



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การทำนายคุณภาพของผลมะนาวแบบไม่ทำลายโดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้า  
Non-destructive prediction of lime's qualities using electrical properties

นายสนธิสุข ธีระชัยชยุติ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย  
จากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559  
คณะอุตสาหกรรมเกษตร  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

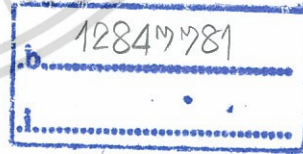


รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การทำนายคุณภาพของผลมะนาวแบบไม่ทำลายโดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้า  
Non-destructive prediction of lime's qualities using electrical properties

นายสนธิสุข ธีระชัยขุติ

RCIT  
81921  
9559



งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

เลขทะเบียน 147251

คณะอุตสาหกรรมเกษตร

วันเดือนปี 13 ก.ค. 2560

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การทำนายคุณภาพของผลมะนาวแบบไม่ทำลายโดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้า

ชื่อโครงการ Non-destructive prediction of lime's qualities using electrical properties

แหล่งเงิน เงินรายได้คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 43,000 บาท

ระยะเวลาการทำวิจัย 1 ปี (1 ตุลาคม 2558 - 30 กันยายน 2559)

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

รศ.ดร. สนธิสุข อีระชัยชยติ คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

มะนาวเป็นวัตถุดิบการเกษตรที่สำคัญของประเทศไทยทั้งในเชิงส่งออกและบริโภคภายในครัวเรือน ให้รสเปรี้ยวและเป็นส่วนประกอบหลักของอาหารไทยหลากหลายชนิด ดังนั้นผู้บริโภคจึงต้องการมะนาวที่มีปริมาณน้ำและความเปรี้ยวตามต้องการอย่างสม่ำเสมอ หากสามารถทราบปริมาณเหล่านี้ได้ล่วงหน้าก็จะเป็นประโยชน์ต่อการค้ามากยิ่งขึ้น ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายตัวแปรเพื่อทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณกรด ปริมาณน้ำของมะนาวและความชื้นโดยศึกษาจากตัวแปรแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ได้แก่ น้ำหนัก, ขนาด, ปริมาตร, ค่าทางสีในระบบ L a b , ค่าสัญญาณวัดค่าความเข้มแสงทะลุผ่านตัวอย่างจากเซนเซอร์ และค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก, ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า, ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงซ้อน (อิมพีแดนซ์), ค่า quality & dissipation factor ที่ผ่านการทดลองจาก 10 ความถี่ไฟฟ้า (0.012 kHz, 0.05 kHz , 0.1 kHz, 0.2 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz) โดยศึกษาทั้งมะนาวแป้น ผลการศึกษาพบว่า สมการหลายตัวแปรทั้งทางกายภาพและทางไฟฟ้ามีศักยภาพในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ( $R=0.8$ ), ปริมาณกรด ( $R=0.89$ ) ปริมาณน้ำของมะนาว ( $R^2=0.769$ ) และ ความชื้น ( $R^2=0.934$ )

คำสำคัญ: มะนาว, ไม่ทำลาย, การตรวจสอบ, คุณภาพภายใน, การทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Abstract

Lime is an important agricultural product of Thailand for both export and household. Also it is a Thai traditional vegetable which give sour in many food. Consequently, reliable quality of lime is expected from consumer that should have stable water content and enough sour. It will be beneficial for commercial if we can predict total soluble solids, acidity water content and moisture content without doing any damage to sample. Therefore we did the project in order to create the non-destructive multivariate mathematical model. The models can be able to predict the internal characteristic such as total soluble solids, acidity water content and moisture content. We studied both physical properties such as weight, size, volume, color parameters in L a b system , light intensity from photosensor and electrical parameters like dielectric constant , inductance, impedance , quality & dissipation factor in 10 ranges of frequency (0.012 kHz, 0.05 kHz , 0.1 kHz, 0.2 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz). The results show that both physical and electrical properties could be used to establish the models. It had a potential to predict total soluble solids ( $R=0.8$ ), acidity ( $R=0.89$ ), water content ( $R^2=0.769$ ) and moisture content ( $R^2=0.934$ ).

**Keywords:** lime, non-destructive, evaluation, internal quality, prediction

## กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำขอขอบพระคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุมัติเงินงบประมาณเพื่อมาสนับสนุนงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ จนทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสิ้นด้วยดี

รศ.ดร.สนธิสุข ธีระชัยชยุติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
สัญลักษณ์คำย่อและอักษรย่อ.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นทางพฤกษศาสตร์ของมะนาว.....	4
2.2 การทดสอบคุณภาพของมะนาวด้วยวิธีการไม่ทำลาย.....	7
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	14
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	14
3.2 อุปกรณ์.....	14
3.3 วิธีการทดลอง.....	15
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	22
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางไฟฟ้ากับการทดลอง.....	22
4.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุตัวแปร.....	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	35
เอกสารอ้างอิง .....	36
ภาคผนวก .....	39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางสถิติเชิงพรรณนาเปรียบเทียบปริมาณน้ำมะนาวของกลุ่มสร้างสมการกับกลุ่มทดสอบสมการของมะนาวแป้น.....	25
4.2 การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อพยากรณ์ค่าปริมาณน้ำ โดยนำตัวแปรอิสระที่เป็นคุณสมบัติทางกายภาพและไฟฟ้าเข้าสู่สมการ ประมวลผลด้วยวิธี STEPWISE.....	26
4.3 ค่าปริมาณน้ำมะนาวแป้นที่ได้จากการทดลองกับค่าปริมาณน้ำมะนาวแป้นจากการทำนายได้จากตัวแปรทางตัวแปรทางกายภาพและทางไฟฟ้า.....	27
4.4 ตารางสถิติเชิงพรรณนาเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดของมะนาวแป้นระหว่างกลุ่มสร้างสมการกับกลุ่มทดสอบสมการ.....	28
4.5 ผลการสร้างสมการและทดสอบสมการ โดยใช้ pretreatments ต่างๆ เพื่อการทำนายค่าความเป็นกรดของมะนาวแป้นโดยวิธี PLSR.....	29
4.6 ตารางสถิติเชิงพรรณนาเปรียบเทียบค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของมะนาวแป้นระหว่างกลุ่มสร้างสมการกับกลุ่มทดสอบสมการ.....	30
4.7 ผลการสร้างสมการและทดสอบสมการ โดยใช้ตัวแปรต่างๆ เพื่อการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของมะนาวแป้นโดยวิธี PLSR .....	29
4.8 ตารางสถิติเชิงพรรณนาเปรียบเทียบค่า pH ของมะนาวแป้นระหว่างกลุ่มสร้างสมการกับกลุ่มทดสอบสมการ.....	31
4.9 ตารางสถิติเชิงพรรณนาเปรียบเทียบค่าความชื้นของมะนาวแป้นระหว่างกลุ่มสร้างสมการกับกลุ่มทดสอบสมการ.....	32
4.10 การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อพยากรณ์ค่าความชื้น โดยนำตัวแปรอิสระที่เป็นคุณสมบัติทางกายภาพและไฟฟ้า.....	33

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ผลมะนาว.....	4
2.2 กราฟกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับกราฟความต่างศักย์.....	9
3.1 เครื่องวัดสี Minolta CR 300.....	16
3.2 การวัดค่าทางแสงของมะนาวต้องทำการวัด 3 จุด รอบผลมะนาวเพื่อให้ได้ค่าประมาณรอบมะนาว แต่ละจุดห่างกัน 120 องศา.....	16
3.3 เครื่องวัดสัญญาณจากเซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มแสง ขณะทำการทดลอง (จากภาพเปิดกล่อง ไว้เพื่อให้เห็นรูปแบบการวางผลมะนาวที่ชัดเจนขึ้น ขณะทดลองจริงต้องปิดกล่องเพื่อลด ผลกระทบจากแสงภายนอก.....	17
3.4 Pocket Refractometer (ATAGO รุ่น Pal-1).....	19
3.5 pH meter (INDEX รุ่น ID1000).....	19
3.6 มะนาวหลังการอบแห้ง.....	20
3.7 การชั่งน้ำหนักมะนาวหลังการอบแห้ง.....	21
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของมะนาวกับความถี่.....	22
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวนำไฟฟ้ากับความถี่.....	22
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเชิงซ้อน(อิมพีแดนซ์)กับความถี่.....	23
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกที่ปริมาณน้ำมะนาวมากกับน้ำมะนาวน้อย กับความถี่ต่างๆของมะนาวแป้น.....	23
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวนำไฟฟ้าที่ปริมาณน้ำมะนาวมากกับน้ำมะนาว น้อยกับความถี่ต่างๆของมะนาวแป้น.....	24
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงซ้อน(อิมพีแดนซ์) ที่ปริมาณน้ำ มะนาวมากกับน้ำมะนาวน้อยกับความถี่ต่างๆของมะนาวแป้น.....	24
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำมะนาวที่ได้จากการทดลองกับค่าปริมาณน้ำ มะนาวที่ได้จากการทำนายด้วยตัวแปรทางกายภาพและทางไฟฟ้าของมะนาวแป้น.....	28
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดของมะนาวที่ได้จากการทดลองกับค่าความ เป็นกรดน้ำมะนาวที่ได้จากการทำนายด้วยตัวแปรไฟฟ้าของมะนาวแป้น.....	29
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของมะนาวที่ได้จากการ ทดลองกับค่าความเป็นกรดน้ำมะนาวที่ได้จากการทำนายด้วยตัวแปรไฟฟ้าของมะนาวแป้น.....	30
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่ปริมาณค่าความชื้นมากกับค่าความชื้นน้อย กับความถี่ต่างๆของมะนาวแป้น.....	32
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงซ้อน(อิมพีแดนซ์) ที่ปริมาณค่า ความชื้นมากกับค่าความชื้นน้อยกับความถี่ต่างๆของมะนาวแป้น.....	32
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวนำไฟฟ้าที่ปริมาณค่าความชื้นมากกับค่าความ ชื้นน้อยกับความถี่ต่างๆของมะนาวแป้น.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองกับค่าความชื้นที่ได้จากการทำนายด้วยตัวแปรทางกายภาพและทางไฟฟ้าของมะนาวแป้น.....	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สัญลักษณ์คำย่อและอักษรย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
W	weight
R	resistance
C	capacitance
L	inductance
Z	impedance
X	reactance
Q	quality factor
D	dissipation factor
MC	moisture content
MLR	multiple linear regression
PLSR	partial least square regression
$R^2$	coefficient of determination
R	correlation coefficient
N	number of sample
SEC	standard error of calibration
SEP	standard error of prediction
RMSEC	root mean square error of calibration
RMSEP	root mean square error of prediction
F	factor
GMD	geometric mean distance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1. ความเป็นมาและความสำคัญ

มะนาวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ สามารถผลิตได้ทั่วทุกภาคของประเทศ โดยเฉพาะมะนาวพันธุ์แป้นซึ่งเป็นที่ยอมรับ แต่ปัญหาใหญ่ของมะนาวคือ คุณภาพที่ไม่มีควมสม่ำเสมอ ได้แก่ ปริมาณน้ำมะนาว ความเปรี้ยวของมะนาวแต่ละผล เป็นต้น หากสามารถทำนายคุณภาพโดยไม่ทำลายได้จะเป็นประโยชน์ต่อการคัดแยกคุณภาพของมะนาว โครงการวิจัยที่เสนอนี้จึงเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ในช่วง 12 Hz – 200 KHz (ค่าความจุไฟฟ้า, ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า, ค่าความต้านทานไฟฟ้า, ค่าอิมพีแดนซ์, ค่าตัวประกอบคุณภาพ, ค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย และ ค่ามุมเฟส) ของมะนาว ร่วมกับคุณสมบัติทางกายภาพที่สามารถวัดได้แบบไม่ทำลาย ได้แก่ น้ำหนัก สี ความหนาแน่น เป็นต้น เพื่อใช้สร้างสมการทำนายคุณสมบัติภายใน ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณกรด ความชื้น pH และ ปริมาณน้ำของมะนาว เพื่อเป็นข้อมูลไปใช้ในการออกแบบระบบคัดแยกคุณภาพของผลมะนาวแบบไม่ทำลาย อันจะเป็นการสร้างเชื่อมั่นให้แก่ผู้บริโภคและเป็นการยกระดับคุณภาพของมะนาวในเชิงธุรกิจ

### 1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับคุณภาพของผลมะนาวพันธุ์แป้น
2. เพื่อให้ได้สมการทางคณิตศาสตร์ในการทำนายคุณภาพของผลมะนาวพันธุ์แป้น โดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกายภาพที่สามารถวัดได้แบบไม่ทำลาย

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาคูณภาพของมะนาวพันธุ์แป้นและค่าตัวแปรต่างๆที่สามารถวัดได้เพื่อจะทำการสร้างสมการโดยใช้เทคนิควิเคราะห์พหุตัวแปรเพื่อทำนายคุณภาพของมะนาวพันธุ์แป้น ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณกรด ความชื้น pH และปริมาณน้ำของมะนาว แบบไม่ทำลาย จากค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆในช่วงความถี่ 12 Hz – 200 KHz ที่สามารถวัดได้แบบไม่ทำลาย ได้แก่ ค่าความจุไฟฟ้า, ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า, ค่าความต้านทานไฟฟ้า, ค่าอิมพีแดนซ์, ค่าตัวประกอบคุณภาพ, ค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย และ ค่ามุมเฟส

### 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัย

#### 1.4.1 วัสดุดิบและสารเคมี

##### 1.4.1.1 วัสดุดิบ มะนาวแป้น

##### 1.4.1.2 สารเคมี โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 mol/L, ฟีนอล์ฟทาลีน

#### 1.4.2 อุปกรณ์

เวอร์เนียร์คาลิเปอร์

เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้าเอนกประสงค์

เครื่องวัดสี

ถังน้ำยูเรก้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มัลติมิเตอร์ดิจิตอล

เครื่องวัด pH (pH meter)

กระบอกตวง 100 มิลลิลิตร

ชุดแผงแผ่นเหล็กยึดด้วยสปริง (ต้นแบบ)

บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร

ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

ปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตร

ตู้อบความร้อน

#### 1.4.3 วิธีการทดลอง

ทำการทดลองด้วยการ ชั่งน้ำหนักมะนาวด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์, และวัดปริมาตรด้วยถ้วยยูเรก้า วัดขนาดทั้งสามด้านของมะนาวโดยใช้เวอร์เนียคาลิเบอร์, วัดค่าสี L, a, b, วัดค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นให้เหมาะสมกับมะนาวและวัดค่าทางไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดทางไฟฟ้าที่สามารถปรับความถี่ได้

ทำการผ่า คั้นน้ำมะนาวด้วยการบีบด้วยมือใส่ในบีกเกอร์และวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด, pH, วัดปริมาตรและน้ำหนักน้ำมะนาว, ทำการไทเทรตหาค่าความเป็นกรดด้วยการไทเทรตน้ำมะนาว 1 มิลลิลิตรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 mol/L โดยมีฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ตามลำดับ ชั่งน้ำหนักของน้ำมะนาวที่ได้ รวมถึงชั่งน้ำหนักเปลือกมะนาวที่คั้นน้ำออกแล้ว นำเปลือกมะนาวเข้าเตาอบ (hot air oven) แล้วอบในเป็นเวลา 8 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และชั่งน้ำหนักตัวอย่างเมื่อครบกำหนดเวลา เพื่อหาปริมาณน้ำมะนาวและความชื้นในแต่ละผล

นำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการสร้างสมการในการทำนายคุณภาพต่างๆ ได้แก่ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณกรด pH ความชื้นและปริมาณน้ำของมะนาวกับตัวแปรอิสระต่างๆ ได้แก่ ค่าทางไฟฟ้าต่างๆ (ค่าความจุไฟฟ้า, ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า, ค่าความต้านทานไฟฟ้า, ค่าอิมพีแดนซ์, ค่าตัวประกอบคุณภาพ, ค่าตัวประกอบการแผ่กระจาย และ ค่ามมเฟส), ค่าความหนาแน่น, ค่าสี, และค่าทางกายภาพต่างๆ ที่ได้จากการวัดของผลมะนาวด้วยวิธี Multiple Linear Regression (MLR) พร้อมทดสอบสมการโดยจะพิจารณาจากค่าความผิดพลาดจากการปรับเทียบหรือ standard error of calibration (SEC) และค่า bias ในการประเมินประสิทธิภาพในการทำนายของสมการที่ใช้ข้อมูลของกลุ่มที่แยกไว้สำหรับการทำนาย พิจารณาค่าของ correlation coefficient (R) และค่าของความผิดพลาดจากการทำนายหรือ standard error of prediction (SEP) และค่า bias ที่ได้ ใช้ในการตัดสินใจว่าสมการมีความสามารถในการทำนายได้แม่นยำมากน้อยเพียงใด โดยที่สมการที่มีความสามารถในการทำนายได้แม่นยำจะต้องมีค่า correlation coefficient ที่สูง และมีค่า standard error of prediction ที่ต่ำ ทั้งนี้จะต้องมีค่า bias ที่ต่ำ

สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการแปรรูปอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ

#### 1.5 สมมติฐานงานวิจัย

คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆของผลมะนาวมีความสัมพันธ์กับคุณภาพภายในของผลมะนาว จึงใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าในการคัดแยกคุณภาพของผลมะนาว การใช้เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามาทำนายคุณภาพของผลมะนาวจึงเป็นเทคนิคที่น่าสนใจและไม่ทำลายตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.6 คำสำคัญของการวิจัย

lime, non-destructive, evaluation, internal quality, prediction  
มะนาว, ไม่ทำลาย, การตรวจสอบ, คุณภาพภายใน, การทำนาย

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจาก เทคนิคการทำนายคุณภาพของผลมะนาวโดยการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าสามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบคุณภาพในกระบวนการคัดคุณภาพของผลมะนาว เพื่อการบริโภคและการส่งออกให้เป็นที่ยอมรับ ได้มาตรฐาน และช่วยเพิ่มมูลค่าแก่ผลผลิตเกษตรกร ได้ผลงานทางวิชาการตีพิมพ์เผยแพร่เป็นความรู้ให้แก่บุคคลทั่วไป งานวิจัยนี้จะเป็นองค์ความรู้ที่เป็นประโยชน์สามารถถ่ายทอดให้แก่ผู้ผลิต ผู้จำหน่าย เพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมวัตถุดิบที่จะจัดจำหน่าย จะได้บทความวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับชาติและสามารถสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นทางพฤกษศาสตร์ของมะนาว

