตารางที่ 1.1 และ 1.2

Country	Layer chicken	Source	Thickness (mm)
Australia	-	Commercial floak's eggs	0.384 ± 0.010
Brazil	Hy-line W-36	Fresh eggs	0.297
Brazil	Lohmann LSL White®	Fresh eggs	0.495
China	Hy-line Brown	Fresh eggs	0.369 ± 0.021

ตารางที่ 1.1 แสดงข้อมูลค่าความหนาของเปลือกไข่ไก่ในแต่ละสายพันธุ์

Country	Layer chicken	Source	Breaking strength (N)
Australia	-	Commercial floak's eggs	39.90 ± 0.60
Brazil	Hy-line W-36	Fresh eggs	33.24
Brazil	Lohmann LSL White®	Fresh eggs	39.15
China	-	Commercial fresh eggs	24.88 ± 13.23
China	Hy-line Brown	Fresh eggs	35.33 ± 7.61
Egypt	Lohmann Selected Leghorns	Fresh eggs	39.26 ± 0.93

ตารางที่ 1.2 แสดงข้อมูลค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ในแต่ละสายพันธุ์

จากข้อมูลดังตารางที่ 1.1 และ 1.2 จะเห็นได้ว่าความหลากหลายของสายพันธุ์ไก่ ส่งผลให้ค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่มีความแตกต่างกัน เช่น ไก่สายพันธุ์ Hy-line W-36 และ Lohmann LSL White® ในประเทศบราซิล จะมีค่าความหนาเท่ากับ 0.297 และ 0.495 มิลลิเมตร และค่าความแข็งแรงเท่ากับ 33.24 และ 39.15 นิวตัน ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้เองทางบริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเก็บข้อมูลความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ของไข่ไก่ที่นำมาใช้แปรรูปในบริษัทเพื่อเป็นฐานข้อมูลในการตรวจสอบคุณภาพของไข่ไก่ อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่นั้น ทางบริษัทจะทำการวิเคราะห์โดยการสุ่มตัวอย่างจากไข่ไก่ที่รับเข้ามาจำนวนมหาศาลต่อวัน ในอัตราส่วนเพียง 1-2 % เท่านั้น เนื่องจากการวิเคราะห์ความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่นั้นจะเป็นการวิเคราะห์ที่ทำลายตัวอย่าง ซึ่งข้อมูลจากตัวอย่างเพียง 1-2% เหล่านี้จะเป็นตัวแทนของไข่ไก่ในกลุ่มดังกล่าว นับว่าไม่เพียงพอและเสี่ยงต่อความเสียหายที่จะเกิดขึ้นระหว่างการแปรรูปได้

ในปัจจุบันเทคนิคการวิเคราะห์เชิงแสง หรือ สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์โดยไม่ทำลายตัวอย่างและมีหลากหลายขึ้นอยู่กับช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในแต่ละเทคนิค ในส่วน

ของเทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near-infrared spectroscopy)^[3] เป็นเทคนิคที่มีความนิยมในช่วงไม่นานมานี้ ทั้งในการวิเคราะห์ทางเคมีเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณในภาคอุตสาหกรรมการเกษตร, อาหาร และทางเภสัชกรรม เป็นเทคนิคที่สะดวกและรวดเร็วในการใช้งาน เทคนิคดังกล่าวจะใช้แสงในช่วงของเนียร์อินฟราเรด (Near-infrared หรือ NIR) ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 700 – 2500 นาโนเมตร และจะสัมพันธ์กับการสั่นของโอเวอร์โทน (Overtone) และคอมบิเนชันแบนด์ (Combination band) โดยที่จะกระตุ้นหมู่ฟังก์ชันให้เกิดการสั่นในโมเลกุลขึ้น โดยเฉพาะกับหมู่ฟังก์ชัน O-H, C-H, C-O และ N-H ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่จะพบมากในโมเลกุลต่าง ๆ ทำให้เกิดการสั่นในรูปแบบของการยืดและหด (Stretching) และการเปลี่ยนมุมของพันธะ (Bending) ซึ่งสเปกตรัมที่ได้จากการวัดด้วยวิธีข้างต้นจะเกิดจากสัญญาณของ overtone และ combination band ที่ถูกกระตุ้นจากแสงช่วงของเนียร์อินฟราเรด สัญญาณที่ได้ดังกล่าวจะถูกนำไปแปลผล (Interpreting) เพื่อระบุชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างได้ โดยที่สัญญาณดังกล่าวจะมีสัดส่วนที่สัมพันธ์กับปริมาณแสงที่ดูดกลืน ดังนั้นจึงสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของสารได้โดยประกอบกับการใช้วิธีการทางเคมิเมตริกซ์ (Chemometric method) ซึ่งเทคนิค Near-infrared spectroscopy จึงน่าจะสามารถนำมาทำนายความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ได้ เนื่องจากความหนาของเปลือกไข่ไก่แต่ละฟองนั้นไม่เท่ากัน ซึ่งเกิดจากหลายปัจจัย เช่น สายพันธุ์ สภาพแวดล้อมของแม่ไก่ จึงทำให้อาจมีผลกับการดูดกลืนของแสงที่เกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่นไข่ไก่ที่มีเปลือกไข่ไก่หนา องค์ประกอบภายในส่วนของเปลือกจะมีมาก ทำให้แสงที่ส่องเข้ามาอาจไม่สามารถทะลุผ่านได้ เพราะแสงส่วนมากถูกดูดกลืนโดยองค์ประกอบภายในเปลือก หรือจะเป็นความแข็งแรงของเปลือกไข่ที่เกิดจากสัดส่วนหรือปริมาณของแคลเซียม โปรตีน หรือองค์ประกอบอื่นที่กระจายตัวในแต่ละบริเวณของเปลือกไข่และเยื่อหุ้มไข่ที่มีไม่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้มีการดูดกลืนแสงมีความแตกต่างกันได้เช่นกัน

งานวิจัยเกี่ยวกับการวัดคุณภาพของไข่ไก่โดยใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรด ได้มีนักวิจัยหลายคนได้ทำการศึกษาและวิจัยการวัดคุณภาพของไข่ไก่ในหลายรูปแบบ ยกตัวอย่างดังนี้

C.J. Sun และคณะ^[4] ได้ทำการศึกษาความหลากหลายของความหนาของเปลือกไข่ไก่ในแต่ละบริเวณเพื่อที่จะใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของเปลือกไข่ไก่ โดยใช้ไข่ไก่จากไก่สายพันธุ์ Hy-line Brown อายุ 52 สัปดาห์ จำนวน 100 ฟอง และวัดความหนาของเปลือกไข่ไก่ 2 กลุ่มคือ เปลือกไข่ที่มีและไม่มีเยื่อหุ้มไข่และจะวัดทั้งหมด 42 ตำแหน่งต่อฟอง จะได้ค่าความหนาของเปลือกไข่ไก่ที่มีเยื่อหุ้มไข่และไม่มีเยื่อหุ้มไข่เท่ากับ 0.369 ± 0.021 และ 0.356 ± 0.022 มิลลิเมตร ตามลำดับ

C. Xie และ Y. He^[5] ได้ทำการทำนายสีและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่โดยการใช้วิธี Hyperspectral imaging technique ร่วมเข้ากับเทคนิค Partial least square (PLS) ในการทำนายพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 อย่าง ได้แก่ ค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ ค่า L^* a^* และ b^* สำหรับการทำนายสีของเปลือกไข่ไก่ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (R) ที่ของค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ ค่า L^* a^* และ b^* จะมีค่าเท่ากับ 0.835, 0.778, 0.810 และ 0.776 ตามลำดับ

C. Stefanello และคณะ^[6] ได้ทำการศึกษามูลของการเพิ่มแร่ธาตุอินทรีย์และอนินทรีย์ในอาหารเลี้ยงไก่ต่อความสามารถในการผลิตและคุณภาพของไข่ไก่ โดยจะใช้ไก่สายพันธุ์ Hy-line W-36 ช่วงอายุ 47 – 62 สัปดาห์ จำนวน 360 ตัว แล้วทำการวัดคุณภาพไข่ไก่ พบว่าค่าความหนาของเปลือกไข่เฉลี่ยที่ใช้ อาหารที่ไม่เพิ่มแร่ธาตุ เพิ่มแร่ธาตุอินทรีย์ และเพิ่มแร่ธาตุอนินทรีย์ มีค่าเท่ากับ 0.350, 0.370 ± 0.002 และ 0.370 ± 0.002 มิลลิเมตร ตามลำดับ และค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่เฉลี่ยที่ใช้อาหารที่ไม่เพิ่มแร่ธาตุ เพิ่มแร่ธาตุอินทรีย์ และเพิ่มแร่ธาตุอนินทรีย์ มีค่าเท่ากับ 32.24, 37.07 ± 0.41 และ 37.76 ± 0.48 นิวตัน ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าในงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น ยังไม่มีผู้วิจัยศึกษาความสัมพันธ์ของความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่กับข้อมูลเชิงแสงสัญญาณเนียร์อินฟราเรด สำหรับงานวิจัยนี้เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นรวมถึงลดมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากปัญหาที่ไข่ไก่สดที่มีความหนาหรือความแข็งแรงไม่ผ่านมาตรฐานในการนำไปแปรรูป ผู้วิจัยสนใจที่จะนำเสนอวิธีการตรวจวัดที่สามารถวิเคราะห์และทำนายความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ได้อย่างแม่นยำโดยที่ไม่ได้ทำลายตัวอย่าง โดยใช้เทคนิค Near-infrared spectroscopy พร้อมกับการคำนวณทางสถิติและคณิตศาสตร์ทางเคโมเมทริกซ์ มาประยุกต์ใช้ในการทำนายความหนาและความแข็งแรงของไข่ไก่สดที่จะนำไปแปรรูปของบริษัทซีพีเอฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เก็บข้อมูลสัญญาณจากเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมจากไข่ไก่ที่ได้จากศูนย์วิจัยและนวัตกรรมอาหารสัตว์ บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ที่ได้
2. ตรวจและวัดความหนาและความแข็งแรงของไข่ไก่ที่ได้จากศูนย์วิจัยและนวัตกรรมอาหารสัตว์บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
3. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่จากสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมโดยใช้วิธีการทางเคโมเมทริกซ์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่โดยพิจารณาจากค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ที่วัดจากไข่ไก่ของไก่พันธุ์ Hy-line brown จาก ศูนย์วิจัยและนวัตกรรมอาหารสัตว์ (Feed Research and Innovation Center) บริษัท ซีพี เอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ประกอบกับเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม ในการจัดการข้อมูลของสเปกตรัม จะใช้วิธีการปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard Normal Variates; SNV), การวิเคราะห์

องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis; PCA) และจะสร้างแบบจำลองโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดบางส่วน (Partial Least Square Regression; PLS)

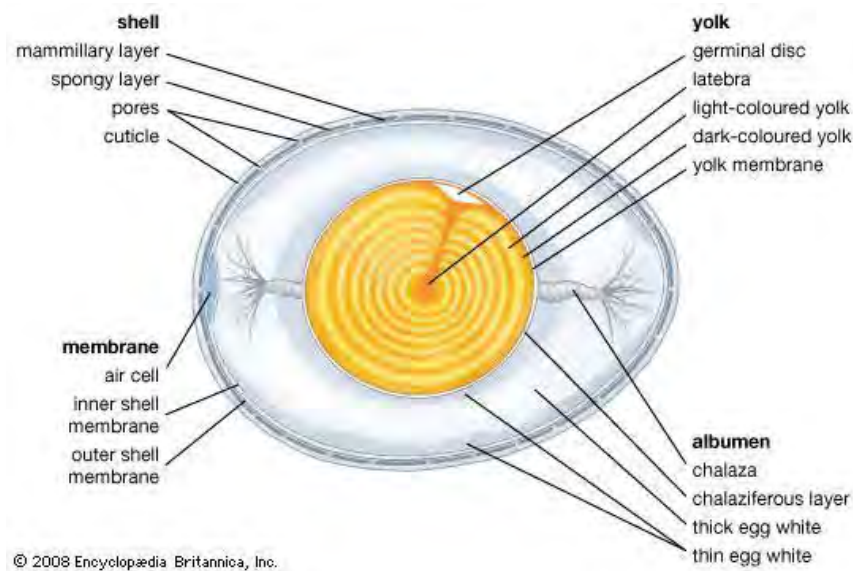
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สัญญาณของเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมที่สอดคล้องกับความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ได้
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการใช้ทำนายค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่จากสัญญาณของเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไข่ไก่

ไข่ไก่เป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการใช้ประกอบอาหารสำหรับการนำมาบริโภค เนื่องจากไข่ไก่เป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการมากมาย ได้แก่มีกรดอะมิโนจำเป็นที่ครบถ้วน วิตามินหลายชนิด เช่น วิตามินเอ, บี 2, บี 6, บี 12, ดี และ อี รวมถึงแร่ธาตุเช่น โฟเลต, แคลเซียม, ฟอสฟอรัส, โพแทสเซียม และ เหล็ก โดยส่วนประกอบหลักของไข่ไก่จะมี 4 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.1 ได้แก่



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบภายในของไข่ไก่

2.1.1 ไข่แดง (Yolk)

