

การทำนายความแน่นเนื้อของเยลลี่และเต้าหู้อ่อนโดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้า

FIRMNESS PREDICTION OF JELLY AND SOFT TOFU USING ELECTRICAL  
PROPERTIES

ปุณณดา อ่อนน้อม  
POONNADA ONNOM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร

คณะอุตสาหกรรมอาหาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2563

KMITL-2020-AI-M-053-354

การทำนายความแน่นเนื้อของเยลลี่และเต้าหู้อ่อนโดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้า

FIRMNESS PREDICTION OF JELLY AND SOFT TOFU USING ELECTRICAL  
PROPERTIES

ปุณณดา อ่อนน้อม  
POONNADA ONNOM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร  
คณะอุตสาหกรรมอาหาร  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2563  
KMITL-2020-AI-M-053-354

FIRMNESS PREDICTION OF JELLY AND SOFT TOFU USING ELECTRICAL  
PROPERTIES

POONNADA ONNOM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE PROGRAM IN FOOD SCIENCE  
FACULTY OF FOOD INDUSTRY  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2020  
KMITL-2020-AI-M-053-354

COPYRIGHT 2020

FACULTY OF AGRO INDUSTRY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำนายความแน่นเนื้อของเยลลี่และเต้าหู้อ่อนโดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้า
นักศึกษา	นางสาวปุณณดา อ่อนน้อม
รหัสประจำตัว	60608011
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์การอาหาร
พ.ศ.	2563
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.สนธิสุข ธีระชัยชยุติ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์(ร่วม) -	

### บทคัดย่อ

ในสถานการณ์ปัจจุบันประเทศไทยเริ่มเข้าสู่สภาวะสังคมที่มีผู้สูงอายุเพิ่มมากขึ้น ปัญหาที่พบในผู้สูงอายุจะเกี่ยวกับเรื่องการย่อยของอาหาร ดังนั้นเนื้อสัมผัสของอาหารจึงมีบทบาทสำคัญที่ควรคำนึงถึง การนำเทคนิคต่างๆเพื่อมาใช้ตรวจสอบเนื้อสัมผัสของอาหารแบบไม่ทำลายตัวอย่างจึงเป็นทางเลือกที่ดี ที่จะสามารถควบคุมคุณภาพของเนื้อสัมผัสให้ได้คุณภาพตามมาตรฐาน ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยการใช้เทคนิคคุณสมบัติทางไฟฟ้า การทดลองนี้อาศัยการพิจารณาคุณสมบัติภายนอกและทางเคมีเพื่อสร้างสมการทำนายค่าความแน่นเนื้อ (texture) ทางด้านของเทคนิคคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะทำการทดลองเกี่ยวกับความแน่นเนื้อของเยลลี่และเต้าหู้อ่อน การผลิตเยลลี่และเต้าหู้อ่อนแต่ละตัวอย่างจะมีความแน่นเนื้อที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละตัวอย่างจะถูกพิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้แก่ ความจุ, ตัวเหนียวนำ, ความต้านทาน, ปัจจัยการกระจาย, ปัจจัยคุณภาพ, มุมเฟสที่ความถี่ต่างๆ (0.012, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50, 100 และ 200 KHz) และพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพคือความแน่นเนื้อ นำมาวิเคราะห์จากข้อมูลทางสถิติ โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติสำเร็จรูป (The Unscrambler) และใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least squares regression, PLSR)

ในส่วนของการทดลองความแน่นเนื้อของเยลลี่ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ 81 ตัวอย่าง สำหรับการสอบเทียบและใช้ 39 ตัวอย่างสำหรับการทำนายผล ความถูกต้องของแบบจำลองในชุดการทำนายได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ที่ 0.636 และค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาดกำลังสองของการทำนาย (RMSEP) ที่ 0.128 N ผลการศึกษาพบว่าเทคนิคการวัดทางไฟฟ้าสามารถใช้ในการหาความแน่นเนื้อของเยลลี่ได้

ในส่วนของการทดลองความแน่นเนื้อของเต้าหู้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ 65 ตัวอย่าง สำหรับการสอบเทียบและใช้ 32 ตัวอย่างสำหรับการทำนายผล ความถูกต้องของแบบจำลองในชุดการทำนายได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ที่ 0.505 และค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาดกำลังสองของการทำนาย (RMSEP) ที่ 6.017 N ผลการศึกษาพบว่าเทคนิคการวัดทางไฟฟ้าสามารถใช้ในการหาความแน่นเนื้อของเยลลี่ได้

<b>Thesis</b>	Firmness prediction of jelly and soft tofu using electrical properties
<b>Student</b>	Miss. Poonnada Onnom
<b>Student ID</b>	60608011
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Food Science
<b>Year</b>	2019
<b>Thesis Advisor</b>	Associate Professor Sontisuk Teerachaichayut, Ph.D.
<b>Thesis Co-Advisor</b>	-

### ABSTRACT

In the current situation, Thailand has started to enter a society with an aging population. Problems encountered in the elderly are related to digestion of food. Therefore, the texture of the food plays an important role to consider. Using various techniques to check the texture of food without destroying samples, it is a good option to be able to control the quality of the texture to meet the standard quality to check the texture of the food. The technique of non-destructive inspection using electrical properties was studied in this research. This experiment was based on the consideration of external and chemical properties in order to create an equation to predict the value of the texture and total solubility in food.

In the technique of electrical properties, experiments were conducted on the firmness of jelly and soft tofu. The production of jelly and soft tofu had different firmness. Each sample was measured electrical properties such as capacitance, inductor, resistance, distribution factor, quality factor, phase angle at various frequencies (0.012, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50, 100 and 200 KHz) and consider the physical properties which were firmness. Analyzed from statistical data by using ready-made statistical analysis program (The Unscrambler) and use the partial least squares regression (PLSR) method.

In the experiment, the firmness of the jelly was analyzed by using 81 samples for calibration and 39 samples for prediction. The accuracy of the model in the prediction set obtained the coefficient of determination ( $R^2$ ) at 0.636 and the root mean square error of prediction (RMSEP) at 0.128 N. The results showed that electrical measurement techniques could be used to find the firmness of jellies. For the soft tofu firmness experiment, data were analyzed using 65 samples for calibration and use 32 samples for prediction. The accuracy of the model in the prediction set obtained the coefficient of determination ( $R^2$ ) at 0.505 and the root mean square Error of

prediction (RMSEP) at 6.017 N. The results showed that electrical measurement techniques could be used to find the firmness of soft tofu.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย รองศาสตราจารย์ สนธิสุข ธีระชัยชยุติ ที่มอบคำแนะนำ คำปรึกษา ความรู้ ความช่วยเหลือ คำชี้แนะช่วยเหลือตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆอย่างเต็มที่ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดีตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น ขอขอบคุณคณะอาจารย์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่สั่งสอนวิชาความรู้ ถ่ายทอดประสบการณ์ต่าง ๆ และนำความรู้เหล่านั้นมาใช้ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณการวิจัยจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งทางตรงและทางอ้อมที่ช่วยให้การสนับสนุนให้การทำเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ ให้แก่เหล่าคณาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาจนทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และขอขอบคุณ บิดามารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ช่วยในการสนับสนุนและช่วยเหลือทุกอย่างตลอดจนจบงานวิจัยสำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียง ผู้เดียว และยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

ปุณณดา อ่อนน้อม  
23 ธันวาคม 2562

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์คำย่อและอักษรย่อ.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เยลลี่.....	3
2.1.1 ความหมายของเยลลี่.....	3
2.1.2 รูปแบบของผลิตภัณฑ์เยลลี่.....	3
2.1.3 ส่วนประกอบของเยลลี่.....	4
2.2 เต้าหู้.....	5
2.2.1 ชนิดของเต้าหู้.....	5
2.2.2 สารที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์เต้าหู้.....	6
2.3 ค่าทางไฟฟ้า.....	7
2.3.1 ความจุไฟฟ้า (capacitance).....	7
2.3.2 อิมพีแดนซ์ (impedance).....	7
2.3.3 ความต้านทานไฟฟ้า (resistance).....	8
2.3.4 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance).....	9
2.3.5 ตัวประกอบคุณภาพ (quality factor).....	9
2.3.6 เฟส (phase).....	10
2.3.7 ตัวประกอบการแผ่กระจาย (dissipation factor).....	11
2.4 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส.....	11
2.4.1 texture analysis.....	11
2.5 การปรับแต่งข้อมูลก่อนการวิเคราะห์.....	11
2.5.1 วิธีอนุพันธ์ (derivative).....	11
2.5.2 วิธี multiplicative scatter correction (MSC).....	12
2.5.3 วิธี smoothing.....	12

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 เครื่องมือวัด.....	12
2.5.1 เครื่องวัด LCR800 (LCR meters).....	12
2.5.2 หลักการวัดด้วยเครื่อง LCR Meter.....	13
2.5.3 ชนิดของเครื่องวัด LCR Meter.....	13
2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	13
2.7.1 วิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน.....	13
2.7.2 วิธี cross-validation test.....	14
2.7.3 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ .....	14
2.7.4 ความน่าเชื่อถือของการประมาณการโดยใช้ regression.....	14
2.7.5 ความคลาดเคลื่อนในการทำนาย.....	14
2.8 เทคนิคการวัดคุณภาพแบบไม่ทำลาย (non – destructive).....	14
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	17
3.1 วัสดุดิบและสารเคมี.....	17
3.1.1 วัสดุดิบ.....	17
3.1.2 สารเคมี.....	17
3.2 เครื่องมือ.....	17
3.3 โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ.....	17
3.4 อุปกรณ์.....	17
3.5 วิธีการทดลอง.....	18
3.5.1 การสร้างอุปกรณ์แท่งวัด.....	18
3.5.2 ผลิตภัณฑ์เยลลี่.....	18
3.5.3 ผลิตภัณฑ์เต้าหู้.....	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	24
4.1 กราฟเปรียบเทียบกลุ่ม texture สูงกับ texture ต่างของผลิตภัณฑ์เยลลี่กับ.....	24
ค่าทางไฟฟ้าต่างๆ	
3.1.1 กราฟเปรียบเทียบกลุ่ม texture สูงกับ texture ต่างของผลิตภัณฑ์เต้าหู้กับ.....	33
ค่าทางไฟฟ้าต่างๆ	
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	42
4.1 สรุปผลการวิจัย.....	42
4.2 ข้อเสนอแนะ.....	42

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	43
ภาคผนวก.....	47
ก. การวัดค่าตัวแปรทางไฟฟ้า.....	48
ข. รูปที่เกี่ยวข้องในการทำการทดลอง.....	49
ประวัติผู้เขียน.....	52

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงการเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างของ calibration และกลุ่ม prediction ของเยลลี่.....	31
4.2 การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลจากการปรับและแก้ไขโดยการตรวจสอบความถูกต้อง.....	31
ของแบบจำลองในชุด calibration ของเยลลี่	
4.3 ผลลัพธ์ทางสถิติของแบบจำลอง PLSR สำหรับ texture ของเยลลี่.....	32
4.4 การเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างของ calibration และกลุ่มของ prediction ของเต้าหู้.....	40
4.5 การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลจากการปรับและแก้ไขโดยการตรวจสอบความถูกต้อง.....	40
ของแบบจำลองในชุดการสอบเทียบของเต้าหู้	
4.6 ผลลัพธ์ทางสถิติของแบบจำลอง PLSR สำหรับ texture ของเต้าหู้.....	41

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเปลี่ยนแปลงสัญญาณ E(V) ของสัญญาณสองสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน.....	10
2.2 แสดงภาพวงจรการวัดตัวเก็บประจุของกล้วย (capacitance sensing system).....	15
3.1 แสดงภาพอุปกรณ์การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง texture analysis.....	19
3.2 เมล็ดถั่วเหลืองยี่ห้อเอโร่หลังแช่น้ำ.....	21
3.3 แยกส่วนของกากถั่วเหลืองกับน้ำออกจากกัน.....	21
3.4 แสดงภาพอุปกรณ์การวัดค่าทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter.....	22
4.1 เปรียบเทียบค่า impedance ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	24
4.2 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ impedance.....	24
4.3 เปรียบเทียบค่า resistance ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	25
4.4 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ resistance.....	25
4.5 เปรียบเทียบค่า quality factor ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	26
4.6 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ quality factor.....	26
4.7 เปรียบเทียบค่า inductance ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	27
4.8 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ inductance.....	27
4.9 เปรียบเทียบค่า phase angle ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	28
4.10 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ phase angle.....	28
4.11 เปรียบเทียบค่า dissipation factor ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	29
4.12 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ dissipation factor.....	29
4.13 เปรียบเทียบค่า capacitance ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	30
4.14 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ capacitance.....	30
4.15 แผนการกระจายของพื้นผิวจริงและพื้นผิวที่คาดการณ์ไว้.....	32
ในชุดการสอบเทียบ (a) และในชุดการทนาย (b)	
4.16 เปรียบเทียบค่า impedance ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	33
4.17 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ impedance.....	33
4.18 เปรียบเทียบค่า resistance ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	34
4.19 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ resistance.....	34
4.20 เปรียบเทียบค่า quality factor ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	35
4.21 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ quality factor.....	35
4.22 เปรียบเทียบค่า inductance ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	36
4.23 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ inductance.....	36
4.24 เปรียบเทียบค่า phase angle ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	37
4.25 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ phase angle.....	37
4.26 เปรียบเทียบค่า dissipation factor ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	38
4.27 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ dissipation factor.....	38
4.28 เปรียบเทียบค่า capacitance ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน.....	39

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ capacitance.....	39
4.30 แผนการกระจายของพื้นผิวจริงและพื้นผิวที่คาดการณ์ไว้.....	41
ในชุดการสอบเทียบ (a) และในชุดการทนาย (b)	
ข.1 เมล็ดถั่วเหลือง.....	49
ข.2 ขั้นตอนการรีดน้ำออกจากเต้าหู้.....	49
ข.3 เครื่องวัดความแน่นเนื้อ texture ยี่ห้อ Texture Technologies รุ่น Ta-hd plus.....	50
ข.4 อุปกรณ์การวัดการวัดค่าทางไฟฟ้าที่ผลิตขึ้น.....	50
ข.5 เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า LCR800.....	51
ข.6 การวัดค่าทางไฟฟ้าของเยลลี่โดยแท่งเหล็กต่อเข้ากับเครื่อง LCR800.....	51

## สัญลักษณ์คำย่อและอักษรย่อ

$\theta$	= phase angle
0.012	= ความถี่ 0.012 KHz
0.05	= ความถี่ 0.05 Hz
0.1	= ความถี่ 0.1 Hz
0.5	= ความถี่ 0.5 Hz
1	= ความถี่ 1 Hz
5	= ความถี่ 5 Hz
10	= ความถี่ 10 Hz
50	= ความถี่ 50 Hz
100	= ความถี่ 100 Hz
200	= ความถี่ 200 Hz
Average	= ค่าเฉลี่ย
C	= ความจุไฟฟ้า (capacitance)
D	= dissipation factor
F	= จำนวนแพ็คเกจของสมการ PLSR
KHz	= กิโลเฮิรตซ์
L	= inductance
MHz	= หน่วยวัดกระแสไฟฟ้า เมกกะเฮิรตซ์
MSC	= การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ (multiplicative scatter correction)
N	= จำนวนตัวอย่าง
nm	= หน่วยวัด นาโนเมตร
PLS	= วิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least squares method)
PLSR	= การวิเคราะห์การถดถอยเชิงสถิติ (partial least squares regression)
Q	= quality factor
$R^2$	= ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination)
R1	= resistance primary
R2	= resistance secondary
RMSEC	= ความน่าเชื่อถือของการประมาณการโดยใช้ regression (root mean square error of calibration)
RMSECV	= ความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (root mean square error of cross validation)
RMSEP	= ค่าผิดพลาดในการทำนาย (standard error of prediction)
SD	= ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)
SEC	= ความผิดพลาดมาตรฐานของการจำลอง (standard error of calibration)
SEV	= standard error of validation

SNV	= การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (standard normal variate)
SPSS	= statistical package for the social science for windows
Z	= impedance

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสถานการณ์ปัจจุบันประเทศไทยเริ่มเข้าสู่สภาวะสังคมที่มีผู้สูงอายุเพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาแนวโน้มของประชากรสูงอายุในประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2503 - พ.ศ. 2543 พบว่า ประชากรผู้สูงอายุที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไปมีเพียง 1.5 ล้านคน หรือประมาณร้อยละ 5.4 ของประชากรทั้งหมดเท่านั้น และการมีการคาดการณ์ประมาณประชากรผู้สูงอายุของประเทศไทยระหว่างปีพ.ศ. 2543 - พ.ศ. 2573 พบว่าประชากรผู้สูงอายุที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไป มีการเพิ่มมากขึ้นเป็น 7.6 ล้านคนในปีพ.ศ. 2552 หรือคิดเป็นร้อยละ 11.5 มีการเพิ่มมากขึ้นถึง 7 เท่าตัว ของประชากรทั้งหมด ซึ่งสถานการณ์ดังกล่าวนี้ทำให้ปีพ.ศ. 2552 เป็นปีที่ประเทศไทยก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ (aging society) (สมศักดิ์ ชุณหรัศมิ์. 2553: 8-9)

โดยผู้สูงอายุหมายถึง ผู้ที่มีอายุเกิน 60 ปีขึ้นไป มักจะเกิดความเปลี่ยนแปลงทางด้านจิตใจ และร่างกาย เมื่อร่างกายเจริญเติบโตถึงขีดสุด การเปลี่ยนแปลงภายในและภายนอกจึงเกิดการเสื่อมสลาย เมื่อเข้าสู่วัยสูงอายุ การทำงานของระบบประสาทต่างๆ จะลดลง ซึ่งเป็นปัญหาที่พบมากจะเป็นเรื่องเกี่ยวกับฟัน ต่อมน์น้ำลายหลังสารได้น้อยลง มีผลทำให้การบดเคี้ยวอาหารภายในปากเป็นไปได้ไม่ดี เมื่ออาหารมาถึงกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กจึงมีปัญหาด้านการย่อยและการดูดซึมเพราะน้ำย่อยในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กมีน้อยลงส่งผลให้อาหารย่อยไม่ได้ (สุพัตรา แสงรุจิ. 2555)

ดังนั้นเนื้อสัมผัสของอาหารจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากที่ส่งผลต่อสุขภาพของผู้สูงอายุ ในประเทศญี่ปุ่นได้ใส่ใจในเรื่องผู้สูงอายุมากทั้งภาครัฐและเอกชนมีการพัฒนาอาหารเพื่อผู้สูงอายุเรียกว่า “universal design food” เพื่อช่วยสำหรับผู้สูงอายุที่มีปัญหาด้านการเคี้ยว การกลืนและการย่อยอาหาร universal design food จะมีเกณฑ์การแบ่งระดับมาตรฐานทางกายภาพความแข็งของเนื้อสัมผัสอาหารผู้สูงอายุแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบได้แก่ กลุ่มเนื้อสัมผัสอ่อนนุ่มจะเหมาะสมกับความสามารถในการเคี้ยวของผู้สูงอายุแต่ละระดับ เป็นอาหารที่เคี้ยวง่าย กลุ่มโภชนาการครบถ้วนเหมาะกับคนสูงอายุที่ฟันไม่เหลือแล้ว เหลือแต่เหงือกเอาไว้ขบอาหาร กลุ่มโรคประจำตัวเหมาะสมสำหรับคนสูงอายุที่เหงือกก็เริ่มเจ็บขบอาหารไม่สะดวก และกลุ่มปัญหาเรื่องการกลืนเหมาะสำหรับคนสูงอายุที่ต้องกลืนอาหารได้เพียงอย่างเดียว โดยเกณฑ์เนื้อสัมผัสที่เหมาะสมกับผู้สูงอายุ จะต้องไม่นิ่มเกินไปจนมีลักษณะเหลวหรือแข็งมากเกินไปเพราะจะลำบากต่อการเคี้ยวและการกลืน (เนตรนภิส วัฒนสุชาติ. 2562) ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์เชิงคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส ซึ่งการตรวจสอบจะแบ่งได้เป็น 2 แบบได้แก่ การทดสอบเชิงวัตถุวิสัย (objective method) โดยใช้เครื่องมือวัด และการประเมินโดยใช้ประสาทสัมผัส (sensory evaluation) ซึ่งใช้คนหรือผู้ชิมในการประเมิน ซึ่งการทดสอบเนื้อสัมผัสทางวัตถุวิสัยวิธีการทดสอบจะมีการทดสอบแรงกด (compression test) การทดสอบแรงดึง (tensile test) การทดสอบแรงกดทะลุ (penetration test) การทดสอบการโค้งตัว (bending test) การทดสอบแรงตัด (cutting test) และการทดสอบแรงผลักดัน (extrusion test) เป็นต้นซึ่งวิธีการทดสอบเหล่านี้จะเป็นการทำลายตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้จะทำการผลิตเยลลี่และเต้าหู้อ่อนขึ้นมา โดยจะกำหนดให้มีความอ่อนนุ่มน้อยไปจนถึงอ่อนนุ่มมาก เพื่อให้มีความแตกต่างทางด้านเนื้อสัมผัส โดยให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของทาง universal design food โดยจะนำเอาเทคนิคการวัดทางไฟฟ้ามาใช้เพื่อวิเคราะห์เพื่อหาความแน่นเนื้อของตัวอย่างแบบไม่ทำลาย โดยเทคนิคนี้เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ราคาถูกและไม่ใช้สารเคมี ผลงานวิจัยจะสามารถนำไปใช้ตรวจสอบและคัดแยกผลิตภัณฑ์อาหารแบบออนไลน์สำหรับผู้สูงอายุ เพื่อให้มีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มเหมาะสมกับการกลืน อีกทั้งยังทำให้อาหารของผู้สูงอายุอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานโดยไม่ต้องทำลายตัวอย่าง