มะนาว (อังกฤษ: lime) เป็นไม้ผลยืนต้นขนาดเล็ก ผลมีรสเปรี้ยวจัด จัดอยู่ในสกุลส้ม (*Citrus*) ผลสีเขียว เมื่อสุกจัดจะเป็นสีเหลือง เปลือกบาง ภายในมีเนื้อแบ่งกลีบๆ ชุ่มน้ำมาก นับเป็นผลไม้ที่มีคุณค่า นิยมใช้เป็นเครื่องปรุงรส นอกจากนี้ยังถือว่ามีคุณค่าทางโภชนาการและทางการแพทย์ด้วย (ทอง ธรรมดา , ปีที่แต่งไม่ระบุ)

ชื่อภาษาไทย	มะนาว
ชื่ออื่นๆ	ส้มมะนาว
ชื่อภาษาอังกฤษ	lime, sour lime
ชื่อวิทยาศาสตร์	<i>Citrus aurantifolia</i> (Christm. & Panzer) Swingle
ชื่อพ้อง	<i>Limolia aurantifolia</i> Christm. & Panzer, <i>Citrus javanica</i> Blume , <i>Limonia acidissima</i> Houtt.
วงศ์	Rutaceae



ภาพที่ 2.1 ผลมะนาว

ที่มา : [www.th.wikipedia.org/wiki/มะนาว](http://www.th.wikipedia.org/wiki/มะนาว)

##### 2.1.1 ลักษณะทั่วไป

ผลมะนาวโดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4 – 4.5 เซนติเมตร ต้นมะนาวเป็นไม้พุ่มเตี้ย สูงเต็มที่ราว 5 เมตร ก้านมีหนามเล็กน้อย มักมีใบดก ใบยาวเรียวเล็กน้อย คล้ายใบส้ม ส่วนดอกสีขาวอมเหลือง ปกติจะมีดอกผลตลอดทั้งปี แต่ในช่วงหน้าแล้ง จะออกผลน้อย และมีน้ำน้อย มะนาวเป็นพืชพื้นเมืองในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ผู้คนในภูมิภาคนี้รู้จักและใช้ประโยชน์จากมะนาวมาช้านาน น้ำมะนาวนอกจากใช้ปรุงรสเปรี้ยวในอาหารหลายประเภทแล้ว ยังนำมาใช้เป็นเครื่องดื่ม ผสมเกลือ และน้ำตาล เป็นน้ำมะนาว ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีทั้งในประเทศไทย และต่างประเทศทั่วโลก นอกจากนี้เครื่องดื่มแอลกอฮอล์บางชนิดยังนิยมผ่านมะนาวเป็นชั้นบางๆ เสียบไว้กับขอบแก้ว เพื่อใช้แต่งรส ในผลมะนาวมีน้ำมันหอมระเหยถึง 7% แต่กลิ่นไม่ฉุนอย่างมะกรูด น้ำมะนาวจึงมีประโยชน์สำหรับใช้เป็นส่วนผสมน้ำยาทำความสะอาด เครื่องหอม และการบำบัดด้วยกลิ่น (aromatherapy) หรือน้ำยาล้างจาน

##### 2.1.2 ชื่อของมะนาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มะนาวมีลักษณะคล้ายคลึงกับส้มทั้งหลาย ที่มีปัญหาในการจัดหมวดหมู่และแยกแยะทางอนุกรมวิธาน สำหรับชื่อวิทยาศาสตร์ที่คุ้นเคยของมะนาว ก็คือ *Citrus aurantifolia* Swingle หรือ "*Citrus aurantifolia*" (Christm & Panz) Swing." แต่ยังมีชื่ออื่นๆ อีก ดังนี้

*C. acida* Roxb.

*C. lima* Lunan

*C. medica* var. *ácida* Brandis และ

*Limonia aurantifolia* Christm

สำหรับชื่อสามัญนั้น ในหลายภาษาก็เรียกชื่อแตกต่างกันไป เช่น ในภาษาอังกฤษ เรียก Mexica lime, West Indian lime, และ Key lime หรือเรียก lime สั้นๆ ก็ได้ สาเหตุที่มีหลายชื่ออาจเป็นเพราะเป็นพืชต่างถิ่น จึงไม่มีชื่อดั้งเดิมในภาษานั้นๆ ทำให้เกิดการเสนอชื่ออื่นๆ มาหลายชื่อก็เป็นได้ ส่วนในประเทศไทยยังเรียกอีกหลายชื่อ เช่น โกรยชะม้, ปะนอเกล, ปะโหม่งกลยาน, มะนอเกละ, มะเน้าค้เล, มะลิว, ส้มมะนาว, ลิมานี่ปี้ห์, หมากฟ้า

อนึ่งคำว่า เลมอน (lemon) ในภาษาอังกฤษ หมายถึง ผลส้มอีกชนิดหนึ่ง ที่หัวท้ายมน ไม่ใช่ผลกลมอย่างมะนาวที่เรารู้จักกันดี สำหรับมะนาวเทศ (*Triphasia trifolia*) นั้น เป็นพืชในวงศ์เดียวกัน (Rutaceae) กับมะนาว แต่ต่างสกุล ส่วน มะนาวควาย หรือ ส้มซ่า (*Citrus medica* Linn. Var. *Linetta*.) เป็นพืชสกุลส้มเช่นเดียวกัน แต่ต่างชนิด (สปีชีส์) กัน ส้มนาวเป็นภาษาใต้ที่ใช้เรียกมะนาว เช่นเดียวกับทางภาคอีสานเรียกผลไม้บางอย่างว่า "บั๊ก" ในการขึ้นต้น เช่น บั๊กม่วงที่หมายถึงมะม่วง คำว่าส้มในภาษาใต้จะใช้เรียกผลไม้บางชนิดที่มีรสเปรี้ยว อย่าง ส้มนาว ส้มขาม เป็นต้น

### 2.1.3. พันธุ์ที่นิยมปลูกในประเทศไทย

2.1.3.1 มะนาวไซ้ ผลกลม หัวท้ายยาว มีสีอ่อนคล้ายไซ้เปิด ขนาด 2-3 เซนติเมตร เปลือกบาง

2.1.3.2 มะนาวแป้น ผลใหญ่ ค่อนข้างกลมแป้น เปลือกบาง มีน้ำมาก นิยมใช้บริโภคมากกว่า

พันธุ์อื่นๆ ในเชิงพาณิชย์จะปลูก มะนาวพันธุ์แป้นรำไพและพันธุ์แป้นดกพิเศษ สามารถบังคับให้ออกฤดูดูแลได้ง่าย

2.1.3.3 มะนาวหนัง ผลอ่อนกลมยาวหัวท้ายแหลม เมื่อโตเต็มทีผลจะมีลักษณะกลมค่อนข้างยาว มีเปลือกหนา ทำให้เก็บรักษาผลได้นาน

2.1.3.4. มะนาวทราย ทรงพุ่มสวยใช้เป็นไม้ประดับ ให้ผลตลอดปีแต่ไม่ค่อยนิยมบริโภค เพราะน้ำมีรสขมเจือปน

2.1.3.5. มะนาวตาดิตี เป็นมะนาวพันธุ์ต่างประเทศ ซึ่งกรมวิชาการเกษตรได้นำมาจากหมู่เกาะตาดิตี ผลมีขนาดใหญ่ รูปไซ้ เปลือกและเนื้อมีสีเขียว เก็บเกี่ยวขณะที่เปลือกสีเขียวเข้ม มีกลิ่นและรสดี เป็นมะนาวไม่มีเมล็ด

2.1.3.6. มะนาวหวาน มีผลขนาดใหญ่ ผลรูปร่างกลม เปลือกสีเขียวเข้ม รสไม่เปรี้ยว หรือเปรี้ยวน้อยกว่าพันธุ์อื่น จึงไม่ค่อยนิยมปลูกกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.7. มะนาวป็น้ำ ลักษณะผลกลมยาว ผลโตกว่ามะนาวหนัง ก้นแหลมคล้ายไข่เต่า เปลือกหนา มีกลิ่นหอม ปลูกเป็นไม้ประดับได้ดี

2.1.3.8. มะนาวโมพี ลักษณะลูกกลมโต แต่ส่วนก้นจะกลมแบน มีเปลือกหนา พันธุ์นี้มีรสเปรี้ยวมาก ลำต้นจะใหญ่แข็งแรง เหมาะสำหรับการใช้ทำเป็นต้นตอ

2.1.3.9. มะนาวพม่า มีผลโตเกือบเท่าส้มเขียวหวาน เปลือกหนา ใบค่อนข้างจะรี ๆ ขอบใบมีจักเล็กน้อย มีรสเปรี้ยว แต่ไม่ค่อยมีกลิ่นจึงไม่ค่อยนิยมปลูกกันมาก (ทอง ธรรมดา, ปีที่แต่งไม่ระบุ)