เป็นส่วนที่มีสีเหลืองปนส้มอยู่บริเวณส่วนกลางของไข่ไก่ ประกอบด้วย ไขมัน, คอเลสเตอรอล วิตามินที่ละลายในไขมัน ได้แก่ วิตามินเอ, ดี และอี แร่ธาตุที่พบมากได้แก่ ฟอสฟอรัส โฟเลตและเหล็ก ไข่แดงจะมีองค์ประกอบดังรูปที่ 2.1 ได้แก่ จุดกำเนิด (Germinal disc) เป็นส่วนที่จะเจริญไปเป็นตัวอ่อน ท่อนำไข่ (Latebra) เป็นท่อในการลำเลียงอาหารจากไข่แดงไปยังตัวอ่อนและเชื่อมระหว่างจุดกึ่งกลางของไข่แดงและจุดกำเนิด ชั้นไข่แดงสีจาง (Light-colored yolk) และชั้นไข่แดงสีเข้ม (Dark-colored yolk) ทั้งสองชั้นเกิดจากการผสมเม็ดสีจากการผสมในอาหาร และเยื่อหุ้มไข่แดง (Yolk membrane) ทำหน้าที่หุ้มไข่แดง

2.1.2 ไข่ขาว (Albumin)

เป็นของเหลวใสอยู่บริเวณรอบไข่แดง องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำและโปรตีน ได้แก่ ovalbumin, lysozyme, conalbumin รวมถึงแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น โรโบฟลาวิน, แมกนีเซียม, ฟอสฟอรัส ซึ่งไข่ขาวจะมีองค์ประกอบ ดังรูปที่ 2.1 ได้แก่ ชั้นไข่ขาวชั้น (Chalaziferous layer) เป็นส่วนที่ติดกับไข่แดง ขั้วยึดไข่แดง (Chalaza) ลักษณะเป็นเส้นจะยึดไม่ให้ไข่แดงเคลื่อนที่ ไข่ขาวส่วนหนา (Thick egg white) และ ไข่ขาวส่วนบาง (Thin egg white) ที่จะสามารถบ่งบอกอายุของไข่ไก่ได้ตามสัดส่วน อายุของไข่ไก่จะมากขึ้นหากไข่ขาวส่วนบางมีสัดส่วนที่มากกว่าไข่ขาวส่วนหนา เพราะเมื่ออายุของไข่ไก่มากขึ้น โปรตีนในไข่ขาวส่วนหนาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้เนื้อไข่ขาวเหลวขึ้นจึงเกิดเป็นส่วนของไข่ขาวส่วนเหลว

2.1.3 เยื่อหุ้มไข่ (Egg membrane)

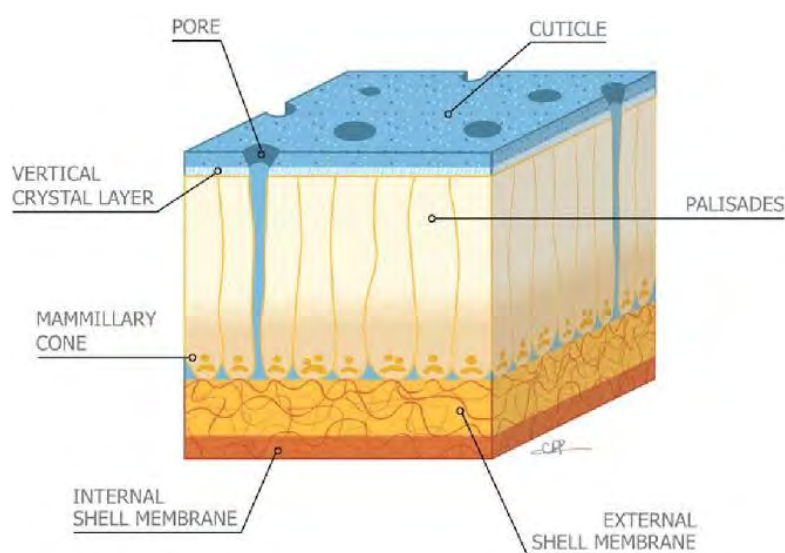
ประกอบด้วยโปรตีนไฟบรัส (Fibrous protein) แบ่งเป็นเยื่อหุ้ม 2 ชั้นดังรูปที่ 2.1 ได้แก่ เยื่อหุ้มไข่ชั้นใน (Internal หรือ Inner egg membrane) และเยื่อหุ้มไข่ชั้นนอก (External หรือ Outer egg membrane) และมีช่องอากาศ (Air cell) เป็นตัวแยกทั้งสองชั้น

2.1.4 เปลือกไข่ (Eggshell)

เป็นส่วนประกอบที่ปกคลุมไข่ไก่ทั้งใบไว้เพื่อคงรูปของไข่ไก่และมีเมือกคอยป้องกันสิ่งแปลกปลอมจากภายนอกเข้ามาภายในไข่ไก่ องค์ประกอบของเปลือกไข่จะประกอบไปด้วยโปรตีน 3 กลุ่ม ได้แก่ โปรตีนของไข่ขาวที่พบในเปลือกไข่ ได้แก่ ovalbumin, lysozyme และ ovotransferrin ซึ่งโปรตีนกลุ่มนี้จะอยู่ในชั้นต่าง ๆ ของเปลือกไข่ โปรตีนที่สร้างจากอวัยวะอื่น ได้แก่ osteopontin และ clusterin ซึ่งโปรตีนทั้งสองจะพบมากในมดลูกของไก่และในเปลือกไข่ไก่ และกลุ่มของเมทริกซ์โปรตีน (Matrix Protein) เป็นโปรตีนโครงสร้างที่จะช่วยในการยึดโครงร่างของโปรตีน เช่น Ovocleidin-17, Ovocleidin-32, Ovocleidin-116, Ovocleidin-180 นอกจากนี้จะมีองค์ประกอบของหินปูน (Calcium carbonate) ในรูปของแคลไซต์ (Calcite) ที่ทำให้เปลือกมีความแข็งแรง ส่วนประกอบของเปลือกไข่ แสดงดังรูปที่ 2.2 ได้แก่ ผิวเปลือกไข่ (Vertical crystal layer หรือ cuticle) เป็นส่วนที่อยู่นอกสุดของเปลือกไข่ ทำหน้าที่ป้องกันอากาศและน้ำจากภายนอกเข้าไปในไข่ไก่โดยมีเมือกคลุมชั้น cuticle อยู่ โดยสีของเปลือกไข่ที่เกิดขึ้นจะเกิดจากเม็ดสีของพอร์ไฟริน (Porphyrin pigment) ที่อยู่บนผิวของชั้น cuticle ส่วนของเปลือก (Shell) จะมี 2 ชั้นหลักได้แก่ชั้นพาลิเสต (Palisade layer) เป็นส่วนที่หนาที่สุดของเปลือกไข่ไก่ และเป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้น cuticle และ mamillary layer โดย palisade layer จะประกอบจาก

โปรตีนและแคลไซต์ต่อกันแน่นเป็นแถวโดยมีช่องว่าง (pore) ที่เป็นทางผ่านของอากาศและความชื้นจากภายนอก แทรกอยู่ระหว่างชั้น cuticle ถึงชั้นเนื้อเยื่อ ซึ่งขนาดของช่องว่างดังกล่าวจะมีขนาดกว้างขึ้นเมื่อไข่มีอายุมากขึ้น กล่าวคือ เมื่ออายุมากขึ้น เมื่อกที่คลุมชั้น cuticle อยู่จะหายไปและทำให้อากาศและความชื้นสามารถเข้ามาในไข่ได้ ส่งผลให้ไข่ไก่เสื่อมสภาพ ชั้นแมมิลลารี (Mammillary layer) เป็นชั้นที่อยู่บริเวณปลายของโปรตีนในชั้น palisade layer ซึ่งมีหน้าที่ในการเก็บสะสมสารอาหารและแร่ธาตุหลายชนิดเพื่อเลี้ยงตัวอ่อน เช่น keratan sulfate และแคลเซียม ซึ่งเมื่อตัวอ่อนสมบูรณ์ เปลือกไข่ไก่จะแข็งแรงน้อยลงเนื่องจากปริมาณแคลเซียมที่สะสมไว้ลดลง

การวิเคราะห์คุณภาพของเปลือกไข่ไก่จะมีหลายวิธีการ ได้แก่ การวิเคราะห์ความหนา โดยจะประเมินจากความหนาจากเปลือกไข่ไก่ที่ล้างเมือกเรียบร้อยแล้ว อยู่ในหน่วยของ มิลลิเมตร (mm) และการวิเคราะห์ความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ จะประเมินจากค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เปลือกไข่ไก่แตกจากเครื่องทดสอบวัดแรงอัด อยู่ในหน่วยของ กิโลกรัมแรง (kgf) นิวตัน (N) หรือแรงต่อพื้นที่ เช่น กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร (kgf/cm²) นิวตันต่อตารางเซนติเมตร (N/cm²)

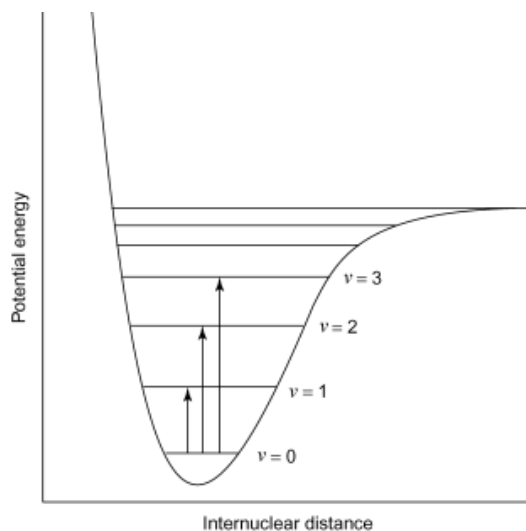


รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของเปลือกไข่ไก่

2.2 เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near-infrared spectroscopy)

เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้หลักการของการเกิดอันตรกิริยาของแสงในช่วงของเนียร์อินฟราเรดกับหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุล โดยเฉพาะ C-H, O-H, C-O และ N-H ซึ่งแสงในช่วงเนียร์อินฟราเรดจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 700 – 2500 นาโนเมตร โดยแสงดังกล่าวจะถูกหมู่ฟังก์ชันเหล่านั้นดูดกลืน ทำให้เกิดการสั่นภายในโมเลกุล อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจากแสงช่วงเนียร์อินฟราเรด และถูกกระตุ้นทำให้เคลื่อนจากชั้นระดับพลังงานของการสั่นในโมเลกุลที่สภาวะพื้น (Ground

state) ที่ $v = 0$ ไปยังชั้นระดับพลังงานที่สูงขึ้น ($v = 1$) หรือ Fundamental อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของระดับชั้นพลังงานของการสั่นของอิเล็กตรอนจะสามารถเปลี่ยนแปลงค่ามากกว่า 1 ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงของเลขควอนตัม ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนสามารถถูกกระตุ้นให้อยู่ในชั้นระดับพลังงานที่สูงกว่าชั้น fundamental ได้ ($v > 1$) โดยจะเรียกชั้นระดับพลังงานเหล่านี้ว่า overtone ในชั้นระดับพลังงานที่ $v = 2$ คือ overtone ที่ 1 ส่วนในชั้นระดับพลังงานที่ $v = 3$ คือ overtone ที่ 2 ดังรูปที่ 2.3

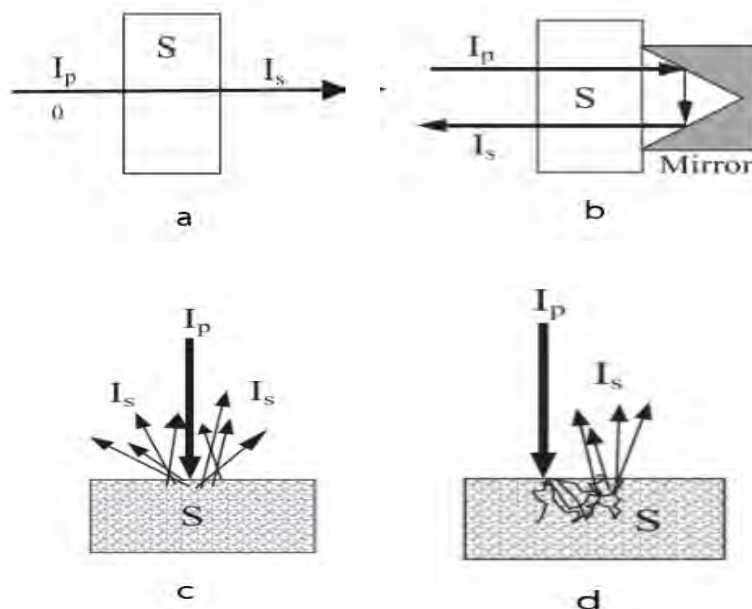


รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงช่วงเนียร์อินฟราเรด

รูปแบบของโหมดในการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างและการจัดวางของแหล่งกำเนิดแสงและตัวตรวจรับสัญญาณที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งมีหลายรูปแบบ ดังนี้