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ของความแน่นเนื้อของเยลลี่และเต้าหู้อ่อนกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ

1.2.2 เพื่อให้ได้สมการในการทำนายความแน่นเนื้อของเยลลี่และความแน่นเนื้อ เต้าหู้อ่อนแบบไม่ทำลายตัวอย่างโดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในการวิจัยจะมุ่งเน้นศึกษาความแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์เยลลี่และเต้าหู้อ่อน โดยจะทำการผลิตเยลลี่และเต้าหู้อ่อนที่มีระดับความแน่นเนื้อที่แตกต่างกัน จากนั้นจะทำการวัดด้วยคุณสมบัติทางไฟฟ้าและอ้างอิงค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐาน ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อสร้างสมการสำหรับทำนายค่าความแน่นเนื้อจากนั้นทดสอบความแม่นยำของสมการที่ได้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำไปใช้ตรวจสอบและคัดแยกผลิตภัณฑ์อาหารสำหรับผู้สูงอายุ เพื่อให้อาหารอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานโดยไม่ต้องทำลายตัวอย่าง

1.4.2 ช่วยในการตรวจสอบความแน่นเนื้อ และได้ค่าตัวแปรที่สำคัญจากการทดลองเพื่อมาทำนายอาหารของผู้สูงอายุแบบไม่ทำลาย

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เยลลี่

2.1.1 ความหมายของเยลลี่ ได้มีผู้ให้ความหมายของเยลลี่ไว้ 2 แนวคิด

2.1.1.1 เยลลี่ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำผลไม้ หรือน้ำผลไม้เข้มข้น เช่น สับปะรด สตรอว์เบอร์รี มะนาว ส้ม กับสารที่ให้ความหวาน (sweetening agent) และสารที่ทำให้เกิดเจล (gelling agent) เช่น เจลาติน (gelatin) คาราจีแนน (carrageenan) นำมาให้ความร้อนเพื่อให้ส่วนผสมละลาย แล้วทิ้งไว้ให้เย็น จะมีลักษณะเป็นเจล (gel) โปร่งแสง เยลลี่ที่ดี ต้องมีลักษณะใสและมีเนื้อสัมผัส อ่อนนุ่มแต่ไม่เหนียวจนหนืด และไม่เหลว ต้องแข็งพอที่จะคงรูปเดิมเมื่อตัด มีความหยุ่นตัว ผลไม้ไทยมีกลิ่นรสและสีต่างๆสามารถทำเป็นเยลลี่ได้ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547)

2.1.1.2 เยลลี่ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำผลไม้ที่ได้จากการคั้นหรือสกัดจากผลไม้สดผสมกับสารที่ทำให้เกิดเจล มีความข้นหนืดพอเหมาะ ไม่มีเนื้อผลไม้เจือปน ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพและลักษณะที่ดีของเยลลี่ ได้แก่ ชนิดของน้ำตาลที่ใช้ ควรเป็นน้ำตาลทรายจากอ้อย เพราะไม่เกิดผลึก อุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่น้ำผลไม้ไม่ควรเกิน 100 องศาเซลเซียส เพราะจะส่งผลให้สารที่ทำให้เกิดเจลสลายตัว เป็นสาเหตุที่เยลลี่ไม่แข็งตัว สารที่ช่วยในการทำให้เกิดเจล คือ สารคาราจีแนน ซึ่งสกัดมาจากสาหร่าย สามารถละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส มีการยืดหยุ่นได้ดี food and drug administration ได้รวมสารนี้ไว้ใน generally recognized as safe life เนื่องจากผลการทดลองเกี่ยวกับด้านพิษวิทยาพิสูจน์แล้วว่า สารนี้ไม่เป็นอันตรายกับสัตว์ ทดลองและได้รับอนุญาตให้ใช้ในอาหารได้ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 84

2.1.2 รูปแบบของผลิตภัณฑ์เยลลี่สามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ

2.1.2.1 เยลลี่ชนิดเหลว ที่รับประทานเป็นอาหารว่าง (dessert jelly) เป็นเยลลี่ที่มีเนื้อสัมผัสนุ่ม มีน้ำมาก มักรับประทานแบบแช่เย็น เป็นของหวานที่จะทานหลังมื้ออาหาร เยลลี่ประเภทนี้ มีส่วนผสมของสารที่ทำให้เกิดเจล ได้แก่ คาราจีแนน ผงบุก มีการเติมน้ำตาล กรดซิตริก สีผสมอาหาร และสารปรุงแต่งกลิ่นรส (flavoring agent) ผลิตภัณฑ์มีทั้งรสหวานและรสเปรี้ยว ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่พบในท้องตลาด อาจเป็นผงเยลลี่ผสมสำเร็จรูปที่ผู้บริโภคนำมาผสมน้ำร้อนตามสัดส่วน แล้วแช่เย็นเพื่อให้เกิดเจล อีกรูปแบบหนึ่งคือ เยลลี่ที่พร้อมรับประทานบรรจุถ้วยในภาชนะที่ปิดผนึกสนิท

2.1.2.2 เยลลี่แข็ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผลไม้ ผัก ธัญชาติ (cereal grain) มาคั้นหรือสกัดแล้วผสมกับสารให้ความหวาน (sweetener) และสารที่ทำให้เกิดเจล (gelling agent) เช่น เจลาติน คาราจีแนน วัณในปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในลักษณะแข็งและเหนียว อาจผสมกรดผลไม้และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ผลไม้ ผัก ธัญชาติ เคี้ยวให้มีความข้นเหนียวพอเหมาะ

ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม แต่งสีและกลิ่นรส อาจคลุกด้วยน้ำตาลหรือแป้งบริโกลด์ รับประทานเป็นขนมหวาน (confectionery jelly) เยลลี่ชนิดนี้ มีเนื้อเหนียวหนึบแห้งไม่ติดมือ

### 2.1.3 ส่วนประกอบของเยลลี่

2.1.3.1 สารที่ทำให้เกิดเจล (gelling agent) ส่วนประกอบที่สำคัญคือ กัม (gums) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดเจล ชนิดของกัมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ คาราจีแนน และเจลาติน

2.1.3.1.1 Karim and Rajeev (2009) เจลาตินเป็นสารสารก่อเจลประเภทโปรตีน วัตถุประสงค์ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเจลาตินมักใช้กระดูก และหนังเนื่องจากจะให้เจลาตินที่มีคุณภาพดีเจลาตินเป็นสายพอลิเมอร์ของโปรตีนประกอบด้วยกรดอะมิโนชนิดต่างๆ มาต่อกันเป็นสายยาวระหวังกกรดอะมิโนแต่ละชนิดจะมีพันธะเพปไทด์เชื่อม

2.1.3.2 สารให้ความหวาน (sweetener) เยลลี่ส่วนใหญ่ใช้น้ำตาลซูโครส เป็นสารที่ให้ความหวาน น้ำตาลซูโครสจะช่วยให้เพกติน เกิดโครงสร้างเป็นเจล ซึ่งปริมาณน้ำตาลที่ใช้จะขึ้นอยู่กับปริมาณเพกติน และความเป็นกรดต่างของเนื้อหรือน้ำผลไม้ชนิดนั้นๆ ถ้าปริมาณ เพกตินมาก ปริมาณน้ำตาลที่ใช้ต่อน้ำหนักของผลไม้ก็มากด้วย ถ้าผลไม้ชนิดนั้นมีความเป็นกรดสูง(รสเปรี้ยวมาก) ปริมาณน้ำตาลที่ใช้ต่อน้ำหนักผลไม้หรือน้ำผลไม้ควรใช้ปริมาณน้ำตาลไม่สูงกว่า 70 องศาบริกซ์ (วัดโดยใช้ refractometer) นอกจากน้ำตาลซูโครส ยังมีสารให้ความหวานอื่นๆ ที่อนุญาตให้ใช้ในเยลลี่ตาม มอก. 236-2521 มีหลายชนิด ได้แก่ น้ำตาลอินเวิร์ต (invert sugar) อินเวิร์ตไซรัป (invert syrup) เดกซ์โตรส (dextrose) ฟรุคโตสไซรัป (fructose syrup) กลูโคสไซรัป (glucose syrup) และทรายกลูโคสไซรัป (dried glucose syrup)

2.1.3.3 สารควบคุมความเป็นกรดและควบคุมความเป็นกรดต่าง (acidifying และ pH regulating agents) มีความสำคัญต่อรสของผลิตภัณฑ์และช่วยให้เจลอยู่ตัวมากขึ้น ถ้ามีกรดมากเกินไปจะทำลายความคงตัวของเจลได้ โดยปกติความเป็นกรดเป็นต่าง (pH) ของเยลลี่อยู่ ระหว่าง pH 2.8 - 3.5 ส่วน pH ที่เหมาะสมที่สุดคือ pH 3.2 ในการปรับความเป็นกรด-ต่าง ของเยลลี่ ตาม มอก.263-2521 ได้กำหนดสารที่ใช้เพิ่มและควบคุมความเป็นกรด-ต่าง ได้แก่ กรดซิตริก (citric acid) กรดมาลิก (malic acid) กรดแลกติก (lactic acid) กรดฟูมาลิก (fumaric acid) และเกลือ โซเดียมโปตัสเซียมและแคลเซียมของกรดเหล่านี้ โซเดียมและโปตัสเซียมไบคาร์บอเนต

2.1.3.4 สี กลิ่นรส หรือน้ำผลไม้ จะช่วยปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้มีลักษณะน่ารับประทาน เพิ่มมากขึ้น น้ำผลไม้ที่ใช้เป็นส่วนผสมในเยลลี่ต้องเป็นน้ำผลไม้แท้ หรือน้ำสกัดได้จากผลไม้ที่ผ่านการกรอง เพื่อให้ใสปราศจากชิ้นหรือเศษผลไม้ และอาจทำให้ข้นโดยการระเหยน้ำออก และน้ำผลไม้หรือน้ำสกัดจากผลไม้ที่ใช้ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 20 ของน้ำหนัก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547)

## 2.2 เต้าหู้

ถั่วเหลืองมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Glycin max* (L.) Merr. เป็นพืชที่อยู่ในตระกูล Leguminosae มีชื่อภาษาอังกฤษว่า Soja Bean หรือ Soybean เป็นพืชตระกูลถั่ว เนื่องจากในถั่วเหลืองมีสารอาหารต่างๆซึ่งประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน แคลเซียม ฟอสฟอรัส และวิตามิน จึงทำให้ถั่วเหลืองมีสรรพคุณทางยาและคุณค่าทางอาหาร เช่น ใช้โยอาหารที่มีไขมันเลว ถั่วเหลืองเป็นอาหารของคนที่เป็นโรคเบาหวานแทนการฉีดอินซูลิน นอกจากนี้ในเมล็ดถั่วเหลืองยังมีเลซิทีนซึ่งเป็นสารบำรุงสมองช่วยเพิ่มความทรงจำ และลดคอเลสเตอรอลในร่างกายอีกด้วย ในการที่นำถั่วเหลืองมาใช้ประโยชน์นั้นส่วนใหญ่มักแปรรูปถั่วเหลืองเป็นนมถั่วเหลือง เต้าหู้ เต้าเจี้ยว และขนมหวานจำพวกเต้าส่วน ซึ่งล้วนแต่เป็นอาหารหรือส่วนประกอบในอาหารที่คนส่วนใหญ่รู้จักเป็นอย่างดี

เต้าหู้ เป็นผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองซึ่งให้คุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเฉพาะโปรตีน ซึ่งให้โปรตีนมากกว่าเนื้อสัตว์บางชนิดถึง สองเท่าในปริมาณที่เท่ากันและมีราคาถูกอีกด้วย เต้าหู้ยังเป็นอาหารที่ย่อยง่าย ไม่มีคอเลสเตอรอล โดยวัตถุดิบ ถั่วเหลืองยังมีสารเลซิทีน ซึ่งมีผลในการลดไขมัน และช่วยส่งเสริมการทำงานของระบบประสาทที่เกี่ยวข้องกับความทรงจำ และฮอร์โมนจากพืช ไฟโตเอสโตรเจน ที่มีการวิจัยพบว่ามีผลในการป้องกันมะเร็งและมีผลดีต่อผู้หญิงวัยทองคือช่วยชะลอภาวะหมดประจำเดือนและลดความเสี่ยงในการเป็นมะเร็งเต้านม

### 2.1.1 ชนิดของเต้าหู้เต้าหู้ แบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด

2.1.1.1 เต้าหู้ชนิดอ่อน หรือเต้าหู้ชนิดเหลืองนิ่ม วิธีการทำต่างจากเต้าหู้ขาวแข็ง เพราะใช้แคลเซียมซัลเฟต (ผงยิปซัม หรือที่เรียกในภาษาจีนแต้จิ๋วว่า"เจียะกอ") ในการทำให้โปรตีนในน้ำนมถั่วเหลืองตกตะกอน ซึ่งเนื้อจะเนียนและไม่แข็งเท่าเต้าหู้ขาวแข็ง เมื่อตกตะกอนแล้วนำมาใส่ผ้าขาวบางห่อในบล็อกให้เป็นก้อนแล้วนำไปต้ม ใส่ไขมันให้ได้สีเหลือง คุณสมบัติเด่นของเต้าหู้เหลืองนิ่มคือ เมื่อนำไปทอดแล้วจะทำให้ได้เต้าหู้ที่กรอบนอกนุ่มใน เต้าหู้ชนิดนี้เหมาะที่จะนำไปผัดกับกุนเชียง ขาว ทอดจิ้มน้ำจิ้มเปรี้ยวหวาน ทอดกินกับน้ำพริกกะปิหรือทอดจิ้มกับน้ำจิ้มซีฟู้ดก็ได้ เต้าหู้ชนิดขาวอ่อน ลักษณะอ่อนนุ่มกว่าเต้าหู้เหลืองนิ่ม กรรมวิธีการผลิตเหมือนกับเต้าหู้เหลืองนิ่มจะต่างกันเพียงเวลาในการทำน้อยกว่า เต้าหู้ชนิดนี้นิยมนำไปทำเป็นแกงจืด เต้าหู้หนึ่งหรือสติกเต้าหู้ เต้าหู้ชนิดห่อผ้า วิธีการทำเหมือนกับเต้าหู้ชนิดขาวอ่อน ต่างกันเพียงการบรรจุหีบห่อที่นำมาห่อผ้าแล้วมัดทำให้แข็งและคงรูปร่างได้ดีมากขึ้นเมื่อนำไปทำอาหาร ส่วนใหญ่จะนำไปทำเต้าหู้ทรงเครื่องหรือแกงจืด

2.1.1.2 เต้าหู้ชนิดแข็ง หรือ เต้าหู้ชนิดขาวแข็ง ทำจากน้ำเต้าหู้ผสมกับดีเกลือ (แมกนีเซียมซัลเฟต) ที่ช่วยทำให้เกิดการตกตะกอนเมื่อตกตะกอนแล้วจึงนำไปใส่ในผ้าขาวที่ปูอยู่ในบล็อก พอสะเด็ดน้ำแล้วจึงห่อให้เป็นก้อนแล้วทำให้สะเด็ดน้ำอีกครั้งก็จะได้เป็นเต้าหู้ขาวแข็ง เต้าหู้ชนิดเหลืองแข็ง วิธีการทำนำเต้าหู้ขาวแข็งไปหมักในเกลือแล้วจึงนำไปต้ม พร้อมทั้งใส่ไขมันให้เป็นสีเหลืองเคลือบบริเวณผิวของเต้าหู้ทำให้เนื้อเต้าหู้ชนิดนี้แข็งและมีความยืดหยุ่นกว่าชนิดขาวแข็ง ส่วนใหญ่นำไปทำผัดไทย หมี่กะทิ ผัดถั่วงอก ผัดขลุกขลิกน้ำพริกเผาหรือนำไปผสมเป็นเครื่องก๋วยเตี๋ยวหลอด เต้าหู้ชนิดทอด มีส่วนประกอบคล้ายกับเต้าหู้ขาวแข็งแต่มีสัดส่วนและเทคนิคที่แตกต่างกัน เนื้อสัมผัสที่ได้จากเต้าหู้ชนิดนี้มีความอ่อนนุ่มกว่าเต้าหู้ขาวแข็ง เมื่อนำไปทอดแล้วจะพองตัวมากกว่าและ

ภายในจะมีเนื้อเต้าหู้นุ่มพองหรือกลวง โดยมากจะใส่ในอาหารประเภทต้ม (พะโล้ ต้มผัดจับฉ่าย แกงต่างๆ และลูกชิ้นแคะ) เต้าหู้ชนิดซีอิ้วดำ วิธีทำนำเต้าหู้ชนิดเหลืองแข็งไปเคี่ยวกับซีอิ้วดำและเครื่องเทศสมุนไพรต่างๆ เพื่อให้เกิดกลิ่นหอมและรสชาติที่แตกต่างโดยใส่น้ำตาลทรายแดงทำให้มีรสชาติที่กลมกล่อมสามารถเก็บไว้ได้นานกว่าเต้าหู้ชนิดอื่นๆ เพราะมีความชื้นน้อย ถ้าเก็บใส่ช่องฟรีซ จะเก็บไว้ได้นานหลายเดือน นิยมนำไปยำกับเกี่ยมไฉ่ ผักกาดอกกุยช่าย ใส่ในอาหารเจแทนเนื้อหมูในพะโล้เจหรือทานเป็นอาหารว่าง

2.1.1.3 เต้าหู้หลอด เป็นเต้าหู้เนื้อนิ่มมีสองชนิดคือ ชนิดที่ทำมาจากถั่วเหลืองล้วน และชนิดที่ทำจากไข่ไก่ (เรียกว่าเต้าหู้ไข่ซึ่งไม่มีส่วนผสมของถั่วเหลืองแต่อย่างใด) นิยมนำมาใส่ในแกงจืด สุกียากี้ ทำเต้าหู้อบ เต้าหู้ตุ๋นหรือนำมาคลุกกับแป้งข้าวโพดแล้วทอด

2.1.1.4 เต้าหู้พวง เป็นเต้าหู้หั่นเป็นชิ้นแล้วทอด ร้อยเชือกขายเป็นพวงใช้ใส่ในก๋วยเตี๋ยวเย็นตาโฟและพะโล้

2.1.1.5 เต้าหู้โมเมน เป็นการผลิตแบบญี่ปุ่นเช่นกัน เนื้อเหมือนเต้าหู้ขาวอ่อนสามารถนำไปประกอบอาหารได้เช่นเดียวกับเต้าหู้ขาวอ่อน

## 2.1.2 สารที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์เต้าหู้

2.1.2.1 แคลเซียมซัลเฟต (calcium sulfate) หรือเรียกอีกอย่างว่ายิปซัม คือแคลเซียมซัลเฟตซึ่งมีน้ำรวมอยู่ด้วย (dihydrate) สูตรเคมีของแร่ยิปซัมคือ  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  โดยประกอบด้วยซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) 46.5% แคลเซียมออกไซด์ (CaO) 32.6% และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 20.9% คุณสมบัติทั่วไปของแร่ยิปซัม แร่ยิปซัมมีหลายรูปแบบแต่ที่พบโดยทั่วไปมักพบเป็นแบบเนื้อแน่น มีรูปผลึกเฉพาะ เช่น เป็นผลึกใส เป็นแผ่นบางโปร่งใส เรียกว่า เซเลไนต์ (selenite) ส่วนยิปซัมที่พบเป็นมวลอัดแน่น เรียกว่า อะลาบาสเตอร์ (alabaster) และชนิดเป็นเส้นใยเรียกว่า ซาทินสปาร์ (satinspar) (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2552)

2.1.2.2 แมกนีเซียมซัลเฟต (magnesium sulfate) หรือดีเกลือ คือสารประกอบเกลือซัลเฟตของโซเดียมและแมกนีเซียม ดีเกลือช่วยให้โปรตีนในน้ำนมถั่วเหลืองตกตะกอน ทำให้เต้าหู้แข็งเป็นก้อน ทั้งเต้าหู้ขาว และเต้าหู้เหลือง ดีเกลือแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ดีเกลือไทยและดีเกลือฝรั่ง ซึ่งทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติและลักษณะแตกต่างกัน

2.1.2.2.1 ดีเกลือไทย มีสูตรทางเคมีว่า  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ดีเกลือชนิดที่เป็นเกลือซัลเฟตของโซเดียม หรือเรียกง่าย ๆ ว่า "โซเดียมซัลเฟต" มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น มีรสเค็ม มีคุณสมบัติเป็นถ่ายพิษเสมหะและโลหิต ถ่ายอุจจาระ ถ่ายพรรตึก ทำให้เส้นเอ็นหย่อน

2.1.2.2.2 ดีเกลือฝรั่ง มีสูตรทางเคมีว่า  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ดีเกลือชนิดที่เป็นเกลือซัลเฟตของแมกนีเซียม หรือเรียกว่า "แมกนีเซียมซัลเฟต" เรียกเป็นภาษาสามัญแบบฝรั่งว่า epsom salts มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวหรือใส คล้ายผงชูรส ไม่มีกลิ่น ละลายน้ำได้ รสเค็ม มีคุณสมบัติเป็นยาระบายถ่ายอุจจาระ ถ่ายพิษเสมหะและโลหิต นิยมนำเอามาใช้ในการรักษาปลา และยังมีการนำไปใช้ในการเกษตรเรื่องเอาไปช่วยรักษาดินที่ขาดแมกนีเซียม นอกจากนี้สาวๆ ยังนิยมนำไปเป็นส่วนผสมในการรักษาผิวแบบประหยัดอีกด้วย