#### 2.1.4. สรรพคุณทางยา

มะนาวเป็นผลไม้ที่มีกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดซิตริก กรดมาลิก ไวตามินซี จากน้ำมะนาว ส่วนน้ำมันหอมระเหยจากผิวมะนาว มีวิตามินเอ และซี ทั้งยังมีธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสสูงกว่าในน้ำมะนาวอีกด้วย มะนาวมีประโยชน์ใช้เป็นยาสมุนไพร ขับเสมหะ แก้ไอโดยนำน้ำมะนาว ผสมกับเกลือและน้ำตาลทรายแดง จิบเป็นยาแก้ไอ ขับเสมหะ กินเป็นยาฟอกเลือด ล้างเสมหะในคอ เพราะกรดอินทรีย์หลายชนิดในน้ำมะนาวจะกระตุ้นให้มีการขับน้ำลายออกมาทำให้ชุ่มคอจึงช่วยลดอาการไอและขับเสมหะได้ นอกจากนี้มะนาวยังมีสรรพคุณในการรักษาอาการเลือดออกตามไรฟัน เหงือกบวม นอกจากนี้ยังช่วยแก้ อาการปวดศีรษะ แก้อาเจียน เมารถเมาเรือ ขจัดคราบบุหรี่ยาสูบ บำรุงผิว และยังสามารถมีฤทธิ์ในการกัดด้วย ส่วนคุณสมบัติที่สำคัญ ทว่าเพิ่งได้ทราบเมื่อไม่นานมานี้ (ราวคริสต์ศตวรรษที่ 19) ก็คือ การป้องกันและรักษาโรคลัทธิปิดลัทธิเปิด ซึ่งเคยเป็นปัญหาของนักเดินเรือมาช้านาน ภายหลังได้มีการค้นพบว่าสาเหตุที่มะนาวสามารถช่วยป้องกันโรคลัทธิปิดลัทธิเปิด เพราะในมะนาวมีวิตามินซีเป็นปริมาณมาก มะนาวมีน้ำมันหอมระเหยที่ให้กลิ่นสดชื่น เพราะมีส่วนประกอบของสารซิโตรเนลลัล (Citronella) ซิโครเนลลิล อะซีเตต (Citronellyl Acetate) ลิโมนีน (Limonene) ลินาลูล (Linalool) เทอร์พีนีออล (Terpeneol) ฯลฯ รวมทั้งมีกรดซิตริก (Citric Acid) กรดมาลิก (Malic Acid) และกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic Acid) ซึ่งถือเป็นกรดผลไม้ (AHA : Alpha Hydroxy Acids) กลุ่มหนึ่ง เป็นที่ยอมรับว่าช่วยให้ผิวหนังที่เสื่อมสภาพหลุดลอกออกไป พร้อมๆ กับช่วยกระตุ้นการสร้างเซลล์ใหม่ๆ ช่วยให้รอยด่างดำหรือรอยแผลเป็นจางลง

หากจำแนกส่วนต่างๆของมะนาวจะได้ข้อมูลสรรพคุณทางยาดังนี้

2.1.4.1. เมล็ดมะนาว นำมาคั่วแล้วบดเป็นผงหรือต้มน้ำดื่ม แก้ขางเด็ก แก้เมื่อยอดในปาก เป็นยาขับเสมหะแก้ไข้ แก้อาเจียน และแก้พิษฝ้ายใน

2.1.4.2. ราก มีสรรพคุณเป็นยาแก้ไข้ แก้ไข้กลับ ไข้ซ้ำ ถอนพิษผิดสำแดง ผ่นกับเหล้าทาแก้ปวดฝี แก้พิษอักเสบ

2.1.4.3. ใบมะนาว แพทย์ตามชนบทใช้ใบมะนาว 108 ใบ ต้มน้ำดื่ม เป็นยากัดฟอกเสมหะ ฟอกโลหิตระดูสำหรับสตรี

2.1.4.4. ผิวมะนาว ใช้เป็นยาแก้ท้องอืดท้องเฟ้อ แก้อลมวิงเวียน แก้ปวดท้อง จุกเสียดแน่น เป็นยาขับเสมหะและแก้เบื่ออาหาร ส่วนที่ใช้เป็นยา เปลือกและน้ำในผล มะนาวที่เหมาะสมกับการนำมาทำยาจะต้องมีผลแก่จัด (ทอง ธรรมดา,ปีที่แต่งไม่ระบุ)

## 2.2. การทดสอบคุณภาพของมะนาวด้วยวิธีการไม่ทำลาย

การตรวจวัดคุณภาพของมะนาวโดยใช้วิธีการไม่ทำลาย เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ง่ายจึงต้องขอยกตัวอย่าง และอธิบายความหมายของการทดสอบคุณภาพด้วยวิธีการไม่ทำลายเสียก่อน

### 2.2.1 การทดสอบคุณภาพด้วยวิธีการไม่ทำลาย (non-destructive evaluation)

การทดสอบคุณภาพด้วยการไม่ทำลายเป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบและวิเคราะห์ความเสียหาย หรือคุณสมบัติภายในวัสดุ ทั้งวัสดุวิศวกรรมและชีววัสดุ ในทางวิศวกรรมได้มีการนำเทคนิคนี้ไปใช้อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้ทดสอบหารอยบกพร่องของชิ้นงาน เช่น รอยร้าว การกัดกร่อน รอยบกพร่องจากเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต โดยไม่ทำลายชิ้นงาน ประยุกต์ใช้ตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตเหล็ก ระหว่างการก่อสร้าง และหลังการใช้งาน อุปกรณ์การผลิตที่ควรได้รับการทดสอบได้แก่ ถัง ท่อ เครื่องจักรในสายการผลิต ส่วนในเชิงเกษตรกรรมได้นำมาประยุกต์ใช้ทั้งการวิเคราะห์คุณสมบัติภายใน และการตรวจความเสียหายของผลผลิตภายใน ซึ่งไม่อาจมองเห็นได้จากภายนอก เพื่อให้สามารถทำนายคุณภาพหรือความเสียหายของผลิตผลทางการเกษตรได้ล่วงหน้า

#### 2.2.1.1 การทดสอบคุณภาพด้วยวิธีการไม่ทำลายในเชิงวิศวกรรม

ในเชิงวิศวกรรมจะใช้หลักการทางฟิสิกส์เพื่อให้ทราบถึงคุณภาพของชิ้นงานที่ถูกทดสอบโดยการหารอยความไม่ต่อเนื่อง (discontinuity) ในชิ้นงาน ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปประเมินความเหมาะสมในการใช้งานของชิ้นงาน การทดสอบจะไม่มีผลต่อการนำชิ้นงานไปใช้งานหรือลดประโยชน์ของชิ้นงานนั้น หลักการทางฟิสิกส์ที่ใช้ เช่น รังสี แสง คลื่นเสียง แม่เหล็กและไฟฟ้า เป็นต้น การทดสอบโดยไม่ทำลายในแต่ละวิธีมีข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบ ความสามารถในการทดสอบ ความเหมาะสม ความไวในการทดสอบและต้นทุนในการทดสอบที่แตกต่างกัน

#### 2.2.1.2 การทดสอบคุณภาพด้วยวิธีการไม่ทำลายในเชิงเกษตรกรรม

ด้านเกษตรกรรมได้มีการนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น มะพร้าว (กัลยาทัศน์ วัฒนบุตร และ อนัญญา หอวัฒนพาณิชย์, 2554) หรือมังคุด (พิชชา เจริญภาค และ วิภาวี ยกสวัสดิ์, 2556) เป็นต้น โดยส่วนมากแล้วจะทำการวัดคุณภาพภายนอก เช่น คุณสมบัติต่างๆ ภายนอก อาทิ น้ำหนัก, ความหนาแน่น, ค่าสี, ขนาด, ปริมาตร, ค่าทางไฟฟ้า เป็นต้น เก็บข้อมูลมาทำการวิเคราะห์เพื่อการทำนายคุณภาพภายใน เช่น ปริมาณกรด ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็งภายใน ในรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เช่นสมการสหสัมพันธ์หลายตัวแปร Multiple Linear regression (MLR) หรือ Partial Least square regression (PLS) , อีกรูปแบบหนึ่งคือการตรวจสอบความเสียหายภายในของผลไม้ ซึ่งไม่อาจเห็นได้จากตาเปล่าเช่น การตรวจสอบอาการเนื้อแก้วในมังคุดด้วยเทคโนโลยี Near Infrared Spectroscopy (NIR) ดังงานวิจัยของ (สนธิสุข ธีระชัยชยุติ, 2552)