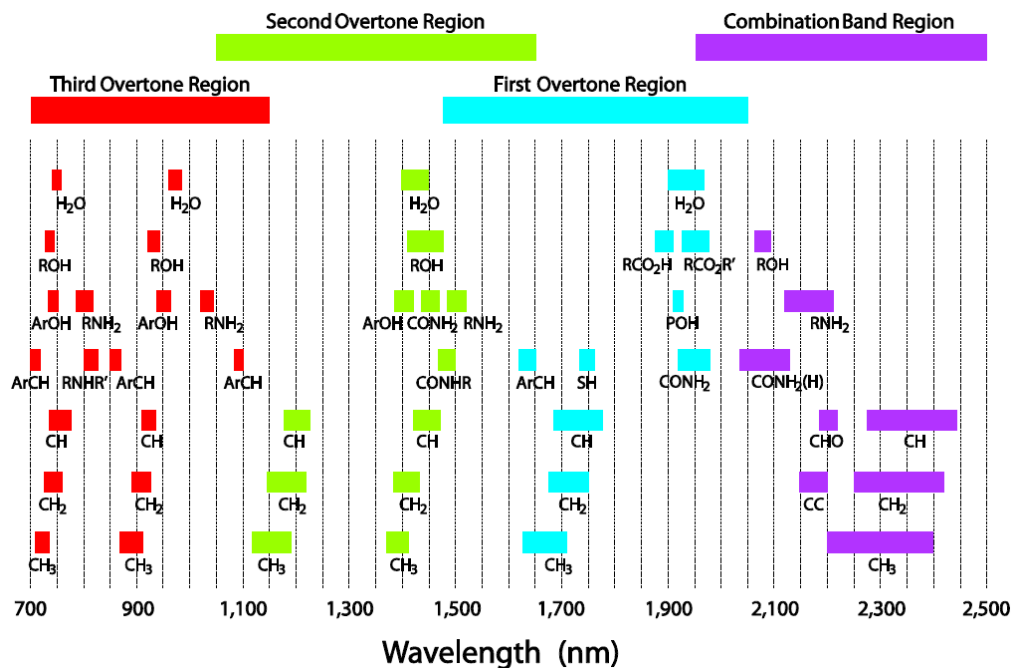
1. Transmittance หรือโหมตส่องผ่านเป็นการวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างของเหลวโดยจะใส่ตัวอย่างลงในคิวเวท แสงจากแหล่งกำเนิดจะผ่านคิวเวทแล้วทะลุผ่านไปยังตัวรับสัญญาณที่ตั้งอยู่ด้านหลังคิวเวท ดังรูปที่ 2.4a
2. Transflectance หรือโหมตส่องผ่านสะท้อน เป็นการวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างของเหลวที่มีลักษณะคล้ายกันกับ โหมตส่องผ่าน จะแตกต่างที่โหมตนี้จะมีการติดตั้งกระจกสะท้อนแสงไว้ด้านหลังคิวเวท และเปลี่ยนตำแหน่งของตัวตรวจรับสัญญาณให้มาอยู่ด้านเดียวกับแหล่งกำเนิดแสง ดังนั้นแสงจากแหล่งกำเนิดจะผ่านตัวอย่างในคิวเวท 2 ครั้งจากการสะท้อนของแสงผ่านกระจก ดังรูปที่ 2.4b
3. Reflectance หรือโหมตสะท้อน เป็นการวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างของแข็ง โดยตัวตรวจรับสัญญาณจะอยู่ด้านเดียวกับแหล่งกำเนิดแสง แสงจากแหล่งกำเนิดจะส่องไปยังผิวของตัวอย่างแล้วแสงที่ไม่โดนดูดกลืนจะสะท้อนมายังตัวตรวจรับสัญญาณ ดังรูปที่ 2.4c

4. Interactance เป็นการวิเคราะห์สำหรับของแข็งเช่นเดียวกับโหมดสะท้อน โดยแสงจากแหล่งกำเนิดจะทะลุเข้าไปในตัวตัวอย่างและเกิดอัตรากับตัวอย่างแล้วสะท้อนแสงที่ไม่ดูดกลืนมายังตัวตรวจรับสัญญาณ ดังรูปที่ 2.4d



รูปที่ 2.4 แสดงโหมดในการวิเคราะห์เนียร์อินฟราเรด (a) Transmittance (b) Transflectance (c) Reflectance และ (d) Interactance

รูปแบบของแถบการดูดกลืนแสงหรือสเปกตรัมที่เกิดขึ้นของ overtone ในแต่ละชั้นระดับพลังงานและ combination band ของสารแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะเฉพาะ สเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากแสงในช่วงของเนียร์อินฟราเรดจะขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุลของสารแต่ละชนิด (รูปที่ 2.5) ซึ่งทำให้การวิเคราะห์เชิงคุณภาพสามารถทำได้ง่าย อย่างไรก็ตามสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ การแปรผลจากสเปกตรัมเป็นค่าตัวเลขนั้นทำได้ยาก ดังนั้นจึงนำวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติมาช่วยให้การวิเคราะห์สามารถทำได้สะดวกมากขึ้น



รูปที่ 2.5 แสดงแถบการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชันในช่วงความยาวคลื่น 700 – 2500 นาโนเมตร

2.3 วิธีเคโมเมทริกซ์

2.3.1 การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (Standard Normal Variates; SNV)

เป็นเทคนิคที่นิยมใช้เพื่อที่จะลบผลของการกระจายและการเลื่อนฐานของสเปกตรัม (Baseline shift) โดยเทคนิคนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของทุกข้อมูลสำหรับสเปกตรัมชุดนั้น ๆ ซึ่งแสดงสมการดังนี้

$$x_{ij}(snv) = \frac{x_{ij} - \mu}{sd}$$

เมื่อ i คือ ลำดับตำแหน่งในสเปกตรัม

j คือ ลำดับของค่าสัญญาณที่วัดได้ที่ตำแหน่งที่ i

x_{ij} คือ ค่าสัญญาณของสเปกตรัมจากการวัด

$x_{ij}(snv)$ คือ ค่าสัญญาณของสเปกตรัมที่ผ่านการปรับให้ถูกต้อง

μ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าสัญญาณทุกจุดในสเปกตรัม

sd คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัญญาณทุกจุดในสเปกตรัม

2.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis; PCA)

เป็นวิธีการในการวิเคราะห์องค์ประกอบในเมทริกซ์ที่มีความซับซ้อน โดยวิธีนี้จะหาความสัมพันธ์ของข้อมูลโดยการสร้างแบบจำลองจากตัวแปรสมมติที่มีความเป็นอิสระต่อกันและมีขนาดมิติที่น้อยลงกว่าข้อมูลเดิม (X) เพื่อศึกษาความแปรผันของข้อมูล โดยข้อมูลที่แสดงในเทคนิคนี้ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ข้อมูลตัวอย่าง (Score; T) และข้อมูลตัวแปร (Loading; P) โดยมีความสัมพันธ์กับข้อมูลเดิมดังนี้

$$X = TP + E$$

การคำนวณสำหรับเทคนิค PCA จะมีหลายรูปแบบโดยจะได้ผลลัพธ์ที่แสดงข้อมูลเหมือนกัน เช่น วิธี Singular Value Deposition (SVD) เป็นการคำนวณโดยใช้องค์ประกอบหลัก (PC) ของข้อมูลทั้งหมดพร้อมกัน ซึ่งใช้เวลามากในการคำนวณ และวิธี Non-linear Iterative Partial Least Square เป็นวิธีที่คำนวณโดยใช้องค์ประกอบหลักที่ละชุดจนครบชุดขององค์ประกอบหลักที่กำหนดได้ ค่า PC ที่ได้จากการคำนวณจะแสดงถึงผลขององค์ประกอบหลักในชุดข้อมูล ซึ่ง PC แรกมีความแปรผันของข้อมูลสูง ค่า PC ลำดับถัดไปจะมีความแปรผันข้อมูลที่ลดลง

การแสดงผลของเทคนิค PCA จะดูจากความสัมพันธ์ของข้อมูล Score และ Loading โดยข้อมูล Score จะดูความสัมพันธ์ของตัวอย่างในชุดข้อมูลในแกน PC ส่วนข้อมูล Loading จะดูความสัมพันธ์ของตัวแปรในชุดข้อมูล หากนำข้อมูลจากทั้งสองชุดมาวิเคราะห์เทียบกัน ข้อมูลที่เกิดการทับซ้อนกันจะช่วยให้การวิเคราะห์สามารถทำได้สะดวกมากขึ้น

2.3.3 เทคนิคกำลังสองน้อยสุดบางส่วน (Partial Least Square Regression; PLS)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองจากข้อมูลในเมทริกซ์ที่มีจำนวนของมิติและตัวแปรจำนวนมาก โดยจะมีการสร้างตัวแปรแฝงที่มีจำนวนของตัวแปรน้อยลง แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ตัวแปรแฝงภายนอกหรือตัวแปรทำนาย (X) ตัวแปรแฝงภายในหรือตัวแปรตาม (Y) ในงานวิจัยนี้ ค่า X และ Y คือ เมทริกซ์ที่ประกอบไปด้วยค่าสัญญาณของเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมที่มีมิติเป็น $m \times n$ และค่าของพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดก็คือค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ที่มีมิติเป็น $m \times 1$ ตามลำดับ ซึ่งตัวแปรแฝงที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปใช้ในการจำแนกประเภทหรือทำนายความสัมพันธ์ของข้อมูลได้ โดยการใช้อัลกอริทึมสำหรับการสร้างตัวแบบสำหรับแบบจำลอง เช่น วิธีกำลังสองน้อยสุดบางส่วนแบบทำซ้ำไม่เชิงเส้น (NIPALS) และวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบเคอร์เนล (Kernel-PLS) และใช้การกำหนดจำนวนของตัวแปรโดยวิธีการตรวจสอบไขว้ (Cross-validation) ในการตรวจสอบว่า องค์ประกอบหนึ่ง ๆ จะสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการทำนายของตัวแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้หรือไม่ สมการต่อไปนี้จะเป็นตัวอย่างเป็นตัวอย่างของสมการใช้ในอัลกอริทึมในการสร้างแบบจำลองและสมการสุทิตีที่ใช้เป็นตัวแทนของแบบจำลองในการทำนาย

$$T = XW^p \text{ และ } U = YC$$

$$X = TP' + E \text{ และ } Y = UQ' + F$$

$$b = W(P'W)^{-1}Q$$

$$Y_{\text{predicted}} = X_{\text{unknown}}b$$

2.3.4 ความคาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error; RMSE)

เป็นค่าที่บอกถึงความแตกต่างระหว่างค่าที่ทำนายจากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งค่าดังกล่าวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองที่สร้างขึ้นได้ การหาค่า RMSE สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{\text{predicted}} - y_{\text{response}})^2}{n}}$$

เมื่อ y_{response} คือ ค่าความหนาและความหนาของเปลือกไข่ไก่ที่ได้จากการใช้เครื่องมือในการวัด

$y_{\text{predicted}}$ คือ ค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่จากการทำนาย

n คือ จำนวนของค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การเก็บไข่ไก่

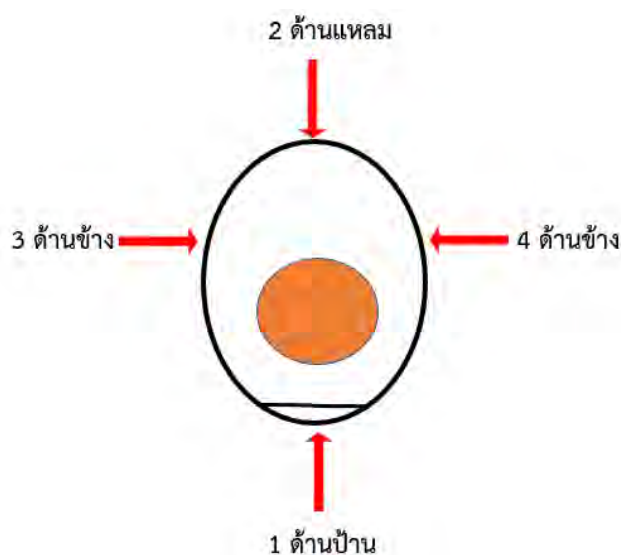
ไข่ไก่ที่ใช้ในการทดลองจะเก็บจากศูนย์วิจัยและนวัตกรรมการอาหารสัตว์ ของบริษัท ซีพี เอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่อำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี เป็นจำนวนทั้งหมด 900 ฟอง เป็นไข่ไก่จากไก่สายพันธุ์ Hy-line brown โดยจะเก็บทั้งหมด 3 กลุ่ม กลุ่มละ 300 ฟอง และเก็บไข่ไก่ในช่วงเช้าเวลา 8.30 – 9.30 น. โดยมีรายละเอียดการเก็บไข่ดังนี้ กลุ่มที่ 1 ไข่ไก่จากไก่ในช่วงอายุ 26-30 สัปดาห์ กลุ่มที่ 2 ไข่ไก่จากไก่ในช่วงอายุ 52-55 สัปดาห์ และกลุ่มที่ 3 ไข่ไก่จากไก่ในช่วงอายุ 78-80 สัปดาห์ โดยที่ไข่ไก่ทั้ง 900 ฟองจะเก็บในห้องวิเคราะห์ที่ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส การเก็บไข่จะเป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงวันที่เก็บไข่ จำนวนไข่ไก่ทดลองที่เก็บในแต่ละวัน และกลุ่มไข่ไก่