## 2.3 ค่าทางไฟฟ้า

2.3.1 ความจุไฟฟ้า (capacitance) คือความสามารถในการเก็บประจุของตัวนำไฟฟ้า หรือปริมาณประจุไฟฟ้า ที่ทำให้ตัวนำมีค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรือลดลง 1 หน่วย ตัวนำใดมีความจุไฟฟ้ามาก แสดงว่าจะต้องใช้ประจุไฟฟ้าจำนวนมากในการทำให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ตัวนำใดมีความจุไฟฟ้าน้อย ศักย์ไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นจากเดิมมาก ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับมีตัวแปรที่สำคัญหนึ่งตัวคือค่าความจุไฟฟ้า (capacitance: C) มีหน่วยเป็น ฟารัด (farad: F) ส่วนมากจะนิยมแสดงเป็น นาโนฟารัด (nF) และพิโคฟารัด (pF) ตัวเก็บประจุส่วนมากแล้วทำจากแผ่นโลหะสองแผ่นที่วางขนานกันแต่มีระยะห่างที่เหมาะสม มีฉนวนซึ่งส่วนมากเป็นอากาศกั้นกลางสำหรับตัวเก็บประจุปรับค่าได้ และมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$C = \frac{A\epsilon_0}{d} \quad (1)$$

เมื่อ A คือพื้นที่หน้าตัดของโลหะ มีหน่วยเป็น ตารางเมตร

เมื่อ C คือค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นฟารัด

เมื่อ d คือระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะ มีหน่วยเป็นเมตร

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอาหาร มีความสำคัญกับการออกแบบเครื่องจักรอุปกรณ์แปรรูปอาหาร กระบวนการแปรรูปอาหาร เช่น การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric material) มีความเป็นขั้ว (polar) สูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดี หรือเป็นฉนวนไฟฟ้า ในแง่ของการทำละลาย ของเหลวที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง เช่น น้ำ จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการแตกตัวของ electrolyte ในน้ำได้ง่าย สารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกใกล้เคียงกันมักจะละลายซึ่งกันและกันได้ดี (สมศักดิ์ เสนาใหญ่. 2554)

Zhu, X. et.al. (2012) มีงานวิจัยที่ศึกษาการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับตัวอย่างผลไม้เช่น องุ่น, สัม พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนั้นจะลดลงถ้าความถี่ไฟฟ้าสูงขึ้น ทั้งยังพบอีกว่าสภาวะที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าไดอิเล็กตริกที่สูงกว่าสภาวะการทดลองที่อุณหภูมิสูง

2.3.2 อิมพีแดนซ์ (impedance) เป็นการวัดความต้านทานที่วงจรไฟฟ้ามีการต่อต้านต่อกระแสเมื่อมีการจ่ายแรงดัน ในความหมายด้านปริมาณ มันเป็นอัตราส่วนที่ซับซ้อนของแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสในวงจรกระแสสลับ (AC) อิมพีแดนซ์ขยายแนวของความต้านทานไปยังวงจร AC และครอบคลุมทั้งขนาดและเฟส ซึ่งแตกต่างจากความต้านทานกระแสตรง (DC) ซึ่งมีเพียงขนาดเท่านั้น เมื่อวงจรถูกขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (DC) มันจะไม่มี ความแตกต่างระหว่างอิมพีแดนซ์และความต้านทาน ความต้านทานจะเป็นอิมพีแดนซ์ที่มีมุมเฟส (phase angle) เป็นศูนย์ อิมพีแดนซ์จะถูกกำหนดเป็นอัตราส่วนแบบโดเมนความถี่ของแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสซึ่งเป็นอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสสำหรับค่าเอกโพเนนเชียลที่ซับซ้อนเชิงเดียวที่ความถี่เฉพาะ  $\omega$  โดยทั่วไป อิมพีแดนซ์จะเป็นตัวเลขที่ซับซ้อนตัวหนึ่ง ที่มีหน่วยเดียวกันกับความต้านทานอิมพีแดนซ์ (impedance: Z) หรือ

ความต้านทานเชิงซ้อน มีหน่วยเป็นโอห์ม (ohm,  $\Omega$ ) เช่นเดียวกับความต้านทาน (R) หากว่าแตกต่างกันตรงที่อิมพีแดนซ์เป็นผลรวมของความต้านทานทั้งจากตัวต้านทาน รวมทั้งตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ มีความสัมพันธ์ (Roadstrum and Wolaver. 1994)

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2)$$

เมื่อ Z คือค่าอิมพีแดนซ์ มีหน่วยเป็น โอห์ม

เมื่อ V คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt, V)

เมื่อ I คือค่ากระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere, A)

Zywica, R. et.al. (2003) ได้ศึกษาความเข้มข้นของน้ำแอปเปิ้ลพิวรี โดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเช่น อิมพีแดนซ์ , ความต้านทานไฟฟ้า, ความนำไฟฟ้า และค่าแอดมิตแตนซ์ เป็นเครื่องมือในการจำแนกสรุปผลการศึกษาว่า ความเข้มข้นที่แตกต่างกันของน้ำแอปเปิ้ลสามารถใช้ คุณสมบัติทางไฟฟ้าเหล่านี้จำแนกได้ เนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหล่านี้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความเข้มข้นของน้ำแอปเปิ้ลที่แตกต่างกัน

2.3.3 ความต้านทานไฟฟ้า (resistance) ความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้า เป็นตัวชี้วัดของความยากลำบากในการที่จะผ่าน กระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวนำนั้น ปริมาณที่ตรงกันข้ามคือ การนำไฟฟ้า เป็นความสะดวกที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ความต้านทานไฟฟ้าเปรียบเหมือน แรงเสียดทาน ทางเครื่องกล หน่วย SI ของความต้านทานไฟฟ้าจะเป็น โอห์ม สัญลักษณ์  $\Omega$  ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานไฟฟ้า ตัวแปรหลายชนิดที่มีผลต่อความต้านทานไฟฟ้าเช่นความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ, ความชื้น, ความหนาแน่น, อุณหภูมิและโครงสร้างของอาหารนั้นๆ สรุปเป็นสมการได้ว่า (Harrington. 2001)

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทาน มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm , $\Omega$ )

เมื่อ  $\rho$  คือ ค่าสภาพต้านทาน (resistivity) มีหน่วยเป็นโอห์มเมตร ( $\Omega.m$ ) เป็นค่าเฉพาะของสารต่างๆ แปรผันตามอุณหภูมิ

เมื่อ l คือ ความยาวลวดโลหะ มีหน่วยเป็น เมตร

เมื่อ A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของลวดโลหะ มีหน่วยเป็นตารางเมตร

ความต้านทานไฟฟ้า เป็นการบอกคุณสมบัติของสารในการต้านกระแสไฟฟ้าที่จะผ่านได้มากน้อยเพียงใด โดยสารที่มีความต้านทานมาก กระแสจะผ่านไปได้น้อย ส่วนสารที่มีความต้านทานน้อย กระแสจะผ่านไปได้มาก (นิรันดร์ สุวรรณ์ 2553: 174)

2.3.4 ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance) ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance: L) เป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ มีหน่วยเป็นเฮนรี (henry, H) หากต่อกับวงจรร่วมกับตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ค่าความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุ จะมีเฟสนำหน้าตัวต้านทาน 90 องศา คุณสมบัติของวงจรไฟฟ้าที่ ตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจร เมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง แรงดันไฟฟ้าจะถูกเหนี่ยวนำ ให้เกิดขึ้นในลวดตัวนำไฟฟ้าโดยสนามแม่เหล็ก ขั้วของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะกระทำตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงเรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าตรงข้าม มีการเหนี่ยวนำไฟฟ้า 2 แบบ คือ การเหนี่ยวนำในตัวเอง (self-inductance) ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตรงข้ามในวงจรที่มีกระแสไหลผ่านตัวเอง และการเหนี่ยวนำซึ่งกันและกัน (mutual inductance) ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น (ถูกเหนี่ยวนำ) ในวงจรอื่น ตัวนำไฟฟ้าของวงจรอื่นนี้สามารถที่จะแยกจากกันทางฟิสิกส์ แต่มีการควบประสาน (coupled) ทางแม่เหล็กกับวงจรที่มีกระแสเหนี่ยวนำไหลอยู่ (สุพจน์ ตุงศเรวงศ. 2553)

$$L = \frac{-R}{2\pi f} \quad (4)$$

เมื่อ L คือ ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เฮนรี (henry, H)

เมื่อ R คือ ความต้านทาน มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm , $\Omega$ )

เมื่อ  $\pi$  คือ เป็นค่าคงตัวทางคณิตศาสตร์

เมื่อ f คือ ความถี่จำนวนลูกคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งใดๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น เฮิร์ตซ์ (Hz)

2.3.5 ตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) คือ อัตราส่วนระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับแบนวิธ บางครั้งนิยมเรียกสั้นๆ ว่า Q factor ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการเลือกความถี่ ค่าตัวประกอบคุณภาพ นี้ไม่มีหน่วย โดยยิ่งค่าตัวประกอบคุณภาพมีค่าสูง วงจรจะสามารถเลือกความถี่ได้ดีมากยิ่งขึ้น อัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุที่ความถี่เรโซแนนซ์ต่อค่าความต้านทานดังสูตร

$$Q = \frac{2\pi fL}{R} \quad (5)$$

เมื่อ Q คือ ตัวประกอบคุณภาพ

เมื่อ L คือ ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เฮนรี (henry, H)

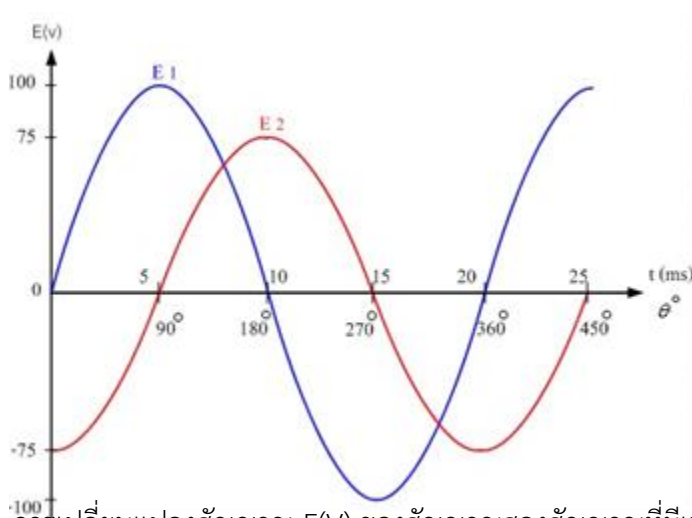
เมื่อ R คือ ความต้านทาน มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm , $\Omega$ )

เมื่อ  $\pi$  คือ เป็นค่าคงตัวทางคณิตศาสตร์

เมื่อ f คือ ความถี่จำนวนลูกคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งใดๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น เฮิร์ตซ์ (Hz)

Instek (2011: 130) กล่าวว่าทั้งสองค่านี้มีหน้าที่วัดอัตราพลังงานที่ใช้ไประหว่างการวัด มีความสัมพันธ์กับความถี่ในการวัด โดยหากใช้พลังงานในการวัดน้อย ค่า quality factor (Q) จะสูง แต่ค่า dissipation factor (D) จะต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากใช้พลังงานในการวัดสูง ค่า quality factor (Q) จะต่ำ แต่ค่า dissipation factor (D) จะสูง

2.3.6 เฟส (phase) คือความแตกต่างกันของเวลาหรือมุมที่เกิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ขึ้นมามากกว่าหนึ่งสัญญาณ เรียกมุมที่แตกต่างกันว่ามุมเฟส (phase angle) ลักษณะสัญญาณที่ต่างเฟสกัน แสดงดังภาพที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงสัญญาณ E(V) ของสัญญาณสองสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน  
ที่มา: (อดิสร มาตรฐาน. 2556)

เป็นคลื่นไซน์ 2 สัญญาณมีเฟสต่างกัน  $90^\circ$  แสดงค่าไว้ในรูปของ E1 และ E2 แรงดันทั้งสองมีความถี่ 50 Hz แรงดัน E1 มีระดับแรงดัน 100V เกิดขึ้นที่เฟสปกติ  $0^\circ$  หรือเวลา 0 ms แรงดัน E2 มีระดับแรงดัน 75V เกิดขึ้นช้ากว่าแรงดัน E1 เป็น มุม  $90^\circ$  หรือเวลาต่างกัน 5 ms ระดับแรงดันของ E1 และ E2 มีค่าแรงดันสูงสุดในเวลาที่แตกต่างกันอยู่ 5 ms เสมอ การพิจารณาเฟสของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ต้องพิจารณาจากปริมาณไฟฟ้าที่มีความถี่เดียวกัน จึงสามารถเปรียบเทียบเฟสกันได้ ถ้าหากมีความถี่ไม่เท่ากัน มีชื่อเรียกเฟสในลักษณะต่าง ๆ แตกต่างกันไป ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่เปรียบเทียบกับเฟสที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ถ้าหากเป็นเฟสนำหน้า (leading phase) จะถูกแทนด้วยเครื่องหมายบวก (+) และถ้าหากเป็นเฟสล้าหลัง (lagging phase) จะถูกแทนด้วยเครื่องหมายลบ (-) (อดิสร มาตรฐาน. 2556)

2.3.7 ตัวประกอบการแผ่กระจาย (dissipation factor) ในทางฟิสิกส์ค่า dissipation factor (D) เป็นตัวชี้วัดความผันผวนของอัตราการสูญเสียพลังงาน ซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า quality factor ที่บอกถึงประสิทธิภาพดังสูตร (Ramo. 1994)

$$DF = \frac{1}{Q} \quad (6)$$

เมื่อ DF คือ ตัวประกอบการแผ่กระจาย

เมื่อ Q คือ ตัวประกอบคุณภาพ

## 2.4 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

2.4.1 texture analysis เป็นการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของอาหาร คิดค้นโดย A.S. Szczesniak ในปี 1963 ต่อมาในปี 1978 M.C. Bourne ใช้การทดสอบโดยการใช้นิ้วแบบแผ่นแบนมีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดของวัสดุ เป็นการให้แรงกดลงบนตัวอย่างอาหาร (compression test) เป็นการจำลองการใช้ฟันบดอาหาร การทดสอบด้วยวิธี texture profile analysis จะมีการประยุกต์ใช้วัดเนื้อสัมผัสของอาหารหลายชนิด เช่น เนื้อสัตว์ (meat) และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ เช่น แยม ไส้กรอก เนยแข็ง ผัก ผลไม้ เต้าหู้ เยลลี่ เพราะคุณภาพที่ได้สัมพันธ์กับการทดสอบทางประสาทสัมผัส (sensory evaluation) (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์. 2549)

## 2.5 การปรับแต่งข้อมูลก่อนการวิเคราะห์

ปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อตัวอย่างทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างกัน เนื่องจากสภาพองค์ประกอบในอาหารแต่ละอย่างมีความแตกต่างกัน หรืออาจจะเกิดจากการกระตุกของเครื่องมือทำให้ค่าที่ได้มีการเหลื่อมซ้อนทับกันอยู่ (overlapping band) ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงนำไปปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ก่อน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง

2.5.1 วิธีอนุพันธ์ (derivative) เป็นการหาความชันของเส้นสเปกตรัม เพื่อแก้ปัญหาพีคที่มีฐานกว้าง (broad peak) เนื่องจากการซ้อนทับกันของพีค (overlapping) และอิทธิพลจากการยกตัวของเส้นสเปกตรัม (baseline shift) ที่เกิดจากการกระเจิงแสง (scattering light) เมื่อแสงตกกระทบที่ตัวอย่างทำให้แสงเปลี่ยนทิศทางซึ่งมีผลต่อการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ทั้งนี้สาเหตุมาจากขนาดของตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ การอัดตัว และการกระจายตัวของตัวอย่างภายในเซลล์บรรจุที่แตกต่างกัน รวมทั้งความชื้นภายในตัวอย่าง ที่แตกต่างกันด้วย (William and Norris. 2001)

2.5.1.1 first derivative เป็นการหาความชันของสเปกตรัมซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาที่สเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นคงที่ตลอดช่วงความยาวคลื่น หรือการเลื่อนตัวของสเปกตรัมแกน y เนื่องจากอิทธิพลของความชื้นและขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน การทำ first derivative ทำให้การแปลความหมายยากดังนั้นจึงนิยมใช้ second derivative มากกว่า First derivative

2.5.1.2 second derivative การใช้ second derivative จะเป็นการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัมสเปกตรัมที่ได้จะมีรูปร่างที่แตกต่างจากสเปกตรัมเริ่มต้น การหาการเปลี่ยนแปลงของความชันสามารถแยกจุดยอดที่เหลื่อมซ้อนกันอยู่ สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี second derivative ที่ได้จะมีจุดยอดที่เป็นบวกในด้านซ้ายและด้านขวา ส่วนจุดยอดตรงกลางจะอยู่ตรงด้านซ้ายที่มีค่ามากที่สุดและตรงกับจุดยอดเริ่มต้น การคำนวณการเปลี่ยนแปลงความชันของสเปกตรัมสามารถแยกจุดยอดของสเปกตรัมที่เหลื่อมซ้อนกันของสเปกตรัมเริ่มต้นได้ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี second derivative จึงเป็นที่นิยมมากกว่าวิธี first derivative

2.5.2 multiplicative scatter correction (MSC) สเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนย่านแสง NIRS แบบ diffuse reflectance และแบบ Transmission มักจะเกิดการกระเจิงแสง (scatter light) ดังนั้น ได้มีการใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า MSC มาปรับแต่งสเปกตรัม เป็นการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสเปกตรัมเพื่อลดอิทธิพลของการกระเจิงของแสง ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการลดค่าผิดพลาด ใช้ NIRS แบบวัดการสะท้อนกลับของแสง เพื่อหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดพืช โดยแปลงข้อมูลสเปกตรัมด้วยวิธี MSC พบว่ามีค่าผิดพลาดของสมการต่ำกว่าสมการของสเปกตรัมดั้งเดิม (original spectrum) (Barnes, R.J. et.al. 1993)

2.5.3 วิธี smoothing เป็นการหาค่าเฉลี่ยคลื่นโดยมีการแทนค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความยาวคลื่นด้วยค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มีจุดศูนย์กลางของช่วงความยาวคลื่นตรงกับจุดที่ถูกแทนที่ ต่อจากนั้นเลื่อนช่วงไปหนึ่งความยาวคลื่น แล้วคำนวณซ้ำจนครบตลอดช่วงความยาวคลื่น ซึ่งสามารถลดปัญหาของสัญญาณรบกวนต่อค่าการดูดกลืนแสง โดยจะได้สเปกตรัมที่มีลักษณะเหมือนสเปกตรัมดั้งเดิมแต่จะเรียบสม่ำเสมอมากกว่า (Siesler, H.W. et.al. 2002)

## 2.6 เครื่องมือวัด

2.6.1 เครื่องวัด LCR800 (LCR meters) หรือ impedance meters จะใช้สำหรับการวัดค่าความเหนี่ยวนำ (L), ความเก็บประจุ (C) และความต้านทานหรือ impedance (R) รวมทั้งตัวแปรอื่น ๆ เช่น คุณภาพ และ dissipation factors เครื่อง LCR จะถูกสร้างให้เป็นเครื่องมือสากลและมีหลายฟังก์ชันการใช้งาน สามารถวัดค่าได้อัตโนมัติของ L, C และ R รวมทั้งตัวแปรอื่น ๆ เช่น ตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) และ ตัวประกอบการแผ่กระจาย (dissipation factors) เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการพิจารณา LCR meters และ impedance meters รวมถึงยังมี option ที่มีความสำคัญต่อการพิจารณา LCR meters ได้แก่ จอแสดงผล, output, คุณลักษณะและฟังก์ชันการทำงานทั่วไป และตัวแปรทางสภาวะแวดล้อม การทดสอบสัญญาณหรือคุณลักษณะแหล่งกำเนิดสำคัญต่อการพิจารณาเมื่อการกำหนด LCR meters หรือ impedance meters รวมความคลาดเคลื่อนพื้นฐาน, ตัวเลขของหน่วยที่แสดง, จำนวนของขั้นตอน, การทดสอบสัญญาณและย่านความถี่ และเวลาการตอบสนอง ค่าความคลาดเคลื่อนพื้นฐานคือ 1 kHz ตัวเลขของหน่วยที่แสดงอ้างถึงตัวเลขของหน่วยที่อ่านออกมา

L C R ย่อมาจาก

L - inductance วัดตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า

C - capacitance วัดตัวเก็บประจุ

R - resistance วัดตัวต้านทาน  
(นิรนาม. 2556)