### 2.2.2. การตรวจสอบคุณภาพมะนาวด้วยวิธีไม่ทำลาย

คุณภาพของผลิตภัณฑ์คือสิ่งที่สำคัญที่สุด ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่สามารถส่งขายในราคาที่เหมาะสมต้องมีคุณภาพที่ดี อีกทั้งผลิตผลทางการเกษตรมีลักษณะที่เสียหายง่าย ส่งผลกระทบต่อคุณภาพได้ง่ายและเร็ว การควบคุมคุณภาพจึงเป็นสิ่งที่ต้องใส่ใจอย่างสูง มะนาวก็เช่นกัน นักวิจัยหลายท่านได้สนใจปัญหาเกี่ยวมะนาว เนื่องจากมะนาวมีปัญหาคือปริมาณน้ำน้อย หรือการถูกมะนาวจากประเทศอื่นสวมสิทธิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้มีการวิจัยวิธีการตรวจสอบปัญหาเหล่านี้ เพื่อที่จะสามารถทำนายปัญหาและวิเคราะห์ความเสียหายผลิตภัณฑ์ได้ล่วงหน้า เพื่อประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพ ดังเช่น ทศนีย์ ชิววิวัฒน์และธนาภรณ์ แซ่เล่า (2555) ได้วิจัยค้นหาวีธีการทำนายปริมาณน้ำมะนาว, ปริมาณของแข็งที่ละลายได้, ค่าความเป็นกรดต่างแบบไม่ทำลาย ด้วยการทำการทดลองวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพภายนอกเช่นค่า sphericity , ค่าสี (L, a, b) , ค่าสัญญาณโฟโตเซนเซอร์, ความหนาแน่น , ค่าflesh firmness และ เทคนิค image processing กับมะนาว 109 ผล พบว่าหากใช้เทคนิค image processing ทำนายความหนาแน่นมะนาว จะมีความแม่นยำ 59.1% (พิจารณาจากค่า coefficient of determination :  $R^2$  ที่ได้เท่ากับ 0.591) และพบว่าคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นสามารถทำนายปริมาณน้ำมะนาว,ค่าของแข็งที่ละลายได้และ pH จากแบบจำลองการถดถอยพหุคูณ ให้ค่า  $R^2$  ได้เท่ากับ 0.31, 0.35 และ 0.2 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าไม่แม่นยำมากนัก หรือบางกรณีนักวิจัยบางท่านได้ทำการเปรียบเทียบคุณภาพภายในของมะนาว 2 สายพันธุ์ ดังเช่น พรพิไล เกียรติสกุลและเสาวณีย์ ผาบชมพู (2554) ได้เปรียบเทียบคุณภาพระหว่างมะนาวแป้นกับมะนาวทูลเกล้าด้วยการวิเคราะห์ ขนาด, น้ำหนัก, สี, แกนมะนาว, ความชื้นเปลือก, sphericity, bulk density, แรงฉีกเปลือก ด้วยวิธี Multiple Linear regression สามารถทำนายปริมาณน้ำ ได้ถูกต้องถึง 91.49% สำหรับมะนาวแป้น ส่วนมะนาวทูลเกล้าได้ 61.86 % ทั้งยังค้นพบว่าค่า sphericity และค่าความหนาแน่น มีผลต่อปริมาณน้ำมะนาวที่สุด

นักวิจัยบางท่านได้มีการศึกษาการจำแนกกลุ่มด้วยปัจจัยทางคุณภาพเช่นกันดังเช่น จันทร์จิรา พิมพาเรียน และอนวัตร แจ้งชัด (2544) ได้ทำการศึกษปัจจัยทางกายภาพที่มีอิทธิพลต่อผู้ซื้อ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี discriminant analysis พบว่า ค่าความสว่าง (Lightness : L) ,ค่า a , ค่า b มีผลต่อการตัดสินใจของผู้บริโภคอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.01$ )

### 2.3. ไฟฟ้ากระแสสลับและคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ทำไมเราจึงต้องกล่าวถึงไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากในปัญหาพิเศษนี้ คุณสมบัติหนึ่งที่ได้ใช้ในการตรวจวัดคุณสมบัติภายนอกของมะนาวคือ คุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance), ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance), ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงซ้อนในวงจรกระแสสลับ (impedance) และการทดลองทั้งหมดนี้ใช้เครื่องมือวัดที่วัดคุณสมบัติด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ จึงต้องกล่าวเกริ่นนำเพื่อทบทวนความรู้เกี่ยวกับไฟฟ้ากระแสสลับเสียก่อน

#### 2.3.1. ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่และคาบเวลา (alternating current)

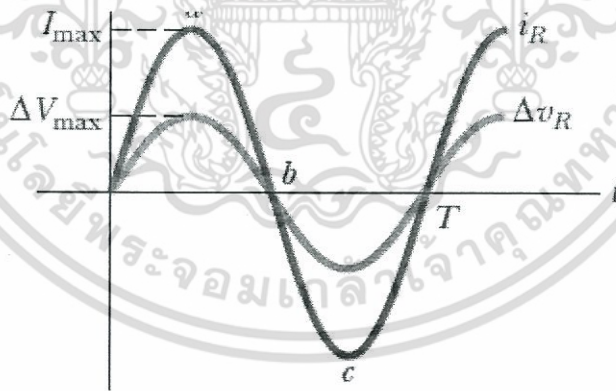
ไฟฟ้ากระแสสลับ คือ ไฟฟ้าที่ลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนทิศทางตลอดเวลา คือ ขณะหนึ่งมีค่าเป็น 0 แล้วจะเพิ่มขึ้นมีค่าสูงสุดในทิศทางบวกแล้วลดลงเป็น 0 ต่อจากนั้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกจนถึงค่าสูงสุด และทิศทางลบแล้วจะลดลงเป็น 0 อีก จะสลับกันไปตลอดเวลา ถ้าไฟฟ้ากระแสสลับมีความถี่ที่ กระแสไฟฟ้าที่จะไหลก็จะเปลี่ยนทิศทางคงที่ตามไปด้วย

##### 2.3.1.1. การสร้างไฟฟ้ากระแสสลับ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมีลักษณะการทำงาน คือ จะทำการเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับนี้ สามารถที่จะผลิตแรงดันไฟฟ้า AC ได้โดยใช้หลักการของการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นขบวนการของการเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าในลวดตัวนำ โดยลวดตัวนำจะเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก กฎมือซ้ายสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถใช้ในการหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำที่เคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก เมื่อนิวตันหัวแม่มือจะแทนทิศทางของการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำ นิ้วชี้แทนทิศทางของการแนวฟลักซ์แม่เหล็กจากเหนือไปได้ และนิ้วกลางจะแทนทิศทางของกระแสที่ไหลในลวดตัวนำ สำหรับค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดจะถูกเหนี่ยวนำเมื่อแนวการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำตั้งฉากกับแนวของฟลักซ์ และเมื่อแนวการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำไปอยู่ในแนวขนานกับแนวของฟลักซ์ จะทำให้ไม่มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น ในแต่ละครั้งที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ จะกล่าวได้ว่า “เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับทำงานได้ 1 ไซเคิล” และแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็จะเรียกว่าแรงดันไฟฟ้า 1 ไซเคิลเช่นกัน และในทำนองเดียวกันเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับก็จะผลิตกระแสไฟฟ้าในวงจรที่สมบูรณ์แบบออกมา 1 ไซเคิลเช่นกัน และสำหรับการเปลี่ยนแปลงของทั้งสองซีกของไซเคิลนี้เรียกว่า การสลับ (alternation) สำหรับวงลวดตัวนำที่หมุนนี้เรียกว่า อาร์เมเจอร์ (armature) และแรงดันไฟฟ้า AC นั้นจะถูกเหนี่ยวนำในอาร์เมเจอร์ และเคลื่อนที่จากตอนปลายของวงลวดตัวนำผ่านหน้าสัมผัสที่เคลื่อนที่ได้ซึ่งติดอยู่ตรงปลายของอาร์เมเจอร์ วงแหวน 2 วง จะถูกเรียกว่า สลิปริง ซึ่งจะถูกยึดติดกับตอนปลายของวงลวดตัวนำและแปรงถ่าน จะเป็นส่วนที่รับแรงดันไฟฟ้า AC จาก สลิปริง และสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่อธิบายมานี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า AC ที่ค่าต่ำ ๆ ดังนั้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจะต้องมีจำนวนของวงลวดตัวนำเพิ่มขึ้น จึงจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น , สำหรับรูปคลื่นที่ถูกผลิตโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกเรียกว่า รูปคลื่นไซน์หรือคลื่นรูปไซน์ (sinusoidal waveform หรือ sine wave) สำหรับคลื่นรูปไซน์เป็นคลื่นพื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุดในการวัดคลื่นกระแสสลับทั้งหมด มันสามารถผลิตได้ทั้งวิธีทางกลและทางไฟฟ้า คลื่นรูปไซน์ถูกแจกแจงด้วยฟังก์ชันไซน์ในตรีโกณมิติ ซึ่งคลื่นรูปไซน์จะเปลี่ยนแปลงจาก 0 ไปจนถึงค่าสูงสุดของฟังก์ชันไซน์ โดยทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจะอยู่ในรูปไซน์



ภาพที่ 2.2 กราฟกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับกราฟความต่างศักย์