Date	Amount	Group	Date	Amount	Group
5/8/2019	30	3	31/8/2019	30	2
6/8/2019	20	3	1/9/2019	30	2
10/8/2019	10	3	2/9/2019	30	2
11/8/2019	15	3	3/9/2019	30	2
12/8/2019	12	2	4/9/2019	30	2
13/8/2019	12	2	7/9/2019	30	2
14/8/2019	12	2	8/9/2019	20	2
15/8/2019	12	2	10/9/2019	30	1
16/8/2019	12	2	11/9/2019	30	1
17/8/2019	12	2	14/9/2019	30	1
18/8/2019	12	2	15/9/2019	30	1
19/8/2019	16	2	16/9/2019	30	1
20/8/2019	25	3	17/9/2019	30	1
21/8/2019	60	3	18/9/2019	30	1
22/8/2019	60	3	22/9/2019	60	1
23/8/2019	60	3	24/9/2019	30	1
24/8/2019	30	3	Total	900	

3.2 การวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของไข่ไก่

ไข่ไก่ที่ใช้ในการทำวิจัยจะถูกนำมาวัดสัญญาณเนียร์อินฟราเรดในวันที่เก็บไข่ไก่ให้ครบจำนวนตามตารางที่ 3.1 โดยไข่ไก่แต่ละฟองจะทำกรวัดทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ได้แก่ด้านแหลม (หมายเลข 2) ด้านป้าน (หมายเลข 1) และด้านข้าง 2 จุด (หมายเลข 3 และ 4) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยทำการวัดตำแหน่งละ 3 ครั้ง จนครบ 900 ฟอง รวมเป็น 10,800 สเปกตรัม และจะจัดวางไข่ไก่เพื่อวัดสัญญาณเนียร์อินฟราเรดดังรูปที่ 3.2a โดยสเปกตรัมของด้านป้าน (Bottom) (หมายเลข 1) จะถูกนำไปเทียบกับค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ ส่วนสเปกตรัมของด้านแหลม (Top) และด้านข้างทั้งสอง (หมายเลข 2, 3 และ 4 ตามลำดับ) จะนำไปเทียบกับค่าความหนาของเปลือกไข่ไก่ โดยจะขีดเส้นระบุตำแหน่งหลังจากนำมาวัดสัญญาณอินฟราเรดแล้ว ดังรูปที่ 3.2b



รูปที่ 3.1 แสดงตำแหน่งในการวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของไข่ไก่แต่ละฟอง

สำหรับเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้คือโมเดล Nicolet iS5N ของบริษัท เทอร์โมฟิชเชอร์ ไชออนทิฟิค จำกัด^[7] (รูปที่ 3.3) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถวัดในช่วงความยาวคลื่น 909 - 2,632 นาโนเมตร มีแหล่งกำเนิดแสงเนียร์อินฟราเรดเป็นหลอดแฮโลเจนความเข้มสูง ในการตรวจวัดด้วยเครื่องดังกล่าวจะทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ก่อนทำการทดลอง ได้แก่รูปแบบที่ใช้คือ รูปแบบสะท้อน (Reflectance mode) ช่วงความยาวคลื่น 1000 - 2500 นาโนเมตร จำนวนครั้งในการวัด (Number of scan) เท่ากับ 16 ขนาดของช่องให้แสงส่องผ่าน (Aperture slit) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร กำลังของแสง

(Laser power) เท่ากับ 7.0 มิลลิวัตต์ และใช้โปรแกรม Thermo Scientific Omnic เป็นโปรแกรมในการแสดงผลและจัดการข้อมูลเบื้องต้น

การจัดการข้อมูลเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม Thermo Scientific Omnic จะทำการปรับข้อมูลโดยใช้การสมูท (Smoothing) เพื่อลบสัญญาณที่รบกวน (Noise) สเปกตรัมในช่วงที่สนใจ และใช้จัดเก็บข้อมูลของสเปกตรัมแต่ละเส้นโดยบันทึกลงในไฟล์สกุล .CSV



รูปที่ 3.2 (a) แสดงการจัดวางไข่ไก่เพื่อวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม และ (b) แสดงการขีดกำหนดตำแหน่งเพื่อวัดความหนาของเปลือกไข่ไก่

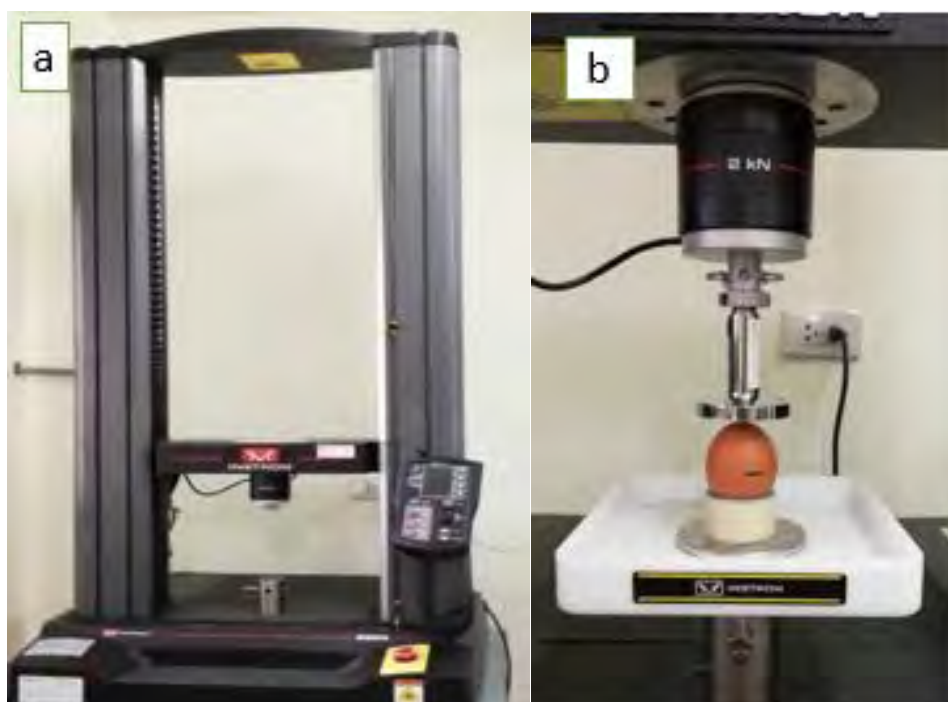


รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์โมเดล Nicolet iS5N ในรูปแบบสะท้อน โดยใช้

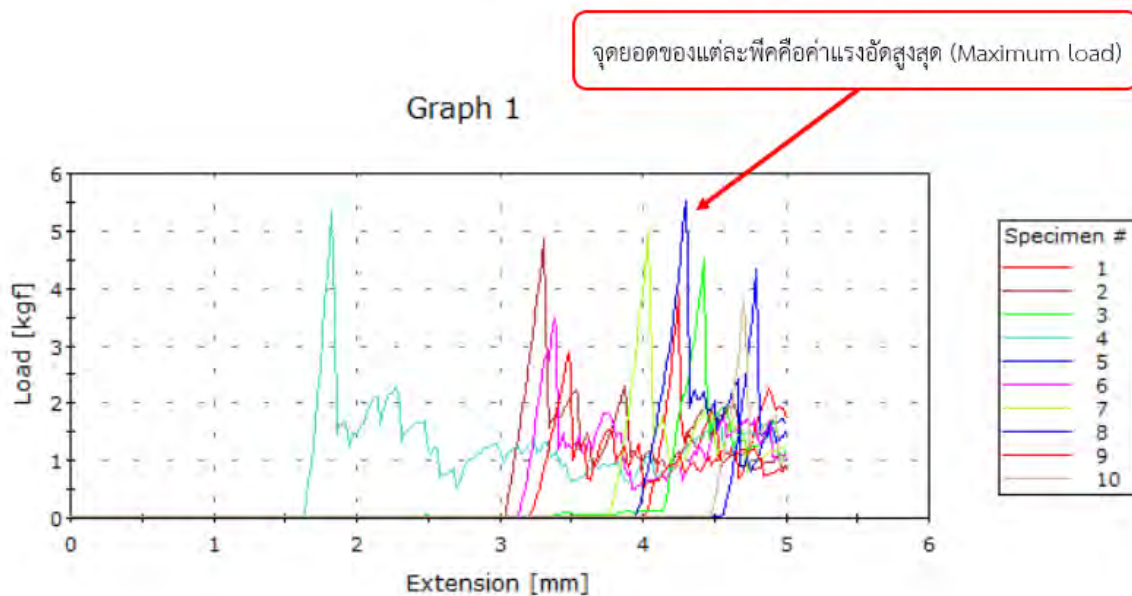
aperture slit ขนาด 10 มม.

3.3 การวัดความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่

ค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่จะถูกประเมินโดยค่าแรงอัดที่ทำให้เปลือกไข่ไก่แตก (Breaking strength) ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องทดสอบตั้งโต๊ะแบบเสาคู่สำหรับวัดแรงดึงและแรงอัดโมเดลรุ่น 5965 ของบริษัท อินสตรอน จำกัด^[8] (รูปที่ 3.4a) และจะใช้ประกอบกับโปรแกรม Bluehill 3 ในการแสดงผลข้อมูล โดยจะตั้งค่าโปรแกรมสั่งการดังนี้ อัตราการเคลื่อนตัวและระยะการเคลื่อนที่ของแม่แรงมีค่าเท่ากับ 20.00 มิลลิเมตรต่อนาที และ 5.00 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยจะเริ่มจากนำไข่ไก่ที่ผ่านการวัดสัญญาณเนียร์อินฟราเรดเรียบร้อยแล้ว มาวางบนแท่นรับแรงอัด ซึ่งในการวัดดังกล่าวจะใช้ไข่ไก่ด้านป้านเป็นด้านที่ใช้ทดสอบ (รูปที่ 3.4b) แล้วสั่งการให้เครื่องทดสอบทำงาน แม่แรงจะเคลื่อนตัวลงมาอัดกับไข่ไก่จนเปลือกเกิดการรอยแตก ดังรูปที่ 3.6 เมื่อถึงระยะที่กำหนด แม่แรงจะยกตัวขึ้นไปยังตำแหน่งเดิม ซึ่งค่าแรงอัดที่วัดได้จะแสดงผลบนโปรแกรม Bluehill 3 เป็นกราฟในรูปของแรงอัดสูงสุด (Maximum load) ดังรูปที่ 3.5 และค่าดังกล่าวคือค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ที่วัดได้



รูปที่ 3.4 (a) แสดงลักษณะเครื่องทดสอบแรงอัดโมเดล 5965 และ (b) แสดงการจัดเครื่องมือเพื่อวัดค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่



รูปที่ 3.5 แสดงผลการวัดแรงอัดสูงสุด (Maximum load) บนโปรแกรม Bluehill 3



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะไข่ไก่หลังจากการวัดความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่

3.4 การวัดความหนาของเปลือกไข่ไก่

เนื่องจากความหนาของไข่ไก่ในแต่ละส่วนนั้นอาจไม่ได้มีค่าที่เท่ากัน ดังนั้นในทางปฏิบัติสำหรับการวัดความหนาของเปลือกไข่ไก่ ทางศูนย์วิจัยและนวัตกรรมอาหารสัตว์จะทำการวัดค่าความหนา

เฉลี่ย โดยเฉลี่ยจากค่าความหนาที่ได้จากด้านข้างทั้งสองด้านและด้านแหลม ค่าความหนาเฉลี่ยที่ได้จะเป็นตัวแทนค่าความหนาของไข่ไก่ทั้งฟอง ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่อง digital micrometer (รูปที่ 3.7) ในการวัดค่าความหนาของทั้งสามด้านในหน่วยของมิลลิเมตร สำหรับไข่ไก่จะใช้ไข่ไก่ที่ผ่านการวัดเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและการวัดความแข็งแรงของเปลือกไข่แล้ว โดยจะตอกไข่เพื่อเอาเนื้อไข่ออกและทำการล้างเปลือกด้วยน้ำสะอาด จากนั้นแกะเปลือกไข่ในตำแหน่งที่กำหนด (ด้านข้างสองด้านและด้านแหลม) เพื่อนำชิ้นส่วนของเปลือกไข่ด้านดังกล่าวไปวัดค่าความหนาของเปลือกไข่ต่อไป