## 2.6.2 หลักการวัดด้วยเครื่อง LCR Meter

LCR Meter เป็นเครื่องมือวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance), ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) และค่าความต้านทานไฟฟ้า (resistance) การวัดค่า LCR มีหลากหลายแบบ ตั้งแต่แบบง่ายๆ ที่ใช้การวัดค่า impedance แล้วแปลงให้เป็นค่าความเหนี่ยวนำหรือค่าความจุไฟฟ้า ส่วนแบบที่ยากและซับซ้อนขึ้นมาจะใช้การวัดค่าความเหนี่ยวนำหรือค่าความจุไฟฟ้าได้โดยตรง และยังสามารถวัดค่าความต้านทานอนุกรมแฝง และค่า quality factor หรือ ตัวประกอบคุณภาพ ของอุปกรณ์เหนี่ยวนำได้ ทำให้ทราบได้ถึงสมรรถนะหรือคุณภาพโดยรวมของตัวอุปกรณ์ โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้แก่อุปกรณ์ที่กำลังทดสอบ สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาดเล็กจะทำการจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งผ่านตัวกลางที่ต้องการตรวจรู้ โดยปริมาณกระแสที่วัดได้จะแปรผันตรงกับปริมาณที่ต้องการตรวจรู้ ทำให้สามารถคำนวณย้อนกลับจากกระแสไฟฟ้าสู่ประมาณค่าที่ต้องการตรวจรู้ได้ เครื่องวัด LCR จะทำการวัดค่าแรงดันกับกระแสที่ไหลผ่าน ค่า impedance ของวงจรจะคำนวณได้จากอัตราส่วนของค่าแรงดันกับกระแสที่ไหลผ่าน เครื่องวัด LCR แบบดิจิทัล จะใช้หลักการในการวัดค่า impedance ของอุปกรณ์ที่กำลังทดสอบ โดยการวัดแรงดัน (V) ตกคร่อม, กระแส (I) ที่ไหลผ่าน และมุมเฟสที่แตกต่างระหว่างแรงดันและกระแส ความถี่ทดสอบ (test frequency) เครื่องวัด LCR ทำงานในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10Hz ถึง 2MHz อุปกรณ์ที่ถูกวัดนั้นจะถูกใช้งานที่ความถี่ของมันเอง ดังนั้นเครื่องวัดจึงจำเป็นต้องเลือกความถี่ให้เหมาะกับอุปกรณ์ที่ถูกวัด แรงดันทดสอบ (test voltage) แรงดัน AC ที่ใช้ในการทดสอบก็เช่นกัน จำเป็นต้องเลือกให้เหมาะกับอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบ ความแม่นยำ (accuracy) ถ้าต้องการความแม่นยำที่สูง เวลาที่เครื่องวัดใช้ในการวัดค่าจะนานขึ้น และความแม่นยำจะลดลงเมื่อใช้เวลาวัดที่สั้น เครื่องวัด LCR โดยทั่วไปจะมีความเร็วการวัดให้เลือก 3 ระดับ คือ ช้า, ปานกลาง และเร็ว ซึ่งเราต้องพิจารณาเลือกเอาเองระหว่างความเร็วกับความแม่นยำ ในแต่ละการวัด (เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์. 2558)

## 2.6.3 ชนิดของเครื่องวัด LCR Meter จะแบ่งได้เป็น 2 แบบ

2.6.3.1 เครื่องวัดแบบมือถือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ถือได้ด้วยมือเดียว สะดวกในการพกพา เลือกความถี่ทดสอบได้หลายค่า สามารถส่งข้อมูลการวัดไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB นิยมใช้ในงานภาคสนาม มีความแม่นยำ 0.2% ถึง 0.1% ความถี่ทดสอบมีตั้งแต่ 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, และ 100 kHz

2.6.3.2 เครื่องวัดแบบตั้งโต๊ะ มีขนาดใหญ่ ทำงานโดยโปรแกรมความถี่ได้ความแม่นยำ 0.01% ควบคุมการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์ได้ ความถี่ทดสอบสูงกว่า 100 kHz

## 2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

2.7.1 วิธีกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (partial least squares method, PLS) เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลแบบหลายตัวแปร ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มของตัวแปรสังเกตได้ (observed variable) โดยอาศัยตัวแปรแฝง (latent variable) ในการวิเคราะห์การถดถอย

(regression analysis) การสร้างตัวแปรแบบเคโมเมตริกซ์ (chemometrics) และสเปกโทรเมตริก (spectrometric) และเรียกวิธีการนี้ว่า PLS-Regression หรือ PLS-R (partial least squares regression) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยเชิงสถิติที่มีประสิทธิภาพสามารถรับมือกับข้อมูลที่มีจำนวนมิติมาก (มากกว่าจำนวนตัวอย่าง) ตัวแปรรบกวนจำนวนมาก ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเอง (collinearity) และมีค่าสูญหายในชุดข้อมูล นอกจากนี้ยังไม่มีข้อสมมุติเบื้องต้นเกี่ยวกับการแจกแจงของความคลาดเคลื่อน (Johansson. 2003)

2.7.2 วิธี cross-validation test วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมในการทำงานวิจัย เพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของโมเดลเนื่องจากผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ การวัด ประสิทธิภาพด้วยวิธี cross-validation นี้จะทำการแบ่งข้อมูลออกเป็นหลายส่วน (มักจะแสดงด้วยค่า k) เช่น 5-fold cross-validation คือ ทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 5 ส่วน โดยที่แต่ละส่วนมีจำนวนข้อมูลเท่ากัน หรือ 10-fold cross-validation คือ การแบ่งข้อมูลออกเป็น 10 ส่วน โดยที่แต่ละส่วนมีจำนวนข้อมูลเท่ากัน หลังจากนั้นข้อมูลหนึ่งส่วนจะใช้เป็นตัวทดสอบประสิทธิภาพของโมเดล ทำวนไปเช่นนี้จนครบจำนวนที่แบ่งไว้ (เอกสิทธิ์ พัทธรงค์ศักดิ์ดา. 2558)

2.7.3 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination,  $R^2$ ) เป็นค่าที่นำมาใช้วัดว่าตัวแบบสมการเชิงเส้นที่ได้มานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ แต่อย่างไรก็ตามการมองเฉพาะค่า  $R^2$  อย่างเดียวอาจไม่สามารถตอบได้ว่าตัวแบบสมการนั้นเหมาะสมหรือไม่ แต่ต้องมีการพิจารณาค่า  $R^2$  ร่วมกับการวิเคราะห์แผนภาพเศษเหลือ และตัวสถิติอื่นๆ (สุวดี นำพาเจริญ. 2014)

2.7.4 ความน่าเชื่อถือของการประมาณการโดยใช้ regression (root mean square error of calibration, RMSEC) และสามารถวัดได้จาก standard error of calibration (SEC) หรือ residual standard deviation

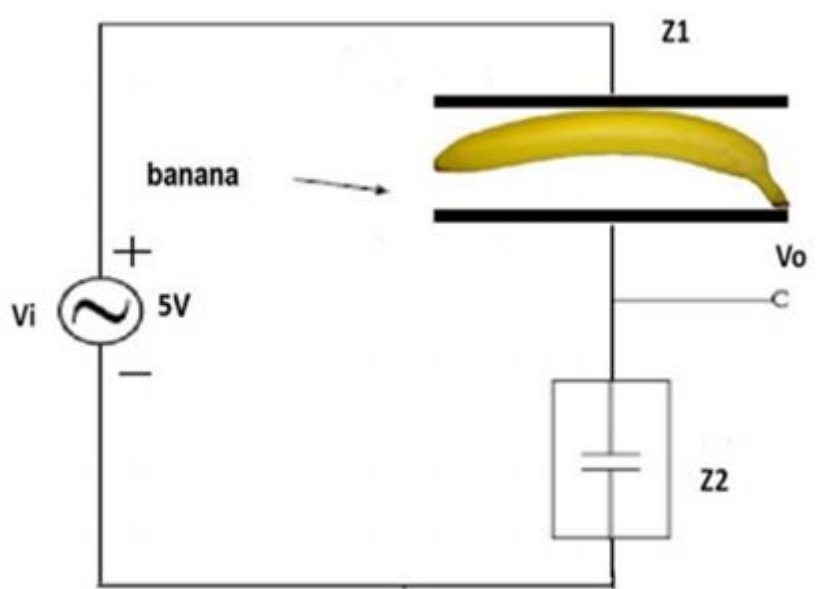
2.7.5 ความคลาดเคลื่อนในการทำนาย (root mean square error of cross validation, RMSECV) เป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการประเมินโดยใช้สมการ calibration กับค่าที่วิเคราะห์ได้ (measured value or true value) ถ้ามีค่าที่แตกต่างน้อยแสดงว่าสมการ calibration ใช้ทำการประเมินนี้มีประสิทธิภาพ ให้ค่าที่สามารถยอมรับได้ (Narungpan. 2006)

## 2.8 เทคนิคการวัดคุณภาพแบบไม่ทำลาย (non - destructive)

เทคนิคการวัดคุณภาพแบบไม่ทำลาย คือ การตรวจสอบตัวอย่างโดยไม่ทำลาย เป็นกรรมวิธีที่ใช้หาความผิดปกติใดๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างนั้น ทั้งที่เป็นอันตรายต่อการใช้งานหรือไม่เป็นอันตรายต่อการใช้งาน โดยที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับตัวอย่างนั้น การตรวจสอบโดยใช้สายตา (visual inspection) เป็นการตรวจสอบโดยไม่ทำลายที่สะดวก รวดเร็ว และประหยัดที่สุด ดังนั้นถ้าหากสามารถตัดสินใจผลของการตรวจสอบได้โดยใช้การตรวจสอบแบบใช้สายตาได้แล้ว ก็ไม่จำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบโดยวิธีอื่นอีก แต่อย่างไรก็ตามความไม่ต่อเนื่องอาจเกิดในตำแหน่งหรือขนาดที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า จึงได้มีการพัฒนาวิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายวิธีต่างๆ ขึ้นมาเพื่อช่วยให้สามารถตรวจสอบความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวนี้ได้

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทำนายคุณภาพกล้วยสุกโดยใช้ระบบการตรวจวัดตัวเก็บประจุ จะทำการศึกษาตัวเก็บประจุเพื่อประเมินความสุขของผลกล้วย เพื่อควบคุมความสุขของกล้วย โดยการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความถี่คลื่นไซน์ที่มีตัวอย่างแผ่นขนานเป็นตัวเก็บประจุถูก แผ่นขนานที่ใช้เป็นตัวเก็บประจุ จะทำงานโดยการขยายความแตกต่างความจุไฟฟ้าที่เกิดจากการนำผลของกล้วยเข้าไปในเซ็นเซอร์ ผลกล้วยถูกส่งไปวัดก่อนการใช้เอทิลีนเพื่อรักษาในวันแรกและหลังการรักษาเป็นเวลาห้าวัน จะมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับค่าพารามิเตอร์คุณภาพของผลกล้วย ผลกล้วยที่มีสีเขียวปนจะมี แรงต้านสนามไฟฟ้าที่มีมากกว่าผลที่สุกเต็มที่ แรงต้านสนามไฟฟ้าที่ลดลงเป็นผลมาจากขั้นตอนที่สุก ความถี่ที่ดีที่สุดของคลื่นไซน์คือ 1 MHz permittivity ที่ความถี่นี้เปลี่ยนจาก 1.7433% สำหรับกล้วยสีเขียว ส่วนกล้วยสุกจะ 1.6431% (Soltani, M. et.al. 2010)



รูปที่ 2.2 แสดงภาพวงจรการวัดตัวเก็บประจุของกล้วย (capacitance sensing system) ที่มา: (Soltani, M. et.al. 2010)

การตรวจสอบความเป็นกรดของส้มตระกูลการัดโดยใช้การวัดความต้านทานทางไฟฟ้า การวัดความต้านทานทางไฟฟ้าสามารถตรวจสอบความเป็นกรดของส้มตระกูลการัด (garut citrus fruit) ขึ้นอยู่กับความถี่และค่าทางไฟฟ้า มีผลต่อค่าความเป็นกรดอย่างมีนัยสำคัญ การเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรดนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ความต้านทานต่อน้ำหนัก ปฏิกริยาต่อน้ำหนัก การเหนี่ยวนำต่อน้ำหนัก และความต้านทานต่อน้ำหนักของส้มตระกูลการัดลดลงเมื่อค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความจุต่อน้ำหนักของส้มตระกูลการัดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอช ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชและค่าทางไฟฟ้าประมาณการโดยใช้หลายการถดถอย ความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ 1 MHz ดังนั้นการวัดความต้านทานทางไฟฟ้าของส้มตระกูลการัดมีประสิทธิภาพสูงในการทำนายความเป็นกรดของส้มตระกูลการัดโดยไม่ทำลาย (Juansah, J. et.al. 2012)

ศึกษาการประเมินผลของการวัดช่วงการเจริญเติบโตของทุเรียนโดยใช้การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบทำลายน้อยที่สุด จะทำโดยการใช้เข็มพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า ซึ่งการประเมินคุณสมบัติต่างๆ ของผลไม้โดยไม่ทำลายหรือทำลายน้อยที่สุด เป็นเทคโนโลยีที่เป็นประโยชน์มากกับอุตสาหกรรมและการส่งออกก่อนการจำหน่ายสู่ผู้บริโภคให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นข้อมูลความต้านทานไฟฟ้าของก้านและเปลือกได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็น EIS พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะทำนายความสุข โดยมีการอ้างอิงจากน้ำหนักแห้ง พารามิเตอร์ที่ได้รับการคัดเลือกจะมาจาก stepwise regression ค่าความต้านทานของรอยต่อระหว่างก้านหรือ CS และค่าความจุของเปลือกจะทำให้การทำนายสมบูรณ์ที่สุด ในการจัดรูปแบบสมการโมเดลของทุเรียนที่สุกและยังไม่สุกแบบ 5EIS พารามิเตอร์ (ZmaxLP, CminRI, CmaxRI, RpkRI, XmaxRI) ผลของประสิทธิภาพค่อนข้างดีความถูกต้องโดยรวมคือ 83.3% และ5EIS พารามิเตอร์ยังเป็นวิธีวัดที่ทำลายน้อยที่สุด แม้ว่าการทำนายจะมีความถูกต้องปานกลางแต่เป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการวัดโดยการกำหนดให้วัดเพียง 3 ที่คือ ก้านส่วนล่าง รอยต่อระหว่างก้านและเปลือก (Kuson, P. et.al. 2013)

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

##### 3.1.1 วัสดุดิบ

3.1.1.1 เยลลี่ผงสำเร็จรูปยี่ห้อ imperial รสสตอร์วเบอร์รี่

3.1.1.2 ถั่วเหลืองยี่ห้อเอโร่

##### 3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  (Magnesium sulfate heptahydrate)

#### 3.2 เครื่องมือ

3.2.1 เครื่อง LCR meter ยี่ห้อ GW Instek รุ่น LCR800

3.2.2 เครื่องวัด texture ยี่ห้อ Texture Technologies รุ่น Ta-hd plus

3.2.3 เครื่องปั่น philips รุ่น HR2118

3.2.4 เตาแผ่นความร้อนไฟฟ้า imarflex IF-412

3.2.5 เครื่องชั่งสาร ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA3202S-CW

3.2.6 สว่านไฟฟ้า ยี่ห้อ makita รุ่น 6501

#### 3.3 โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ

3.3.1 โปรแกรม Unscrambler® version 9.7 (Camo,Oslo, Norway)

3.3.2 โปรแกรม Umbio Evince version 8.0724 (Northampton, USA)

3.3.3 โปรแกรม Microsoft excel 2013 (Washington, USA)

#### 3.4 อุปกรณ์

3.4.1 ผ้าขาวบาง

3.4.2 กระจกบอกล้วยดวงพลาสติก 250 ml

3.4.3 ถ้วยพลาสติก

3.4.4 ถ้วยกระเบื้องเซรามิก

3.4.5 ช้อนพลาสติก

3.4.6 ชุดถ้วยพร้อมแท่งวัด

3.4.7 กระจกนอนพลาสติก

- 3.4.8 ถ้วยพลาสติกแบบเจาะรู
- 3.4.9 หัววัด P/0.5R
- 3.4.10 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.4.11 แผ่นกระเบื้องขนาด 30.5x61.0x1 ซม
- 3.4.12 กระจาดทึบ
- 3.4.13 ชุดข้อต่อยาว + ฐานหกเหลี่ยม
- 3.4.14 หม้อสแตนเลสขนาด 55 ซม
- 3.4.15 หัววัด P/25
- 3.4.16 เหล็กเสียบบิล
- 3.4.17 แผ่นอะคริลิก (ฉนวนกันไฟฟ้า)
- 3.4.18 กาวตราช้าง

### 3.5 วิธีการทดลอง

#### 3.5.1 การสร้างอุปกรณ์แห่งวัด

3.5.1.1 วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของภาชนะถ้วยกระเบื้องเซรามิก ค่าที่วัดได้มีขนาด 8 เซนติเมตร

3.5.1.2 นำแผ่นอะคริลิก (ฉนวนกันไฟฟ้า) มาวัดขนาดให้มีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของภาชนะถ้วยกระเบื้องเซรามิก จากนั้นนำสว่านไฟฟ้ามาเจาะรูโดยกำหนดให้รูห่างจากขอบข้างนอกเข้ามา 3 เซนติเมตร โดยเจาะทั้งหมด 2 รู รูทั้งสองจะมีระยะห่างระหว่างรู 2 เซนติเมตร

3.5.1.3 วัดขนาดความลึกของภาชนะถ้วยกระเบื้องเซรามิก ค่าที่วัดได้มีขนาด 6 เซนติเมตร

3.5.1.4 ตัดเหล็กเสียบบิลให้มีขนาดความยาว 8 เซนติเมตร

3.5.1.5 กำหนดจุดของเหล็กเสียบบิลโดยให้ห่างจากกันถ้วย 2 เซนติเมตร จากนั้นนำกาวตราช้างติดยึดระหว่างเหล็กเสียบบิลกับแผ่นอะคริลิก

#### 3.5.2 ผลิตภัณฑ์เยลลี่

##### 3.5.2.1 การเตรียมเยลลี่

เตรียมผงเยลลี่สำเร็จรูปยี่ห้อ imperial รสสตรอว์เบอร์รี่ นำไปชั่งโดยการใส่ผงเยลลี่ในปริมาณที่แตกต่างกัน เพื่อให้มีความแน่นเนื้อที่แตกต่างกัน 3 กรัม โดยเริ่มจากผงเยลลี่ 41.5 กรัม จนถึง 149.5 กรัม จากนั้นใส่น้ำอุ่น ปริมาตร 300 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน จนให้ผงเยลลี่ละลายหมด จากนั้น นำไปกรองด้วยผ้าดิบหรือผ้าขาวบางเพื่อไม่ให้เกิดฟองอากาศ ทิ้งไว้ให้สารละลายค่อยๆหยดผ่านผ้าเองโดยไม่ต้องบีบ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง จากนั้นนำเข้าสู่ตู้เย็นอุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

### 3.5.2.2 วัดค่าทางไฟฟ้า

นำถ้วยเยลลี่มาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนการวัด 15 นาที จากนั้นนำชุดถ้วยพร้อมแท่งวัดประกอบเข้ากับเครื่อง LCR meter จากนั้นต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีการติดตั้งโปรแกรมเพื่อสามารถเก็บค่าได้อัตโนมัติ โดยจะทำการคาลิเบรทชุดอุปกรณ์แท่งวัดทุกครั้งที่เปลี่ยนตัวอย่าง นำชุดถ้วยที่มีตัวอย่างพร้อมแท่งวัดประกอบเข้ากับเครื่อง LCR meter จากนั้นตั้งค่าเครื่องโดยการเลือกค่าความถี่ได้แก่ 0.012, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50, 100 และ 200 kHz และเลือกประเภทค่าทางไฟฟ้าที่ต้องการวัด ได้แก่ capacitance, inductance, impedance, resistance, dissipation factor, quality factor และ phase angle จากนั้นกดบันทึกผลที่วัดได้ทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนความถี่และประเภทค่าทางไฟฟ้าหลังวัดเสร็จทุกครั้งควรทำความสะอาดหัวโพรบด้วยน้ำสะอาดแล้วใช้ทิชชูเช็ดให้แห้งก่อนวัดตัวอย่างต่อไป

### 3.5.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส

การตรวจสอบเนื้อสัมผัสของเยลลี่โดยใช้เครื่อง texture รุ่นที่ใช้ TA-Plus texture analyzer โดยก่อนการตรวจวัดจะนำตัวอย่างตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที ถ้าตัวอย่างมีความแน่นเนื้อสูง หมายความว่าจะมีค่าความแข็งมากกว่า จุดที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลของแต่ละตัวอย่างจะสอดคล้องกับพื้นที่สำหรับการดึงข้อมูล โดยการทดสอบเยลลี่ จะใช้หัววัด P/0.5R ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ความเร็วในการทดสอบ 1.0 mm/s ความเร็วก่อนการทดสอบ 1.5 mm/s ความเร็วหลังการทดสอบ 1.0 mm/s ความลึกของการเจาะ 4 mm หน่วยของความแน่นเนื้อเป็น  $N/cm^2$



รูปที่ 3.1 แสดงภาพอุปกรณ์การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง texture analysis

### 3.5.2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์

หลังจากการเก็บข้อมูลค่าทางไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง LCR meter และการเก็บข้อมูลค่าความแน่นเนื้อที่ได้รับจากเครื่อง texture แล้ว จะนำข้อมูลทั้งหมดใส่ โปรแกรม microsoft excel เพื่อทำการเปลี่ยนหน่วยข้อมูล และทำการจัดเรียงข้อมูลใหม่ จากนั้นนำข้อมูลที่ถูกรวบรวมใหม่ทั้งหมดมากำจัด outlier ออก