ที่มา : <http://bellissm.blogspot.com/2010/04/6.html>

ค่าใช้งาน (effective value) ของไฟฟ้ากระแสสลับ คือ จำนวนที่คำนวณจากองศาของความร้อนที่ให้โดยตัวต้านทานซึ่งจะเปรียบเทียบกับจำนวนของไฟฟ้ากระแสตรง ค่าที่ใช้งานสามารถหาได้โดยวิธีทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่ารูทมีนสแคว (root-mean-square process) ดังนั้นค่าใช้งานจะเป็นค่าเดียวกับค่า rms จากการที่ใช้ขั้นตอนของ rms จะได้ว่าค่าใช้งานของคลื่นไซน์จะเท่ากับ 0.707 เท่าของค่ายอด เมื่อแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า AC ที่ให้มาไม่มีข้อกำกวมจะถือว่าเป็นค่าที่ใช้งาน และมีเตอร์ส่วนมากจะถูกปรับแต่งให้แสดงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าออกมาเป็นค่าที่ใช้งานหรือ rms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาบ (period) คือเวลาที่ต้องการสำหรับการสร้างคลื่นไซน์ 1 ไซเคิล ซึ่งมีหน่วยการวัดเป็นวินาที (second, s) และใช้สัญลักษณ์แทนด้วยตัว T โดยจำนวนของไซเคิลที่ปรากฏในคาบเวลาหนึ่ง ๆ ถูกเรียกว่า ความถี่ (frequency, f) ซึ่งความถี่ของคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับรูปไซน์จะถูกแสดงในรูปของไซเคิลต่อวินาที และหน่วยของความถี่คือ เฮิรตซ์ (Hertz, Hz) เพราะฉะนั้น 1 เฮิรตซ์จะเท่ากับ 1 ไซเคิลต่อวินาที คาบของคลื่นรูปไซน์จะเป็นส่วนกลับของความถี่ ดังนั้นความถี่ยิ่งสูงคาบเวลาจะยิ่งต่ำซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างคาบกับความถี่

### 2.3.2. คุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐาน

#### 2.3.2.1. ความนำไฟฟ้า (electrical conductivity)

Jha และคณะ (2010) กล่าวว่าความนำไฟฟ้าเป็นคุณสมบัติหนึ่งทางไฟฟ้าที่สำคัญเป็นส่วนกลับของค่าความต้านทานทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็นซีเมนส์ต่อเมตร ความนำไฟฟ้าผันตรงกับอุณหภูมิและความชื้นในอาหาร กระบวนการหลายอย่างใช้หลักความนำไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักในการควบคุม โดยเฉพาะกระบวนการให้ความร้อนแบบโอห์มมิก (ohmic heating) ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้อาหารสุกด้วยการผ่านกระแสไฟฟ้าสลับเข้าไปในอาหาร ในกระบวนการแช่เย็น-แช่แข็งก็มีการวัดค่าความนำทางไฟฟ้าเช่นกัน

#### 2.3.2.2. ความต้านทานไฟฟ้า (dielectric /resistance)

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

##### 2.3.2.2.1. สภาพต้านทานและสภาพนำไฟฟ้า

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อหาความต้านทานของลวดโลหะตามกฎของโอห์ม ทำให้ทราบว่า “ความต้านทานของลวดโลหะแปรผันตรงกับความยาวของลวด เมื่อพื้นที่ภาคตัดขวางของโลหะนั้นคงตัว และความต้านทานของลวดโลหะจะแปรผกผันกับพื้นที่ภาคตัดขวางของลวดโลหะเมื่อความยาวของลวดคงตัว” ทำให้สรุปเป็นสมการได้ว่า

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

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

เมื่อ  $\rho$  คือ ค่าสภาพต้านทาน (resistivity) มีหน่วยเป็นโอห์มเมตร ( $\Omega \cdot m$ ) เป็นค่าเฉพาะของสารหนึ่งๆ แปรผันตามอุณหภูมิ

เมื่อ l คือ ความยาวลวดโลหะ มีหน่วยเป็น เมตร

เมื่อ A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของลวดโลหะ มีหน่วยเป็นตารางเมตร

##### 2.3.2.2.2. ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานไฟฟ้า

ตัวแปรหลายชนิดที่มีผลต่อความต้านทานไฟฟ้าเช่นความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ , ความชื้น , ความหนาแน่น , อุณหภูมิและโครงสร้างของอาหารนั้นๆ

##### 2.3.2.2.3. การวัดค่าคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าต่างๆทางด้านไดอิเล็กทริกมีความสำคัญมากขึ้นเนื่องจากถือเป็นหนึ่งในเทคนิคการตรวจสอบโดยไม่ทำลายทั้งทางกายภาพและเคมี โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหาร เทคนิคการวัดมีหลายวิธีอาทิเช่น ใช้ความถี่ไมโครเวฟหลายความถี่ หรือวัดค่าการสะท้อนหรือดูดซับคลื่นความถี่เรโซแนนซ์ หรืออาจจะวัดจากค่าความถี่ไฟฟ้าจากสายโคแอกเซียล (coaxial)

### 2.3.2.3. ความจุไฟฟ้า (capacitance)

ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับมีตัวแปรที่สำคัญอีกหนึ่งตัวคือ ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance : C) มีหน่วยเป็น ฟารัด (Farad: F) ส่วนมากจะนิยมแสดงเป็น นาโนฟารัด (nF) และพิโคฟารัด (pF) หากต่อกับวงจรร่วมกับตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ค่าความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุ จะมีเฟสตามหลังตัวต้านทาน 90 องศา

Roadstrum และ Wolaver (1994) กล่าวว่าตัวเก็บประจุส่วนมากแล้วทำจากแผ่นโลหะสองแผ่นที่วางขนานกันแต่มีระยะห่างที่เหมาะสม มีฉนวนซึ่งส่วนมากเป็นอากาศกั้นกลางสำหรับตัวเก็บประจุปรับค่าได้ และมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$C = \frac{A\epsilon_0}{d} \quad (2.2)$$

เมื่อ C คือค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นฟารัด

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) รายละเอียดดังภาคผนวก ค

เมื่อ A คือพื้นที่ในหน่วยตารางเมตร และ d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะเป็นเมตร

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant,  $\epsilon$ ) เป็นสมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ของวัสดุ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอาหาร มีความสำคัญกับการออกแบบเครื่องจักรอุปกรณ์แปรรูปอาหาร กระบวนการแปรรูปอาหาร เช่น การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) มีความเป็นขั้ว (polar) สูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดี หรือเป็นฉนวนไฟฟ้า ในแง่ของการ

ทำละลาย ของเหลวที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูง เช่น น้ำ จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการแตกตัวของ electrolyte ในน้ำได้ง่าย สารที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกันมักจะละลายซึ่งกันและกันได้ดี สามารถอ่านรายละเอียดเรื่องค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มได้ในภาคผนวก ค

Zhu และคณะ (2012) กล่าวว่าไว้ว่าจากงานวิจัยของพวกเขาที่ศึกษาการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับตัวอย่างผลไม้เช่น แอปเปิ้ล, ลูกแพร์, องุ่น, ส้ม และสับปะรด พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกนั้นจะลดลงถ้าความถี่ไฟฟ้าสูงขึ้น ทั้งยังพบอีกว่าสถานะที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าสถานะการทดลองที่อุณหภูมิสูง

### 2.3.2.4. ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance)

ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance : L) เป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ มีหน่วยเป็นเฮนรี (Henry , H) หากต่อกับวงจรร่วมกับตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ค่าความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุ จะมีเฟสนำหน้าตัวต้านทาน 90 องศา

### 2.3.2.5. อิมพีแดนซ์ (impedance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิมพีแดนซ์ (impedance:  $Z$ ) หรือความต้านทานเชิงซ้อน มีหน่วยเป็นโอห์ม (ohm,  $\Omega$ ) เช่นเดียวกับความต้านทาน ( $R$ ) หากว่าแตกต่างกันตรงที่อิมพีแดนซ์เป็นผลรวมของความต้านทานทั้งจากตัวต้านทาน รวมทั้งตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ มีความสัมพันธ์

$$Z = V/I \quad (2.3)$$

เมื่อ  $Z$  คือค่าอิมพีแดนซ์ มีหน่วยเป็น โอห์ม

เมื่อ  $V$  คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt,  $V$ )

เมื่อ  $I$  คือค่ากระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere,  $A$ )

หรือสามารถเขียนในรูปแบบจำนวนเชิงซ้อนได้เป็น  $Z = R + X_i$

$R$  (resistance) คือค่าความต้านทานจากตัวต้านทาน ส่วน  $X$  (reactance) คือค่าความต้านทานจากตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ โดยปกติแล้วค่าความต้านทานจากตัวต้านทาน (resistance) เป็นค่าที่ใช้ในวงจรกระแสตรง ส่วนค่า reactance จะเป็นส่วนหนึ่งของค่าอิมพีแดนซ์ จะเป็นตัวก่อให้เกิดมุมเฟส (phase angle) ระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสในวงจร เครื่องหมายของ reactance จะเป็นลบถ้าในวงจรมีตัวเก็บประจุ และจะเป็นบวกเมื่อวงจรมีตัวเหนี่ยวนำ (Roadstrum และ Wolaver, 1994)

หากจะวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ด้วยกฎของโอห์มจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$Z = (R^2 + (1/(2 \times \pi \times f \times C))^2 + (2 \times \pi \times f \times L)^2)^{1/2} \quad (2.4)$$

การประยุกต์ใช้อิมพีแดนซ์ด้านวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว

อิมพีแดนซ์ได้ถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบผลผลิตผลทางการเกษตร ภายใต้ชื่อว่า Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) ถือเป็นเทคนิคหนึ่งที่นักวิจัยสมัยใหม่ หลายท่านให้ความสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการทำแห้ง และการคัดแยกผลไม้ ดังเช่น Yokochi และ Ohkura (2014) กล่าวไว้ว่า อิมพีแดนซ์มีความสัมพันธ์กับเวลา อุณหภูมิและความชื้นอาหารค่า อิมพีแดนซ์ได้ถูกใช้เป็นคุณสมบัติในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของชีววัสดุ เช่นความสุกของผลไม้ เนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเนื้อเยื่อในอาหารเปลี่ยนแปลงไประหว่างกระบวนการผลิตและเก็บรักษาระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมกระบวนการผลิต เช่นการใช้ความร้อน การทำแห้ง การแช่แข็ง หรือการบ่ม สำหรับทางการแพทย์ ค่าอิมพีแดนซ์ได้ถูกใช้เป็นวิธีวิเคราะห์มะเร็ง, ไขมันในร่างกาย หรือ Li และคณะ (2011) ได้ประยุกต์ใช้อิมพีแดนซ์กับการวิเคราะห์กระบวนการรวมตัวของฟองเต้าหู้ ในเชิงการวิเคราะห์การก่อตัวของเต้าหู้พบว่า ที่ความถี่สูง มากกว่า 10KHz. ขึ้นไปเหมาะสมกับการใช้วิเคราะห์การก่อตัวของเต้าหู้ที่สุด

นอกจากนี้อิมพีแดนซ์ได้ถูกใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของอาหารที่ความเข้มข้นแตกต่างกันดังเช่นงานวิจัยของ Masot และคณะ (2010) ซึ่งวิจัยการจำแนกความเข้มข้นของน้ำเกลือในหมูสับด้วยเทคนิคการวัดค่าอิมพีแดนซ์ พบว่าน้ำเกลือที่ความเข้มข้นสูงจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่าน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นต่ำ ทั้งนี้พวกเขาได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายปริมาณน้ำเกลือในหมูสับ และได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำสำหรับการทำนาย 93.4% วัดได้จากค่า coefficient of determination ( $R^2$ ) ของกลุ่มทดสอบสมการเท่ากับ 0.934 หรือจะเป็นงานวิจัย Zywic และคณะ (2005) ได้ศึกษาความเข้มข้นของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอปเปิ้ลพิวรี โดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเช่น อิมพีแดนซ์ , ความต้านทานไฟฟ้า, ความนำไฟฟ้า และค่าแอดมิตแตนซ์ เป็นเครื่องมือในการจำแนก สรุปผลการศึกษาว่า ความเข้มข้นที่แตกต่างกันของน้ำแอปเปิ้ลสามารถใช้ คุณสมบัติทางไฟฟ้าเหล่านี้จำแนกได้ เนื่องจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าเหล่านี้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ความเข้มข้นของน้ำแอปเปิ้ลที่แตกต่างกัน

ในอีกมุมหนึ่งค่าอิมพีแดนซ์จะถูกใช้ศึกษาโครงสร้างเนื้อเยื่อของชีววัสดุเช่นกัน Ando และคณะ (2014) ได้ศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างเนื้อเยื่อของมันฝรั่งจากการทำแห้ง ด้วยเทคนิควิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Electrical Impedance Spectroscopy : EIS) พบว่าความร้อนจากการทำแห้งทำให้โครงสร้างภายในของมันฝรั่งถูกทำลาย พร้อมกับสูญเสียความชื้นในตัวมันฝรั่ง ส่งผลต่ออิมพีแดนซ์ ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้น และสามารถใช้ประมาณความเสียหายของเนื้อเยื่อได้

#### 2.3.2.6. ค่า quality factor (Q) และ dissipation factor (D)

Hambley (2005) กล่าวว่าค่า quality factor คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุที่ความถี่เรโซแนนซ์ต่อค่าความต้านทานดังสูตร

$$Q = (2 \times \pi \times f \times L) / R = 1 / (2 \times \pi \times f \times C \times R) \quad \text{และ} \quad D = R / (2 \times \pi \times f \times L) = 2 \times \pi \times f \times C \times R \quad (2.5)$$

บริษัท GW. Instek (2011 : 130) กล่าวว่าทั้งสองค่านี้มีหน้าที่วัดอัตราพลังงานที่ใช้ไประหว่างการวัด มีความสัมพันธ์กับความถี่ในการวัด โดยหากใช้พลังงานในการวัดน้อย ค่าquality factor (Q) จะสูง แต่ค่า dissipation factor (D) จะต่ำ ในทางตรงกันข้ามหากใช้พลังงานในการวัดสูง ค่าquality factor (Q) จะต่ำ แต่ค่า dissipation factor (D) จะสูง

#### 2.3.2.7. ค่ามุมเฟส (phase angle)

มุมเฟสนี้เป็นมุมระหว่างค่าความต้านทานหลัก กับค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำ + ตัวเก็บประจุในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ มีหน่วยเป็นองศา

กล่าวโดยสรุปคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชีววัสดุจะแตกต่างกันเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ นั้นๆ เช่น ปริมาณน้ำ หรือแร่ธาตุภายใน (Zywica และคณะ , 2005)

## บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

#### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

##### 3.1.1 วัสดุดิบ

##### 3.1.1.1 มะนาวแป้น

##### 3.1.2 สารเคมี

##### 3.1.2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 mol/l ผู้ผลิต MERCK

ขั้นตอนการเตรียม (AOAC Official Method 942.15, 1942) ต้มน้ำกลั่นเพื่อไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วเก็บในขวดสีชา

- ชั่ง NaOH น้ำหนัก 4 กรัม

- ละลาย NaOH ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร แล้วเก็บ

ในขวด

##### 3.1.2.2 ฟีนอล์ฟทาลีน 5%

### 3.2 อุปกรณ์

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 3.2.1 เวอร์เนียร์คาลิเบอร์   | ผู้ผลิต<br>Maccooh รุ่น 2551 |
| 3.2.2 เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยมสองตำแหน่ง   | SDS รุ่น ID5704              |
| 3.2.3 เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้าเอนกประสงค์   | GW INSTEK รุ่น LCR 821       |
| 3.2.4 เครื่องวัดสี   | Minolta รุ่น CR-300          |
| 3.2.5 ถังน้ำยูเรก้า  |                              |
| 3.2.6 เครื่องวัดสัญญาณเซนเซอร์ตรวจวัดแสง (พิชชา เจริญภาสและวิภาวี ยกสวัสดิ์, 2555) |                              |
| 3.2.7 มัลติมิเตอร์ดิจิตอล  | Sanwa DMM รุ่น CD771         |
| 3.2.8 เครื่องวัด pH (pH meter)   | INDEX รุ่น ID1000            |
| 3.2.9 เครื่องวัดปริมาณของแข็งในอาหาร (pocket refractometer)                        | ATAGO รุ่น Pal-1             |
| 3.2.10 มีด   |                              |
| 3.2.11 เขียง   |                              |
| 3.2.12 กระจกตวง 100 มิลลิลิตร  |                              |
| 3.2.13 ชุดแผงแผ่นเหล็กยึดด้วยสปริง (ต้นแบบจาก กนกพร แก้วสมนึก, มาลินี รัชชี่)      |                              |
| 3.2.14 ไม้บรรทัด ขนาด 30 เซนติเมตร   |                              |
| 3.2.15 บิวเรตขนาด 50 มิลลิลิตร   |                              |
| 3.2.16 ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร   |                              |
| 3.2.17 ปีเปตขนาด 1 มิลลิลิตร   |                              |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.18 จุกยางแดงใหญ่

3.2.19 แท่งแก้วคน

3.2.20 ซ้อนตักสาร

3.2.21 กรวยแก้ว

3.2.22 ตู้อบความร้อน

### 3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองเริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบ อุปกรณ์และสารเคมีทั้งหมด โดยมะนาวทั้งหมดจะถูกเก็บในตู้เย็น และจะถูกนำออกมาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืนก่อนการทดลองเพื่อไม่ให้มีผลกระทบจากอุณหภูมิ เริ่มทำการทดลองด้วยการ ชั่งน้ำหนักมะนาวด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์, วัดขนาดทั้งสามด้านของมะนาว, วัดค่าทางสี, วัดค่าทางไฟฟ้า, วัดค่าทางแสง, วัดปริมาตรและความหนาแน่น, ทำการผ่าและวัดค่า pH และเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่ละลายน้ำได้, วัดปริมาตรและน้ำหนักน้ำมะนาว, ทำการไทเทรตหาค่าความเป็นกรด ตามลำดับ แสดงรายละเอียดดังนี้

#### 3.3.1. การวัดน้ำหนัก

เครื่องมือ

เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนิยมนสองตำแหน่ง SDS รุ่น ID5704

วิธีการวัด

- ชั่งน้ำหนักมะนาวที่ใช้ในการทดลอง จนครบชุดของมะนาวที่ใช้ในการทดลอง ไม่ควรเปิดพัดลมเพราะจะทำให้ค่าคลาดเคลื่อนได้ รอจนค่าน้ำหนักหยุดนิ่งแล้วจึงจดบันทึก