รูปที่ 3.7 แสดงเครื่อง digital micrometer ขณะทำการวัดความหนาของเปลือกไข่ไก่

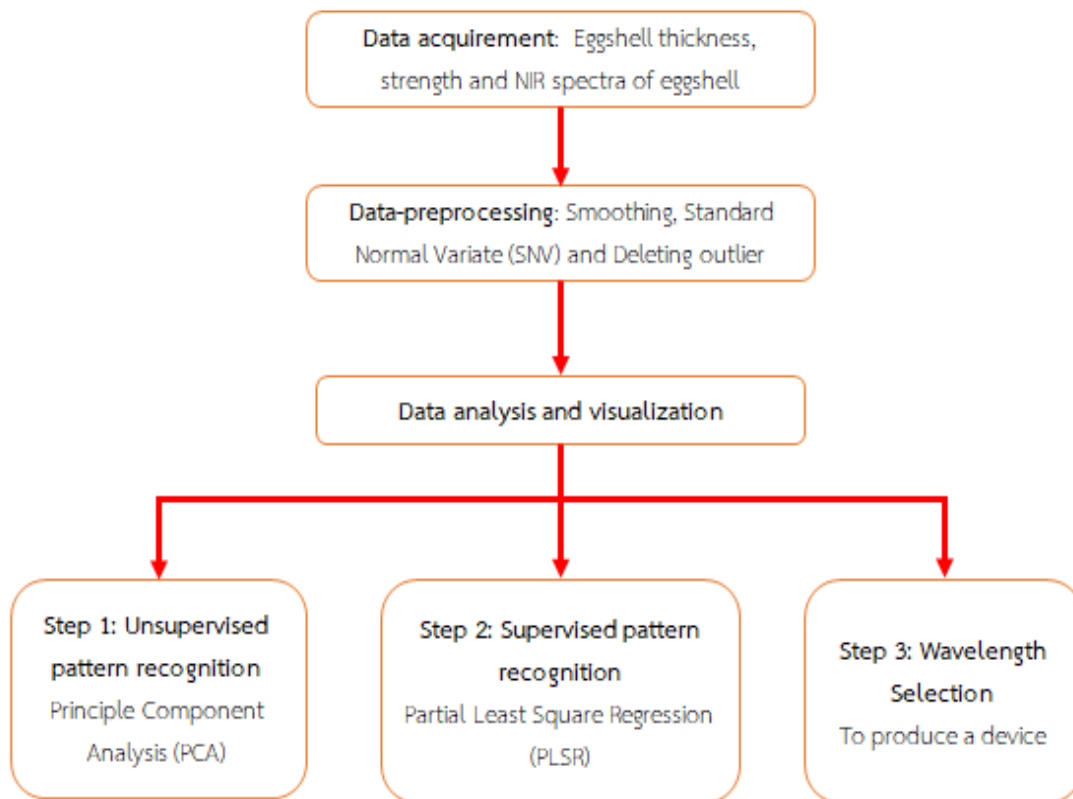
3.5 การเตรียมข้อมูลก่อนการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม Microsoft office Excel 365 และ MATLAB เวอร์ชัน R2018a โดยใช้ Microsoft office Excel ในการจัดระเบียบและแก้ไขข้อมูล และใช้ MATLAB ในการปรับข้อมูลเพิ่มเติมโดยใช้เทคนิค Standard Normal Variate (SNV) และสร้างตัวแปรของข้อมูลต่างๆ เช่น ตัวแปรค่าความยาวคลื่น ตัวแปรค่าสัญญาณจากสเปกตรัม ตัวแปรค่าความหนาและตัวแปรค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมแมทแล็บ

ในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2018a ขั้นตอนการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยจะใช้ตัวแปรของค่าความยาวคลื่น ตัวแปรค่าความหนาและตัวแปรค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ที่สอดคล้องกับตัวแปรของข้อมูลจากสเปกตรัม เพื่อการสร้างแบบจำลองในการอธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลดังกล่าวโดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component

Analysis) และการสร้างสมการสอบเทียบโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด (Partial Least Square Regression) เพื่อใช้ในการทำนายค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่



รูปที่ 3.8 แสดงแผนผังการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปราย

4.1 ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของเปลือกไข่ไก่

ไข่ไก่ที่ใช้ในงานวิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยและนวัตกรรมอาหารสัตว์ บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) โดยไข่ไก่ทั้งหมดเก็บมาจากแม่ไก่สายพันธุ์ Hy-line brown ซึ่งทำการเก็บในระหว่างวันที่ 5 สิงหาคม 2562 ถึงวันที่ 24 กันยายน 2562 เป็นเวลาทั้งสิ้น 33 วัน คุณภาพของไข่ไก่โดยเฉลี่ยในเชิงกายภาพ (น้ำหนักไข่ไก่) และในเชิงคุณภาพ (ค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่) แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลลักษณะทางกายภาพ ค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่

ไข่ที่ใช้ในการทดลอง : 9,880 ตัว ไก่สายพันธุ์ : Hy-line brown
ช่วงอายุของแม่ไก่แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม : กลุ่มที่ 1: 26-30 สัปดาห์ กลุ่มที่ 2: 52-55 สัปดาห์ กลุ่มที่ 3: 78-80 สัปดาห์
สถานที่ใช้เก็บตัวอย่าง: ศูนย์วิจัยและนวัตกรรมอาหารสัตว์ บริษัท ซีพีเอฟ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) อ.บ้านโป่ง จ.ชลบุรี
ช่วงเวลาเก็บไข่ตัวอย่าง : 8.30-9.30 น.
ไข่ไก่ที่ใช้ในการทดลอง : 900 ฟอง
น้ำหนักไข่เฉลี่ย : 61.91 ± 4.63 g.
ค่าความหนาเปลือกไข่เฉลี่ย : 0.400 ± 0.031 mm. ไข่ไก่ที่มีความหนา > 0.431 mm. (เกรด A) มีสัดส่วน 19.19 % ไข่ไก่ที่มีความหนาระหว่าง 0.369 – 0.431 mm. (เกรด B) มีสัดส่วน 65.22 % ไข่ไก่ที่มีความหนา < 0.369 mm. (เกรด C) มีสัดส่วน 15.59 %
ค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่เฉลี่ย : 40.13 ± 8.32 N ไข่ไก่ที่มีความแข็งแรง > 48.45 N (เกรด A) มีสัดส่วน 16.78 % ไข่ไก่ที่มีความแข็งแรงระหว่าง 31.81 – 48.45 N (เกรด B) มีสัดส่วน 70.00 % ไข่ไก่ที่มีความแข็งแรง < 31.81 N (เกรด C) มีสัดส่วน 13.22 %

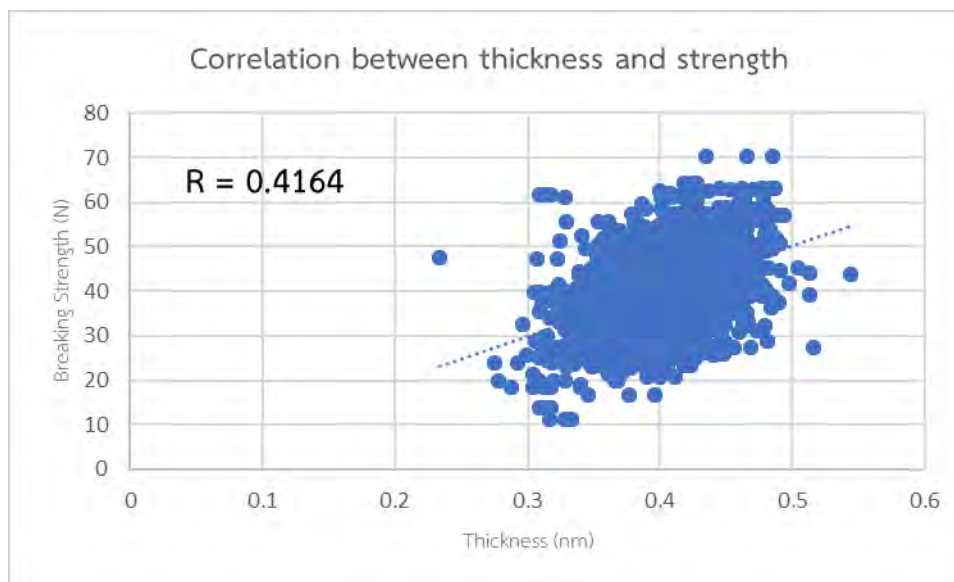
จากตารางที่ 4.1 ได้สรุปข้อมูลของทางกายภาพของไขไก่จากไขไก่ทั้งสิ้นจำนวน 900 ฟอง โดยมีค่าน้ำหนักไขไก่เฉลี่ยเท่ากับ 61.91 ± 4.63 กรัม มีค่าความหนาของเปลือกไข่เฉลี่ยเท่ากับ 0.400 ± 0.031 มิลลิเมตร และค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่เท่ากับ 40.13 ± 8.32 นิวตัน อย่างไรก็ตามเกณฑ์ในการจำแนกค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ก็ยังไม่ได้มีการกำหนดเป็นค่ามาตรฐาน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงทำการกำหนดเกณฑ์ในการแบ่งเกรดโดยใช้ค่าเฉลี่ย (μ) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (sd) โดยเกรดดังกล่าวของค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไขไคนั้นจะเป็นอิสระต่อกัน ดังนี้

1. เกรด A คือ กลุ่มที่มีค่าความหนาหรือค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่มากกว่า $\mu + sd$ ได้แก่
 - ค่าความหนาของเปลือกไข่ที่มีค่ามากกว่า 0.431 มิลลิเมตร จำนวน 173 ฟอง (คิดเป็น 19.19% ของไขไก่ทั้งหมด)
 - ค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ที่มีค่ามากกว่า 48.45 นิวตัน จำนวน 151 ฟอง (คิดเป็น 16.78% ของไขไก่ทั้งหมด)
2. เกรด B คือ กลุ่มที่มีค่าความหนาหรือค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ อยู่ระหว่าง $\mu + sd$ ถึง $\mu - sd$ ได้แก่
 - ค่าความหนาของเปลือกไข่ที่มีค่าระหว่าง 0.369 ถึง 0.431 มิลลิเมตร จำนวน 587 ฟอง (คิดเป็น 65.22% ของไขไก่ทั้งหมด)
 - ค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ที่มีค่าระหว่าง 31.81 ถึง 48.45 นิวตัน จำนวน 630 ฟอง (คิดเป็น 70.00% ของไขไก่ทั้งหมด)
3. เกรด C คือ กลุ่มที่มีค่าความหนาหรือค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่น้อยกว่า $\mu - sd$ ได้แก่
 - ค่าความหนาของเปลือกไข่ที่มีค่าน้อยกว่า 0.369 มิลลิเมตร จำนวน 140 ฟอง (คิดเป็น 15.56% ของไขไก่ทั้งหมด)
 - ค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ที่มีค่าน้อยกว่า 31.81 นิวตัน จำนวน 119 ฟอง (คิดเป็น 13.22% ของไขไก่ทั้งหมด)

4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไขไก่

เนื่องด้วยในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไขไก่จากไขไก่แต่ละฟอง ทางผู้วิจัยจึงทำการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสองว่าสัมพันธ์กันอย่างไร จากรูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไขไก่ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, R) เท่ากับ 0.4164 สรุปได้ว่า ค่าความหนาของเปลือกไขไก่อ่าไม่มี ความสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งแรงของเปลือกไข่ โดยเปลือกไข่ที่มีความหนามาก ไม่จำเป็นต้องมีความ

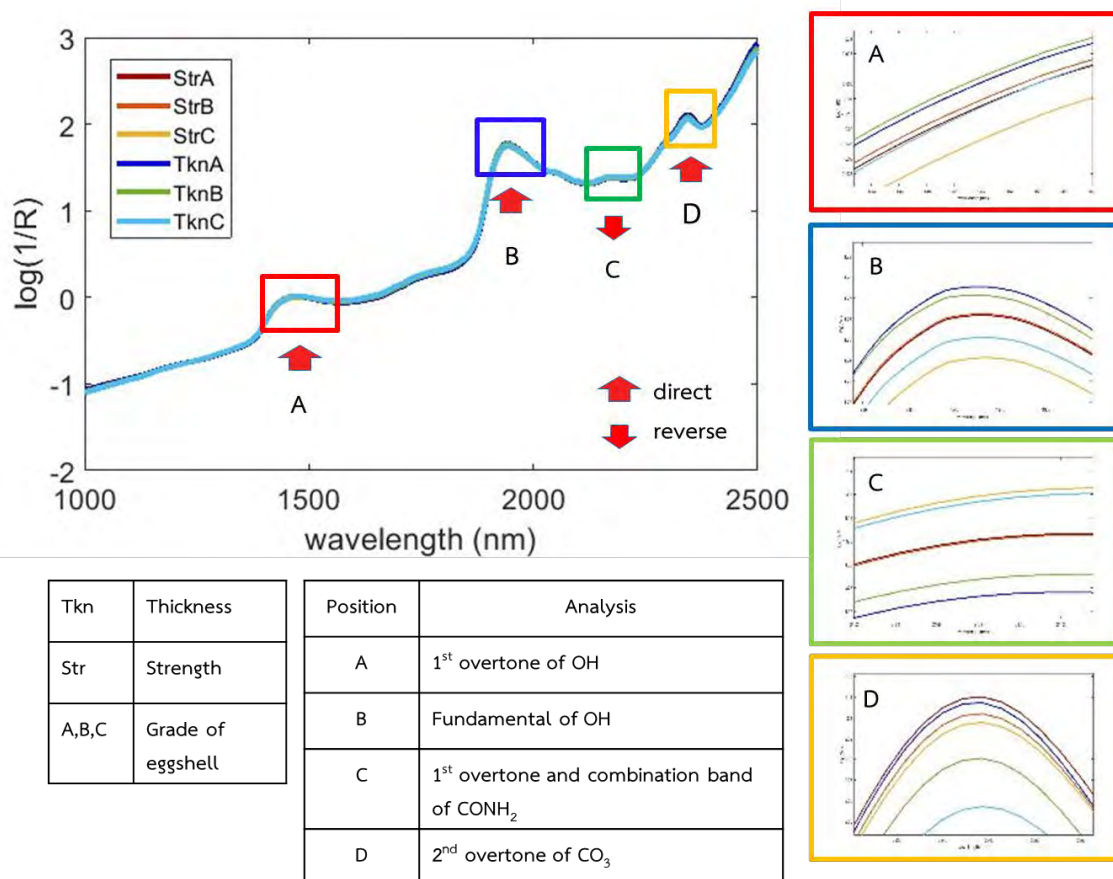
แข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้การวิเคราะห์ทางสถิติในการทดลองนี้จะทำการพิจารณาแยกกันระหว่าง ความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่