3.5.2.4.1 แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มสำหรับการสร้างสมการ (calibration set) และกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มสำหรับการทดสอบสมการ (prediction set) โดยแต่ละกลุ่มมีการกระจายตัวของข้อมูลเท่าๆกัน โดยแบ่งเป็นกลุ่ม calibration set เป็นจำนวนไม่เกิน 70 เปอร์เซ็นต์ โดยข้อมูล calibration set ของเยลลี่จะมีทั้งหมด 81 ข้อมูลและแบ่งเป็นกลุ่ม prediction set เป็นจำนวนไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ โดยข้อมูล calibration set ของเยลลี่จะมีทั้งหมด 39 ข้อมูล

3.5.2.4.2 นำข้อมูลในกลุ่ม calibration มาทำการปรับสภาพข้อมูล (pretreatment) ให้เหมาะสมเพื่อให้เป็นสมการที่ดีที่สุด การ pretreatment จะทำในโปรแกรม unscramble โดยใช้เครื่องในโปรแกรมได้แก่ first derivative, second derivative, multiplicative scatter correction (MSC), smoothing, การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (SNV)

3.5.2.4.3 ทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) เพื่อมาใช้สร้างแบบจำลองเพื่อหาความแน่นอนเมื่อ  $y = mx_1 + mx_2 + \dots + C$  โดยที่  $y$  เป็นตัวแปรตามคือค่าความแน่นอนเมื่อ  $m$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ PLSR ส่วน  $x$  เป็นตัวแปรอิสระ หรือค่าทางไฟฟ้า ที่ได้จากเครื่อง LCR meter ส่วน  $C$  คือค่าคงที่ จากนั้นนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination)  $R^2$ , ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ (root mean square error of calibration) RMSEC และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายด้วยตัวอย่างกลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง (root mean square error of cross validation) RMSECV

3.5.2.4.4 นำสมการที่ได้จากการสร้างโมเดลไปใช้ในการทดสอบตัวอย่างในกลุ่ม prediction set เพื่อดูความแม่นยำของสมการ จากนั้นไปสร้างกราฟโดยใช้โปรแกรม umbio evince

### 3.5.3 ผลิตกัณฑ์เต้าหู้

#### 3.5.3.1 การเตรียมเต้าหู้

เริ่มจากการนำเมล็ดถั่วเหลืองไปแช่น้ำ 4-5 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบ่นโดยใช้อัตราส่วนของถั่ว 250 กรัมต่อน้ำ 1.5 ลิตร ใช้ผ้าขาวบางกรองเพื่อแยกส่วนของกากถั่วเหลืองกับน้ำออกจากกัน นำส่วนที่เป็นน้ำมาต้มให้เดือด ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที จากนั้นใส่ magnesium sulfate หรือดีเกลือลงไปประมาณ 5 กรัมคนให้เข้ากัน จะเกิดการแยกชั้นของตะกอนโปรตีนและน้ำ นำส่วนตะกอนของโปรตีนไปใส่ในภาชนะถ้วยที่เจาะรูไว้แล้วที่มีผ้าขาวบาง จากนั้นนำถ้วยพลาสติกเปล่าอีกใบมาวางข้างบน พร้อมกับนำแผ่นกระเบื้องมาวางทับข้างบนสุด ทำให้เกิดน้ำหนึบขึ้นเพื่อรีดน้ำในตะกอนของโปรตีนออกตามช่วงเวลาต่างๆ ส่งผลให้เกิดความแน่นอนเนื้อที่แตกต่างกัน



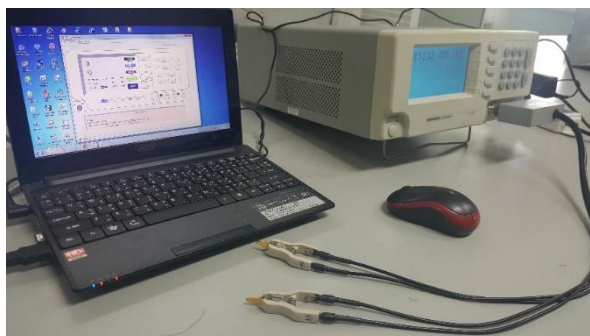
รูปที่ 3.2 เมล็ดถั่วเหลืองยี้ห่อเอโรหลังแช่น้ำ



รูปที่ 3.3 แยกส่วนของกากถั่วเหลืองกับน้ำออกจากกัน

### 3.5.3.2 วัดค่าทางไฟฟ้า

นำชุดถั่วพร้อมแท่งวัดประกอบเข้ากับเครื่อง LCR meter จากนั้นต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีการติดตั้งโปรแกรมเพื่อสามารถเก็บค่าได้อัตโนมัติ โดยจะทำการคาลิเบรทชุดอุปกรณ์แท่งวัดทุกครั้งที่เปลี่ยนตัวอย่าง นำชุดถั่วที่มีตัวอย่างพร้อมแท่งวัดประกอบเข้ากับเครื่อง LCR meter จากนั้นตั้งค่าเครื่องโดยการเลือกค่าความถี่ได้แก่ 0.012, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50, 100 และ 200 kHz และเลือกประเภทค่าทางไฟฟ้าที่ต้องการวัด ได้แก่ capacitance, inductance, impedance, resistance, dissipation factor, quality factor และ phase angle จากนั้นกดบันทึกผลที่วัดได้ทุกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนความถี่และประเภทค่าทางไฟฟ้าหลังวัดเสร็จทุกครั้งควรทำความสะอาดหัวโพรบด้วยน้ำสะอาดแล้วใช้ทิชชูเช็ดให้แห้งก่อนวัดตัวอย่างต่อไป



ภาพที่ 3.4 แสดงภาพอุปกรณ์การวัดค่าทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง LCR meter

### 3.5.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส

การตรวจสอบเนื้อสัมผัสของเต้าหู้โดยใช้เครื่อง texture รุ่นที่ใช้ TA-Plus texture analyzer ถ้าตัวอย่างมีความแน่นเนื้อสูง หมายความว่า จะมีค่าความแข็งมากกว่า จุดที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลของแต่ละตัวอย่างจะสอดคล้องกับพื้นที่สำหรับการดึงข้อมูลของค่าทางไฟฟ้า โดยการทดสอบเต้าหู้ จะใช้หัววัด P/25 cylinder ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม ความเร็วในการทดสอบ 2.0 mm/s ความเร็วก่อนการทดสอบ 1.0 mm/s ความเร็วหลังการทดสอบ 2.0 mm/s ความลึกของการเจาะ 25 mm หน่วยของความแน่นเนื้อเป็น  $N/m^2$

### 3.5.3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์

หลังจากการเก็บข้อมูลค่าทางไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง LCR meter และการเก็บข้อมูลค่าความแน่นเนื้อที่ได้รับจากเครื่อง texture แล้ว จะนำข้อมูลทั้งหมดใส่ โปรแกรม microsoft excel เพื่อทำการเปลี่ยนหน่วยข้อมูล และทำการจัดเรียงข้อมูลใหม่ จากนั้นนำข้อมูลที่ถูกจัดเรียงใหม่ทั้งหมดมากำจัด outlier ออก

3.5.3.4.1 แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มสำหรับการสร้างสมการ (calibration set) และกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มสำหรับการทดสอบสมการ (prediction set) โดยแต่ละกลุ่มมีการกระจายตัวของข้อมูลเท่าๆกัน โดยแบ่งเป็นกลุ่ม calibration set เป็นจำนวนไม่เกิน 70 เปอร์เซ็นต์ โดยข้อมูล calibration set ของเต้าหู้จะมีทั้งหมด 65 ข้อมูลและแบ่งเป็นกลุ่ม prediction set เป็นจำนวนไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ โดยข้อมูล calibration set ของเยลลี่จะมีทั้งหมด 32 ข้อมูล

3.5.3.4.2 นำข้อมูลในกลุ่ม calibration มาทำการปรับสภาพข้อมูล (pretreatment) ให้เหมาะสมเพื่อให้เป็นสมการที่ดีที่สุด การ pretreatment จะทำในโปรแกรม unscramble โดยใช้เครื่องมือในโปรแกรมได้แก่ first derivative, second derivative, multiplicative scatter correction (MSC), smoothing, การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน (SNV)

3.5.3.4.3 ทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธี partial least squares regression (PLSR) เพื่อมาใช้สร้างแบบจำลองเพื่อหาความแน่นเนื้อ  $y=mx_1+mx_2+...+C$  โดยที่  $y$  เป็นตัวแปรตามคือค่าความแน่นเนื้อ  $m$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ PLSR ส่วน  $x$  เป็นตัวแปรอิสระ หรือค่าทางไฟฟ้า ที่ได้จากเครื่อง LCR meter ส่วน  $C$  คือค่าคงที่ จากนั้นนำไปหาค่า

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination)  $R^2$ , ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายของกลุ่มตัวอย่างสร้างสมการ (root mean square error of calibration) RMSEC และค่าความคลาดเคลื่อนจากการทำนายด้วยตัวอย่างกลุ่มตรวจสอบความถูกต้อง (root mean square error of cross validation) RMSECV

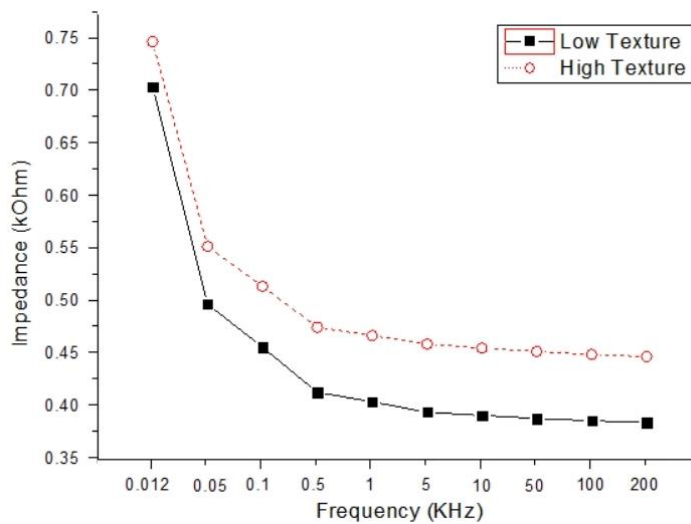
3.5.3.4.4 นำสมการที่ได้จากการสร้างโมเดลไปใช้ในการทดสอบตัวอย่างในกลุ่ม prediction set เพื่อดูความแม่นยำของสมการ จากนั้นไปสร้างกราฟโดยใช้โปรแกรม umbio evince

## บทที่ 4

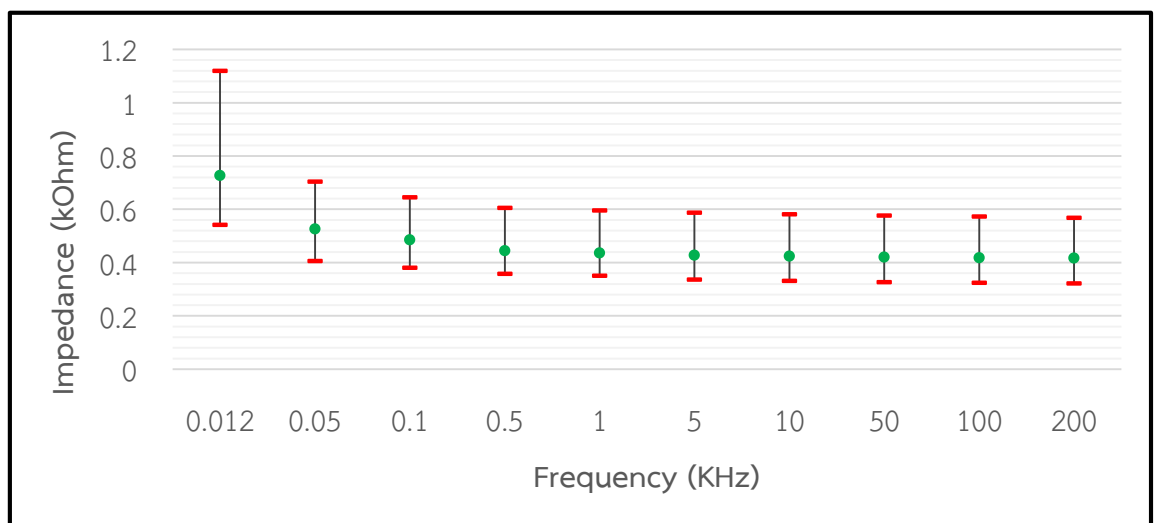
### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 กราฟเปรียบเทียบกลุ่ม texture สูงกับ texture ต่ำของผลิตภัณฑ์เยลลี่กับค่าทางไฟฟ้าต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า impedance เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของเยลลี่ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำ ผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเยลลี่ที่มี texture สูงจะมีค่า impedance ที่สูงกว่าในกลุ่มเยลลี่ที่มี texture ต่ำในทุกช่วงความถี่ส่งผลให้ค่า impedance มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $p < 0.05$ )

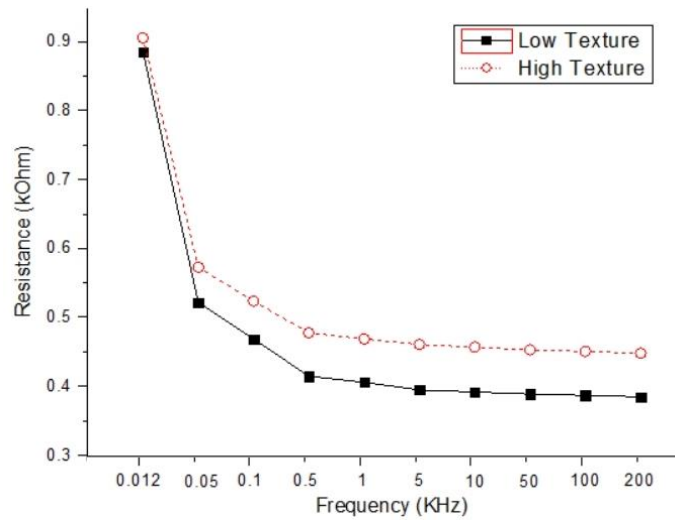


รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่า impedance ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน

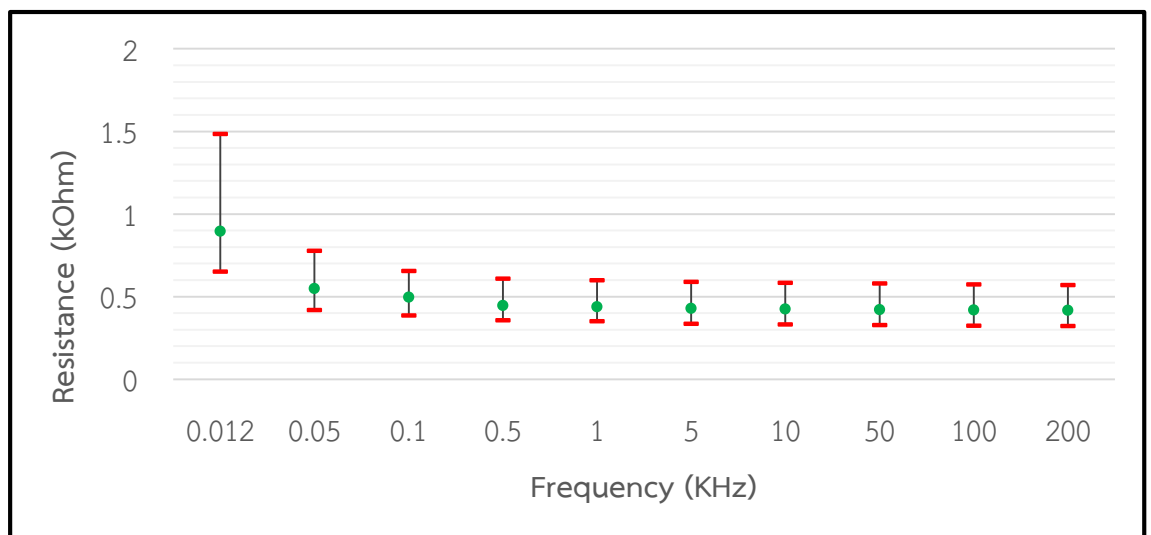


รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ impedance

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า resistance เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของเยลลี่ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำ ผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเยลลี่ที่มี texture สูงจะมีค่า resistance ที่สูงกว่าในกลุ่มเยลลี่ที่มี texture ต่ำในทุกช่วงความถี่ส่งผลให้ค่า resistance มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $p < 0.05$ )

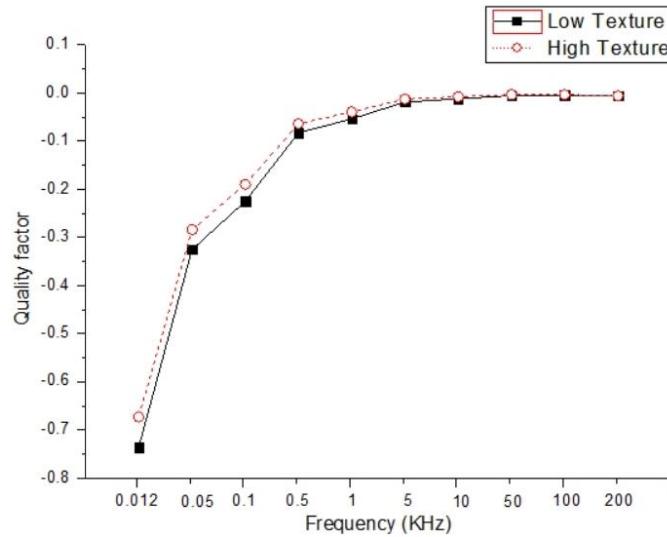


รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า resistance ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน

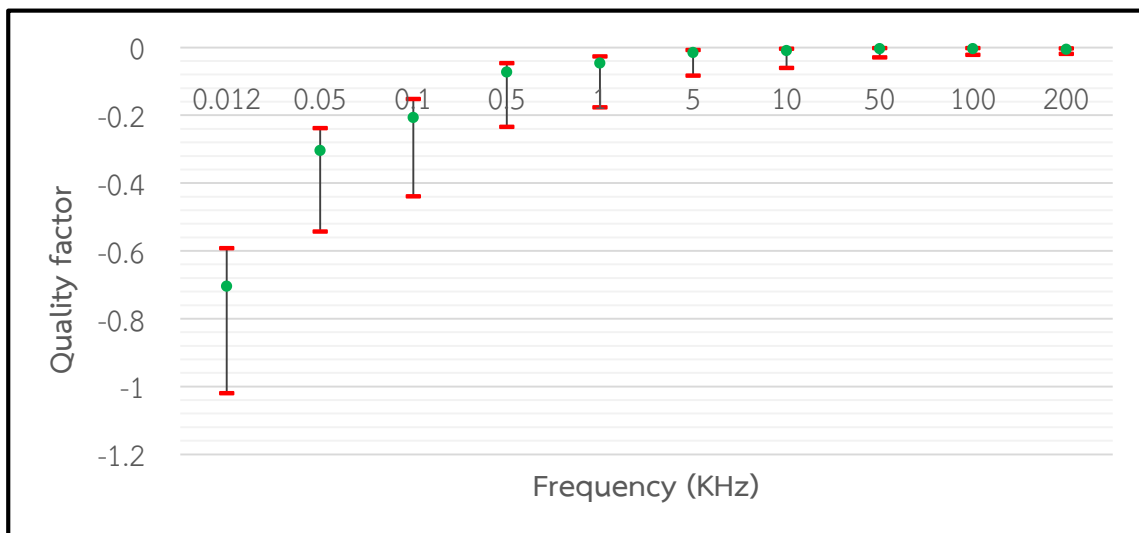


รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ resistance

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า quality factor เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของเยลลี่ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำ ผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเยลลี่ที่มี texture สูงกับกลุ่มเยลลี่ที่มี texture ต่ำมีค่า quality factor ที่ใกล้เคียงกันในทุกช่วงความถี่ส่งผลให้ค่า quality factor ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $p > 0.05$ )

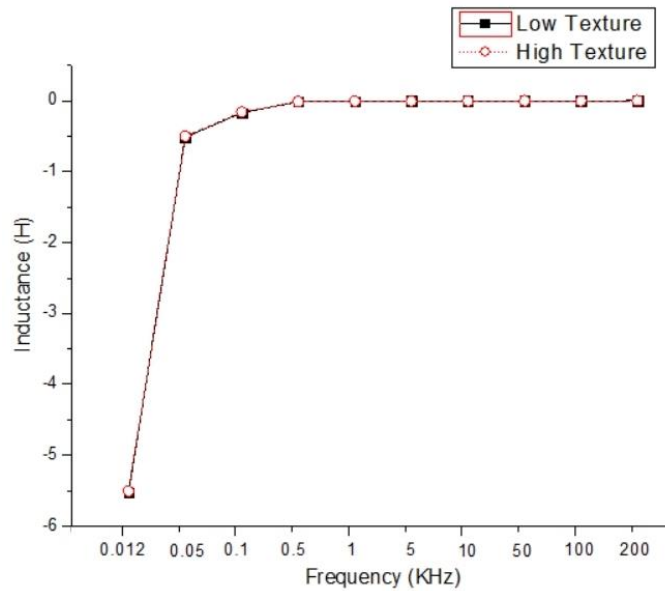


รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบค่า quality factor ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน

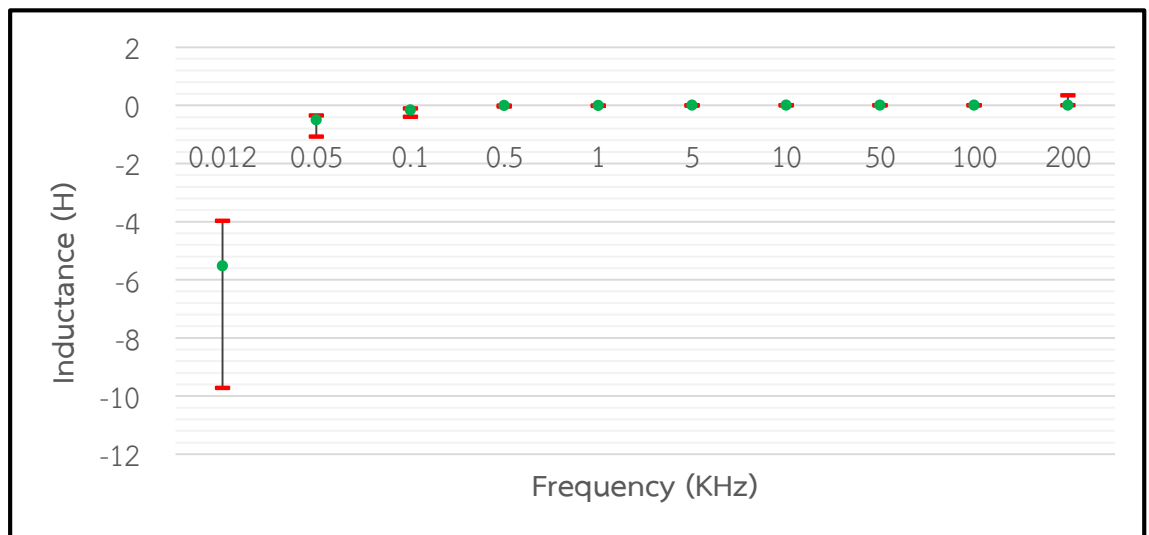


รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ quality factor

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า inductance เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของเยลลี่ ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำ ผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเยลลี่ที่มี texture สูงกับกลุ่มเยลลี่ที่มี texture ต่ำมีค่า inductance ที่ใกล้เคียงกันในทุกช่วงความถี่ส่งผลให้ค่า inductance ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $p > 0.05$ )

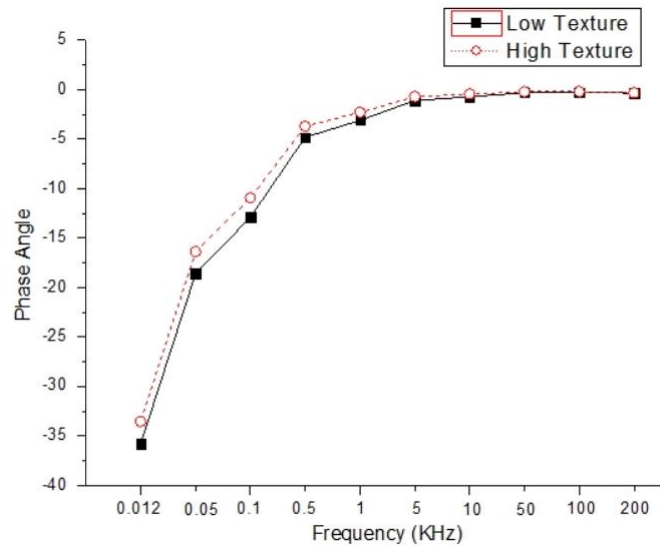


รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่า inductance ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน

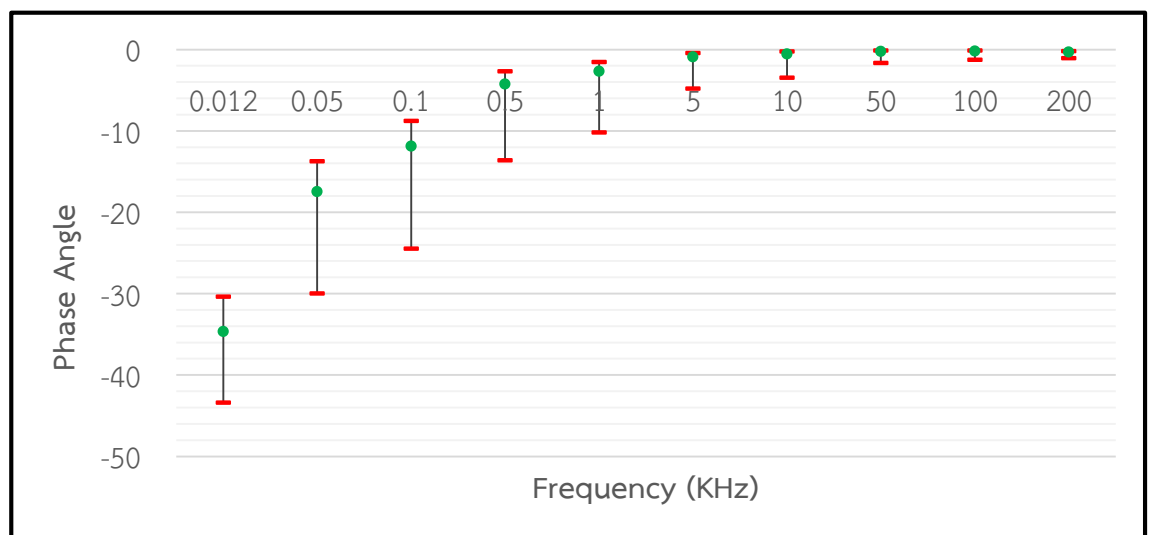


รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ inductance

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า phase angle เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของเยลลี่ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเยลลี่ที่มี texture สูงกับกลุ่มเยลลี่ที่มี texture ต่ำมีค่า phase angle ที่ใกล้เคียงกัน ในทุกช่วงความถี่ส่งผลให้ค่า phase angle ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $p>0.05$ )

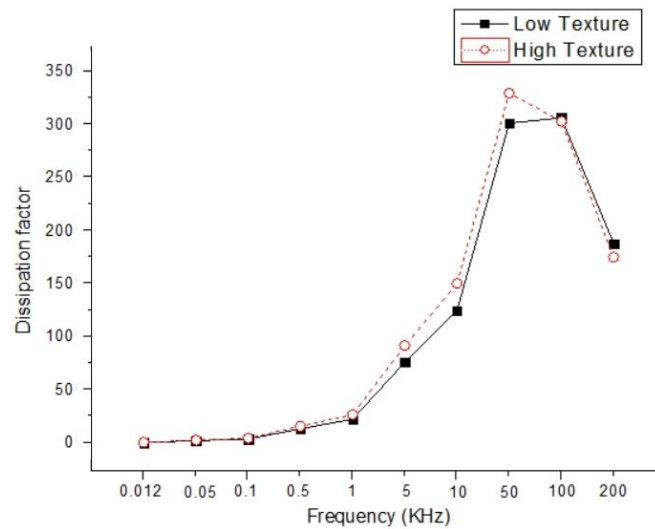


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่า phase angle ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน

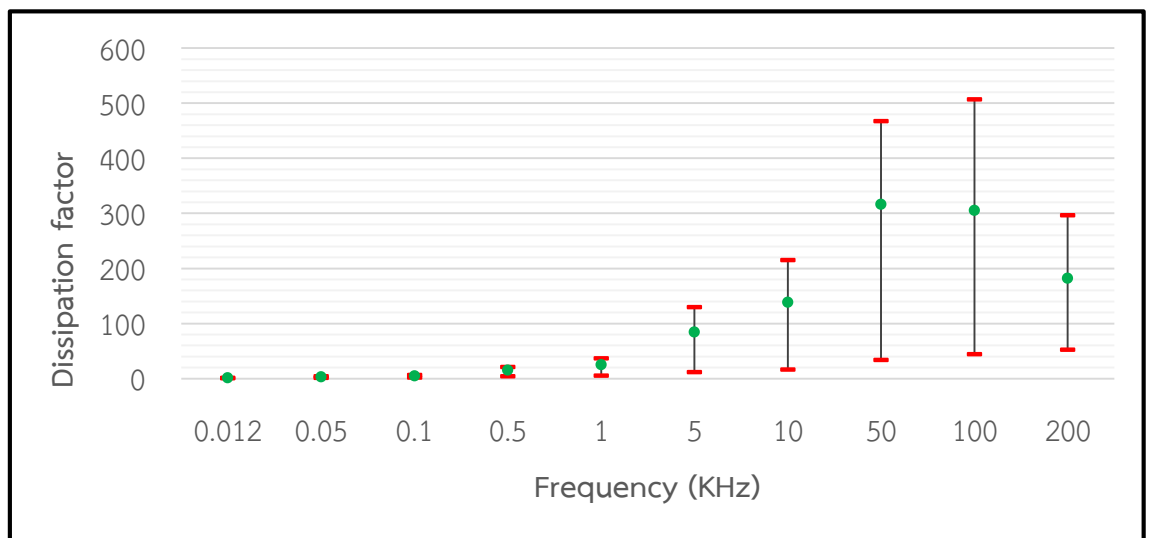


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ phase angle

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า dissipation factor เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของเยลลี่ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำ ผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเยลลี่ที่มี texture สูงจะมีค่า dissipation factor ที่สูงกว่าในกลุ่มเยลลี่ที่มี texture ต่ำ ส่งผลให้ค่า dissipation factor มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $p < 0.05$ )

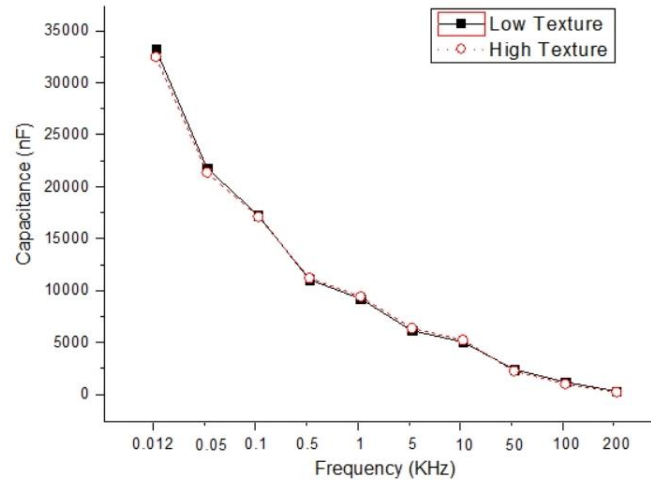


รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่า dissipation factor ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน

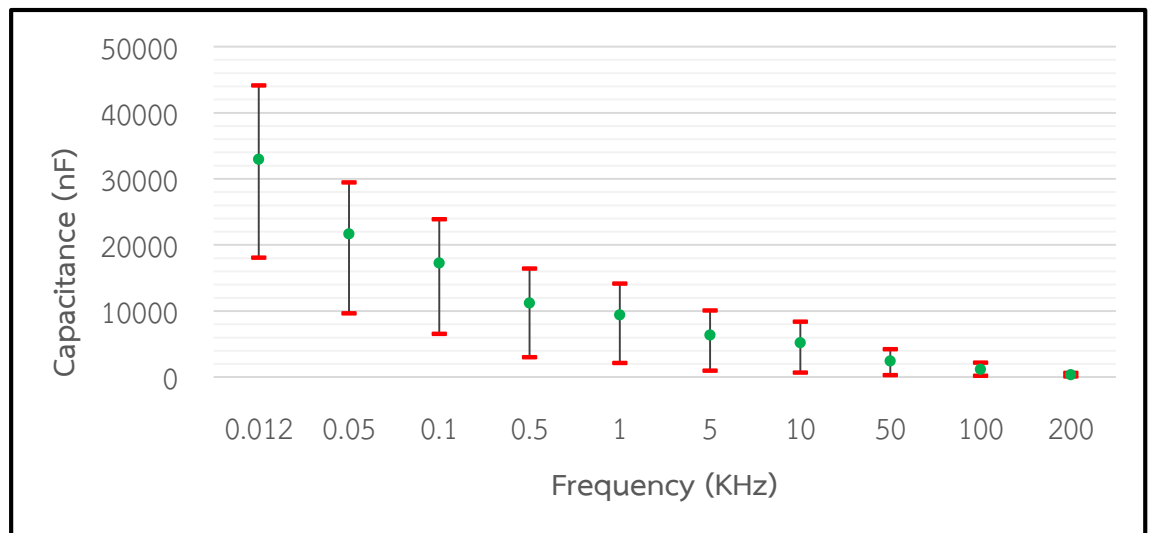


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ dissipation factor

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า capacitance เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของ เยลลี่ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำ ผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเยลลี่ที่มี texture สูงจะมีค่า capacitance ที่สูงกว่าในกลุ่มเยลลี่ที่มี texture ต่ำ ส่งผลให้ค่า capacitance มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ที่ 95% ( $p < 0.05$ )



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบค่า capacitance ของเยลลี่ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเยลลี่กับ capacitance

ในตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างของ calibration และกลุ่มของ prediction ช่วงของ prediction จะอยู่ในช่วงของ calibration ในส่วนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ calibration และ prediction จะมีค่าใกล้เคียงกัน

**ตารางที่ 4.1** แสดงการเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างของ calibration และกลุ่มของ prediction ของเยลลี่

	Firmness (N)	
	Calibration Set	Prediction Set
N	81	39
Range	16.50-43.10	16.70-42.80
SD	0.132	0.128

N = จำนวนข้อมูลของเยลลี่, SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าทางไฟฟ้าของความถี่ทั้งหมดที่ทำการทดสอบ (0.012, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50, 100 และ 200 kHz) ถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรต้น สมการความแน่นเนื้อของ calibration จะทำโดยการใช้ PLSR และตรวจสอบความถูกต้องโดยตัวอย่างในชุด prediction ข้อมูลใน calibration (จำนวนข้อมูล = 81) จะถูกปรับปรับสภาพให้เหมาะสมเพื่อเป็นสมการที่ดีที่สุด ผลจากการทดลองในตารางที่ 4.2 พบว่าข้อมูลแบบ original ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นข้อมูลแบบ original ของสมการ calibration จึงถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองการสอบเทียบในการศึกษานี้

**ตารางที่ 4.2** การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลจากการปรับและแก้ไขโดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในชุด calibration ของเยลลี่

Pretreatment	N	F	R <sup>2</sup>	RMSECV(N)
Original	81	14	0.666	0.132
Smoothing7	81	5	0.611	0.143
1 <sup>st</sup> Derivatives	81	14	0.634	0.137
2 <sup>nd</sup> Derivatives	81	14	0.656	0.133
SNV	81	14	0.588	0.145
MSC	81	10	0.553	0.152

R<sup>2</sup> = ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ, F = จำนวนแฟกเตอร์ของสมการ PLSR

RMSECV = ความคลาดเคลื่อนในการทำนาย, SNV = การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

MSC = การปรับแก้การกระเจิงแบบผลคูณ

ผลลัพธ์ทางสถิติของแบบจำลองการสอบเทียบ เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลองในตารางที่ 4.3 แสดงผลลัพธ์ของประสิทธิภาพของแบบจำลองในกลุ่มของ calibration (R<sup>2</sup> = 0.666 และ RMSEC = 0.132 N) และความแม่นยำของแบบจำลองในกลุ่มของ prediction (R<sup>2</sup> = 0.636, RMSEP = 0.128 N) ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองสามารถใช้ในการทำนายได้

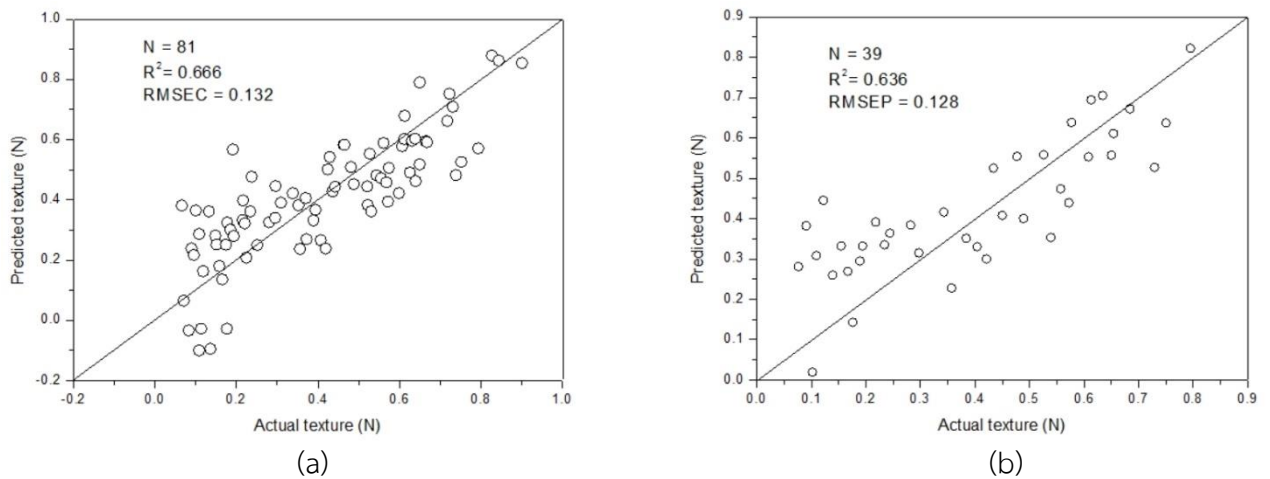
ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์ทางสถิติของแบบจำลอง PLSR สำหรับ texture ของเยลลี่

Sample set	Texture				
	N	F	R <sup>2</sup>	RMSEC(N)	RMSEP(N)
Calibration	81	14	0.666	0.132	-
Prediction	39	14	0.636	-	0.128

F= จำนวนแฟกเตอร์ของสมการ PLSR, RMSEP = ค่าผิดพลาดในการทำนาย

RMSEC = ความน่าเชื่อถือของการประมาณการโดยใช้ regression, N = จำนวนข้อมูลของเยลลี่

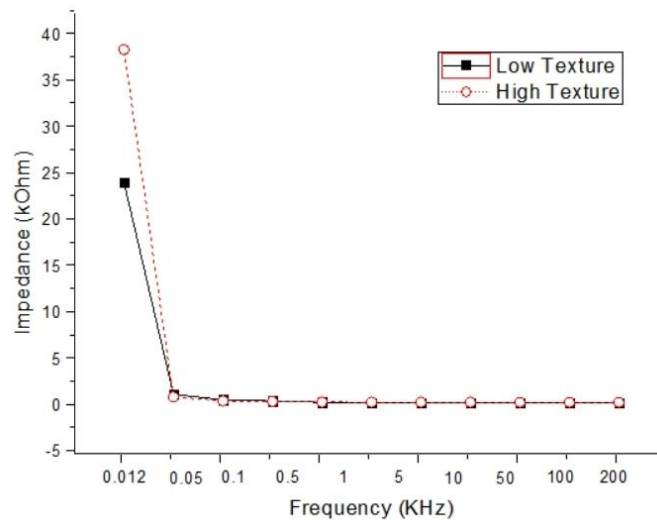
รูปที่ 4.15 (a) แสดงประสิทธิภาพของสมการในการสอบเทียบสำหรับความแน่นเนื้อเมื่อทำการทดสอบกับตัวอย่างในชุดการสอบเทียบและรูปที่ 4.15 (b) แสดงความแม่นยำของสมการในการสอบเทียบสำหรับความแน่นเนื้อเมื่อทำการทดสอบกับตัวอย่างในชุดการทำนาย



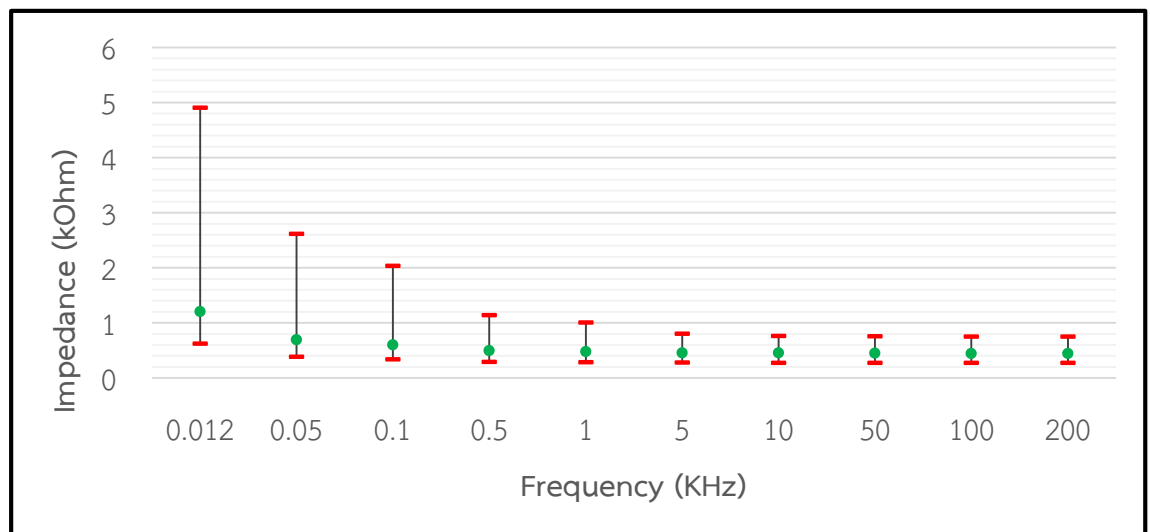
รูปที่ 4.15 แผนการกระจายของพื้นผิวจริงและพื้นผิวที่คาดการณ์ไว้  
ในชุดการสอบเทียบ (a) และในชุดการทำนาย (b)