4.3 เนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม

ในการวัดค่าความหนาของเปลือกไข่ไก่จะทำการวัดในด้านแหลมและด้านข้างทั้งสองด้าน และการวัดความแข็งแรงของเปลือกไข่นั้นใช้เครื่องทดสอบแรงอัดซึ่งกดลงบนไข่ไก่ด้านป้าน ดังนั้นก่อนที่จะไปวัดความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่นั้น ไข่ไก่ทุกฟองจะถูกนำมาวัดสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ได้แก่ ด้านป้าน (Bottom) ด้านแหลม (Top) และด้านข้างทั้งสองด้าน (Side) เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมที่สอดคล้องกับความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ หลังจากได้ค่าสัญญาณของเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมแล้ว จะนำมาผ่านกระบวนการจัดการข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ (Data preprocessing) โดยใช้เทคนิค Standard Normal Variates (SNV) ในการปรับผลของการเลื่อนฐาน (Baseline Shift) ของสัญญาณจากเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม โดยเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมเฉลี่ยของไข่ไก่แต่ละเกรดในเรื่องความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมเฉลี่ยของไข่ไก่จากการวัดทั้ง 4 ตำแหน่ง โดยแบ่งตามเกรดของค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าไข่ไก่ที่อยู่ในเกรด A เกรด B และ C ตามเกณฑ์การแบ่งโดยใช้ค่าความหนาหรือค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่จะทำให้รูปแบบการให้สัญญาณสเปกตรัม (Spectrum pattern) รวมถึงความเข้มของสัญญาณ (Intensity) ในรูปของ $\log(1/R)$ ที่แตกต่างกันออกไป โดยจะมี 4 ตำแหน่งบนสเปกตรัมที่มีความแตกต่างของความเข้มของสัญญาณอย่างเห็นได้ชัด ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่น 1410 – 1510 นาโนเมตร, ช่วงความยาวคลื่น 1920 – 2030 นาโนเมตร, ช่วงความยาวคลื่น 2140 – 2210 นาโนเมตร และช่วงความยาวคลื่น 2310 – 2370 นาโนเมตร ตามลำดับ

ช่วงความยาวคลื่น 1410 – 1510 นาโนเมตร จะเป็นสัญญาณของ 1st overtone ของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ^[9] ของโปรตีนในไข่ขาว ซึ่งคาดว่าเป็น ovalbumin ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีสัดส่วนในไข่ขาวที่มากที่สุดถึง 54% และสามารถพบได้บางส่วนในเปลือกไข่ไก่ได้ เมื่อพิจารณาค่าสัญญาณของสเปกตรัมจะเห็นได้ว่า เมื่อค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่มีค่าสูงขึ้น ค่าความเข้มของสัญญาณ

ในช่วงดังกล่าวจะสูงขึ้นเช่นกัน ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณของ ovalbumin ที่มีในเปลือกไข่ไก่เพิ่มขึ้น เป็นลักษณะแปรผันตาม

ช่วงความยาวคลื่น 1920 – 2030 นาโนเมตร จะเป็นสัญญาณของ fundamental ของน้ำ (H_2O)^[9] ปริมาณน้ำที่อยู่ภายในไข่ไก่อาจเป็นตัวบ่งบอกความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ได้เช่นกัน หากเปลือกไข่มีความหนามาก น้ำภายในไข่จะออกผ่านช่องว่าง (pore) ได้ยากขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำภายในไข่มีมากซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณของสเปกตรัมที่ได้ในลักษณะแปรผันตาม

ช่วงความยาวคลื่น 2140 – 2210 นาโนเมตร จะเป็นสัญญาณของ 1st overtone และ combination band ของหมู่เอไมด์ ($-CONH_2$)^[9] ซึ่งอาจเป็นโปรตีนบริเวณเปลือกไข่ ได้แก่ ovalbumin, lysozyme, ovotransferrin, osteopontin และ matrix proteins เมื่อพิจารณาจากค่าสัญญาณของสเปกตรัม จะเห็นได้ว่า เมื่อค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ต่ำ ค่าความเข้มของสเปกตรัมจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เป็นลักษณะแปรผันผกผัน ซึ่งอาจเกิดจากสัดส่วนของโปรตีนภายในเปลือกไข่ไก่มีปริมาณที่แตกต่างกัน

ช่วงความยาวคลื่น 2310 – 2370 นาโนเมตร จะเป็นสัญญาณของ 2nd overtone ของหมู่คาร์บอนิล ($-CO$) คาดว่าเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)^[10] ในเปลือกไข่ไก่ ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เปลือกไข่ไก่มีความแข็งแรง โดยในเปลือกไข่ $CaCO_3$ จะอยู่ในรูปของแคลไซต์ (Calcite) เมื่อพิจารณาจากสัญญาณของสเปกตรัมจะเห็นได้ว่าสัญญาณของสเปกตรัมตามเกณฑ์ของค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่จะมีค่าสัญญาณที่สูงซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเข้มของสัญญาณสเปกตรัม เป็นลักษณะแปรผันตาม แสดงให้เห็นว่าปริมาณของ $CaCO_3$ มีผลต่อค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่

ความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นของสัญญาณจากเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมและไข่ไก่อารวมถึงความสัมพันธ์เชิงเคมีที่อาจเกิดขึ้นได้ สรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมของไข่ไก่

ความยาวคลื่น (nm)	ความสัมพันธ์กับค่าความหนาของเปลือกไข่	ความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่	ผลการวิเคราะห์	
1410 – 1510	แปรผันตาม	แปรผันตาม	1 st overtone of OH (ovalbumin)	ค่าสัญญาณสเปกตรัมของไข่ไก่มีค่าสูงซึ่งสัมพันธ์กับค่าความชื้นของสัญญาณที่สูงขึ้น คาดว่าตามปริมาณของ ovalbumin
1920 - 2030	แปรผันตาม	แปรผันตาม	Fundamental of OH (water)	ความหนาของเปลือกที่เพิ่มขึ้นจะทำให้น้ำไหลออกผ่านช่องว่างได้ยากขึ้นสอดคล้องกับผลสัญญาณสเปกตรัม
2140 - 2210	แปรผกผัน	แปรผกผัน	1 st overtone and combination band of CONH ₂ (Protein)	สัดส่วนของโปรตีนหลายชนิดในเปลือกไข่ไก่ที่แตกต่างกันส่งผลให้ความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่เกิดการเปลี่ยนแปลง
2310 - 2370	แปรผันตาม	แปรผันตาม	2 nd overtone of CO (CaCO ₃)	ปริมาณของแคลเซียมในเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน จะทำให้ความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่เกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณสเปกตรัม

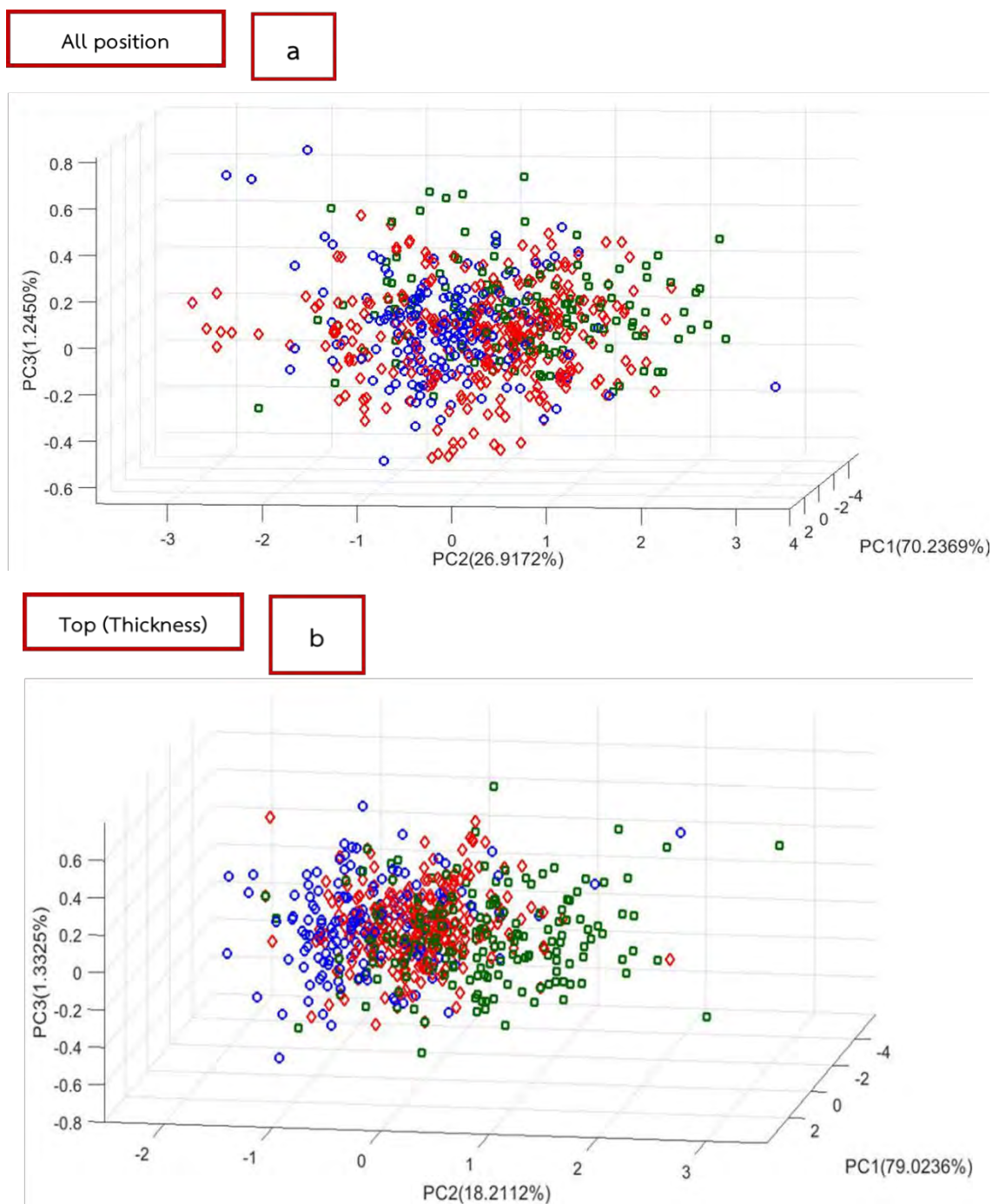
4.4 การวิเคราะห์ความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ด้วยวิธีเคโมเมทริกซ์

เนื่องจากสัญญาณของเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมเป็นสัญญาณที่ได้จากการสั่นของหมู่ฟังก์ชันหรือองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในสารตัวอย่าง หากวัดสเปกตรัมในช่วงของความยาวคลื่นช่วงใดช่วงหนึ่ง อาจจะทำให้ขาดข้อมูลของสัญญาณของสารที่สนใจได้ จึงจำเป็นที่จะต้องวัดสัญญาณจากสเปกตรัมในทั้งช่วงความยาวคลื่นที่ได้กำหนดไว้ (1000 – 2500 นาโนเมตร) อย่างไรก็ตามการคำนวณเพื่อวิเคราะห์จากสัญญาณทั้งสเปกตรัมนั้นทำได้ยากเนื่องจากมีหลายตัวแปร จึงต้องอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์และสถิติเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ผลจากข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลจากสเปกตรัมนั้นเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลแบบหลายตัวแปร จึงแบ่งการวิเคราะห์เป็นดังนี้

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis, PCA) จะใช้ในการแสดงผลความเหมือนและความแตกต่างของข้อมูลสัญญาณจากเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมในแต่ละเกรดของค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ เพื่อเป็นการบอกถึงความเป็นไปได้ในการทำนายค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่จากสัญญาณของเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมได้
2. เทคนิคการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (Partial Least Square Regression, PLS) จะใช้ในการสร้างแบบจำลองในรูปแบบของสมการสำหรับการทำนายค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่จากค่าสัญญาณของเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัม โดยจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) และค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง ($RMSE$)

4.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis) ของสัญญาณสเปกตรัมจากเปลือกไข่ไก่