## 4.2 กราฟเปรียบเทียบกลุ่ม texture สูงกับ texture ต่ำของผลิตภัณฑ์เต้าหู้กับค่าทางไฟฟ้าต่างๆ

จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า impedance เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของเต้าหู้ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำ ผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเต้าหู้ที่มี texture สูงกับกลุ่มเต้าหู้ที่มี texture ต่ำมีค่า impedance ที่ใกล้เคียงกัน ในทุกช่วงความถี่ส่งผลให้ค่า impedance ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $p>0.05$ )

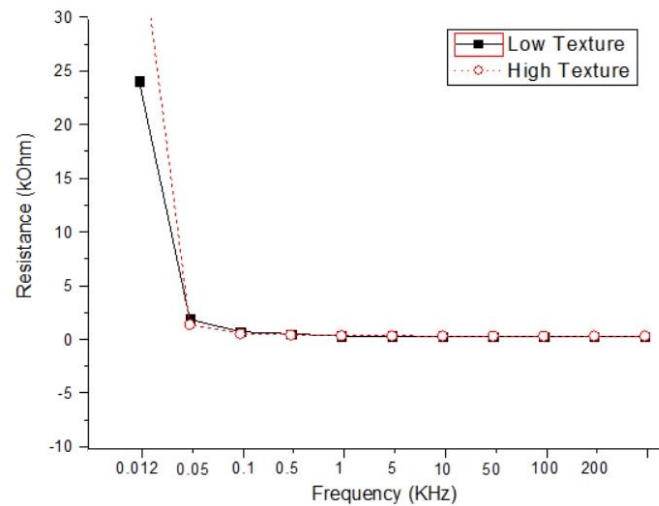


รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบค่า impedance ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน

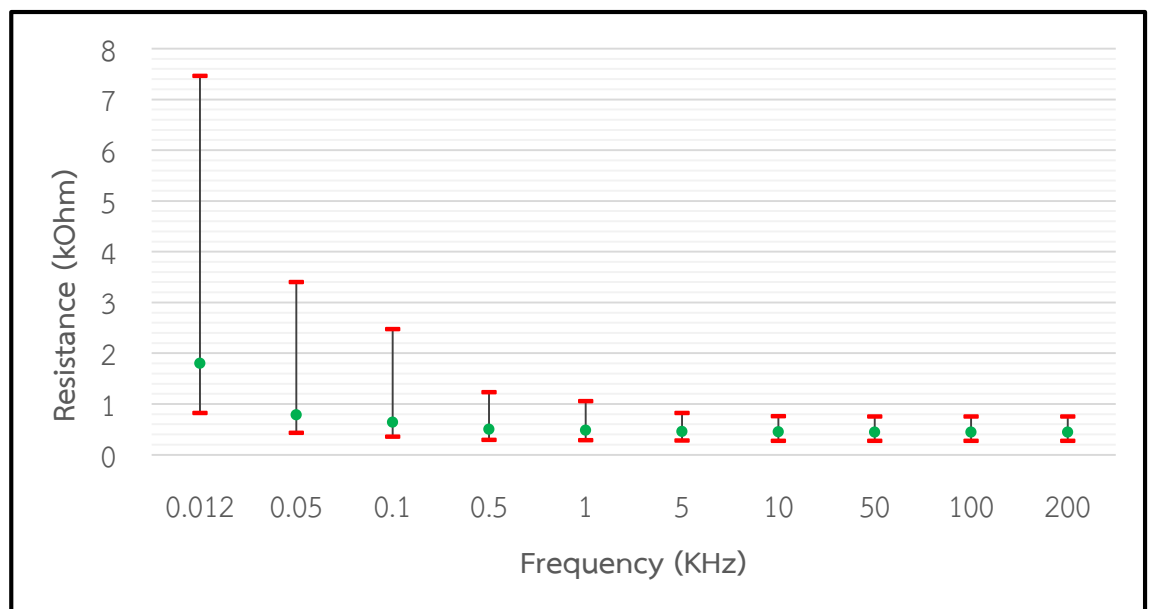


รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ impedance

จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า resistance เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของ เต้าหู้ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำ ผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเต้าหู้ที่มี texture สูงกับกลุ่มเต้าหู้ที่มี texture ต่ำมีค่า resistance ที่ใกล้เคียงกันในทุกช่วงความถี่ส่งผลให้ค่า resistance ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $p>0.05$ )

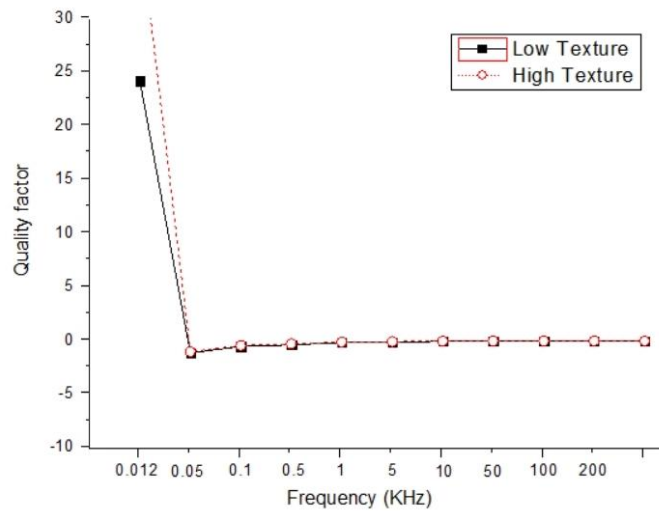


รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบค่า resistance ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน

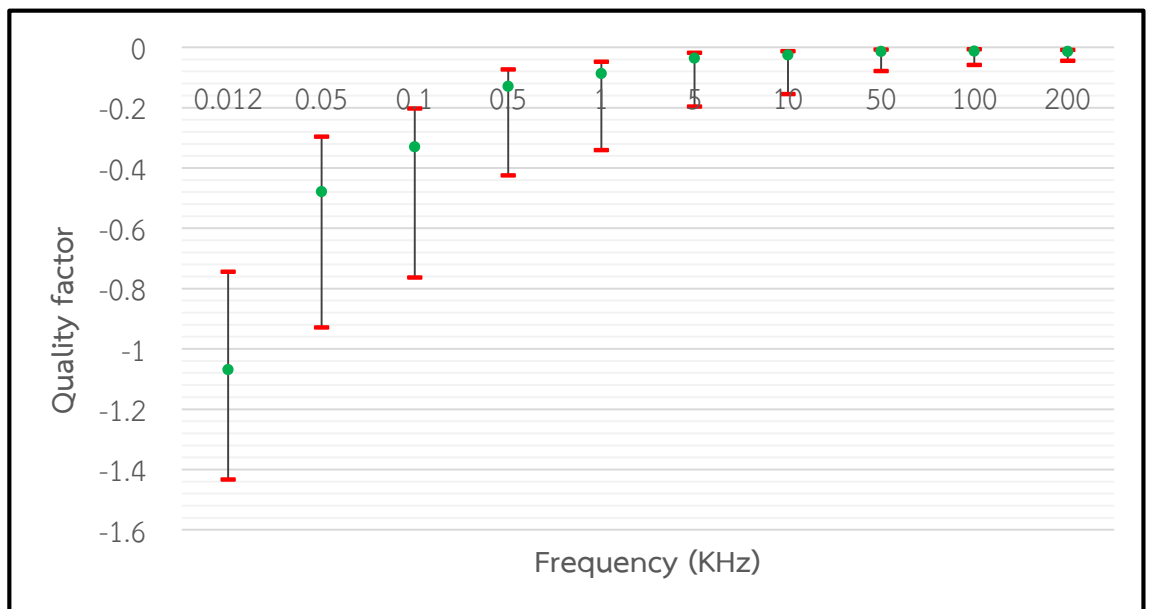


รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ resistance

จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า quality factor เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของเต้าหู้ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำ ผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเต้าหู้ที่มี texture สูงกับกลุ่มเต้าหู้ที่มี texture ต่ำมีค่า quality factor ที่ใกล้เคียงกันในทุกช่วงความถี่ส่งผลให้ค่า quality factor ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $p > 0.05$ )

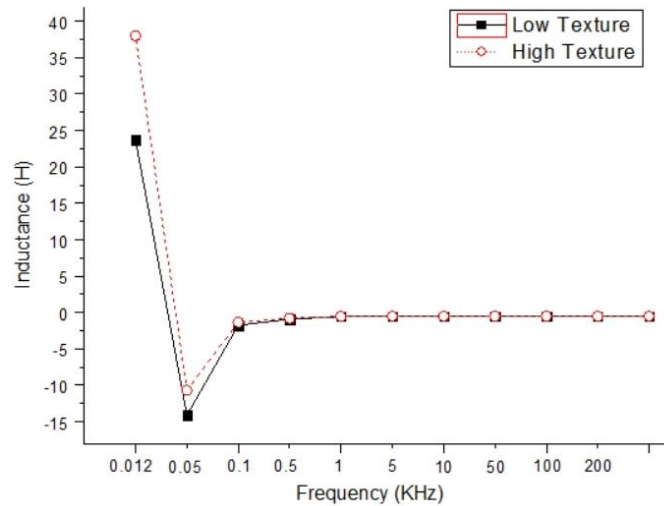


รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบค่า quality factor ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน

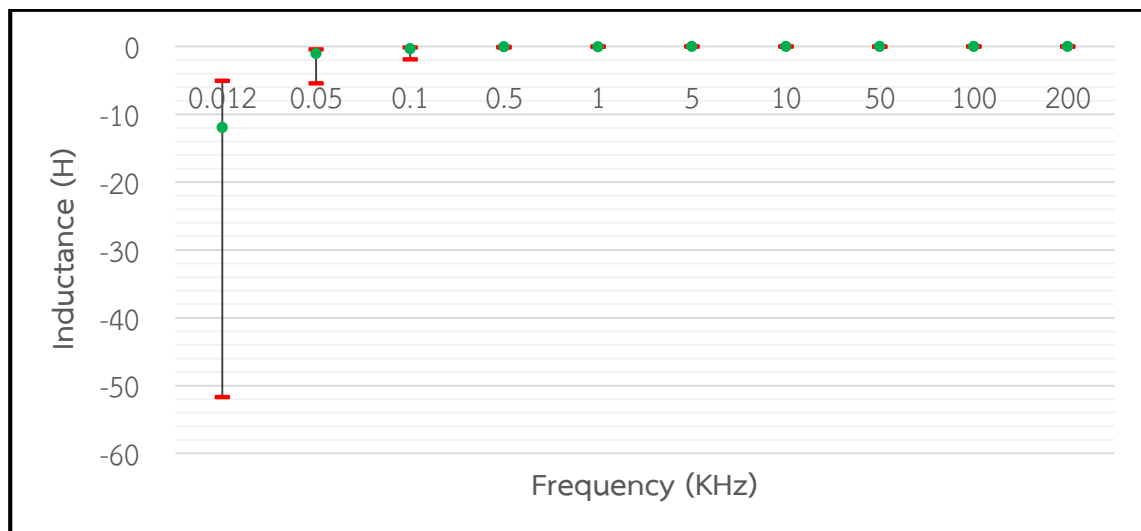


รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ quality factor

จากรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า inductance เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของเต้าหู้ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำ ผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเต้าหู้ที่มี texture สูงกับกลุ่มเต้าหู้ที่มี texture ต่ำมีค่า inductance ที่ใกล้เคียงกัน ในทุกช่วงความถี่ส่งผลให้ค่า inductance ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $p>0.05$ )

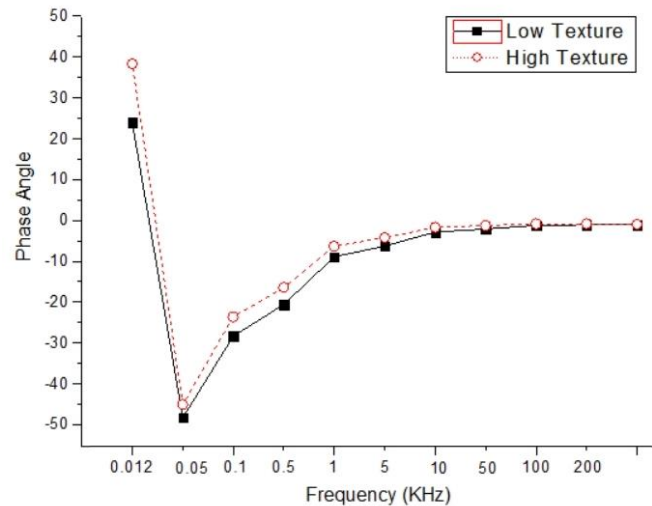


รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบค่า inductance ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน

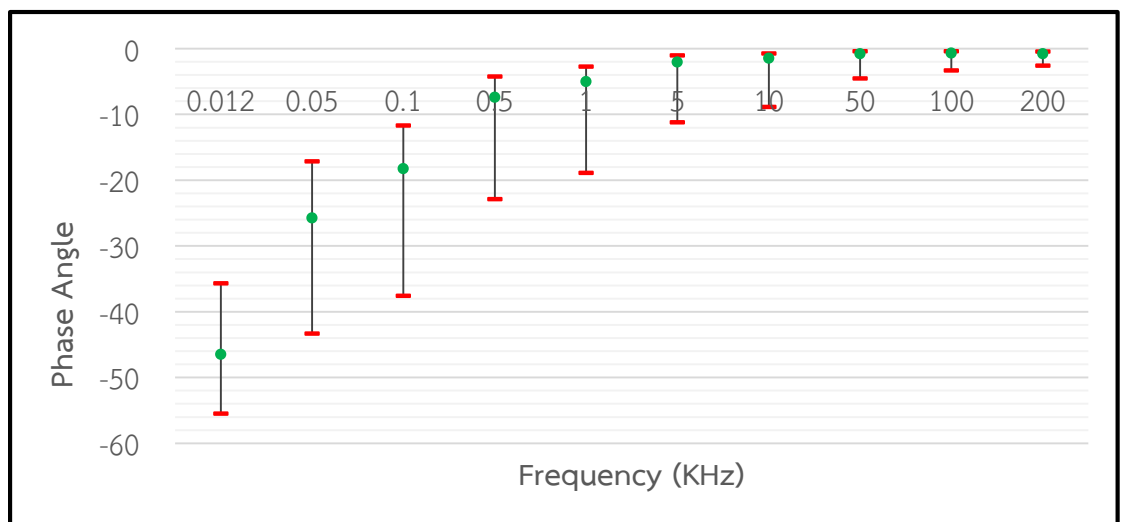


รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ inductance

จากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า phase angle เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของเต้าหู้ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำ ผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเต้าหู้ที่มี texture สูงกับกลุ่มเต้าหู้ที่มี texture ต่ำมีค่า phase angle ที่ใกล้เคียงกัน ในทุกช่วงความถี่ส่งผลให้ค่า phase angle ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $p>0.05$ )

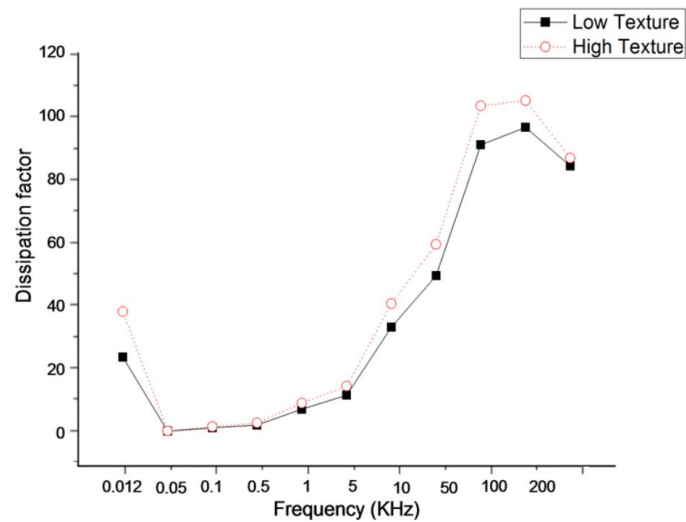


รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่า phase angle ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน

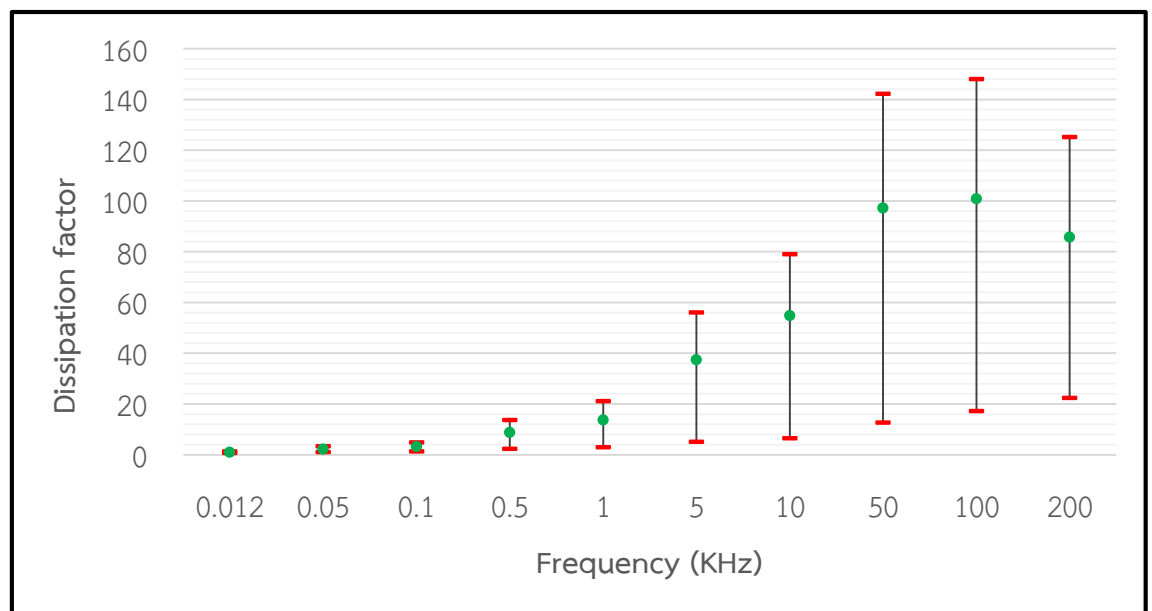


รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ phase angle

จากรูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า dissipation factor เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของเต้าหู้ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำ ผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเต้าหู้ที่มี texture สูงจะมีค่า dissipation factor ที่สูงกว่าในกลุ่มเต้าหู้ที่มี texture ต่ำในทุกช่วงความถี่ส่งผลให้ค่า dissipation factor มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $p < 0.05$ )

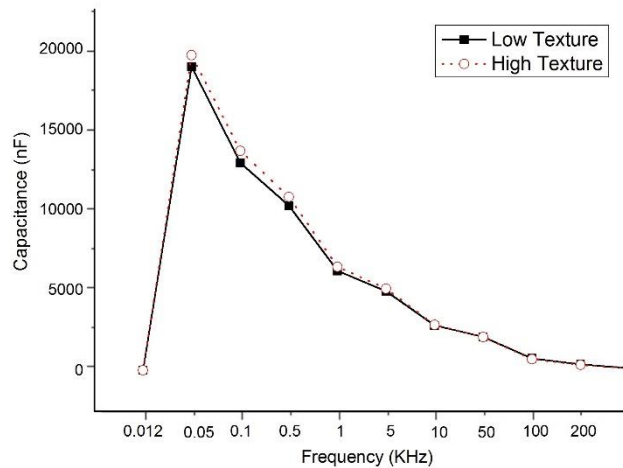


รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบค่า dissipation factor ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน

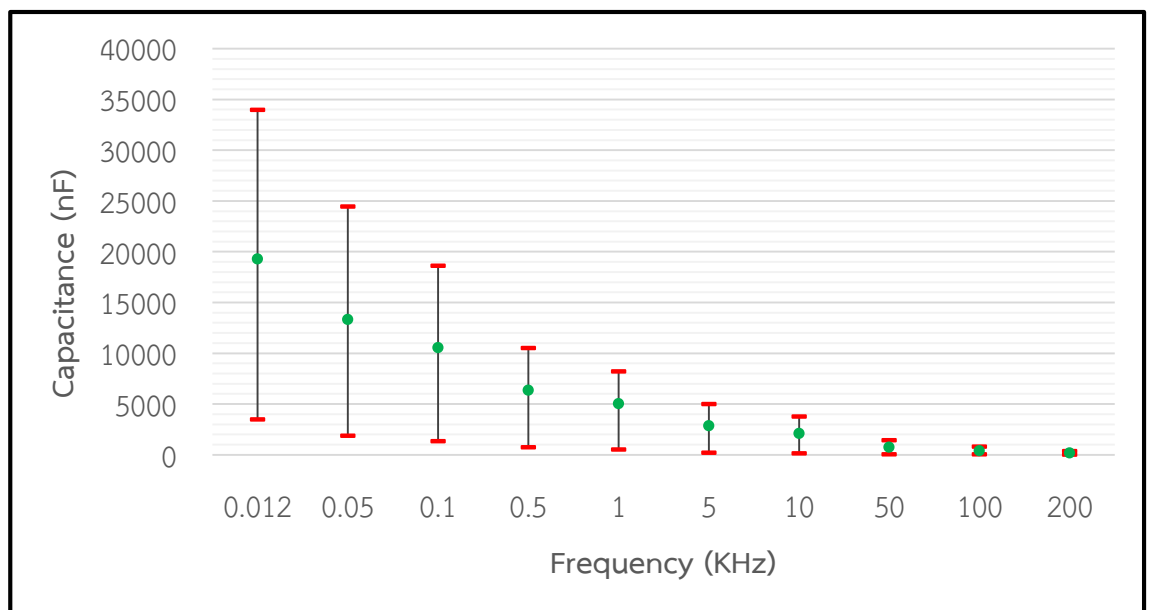


รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ dissipation factor

จากรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบค่า capacitance เมื่อแบ่งกลุ่มตัวอย่างของ เต้าหู้ที่มี texture ต่างกัน ออกเป็น 2 กลุ่ม คือที่มี texture สูงและกลุ่มที่มี texture ต่ำ ผลเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มเต้าหู้ที่มี texture สูงจะมีค่า capacitance ที่สูงกว่าในกลุ่มเต้าหู้ที่มี texture ต่ำ ส่งผลให้ค่า capacitance มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $p < 0.05$ )