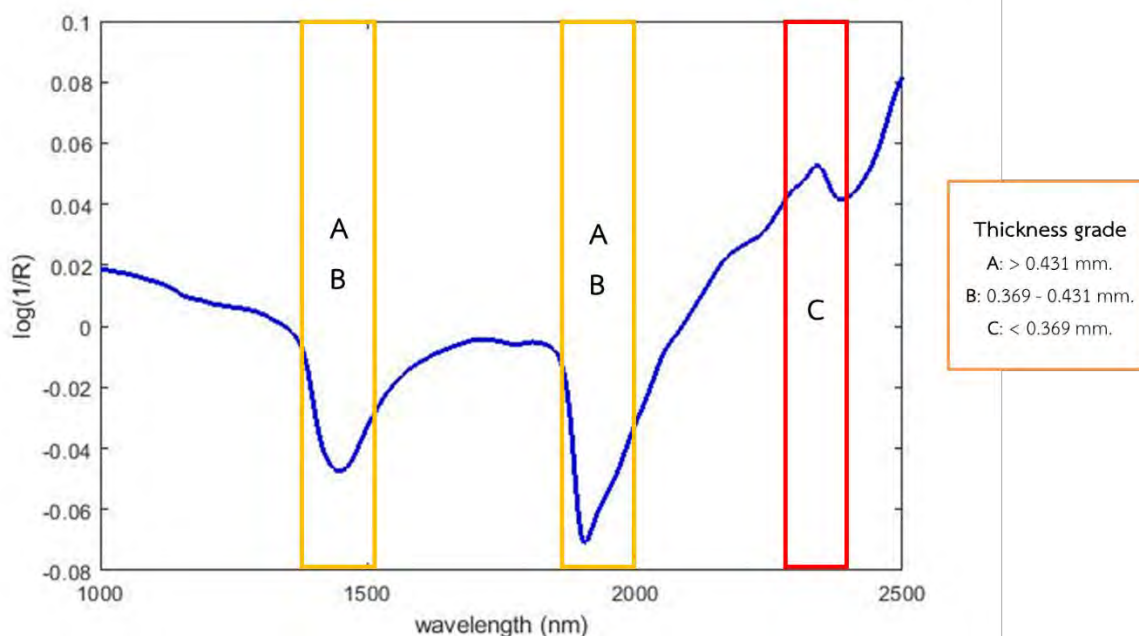
การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักหรือ PCA จะใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความซับซ้อน โดยที่นี้ใช้วิเคราะห์รูปแบบจากความเหมือนและความแตกต่างของข้อมูลสัญญาณของเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากไข่ไก่ที่มีความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ที่แตกต่างกัน รูปแบบนี้สร้างขึ้นแบบจำลองบนแกนของตัวแปรสมมติที่เรียกว่า PC หรือ Principle Component เพื่อศึกษาความแปรผันของข้อมูลสัญญาณเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมซึ่งจะได้ข้อมูล 2 ชุดสำคัญ คือ ข้อมูลสกอร์ (Score, T) ที่ใช้ดูความสัมพันธ์ของตัวอย่างในชุดข้อมูล และข้อมูลโหลดติง (Loading, P) ที่ใช้ดูความสัมพันธ์ของตัวแปรในชุดตัวอย่าง โดยข้อมูลทางสกอร์ของ PC1 - PC3 แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ที่เป็นความสัมพันธ์ของสัญญาณกับความหนาของเปลือกไข่ และรูปที่ 4.5 ที่เป็นความสัมพันธ์ของสัญญาณกับความแข็งแรงของเปลือกไข่



รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ Score plot (T) ของเปลือกไข่ไก่โดยใช้เกณฑ์ตามค่าความหนาของเปลือกไข่ไก่เป็นเกรด A (สีน้ำเงิน) เกรด B (สีแดง) เกรด C (สีเขียว) จาก (a) สเปกตรัมทุกตำแหน่ง (ด้านแหลมและด้านข้างทั้งสองด้าน) และ (b) สเปกตรัมจากตำแหน่งด้านแหลม

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ากลุ่มของตัวอย่างถูกจัดเรียงกลุ่มกันในข้อมูลสกออร์ PC1 - PC3 โดยมี %variance โดยรวม > 95% แต่จะมีการจัดกลุ่มชัดเจนมากเมื่อวิเคราะห์จากสัญญาณเนียร์อินฟราเรด

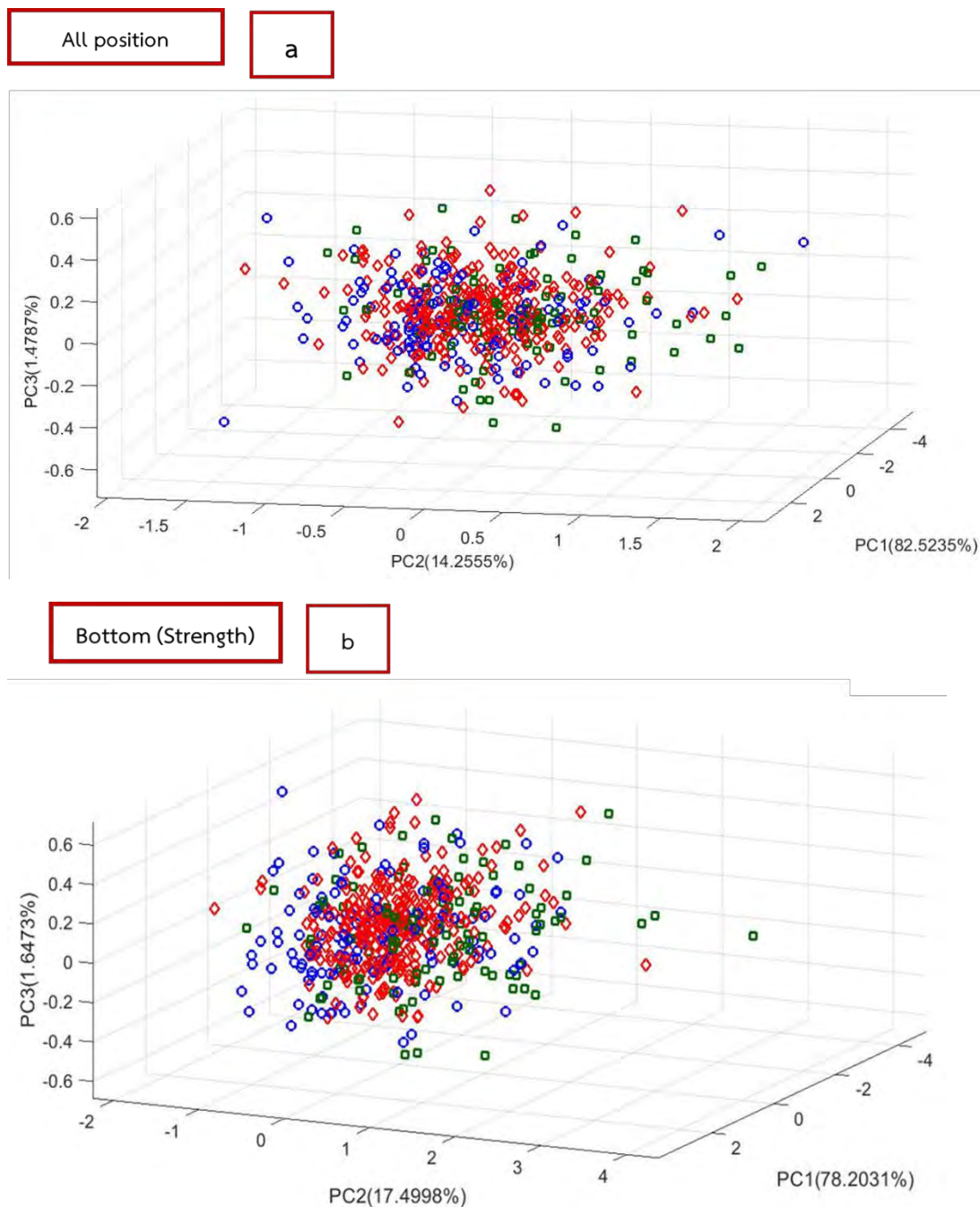
จากตำแหน่งด้านแหลมเท่านั้น โดยกลุ่มที่มีความหนามากกว่า 0.431 มิลลิเมตร (เกรด A) กลุ่มที่มีความหนาระหว่าง 0.431 ถึง 0.369 มิลลิเมตร (เกรด B) จะอยู่ในคลัสเตอร์เดียวกัน ซึ่งแตกต่างจากกลุ่มที่มีความหนาของเปลือกไข่น้อยกว่า 0.369 มิลลิเมตร (เกรด C) อย่างไรก็ตามมีการซ้อนทับของข้อมูลเล็กน้อยระหว่างเกรด B และเกรด C จากข้อมูลสกอ์ของ PC1 – PC3 พบว่าจะสามารถแยกกลุ่มของเปลือกไข่ไก่ที่ใช้เกณฑ์ของค่าความหนาจากแกน PC2 ผลของการวิเคราะห์ Loading plot ของ PC2 ที่ได้จากการแบ่งกลุ่มตามเกณฑ์ของค่าความหนาของเปลือกไข่ไก่ แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าในช่วงความยาวคลื่นที่ 1410 – 1510, 1920 – 2030 นาโนเมตร นั้นจะเป็นสัญญาณเฉพาะกับไข่ไก่ที่มีความหนาเป็นเกรด A และ B ในขณะที่ช่วงความยาวคลื่นและ 2310 – 2370 นาโนเมตร จะให้ผลสอดคล้องกับไข่ไก่เกรด C ซึ่งจากข้อมูลโพลดิ้งนั้นมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ Loading plot (P) ที่ PC2 คำนวณจากความสัมพันธ์ของความหนาของเปลือกไข่กับสัญญาณเนียร์อินฟราเรดด้านแหลม

สำหรับความสัมพันธ์ของสัญญาณเนียร์อินฟราเรดกับความแข็งแรงของเปลือกไข่นั้น จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่ากลุ่มของตัวอย่างจัดเรียงกลุ่มกันในข้อมูลสกอ์ PC1 – PC3 โดยมี %variance โดยรวม > 95% โดยกลุ่มที่มีความแข็งแรงมากกว่า 48.45 นิวตัน (เกรด A) กลุ่มที่มีความแข็งแรงระหว่าง 48.45 ถึง 31.81 นิวตัน (เกรด B) และกลุ่มที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า 31.81 นิวตัน (เกรด C) ทั้งสามกลุ่มจะอยู่ในคลัสเตอร์เดียวกัน ดังรูปที่ 4.5 เนื่องจากข้อมูลทั้งสามกลุ่มนั้นอาจมีค่าสัญญาณที่ใกล้เคียงกันจึงเกิดการทับซ้อนกันทั้งจากสัญญาณสเปกตรัมทุกด้านและเฉพาะจากตำแหน่งด้านบ้าน ดังนั้นข้อมูลสกอ์ ของ

PC1 – PC3 จึงไม่สามารถแยกกลุ่มของเปลือกไข่ไก่ที่ใช้เกณฑ์ของค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ได้ชัดเจน

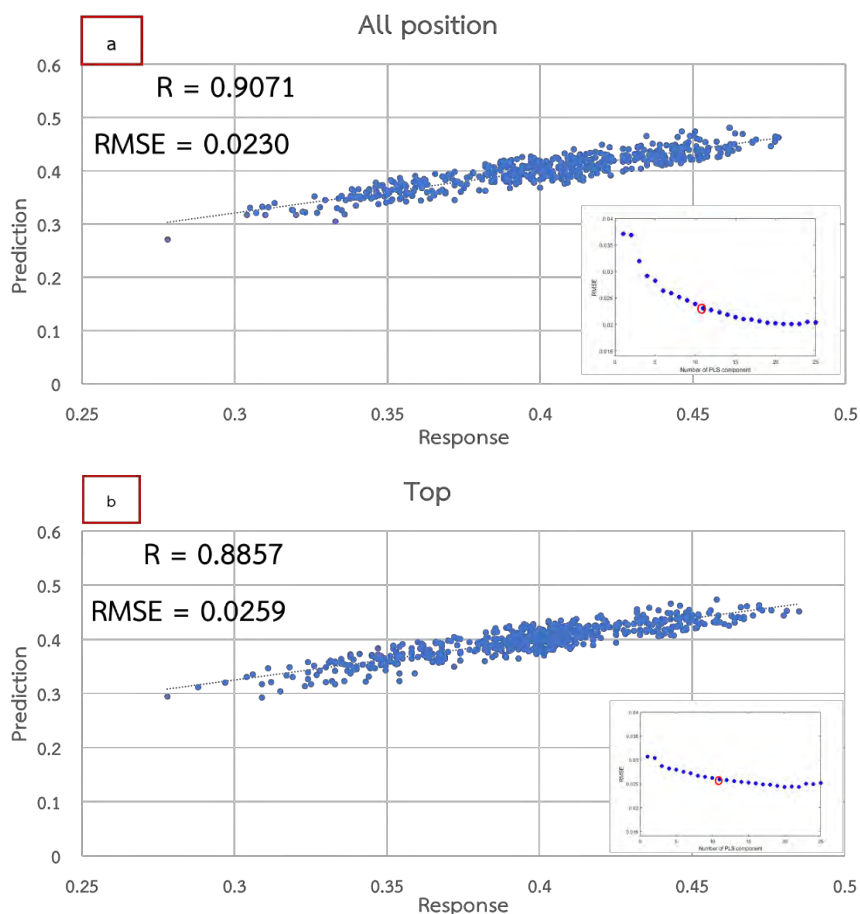


รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ Score plot (T) ของเปลือกไข่ไก่โดยใช้เกณฑ์ตามค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่เป็นเกรด A (สีน้ำเงิน) เกรด B (สีแดง) เกรด C (สีเขียว) จาก (a) สเปกตรัมทุกตำแหน่ง (ด้านบน ด้านแหลม และด้านข้างทั้งสองด้าน) และ (b) สเปกตรัมจากตำแหน่งด้านบน

4.4.2 การสร้างแบบจำลองในการทำนายค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่โดยใช้

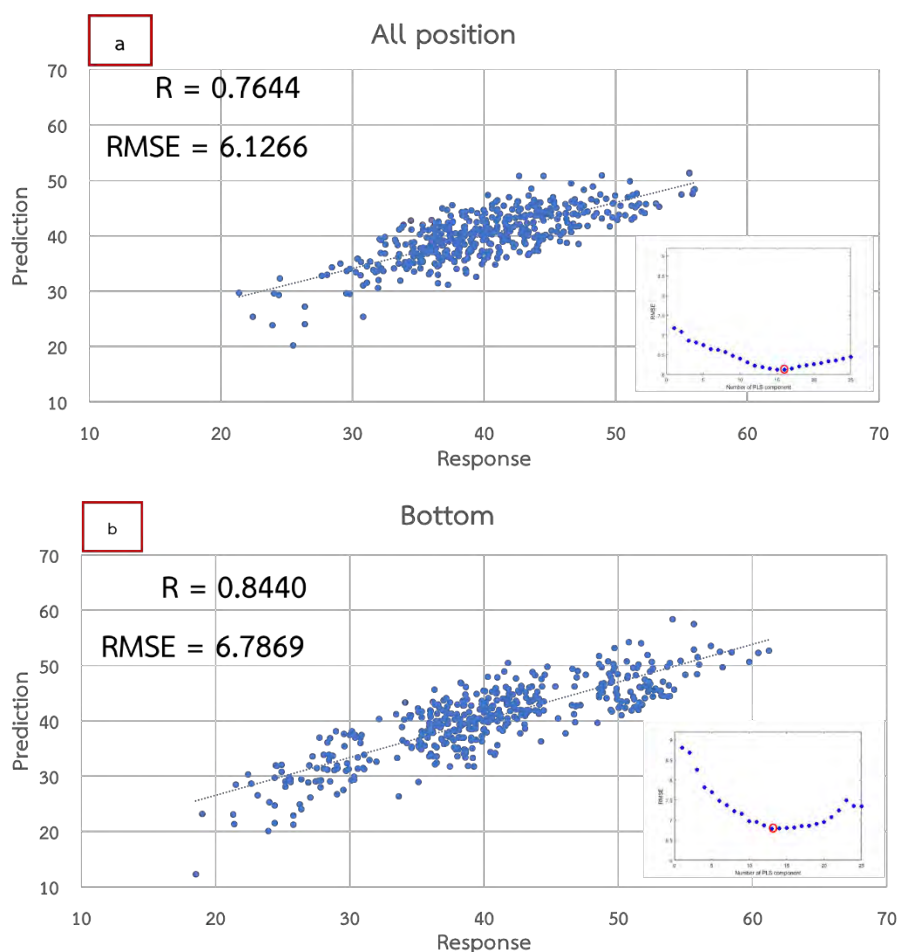
เทคนิคการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (Partial Least Square Regression)

ส่วนนี้เป็นการคำนวณหาสมการโดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์และสถิติในการทำนายค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่จะใช้เทคนิคการถดถอยกำลังสองน้อยสุด (Partial Least Square Regression) โดยจะทำการหาค่าของสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่วงของความยาวคลื่นจากสัมประสิทธิ์การถดถอยกำลังสองน้อยสุด (PLS component) ซึ่งสัมประสิทธิ์เหล่านี้จะทำการคำนวณได้หลายแบบขึ้นอยู่กับ PLS component โดยจะมีเพียงสัมประสิทธิ์เพียงชุดเดียวที่ให้ค่าที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุด โดยวิธีการจัดการข้อมูลเพื่อหาสัมประสิทธิ์ที่ได้จาก PLS component ที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุด ในที่นี้ใช้วิธีตรวจสอบแบบไขว้ หรือ Cross-validation อย่างไรก็ตามค่าความถูกต้องและแม่นยำของสมการที่ได้เพื่อใช้ในการทำนายค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่จะถูกพิจารณาจาก ค่า Correlation coefficient (R) และค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยสุด ($RMSE$) แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.6 แสดงการทำนายความหนาของเปลือกไข่โดยอาศัยสัญญาณเนียร์อินฟราเรดด้วยวิธีการ Partial Least Square Regression จาก (a) สเปกตรัมทุกตำแหน่ง และ (b) สเปกตรัมจากตำแหน่งด้านแหลม

จากรูปที่ 4.6a พบว่าเมื่อพิจารณาจากสัญญาณเนียร์อินฟราเรดที่วัดจากทุกตำแหน่งนั้นสมการที่ให้ค่า $RMSE$ ที่ต่ำที่สุด (0.0230) นั้นอยู่ที่การใช้ 11 PLS component ในการสร้างสัมประสิทธิ์ ในขณะที่เมื่อพิจารณาจากสัญญาณเนียร์อินฟราเรดที่วัดจากตำแหน่งด้านแหลมเท่านั้น พบว่าสมการที่ใช้สัมประสิทธิ์ในการคำนวณจากการใช้ 11 PLS component จะให้ค่า $RMSE$ ที่ต่ำที่สุด (0.0259) ดังรูป 4.6b และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความหนาที่คำนวณได้จากสมการและความหนาจริงที่ได้จากการวัด พบว่าเมื่อใช้สมการที่คำนวณได้จะได้ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น (R) เท่ากับ 0.9071 และ 0.8857 เมื่อพิจารณาจากสัญญาณเนียร์อินฟราเรดที่ได้จากทุกตำแหน่ง และตำแหน่งด้านแหลมเท่านั้นตามลำดับ



รูปที่ 4.7 แสดงการทำนายความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่โดยอาศัยสัญญาณอินฟราเรดด้วยวิธีการ Partial Least Square Regression จาก (a) สเปกตรัมทุกตำแหน่ง และ (b) สเปกตรัมจากตำแหน่งป้าน

จากรูปที่ 4.7a พบว่าเมื่อพิจารณาสัญญาณเนียร์อินฟราเรดจากทุกตำแหน่งนั้นจะมีสมการที่ให้ค่า $RMSE$ ที่ต่ำที่สุด (6.1266) อยู่ที่การใช้ 16 PLS component ในการสร้างสัมประสิทธิ์ที่ดีที่สุด และจากรูปที่ 4.7b เมื่อพิจารณาสัญญาณเนียร์อินฟราเรดจากเฉพาะด้านป่านเท่านั้น จะได้สมการที่ใช้ในการสร้างสัมประสิทธิ์ที่มีค่า $RMSE$ ที่ต่ำที่สุดจากการใช้ 13 PLS component (6.7869) และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความแข็งแรงของเปลือกไข่ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการและค่าความแข็งแรงจริงที่ได้จากการวัด พบว่า จะได้การคำนวณจากสมการจะได้ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น (R) เท่ากับ 0.7644 และ 0.8440 โดยพิจารณาจากสัญญาณเนียร์อินฟราเรดที่ได้จากทุกตำแหน่ง และตำแหน่งด้านป่าน ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและวิธีการทางเคโมเมทริกซ์ในการทำนายความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ โดยจะวัดจากไข่ไก่ทั้งหมด 4 บริเวณ ได้แก่ ตำแหน่งด้านป้าน ด้านแหลมและด้านข้างทั้งสองด้าน จะสามารถสังเกตจากเนียร์อินฟราเรดสเปกตรัมที่เกิดขึ้นได้ว่า จะเกิดสัญญาณของสเปกตรัมที่มีความแตกต่างกันทั้งหมด 4 ช่วงความยาวคลื่น ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่น 1410 – 1510 นาโนเมตร เป็นสัญญาณของโอเวอร์โทนที่หนึ่งของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของโปรตีนในไข่ขาว คาดว่าเป็น ovalbumin, ช่วงความยาวคลื่น 1920 – 2030 นาโนเมตร เป็นสัญญาณของ Fundamental ของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของโมเลกุลน้ำและช่วงความยาวคลื่น 2310 – 2370 นาโนเมตร จะเป็นสัญญาณของโอเวอร์โทนที่สองของหมู่คาร์บอนเนต (-CO) ซึ่งคาดว่าเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต โดยจะมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ในลักษณะของการแปรผันตามส่วนช่วงความยาวคลื่น 2140 – 2210 นาโนเมตร เป็นสัญญาณของโอเวอร์โทนที่หนึ่งและคอมบิเนชันของหมู่เอไมด์ (-CONH₂) ในโปรตีนที่อยู่ในเปลือกไข่ไก่ จะมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ในลักษณะของการแปรผัน

การหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ พบว่า จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ที่ได้จากการวัด จะได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) = 0.4164 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาของเปลือกไข่ไก่ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis) ของสัญญาณสเปกตรัมของเปลือกไข่ไก่จะเห็นได้ว่า แบบจำลองจากความหนาของเปลือกไข่ไก่จะสามารถจัดจำแนกกลุ่มได้ชัดเจนเมื่อใช้สัญญาณของสเปกตรัมจากตำแหน่งด้านแหลม ส่วนแบบจำลองจากความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ จะไม่สามารถจัดจำแนกกลุ่มของไข่ไก่ได้

การหาสมการสอบเทียบในการทำนายค่าความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่โดยใช้วิธีการถดถอยกำลังสองน้อยสุดบางส่วน (Partial Least Square Regression) โดยสร้างสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) สำหรับการทำนายความหนาและความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ เมื่อพิจารณาจากสัญญาณของสเปกตรัมจากทุกตำแหน่งและตำแหน่งด้านป้านจะได้ค่า $RMSE$ ในการทำนายความหนาเท่ากับ 0.0230 และ 0.0259 ตามลำดับ และได้ค่า R เท่ากับ 0.9071 และ 0.8857 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากสัญญาณของสเปกตรัมจากทุกตำแหน่งและตำแหน่งด้านแหลมจะได้ค่า $RMSE$ ในการทำนายความ

แข็งแรงของเปลือกไข่ไก่เท่ากับ 6.1266 และ 6.7869 ตามลำดับ และ ได้ค่า R เท่ากับ 0.7644 และ 0.8440 ตามลำดับ จากข้อมูลที่ได้บอกได้ว่าเทคนิคเนียร์อินพราเรดสเปกโทรสโกปีจะสามารถใช้ในการทำนายค่าความหนาและค่าความแข็งแรงของเปลือกไข่ไก่ได้

เอกสารอ้างอิง

1. มติชนออนไลน์, ไข่ไก่...กินได้ทุกวัย Retrieved from https://www.matichon.co.th/publicize/news_533456 (accessed 21.11.19)
2. CP Brand site, ผลิตภัณฑ์ซีพี. Retrieved from <https://www.cpbrandsite.com/product> (accessed 21.11.19)
3. C. Pasquini, Near Infrared Spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications, Journal of the Brazilian Chemical Society, **2003**, 14
4. C. J. Sun, S. R. Chen, G. Y. Xu, X. M. Liu; N. Yang, Global variation and uniformity of eggshell thickness for chicken eggs, Poultry Science, **2012**, 91, 2718 – 2721
5. C. Xie; Y. He, External characteristic determination of eggs and cracked eggs identification using spectral signature. Scientific Report, **2016**, 6, 21130
6. C. Stefanello, TC Santos, AE Murakami, EN Martin; TC Carneiro, Productive performance, eggshell quality, and eggshell ultrastructure of laying hens fed diets supplemented with organic trace minerals, Poultry Science, **2014**, 93(1), 104 – 113
7. Thermo fisher scientific Nicolet iS5N FT-NIR spectrometer. Retrieved from <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/IQLAADGAAGFAPEMBIE> (accessed 22.11.19)
8. เครื่องทดสอบตั้งโต๊ะแบบเสาคู่รุ่น 5960 Retrieved from <https://www.instron.co.th/th-th/products/testing-systems/universal-testing-systems/electromechanical/5900-series/5960-dual-column> (accessed 22.11.19)
9. M. Vagnini, C. Miliani, L. Cartechini, P. Rocchi, B. G. Brunetti; A. Sgamellotti, FT-NIR spectroscopy for non-invasive identification of natural polymers and resins in easel paintings, Anal Bioanal Chem, **2009**, 395, 2107–2118
10. L. Hopkinsona, P. Kristovab; K. Ruttb, The near-infrared (NIR) spectra of powdered calcite in the 3 –121 μm . mode particle size range, Vibrational Spectroscopy, **2017**, 90, 69 - 73

ประวัติผู้วิจัย

นายศุภกมลพัชร ยิ่งโสภณพิทักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 21 เดือน เมษายน พ.ศ. 2540 ที่จังหวัดตรัง สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬารณราชวิทยาลัย ตรัง จังหวัดตรัง เมื่อปี การศึกษา 2558 และได้รับการเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี ภาควิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2559 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 49/6 หมู่ 5 ตำบลนาตาล่วง อำเภอเมือง จังหวัดตรัง รหัสไปรษณีย์ 92000 อีเมล jungjernjudai@gmail.com