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่า capacitance ของเต้าหู้ 2 กลุ่มที่มี texture ต่างกัน



รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ค่า texture ของเต้าหู้กับ capacitance

ในตารางที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างของ calibration และกลุ่มของ prediction ช่วงของ prediction จะอยู่ในช่วงของ calibration ในส่วนของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ calibration และ prediction จะมีค่าใกล้เคียงกัน

**ตารางที่ 4.4** การเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างของ calibration และกลุ่มของ prediction ของเต้าหู้

	Firmness (N)	
	Calibration Set	Prediction Set
N	65	32
Range	10.44-48.34	16.20-48.15
SD	5.902	6.017

N = จำนวนข้อมูลของเซลล์, SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าทางไฟฟ้าของความถี่ทั้งหมดที่ทำการทดสอบ (0.012, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50, 100 และ 200 kHz) ถูกนำมาใช้เป็นตัวแปรต้น สมการความแน่นเนื้อของ calibration จะทำโดยใช้ PLSR และตรวจสอบความถูกต้องโดยตัวอย่างในชุด prediction ข้อมูลใน calibration (จำนวนข้อมูล = 65) จะถูกปรับปรับสภาพให้เหมาะสมเพื่อเป็นสมการที่ดีที่สุด ผลจากการทดลองในตารางที่ 4.5 พบว่าข้อมูลแบบ smoothing5 ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ดังนั้นข้อมูลแบบ original ของสมการ calibration จึงถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองการสอบเทียบในการศึกษานี้

**ตารางที่ 4.5** การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลจากการปรับและแก้ไขโดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในชุดการสอบเทียบของเต้าหู้

Pretreatment	N	F	R <sup>2</sup>	RMSECV(N)
Original	65	7	0.524	6.334
Smoothing5	65	5	0.576	5.902
1 <sup>st</sup> Derivatives	65	14	0.553	6.045
2 <sup>nd</sup> Derivatives	65	14	0.481	6.293
SNV	65	14	0.423	6.808

R<sup>2</sup> = ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ, F = จำนวนแฟกเตอร์ของสมการ PLSR

RMSECV = ความคลาดเคลื่อนในการทำนาย, SNV = การปรับความแปรปรวนให้เป็นมาตรฐาน

ผลลัพธ์ทางสถิติของแบบจำลองการสอบเทียบ เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลองในตารางที่ 4.6 แสดงผลลัพธ์ของประสิทธิภาพของแบบจำลองในกลุ่มของ calibration (R<sup>2</sup> = 0.576 และ RMSEC = 5.902 N) และความแม่นยำของแบบจำลองในกลุ่มของ prediction (R<sup>2</sup> = 0.505, RMSEP = 6.017 N) ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองสามารถใช้ในการทำนายได้

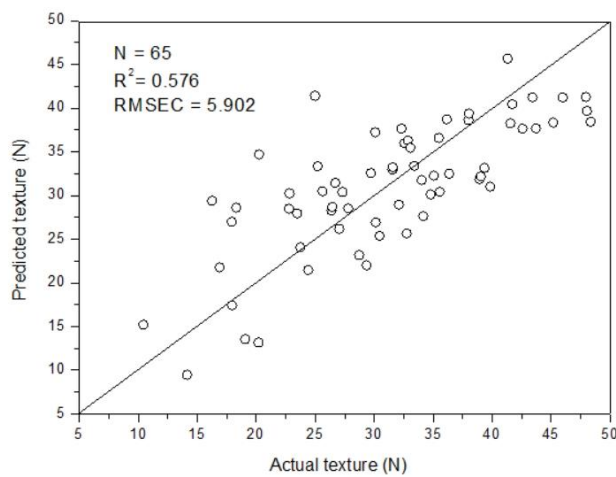
ตารางที่ 4.6 ผลลัพธ์ทางสถิติของแบบจำลอง PLSR สำหรับ texture ของเต้าหู้

Sample set	Texture				
	N	F	R <sup>2</sup>	RMSEC(N)	RMSEP(N)
Calibration	65	6	0.576	5.902	-
Prediction	32	6	0.505	-	6.017

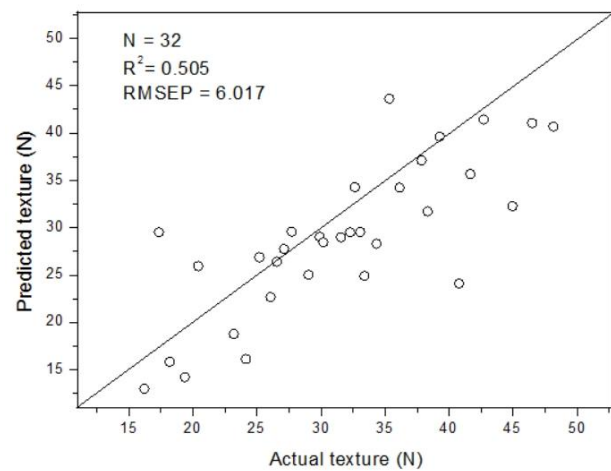
F = จำนวนแฟกเตอร์ของสมการ PLSR, RMSEP = ค่าผิดพลาดในการทำนาย

RMSEC = ความน่าเชื่อถือของการประมาณการโดยใช้ regression, N = จำนวนข้อมูลของเต้าหู้

รูปที่ 4.30 (a) แสดงประสิทธิภาพของสมการในการสอบเทียบสำหรับความแน่นเนื้อเมื่อทำการทดสอบกับตัวอย่างในชุดการสอบเทียบและรูปที่ 4.16 (b) แสดงความแม่นยำของสมการในการสอบเทียบสำหรับความแน่นเนื้อเมื่อทำการทดสอบกับตัวอย่างในชุดการทำนาย



(a)



(b)

รูปที่ 4.30 แผนการกระจายของพื้นผิวจริงและพื้นผิวที่คาดการณ์ไว้  
ในชุดการสอบเทียบ (a) และในชุดการทำนาย (b)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาเรื่อง การทำนายเนื้อสัมผัสของเยลลี่และเต้าหู้อ่อนแบบไม่ทำลายโดยใช้สมการหลายตัวแปร ได้ข้อสรุปดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ได้สร้างสมการ โดยวิธี PLSR ในการทำนายค่า texture ของเยลลี่โดยเทคนิคคุณสมบัติทางไฟฟ้า การสร้างสมการจากตัวแปรอิสระหลายตัวแปร ได้แก่ capacitance, inductance, impedance, resistance, dissipation factor, quality factor และ phase angle และคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความแน่นเนื้อ พบว่าการใช้ข้อมูลต้นฉบับให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้ค่าค่าความถูกต้องของแบบจำลองในชุดการทำนายได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ที่ 0.636 และค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาดกำลังสองของการทำนาย (RMSEP) ที่  $RMSEP = 0.128 N$ . ผลการศึกษาพบว่าเทคนิคการวัดทางไฟฟ้าสามารถใช้ในการหาความแน่นเนื้อของเยลลี่ได้

5.1.2 ได้สร้างสมการ โดยวิธี PLSR ในการทำนายค่า texture ของเต้าหู้โดยใช้เทคนิคคุณสมบัติทางไฟฟ้า การสร้างสมการจากตัวแปรอิสระหลายตัวแปร ได้แก่ capacitance, inductance, impedance, resistance, dissipation factor, quality factor และ phase angle และคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความแน่นเนื้อ พบว่าการใช้ข้อมูล Smoothing5 ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดค่าความถูกต้องของแบบจำลองในชุดการทำนายได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ที่ 0.505 และค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาดกำลังสองของการทำนาย (RMSEP) ที่ 6.017N ผลการศึกษาพบว่าเทคนิคการวัดทางไฟฟ้าสามารถใช้ในการหาความแน่นเนื้อของเต้าหู้ได้

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 จากการทดลองขั้นตอนในการวัดค่าทางไฟฟ้าของเยลลี่ สิ่งสำคัญมากที่ควรควบคุมให้คงที่เพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด คือเรื่องของอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิส่งผลมากต่อความอ่อนและความแข็งของเยลลี่

5.3.2 ในกระบวนการทำเต้าหู้ หากต้องการรีดน้ำออกจากตัวเต้าหู้ น้ำหนักที่ใช้ในการกดทับควรหนักให้มากพอ และมีการกระจายน้ำหนักแบบเท่าๆกัน เพื่อให้ความแน่นเนื้อที่ได้จากการกำหนดระยะเวลาส่งผลให้เต้าหู้มีค่าความแน่นเนื้อที่แตกต่างกัน



- สมศักดิ์ ชุณหรัศมิ์. 2553. **สถานการณ์ผู้สูงอายุไทย พ.ศ. 2552**. กรุงเทพฯ: บริษัทที่ควีพีจำกัด.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเยลลี่เหลว**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [http://app.tisi.go.th/otop/pdf\\_file/tcps518\\_47.pdf](http://app.tisi.go.th/otop/pdf_file/tcps518_47.pdf) (วันที่สืบค้น 18 มกราคม 2561)
- สุพจน์ ตุงคเศรษฐศ. 2553. “บทที่ 2 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาตรฐานและตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาตรฐาน (Standard Inductor and Capacitor)”. หน้า 63. ใน **มาตรวิทยา การสอบเทียบมาตรฐานไฟฟ้า**. 2552: 063
- สุพัตรา แสงรุจี. 2555. **อาหารผู้สูงอายุ**. กรุงเทพฯ: คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล.
- สุวดี น้าพาเจริญ และชลธิชา จำรัสพร. 2557. **R-Squared**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [http://www.tpa.or.th/writer/read\\_this\\_book\\_topic.php](http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php) (วันที่สืบค้น 11 มิถุนายน 2560)
- อดิสร มาตรพันธ์นา. 2556. **เฟสและเฟสเซอร์ไดอะแกรม**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://wiki.stjohn.ac.th/groups/poly1/wiki/06f38/> (วันที่สืบค้น 11 มิถุนายน 2560)
- เอกสิทธิ์ พัทธวงศ์ศักดิ์. 2558. การแบ่งข้อมูลเพื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพของโมเดล. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://dataminingtrend.com/2014/data-mining-techniques/cross-validation/> (วันที่สืบค้น 15 มิถุนายน 2560)
- Barnes, R.J., Dhanoa, M.S. and Lister, S.J. 1993. Correction to the description of standard normal variate (SNV) and detrend (DT) transformations in Practical spectroscopy with applications in food and beverage analysis. **Journal Near Infrared Spectroscopy**. 1: 185-186
- Cheng, J.H., Qu, J.H. and Sun, D.W. 2014. Visible/near-infrared hyperspectral imaging prediction of textural firmness of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) as affected by frozen storage. **Food Research International**. 56: 190-198.
- Du, C.J. and Sun, D.W. 2005. Comparison of three methods for classification of pizza topping using different colour space transformations. **Journal of Food Engineering**. 68(3): 277-287.
- GW Instek Co.,Ltd. 2011. **LCR 800's user manual**. New Taipei city : Taiwan.
- Harrington, R.F. 2001. **Time-Harmonic Electromagnetic Fields**. USA: Reissued original 1961
- He, H.J. and Sun, D.W. 2015. Hyperspectral imaging technology for rapid detection of various microbial contaminants in agricultural and food products. **Trends in Food Science & Technology**. 46: 99-109.
- Huong, H.T. and Teerachaichayut, S. 2017. Non-destructive prediction of moisture content of lime (*Citrus aurantifolia* Swingle 'Paan') by multiple regression analysis of its electrical and physical properties. **Acta Horticulturae (ISHS)**. 1152: 299-306.

- Jannok, P., Petcharaporn, K. and Teerachaichayut, S. 2014. Detection of internal mold infection in tomato by transmittance near infrared spectroscopy. **Acta Hort (ISHS)**. 1053: 93-99.
- Janhira, A., Thanapase, W., Kasemsumran, S. and Anusornwongchai, J. 2010. Brix Value Determination of Longkong Fruits Using Near Infrared Instrument. **Journal of Agricultural Science (JAS)**. 41: 29-32.
- Johansson, D. 2003. Partial least squares method (PLS). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [http://digital\\_collect.lib.buu.ac.th/dcms/files/53810233/chapter2.pdf](http://digital_collect.lib.buu.ac.th/dcms/files/53810233/chapter2.pdf) (วันที่สืบค้น 11 มิถุนายน 2560)
- Juansah, J., Budiastara, I.W., Dahlan, K. and Seminar, K.B. 2012. The prospect of electrical impedance spectroscopy as nondestructive evaluation of citrus fruits acidity. **Journal of engineering & technology**. 12(4): 1-8
- Kawano, S., Fujiwara, T. and Iwamoto, M. 1993. Nondestructive Determination of Sugar Content in Satsuma Mandarin Using NIR Transmittance. **Horticultural Science**. 62: 465-470.
- Kuson, P. and Terdwongworakul, A. 2013. Minimally-destructive evaluation of durian maturity based on electrical impedance measurement. **Journal of Food Engineering**. 116: 50-56
- Ramo, S. Whinnery, J.R. and Duzer, T.V. 1994. **Fields and waves in communication electronics**. USA: John Wiley and sons
- Mendoza, F., Lu, R., Ariana, D., Cen, H. and Bailey, B. 2011. Integrated spectral and image analysis of hyperspectral scattering data for prediction of apple fruit firmness and soluble solids content. **Postharvest Biology and Technology**. 62: 149-160.
- Narungpan, R. 2006. Root mean square error of cross validation (RMSECV). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://research.dusit.ac.th/menu/abstra/abstract/full/sci/narungpan/ch2.pdf>
- Reich, G. 2005. Near-infrared spectroscopy and imaging: Basic principles and pharmaceutical applications. **Advanced Drug Delivery Reviews**. 57: 1109-1143.
- Roadstrum. W.H., and Wolaver. D.H. 1994. **Electrical engineering for all engineers**. 2<sup>nd</sup>. John Wiley & Sons : United states of America
- Seehanam, P. 2016. Evaluation of Total Soluble Solids in Passion Fruit by Near Infrared Spectroscopy. **Songklanakarin Journal of Plant Science**. Vol 3: 94-101.
- Siesler, H.W., Ozaki, Y., Kawata, S. and Heise, H.M. 2002. "Near-Infrared Spectroscopy : Principle Instrument, Application." 348pp. WILEY-VCH Verlag GmbH Germany.

- Soltani, M., Alimardani, R. and Omid, M. 2010. Prediction of banana quality during ripening stage using capacitance sensing system. **Australian Journal of Crop Science (AJCS)**. 4(6): 443-447.
- Suktanarak, S. and Teerachaichayut, S. 2017. Non-destructive quality assessment of hens' eggs using hyperspectral images. *Journal of Food Engineering*. 215: 97-103
- Sun, D.W. and Brosnan, T. 2003. Pizza quality evaluation using computer vision - part 1 - Pizza base and sauce spread. **Journal of Food Engineering**. 57(1): 81–89.
- Teerachaichayut, S. and Huong, T.H. 2017. Non-destructive prediction of total soluble solids, titratable acidity and maturity index of limes by near infrared hyperspectral imaging. **Postharvest Biology and Technology**. 133: 20-25.
- William, P.C. and Norris, K.H. 2001. “Near-Infrared Technology in Agricultural and Food Industries. 2<sup>nd</sup> ed.” **American Association of Cereal Chemists, Inc.** USA : St. Paul, Miinnesota
- Wu, D. and Sun, D.W. 2013. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: Part I: Fundamentals. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 19: 1–14.
- Zheng, C.X., Sun, D.W. and Zheng, L.Y. 2006. Recent developments and applications of image features for food quality evaluation and inspection – a review. **Trends in Food Science & Technology**. 17(12): 642–655.
- Zhu, X., Guo, W., and Wu, X. 2012, Frequency- and temperature-dependent dielectric properties of fruit juices associated with pasteurization by dielectric heating. **Journal of food engineering**, 109: 258-266.
- Zywica, R., Grazyna, P.K., and Wojcik, J. 2005, Application of food products electrical model parameters for evaluation of apple pure´e dilution. *Journal of food engineering*. 67: 413-418.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### การวัดค่าตัวแปรทางไฟฟ้า

การวัดค่าทางไฟฟ้าจะใช้เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าแอนกประสงค์ ยี่ห้อ GW INSTRON รุ่น LCR-800 ตัวแปรทางไฟฟ้าที่ใช้วัด ได้แก่ ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) มีหน่วยเป็น ฟารัด (farad: F) , ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance) มีหน่วยเป็นเฮนรี (henry, H), ค่าความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance) มีหน่วยเป็นโอห์ม (ohm,  $\Omega$ ), ความต้านทานไฟฟ้า (resistance) มีหน่วยเป็นโอห์ม (ohm,  $\Omega$ ), ตัวประกอบคุณภาพ (quality factor), เฟส (phase angle), ตัวประกอบการแผ่กระจาย (dissipation factor)

#### ขั้นตอนการใช้เครื่อง LCR meter

1. ทำการเชื่อมต่อเครื่อง LCR-800 เข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลอัตโนมัติ
2. ทำการสร้างไฟล์ เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลแต่ละตัวอย่าง (1ตัวอย่างต่อ1ไฟล์) ขั้นตอนการสร้างไฟล์ดังนี้
  - 2.1 เลือกคำสั่ง file setting
  - 2.2 เลือกโพลเดอร์ที่ต้องการจะเซฟข้อมูล
  - 2.3 เลือก com2 ที่หัวข้อ port แล้วกด ok
 จะเห็นว่าเครื่องขึ้นสถานะ online หมายความว่าเครื่อง LCR-800 ได้ถูกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เรียบร้อยแล้ว และพร้อมใช้งาน
3. ขั้นตอนต่อมาคือจะทำการ คาลิเบรตเครื่องทุกครั้งเมื่อทำการเปิดเครื่องหรือเปลี่ยนตัวอย่างใหม่ ขั้นตอนของการคาลิเบรตเครื่องมีดังนี้
  - 3.1 เลือกที่คำสั่ง MANU ด้านขวาล่าง หรือ F5
  - 3.2 เลือกคำสั่ง OFFSET หรือ F1
  - 3.3 กด F1 ในส่วนของ OPEN TEST จะเป็นการตั้งค่าศูนย์ด้วยการเปิดวงจร ตัวหนีบที่จะทำการวัดต้องไม่สัมผัสกับวัสดุใดๆ
  - 3.4 กด F2 ในส่วนของ SHORT TEST จะเป็นการตั้งค่าศูนย์ด้วยการปิดวงจร โดยตัวหนีบที่ใช้อัดจะต้องไปหนีบไว้กับแท่งเหล็กที่เป็นตัวนำทั้ง 2 ข้าง
4. ทำการ setting ค่า average ให้เท่ากับ 10
5. จะเริ่มทำการวัดค่าทางไฟฟ้าทั้งหมด 8 ค่า ได้แก่ capacitance, inductance, impedance, resistance, dissipation factor, quality factor และ phase angle ค่าทางไฟฟ้าแต่ละค่าต้องทำการวัดความถี่ ในการตั้งค่าความถี่ จะทำการกดเลือกไปที่ปุ่ม Freq จากนั้นใส่ค่าความถี่ที่ต้องการจะวัดโดยจะใช้ค่าความถี่ทั้งหมด 10 ค่า ได้แก่ 0.012, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50, 100 และ 200 kHz
6. เมื่อทำการเก็บข้อมูลเสร็จในแต่ละตัวอย่าง จะต้องทำการปิดเครื่องเพื่อให้ข้อมูลจากเครื่อง LCR-800 เซฟลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่ได้อัดต่อ1ตัวอย่างจะเท่ากับ 70 ข้อมูลทางไฟฟ้า

ภาคผนวก ข  
รูปที่เกี่ยวข้องในการทำการทดลอง



รูปที่ ข.1 เมล็ดถั่วเหลือง



รูปที่ ข.2 ขั้นตอนการรีดน้ำออกจากเต้าหู้



รูปที่ ข.3 เครื่องวัดความแน่นเนื้อ texture ยี่ห้อ Texture Technologies รุ่น Ta-hd plus



รูปที่ ข.4 อุปกรณ์การวัดการวัดค่าทางไฟฟ้าที่ผลิตขึ้น



รูปที่ ข.5 เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า LCR800



รูปที่ ข.6 การวัดค่าทางไฟฟ้าของเยลลี่โดยแทงเหล็กต่อเข้ากับเครื่อง LCR800

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	ปุณณดา อ่อนน้อม
วัน เดือน ปีเกิด	9 สิงหาคม 2537 จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	89/1 หมู่ 3 ตำบลบางแก้ว อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540 โทร. 087-5944566 ponnutcha_ice@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	2561 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) คณะอุตสาหกรรมเกษตร สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง 2560 วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) คณะอุตสาหกรรมเกษตร สาขาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิจัย	Onnom, P. and Teerachaichayut, S. 2561. Development of calibration models to predict texture and total soluble solids in jelly using hyperspectral imaging. ACENS. 402-410