#### 3.3.2. การวัดขนาด

เครื่องมือ

เวอร์เนียร์คาลิเปอร์

วิธีการวัด

เมื่อทำการทดลองเริ่มทำการวัดขนาดของตัวอย่าง โดยวัด 3 ด้านที่ตั้งฉากกัน กำหนดจุดวัดที่แน่นอนไว้ด้วยปากกา ขนาดของมะนาวจะแสดงด้วยค่า Geometric Mean Diameter (GMD) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ  $GMD = (a \times b \times c)^{1/3}$  และ sphericity คำนวณจาก  $(abc)^{1/3}$

เมื่อ

a= ความยาวจริงของเส้นที่ลากจากขั้วถึงกันมะพร้าวโดยเป็นด้ายที่ยาวที่สุด

b= ความยาวจริงของเส้นที่ลากตั้งฉากกับ a ตรงกึ่งกลางลูกในระนาบเดียวกัน

c= ความยาวจริงของเส้นที่ลากตั้งฉากกับทั้ง a และ b โดยวัดจากเงาฉายในแนวตั้ง

#### 3.3.3 การวัดสีระบบ CIE (L, a, b) ด้วยเครื่อง Minolta CR 300

เครื่องมือ เครื่องวัดสี Minolta CR-300

ค่าที่ทำการวัดประกอบด้วย

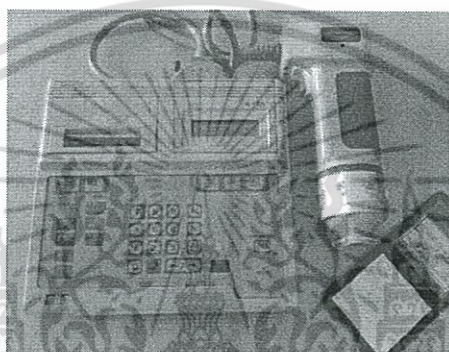
- ค่า L (Lightness) คือค่าความสว่าง เมื่อมีค่าใกล้ 100 แสดงวัตถุมีสีขาวและเมื่อลบเข้าใกล้ 0 แสดงว่าวัตถุมีสีดำ
- ค่า a (Redness/Greenness) คือ ค่าสีแดงและสีเขียว เมื่อเป็นบวกแสดงว่าวัตถุมีสีแดงและเมื่อเป็นลบแสดงว่าวัตถุมีสีเขียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่า b (Yellowness/Blueness) คือค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน เมื่อเป็นบวกแสดงว่าวัตถุสีเหลืองและเมื่อเป็นลบแสดงว่า วัตถุมีสีน้ำเงิน (กิตติชัย, 2537)

#### วิธีการวัด

- เปิดปุ่ม on เพื่อเปิดเครื่อง
- เลือก Callibrate จากนั้นนำหัววัดไปยังทาบกับแผ่นเทียบค่า กดปุ่ม measure ทิ้งไว้ให้เครื่องสอบเทียบค่าให้ตามที่กำหนด
- กด color space select เพื่อเลือกที่จะอ่านค่าระบบใด ในที่นี้เลือกระบบ CIE (L, a, b)
- เมื่อเทียบค่าได้ตามที่ต้องการแล้ว ให้วัดสีตัวอย่างทั้งหมด โดยวัด 3 ตำแหน่ง รอบตัวอย่าง ให้ห่างเป็นมุม 120 องศา ให้หัววัดไปทาบกับวัตถุที่ต้องการจะวัด กดให้แนบสนิทไม่ให้แสงเข้า แล้วจึงกดปุ่มวัดสี



ภาพที่ 3.1 เครื่องวัดสี Minolta CR 300



ภาพที่ 3.2 การวัดค่าทางแสงของมะนาวต้องทำการวัด 3 จุด รอบผลมะนาวเพื่อให้ได้ค่าประมาณรอบมะนาว แต่ละจุดห่างกัน 120 องศา

#### 3.3.4. การวัดค่าทางไฟฟ้าด้วยชุดแผงเหล็กติดสปริงและเครื่องวัดทางไฟฟ้าเอนกประสงค์ (GW INSTEK รุ่น LCR 821)

เครื่องมือ -เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าเอนกประสงค์ (GW INSTEK, LCR 801)

-ชุดแผ่นเหล็กยึดด้วยสปริง (ต้นแบบจาก กนกพร แก้วสมนึกและมาลินี รังษี, 2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หลักการวัด**

มะนาวจะถูกนำไปยึดกับชุดแผ่นเหล็กติดสปริง ซึ่งทั้งด้านบนและล่างมีแผ่นสแตนเลสติดอยู่ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งบวกลบของมะนาว เมื่อทำการวัด กระแสไฟฟ้าจะวิ่งจากแหล่งกำเนิดสู่มะนาว แล้ววิ่งกลับเข้าสู่เครื่องมือวัดเพื่ออ่านค่า

**วิธีการวัด**

- นำมะนาวไปไว้ระหว่างแผ่นสแตนเลสของชุดแผ่นเหล็กกับสปริง เพื่อให้แผ่นสแตนเลสทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งบวกลบ กดให้แผ่นสแตนเลสแนบสนิทกับพื้นผิวมะนาว

- เปิดสวิตช์เครื่องมือวัด ทำการปรับเทียบค่าให้เป็นศูนย์ ควรเทียบค่าทุกครั้งที่เปลี่ยนลูกมะนาว

- ตั้งความถี่ไฟฟ้า , เลือกโหมดที่ทำการวัด และกดปุ่ม start เพื่อทำการวัดค่า

**3.3.5. วัดค่าความเข้มแสงด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดแสง (รายละเอียดในภาคผนวก ข)**

**เครื่องมือ**

- เครื่องวัดสัญญาณความเข้มแสง (พีชชา เจริญภาค, วิภาวี ยกสวัสดิ์, 2556)

- มัลติมิเตอร์ดิจิทัล (Sanwa DMM, CD771)

**วิธีการวัด**

- เสียบปลั๊ก และเปิดหลอดไฟ วงจรไฟ

- นำตัวอย่างวางเหนือแผ่นอย่างกันความร้อนที่ฝั่งเซนเซอร์วัดแสงไว้ โดยวางเอากันผลปิดรูที่ฝั่งเซนเซอร์ไม่ให้แสงทะลุผ่านได้

- ปิดฝากล่องให้สนิทเพื่อไม่ให้แสงด้านนอกทะลุผ่านเข้าไป

- เปิดสวิตช์วงจรเพื่อให้เซนเซอร์ตรวจวัดแสงทำงาน

- เมื่อเปิดสวิตช์ไฟแล้วอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แสดงขึ้นจากมัลติมิเตอร์ รอจนเครื่องวัดอ่านค่าจนนิ่งแล้ว ให้จับบันทึกผลการทดลอง



ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดสัญญาณจากเซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มแสง ขณะทำการทดลอง (จากภาพเปิดกล่องไว้เพื่อให้เห็นรูปแบบการวางผลมะนาวที่ชัดเจนขึ้น ขณะทดลองจริงต้องปิดกล่องเพื่อลดผลกระทบจากแสงภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.6. การวัดปริมาตรและความหนาแน่นด้วยถ้วยยูเรก้า

กฎของอาร์คิมิดีส (Archimedes Principle) กล่าวว่า “ปริมาตรของวัตถุส่วนที่จมลงในน้ำย่อมเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยวัตถุ” ดังนั้นการทดลองจึงอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร มวล ความหนาแน่นซึ่งโดยส่วนมากจะใช้วิธีการแทนที่น้ำในการคำนวณหาปริมาตร กล่าวคือ ปริมาตรจะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักที่ถูกแทนที่ ด้วยมวล การวัดปริมาตรมะนาวมีขั้นตอนดังนี้

- ใส่น้ำให้เต็มถึง ใยมืออดทางออกน้ำไว้ก่อน
- วางบนพื้นระดับแล้วปล่อยให้ น้ำไหล จนระดับน้ำพอดีกับปากทางออกของน้ำ
- รองภาชนะรับน้ำ ในที่นี้ใช้กระบอกตวงไว้ที่บริเวณทางออกของน้ำ
- ค่อยๆ ใส่มะนาวลงไปช้าๆ

- ใส่มะนาวแล้วให้รอจนน้ำหยุดไหลจากปลายทางออก อ่านค่าปริมาตรน้ำที่ไหลออกมา ส่วนความหนาแน่นคำนวณจากสมการ  $D = m/V$  โดย  $m$  และ  $D$  ได้พิจารณาเป็นน้ำหนักน้ำที่ถูกแทนที่และความหนาแน่นของน้ำที่  $25^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ

### 3.3.7. การวัดปริมาตรและน้ำหนักน้ำมะนาว

เครื่องมือ

- กระบอกตวง 100 มิลลิลิตร
- ปีกเกอร์ 50 มิลลิลิตร
- เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ทศนิยมสองตำแหน่ง (SDS รุ่น ID5704)

วิธีการวัด

ผ่านมะนาวออก คั้นน้ำด้วยการบีบด้วยมือใส่ปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร วัดปริมาตรน้ำมะนาวด้วยกระบอกตวง และชั่งน้ำหนักของน้ำมะนาวที่ได้ รวมถึงชั่งน้ำหนักเปลือกมะนาวที่คั้นน้ำออกแล้ว

### 3.3.8 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

#### 3.3.8.1 การวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด

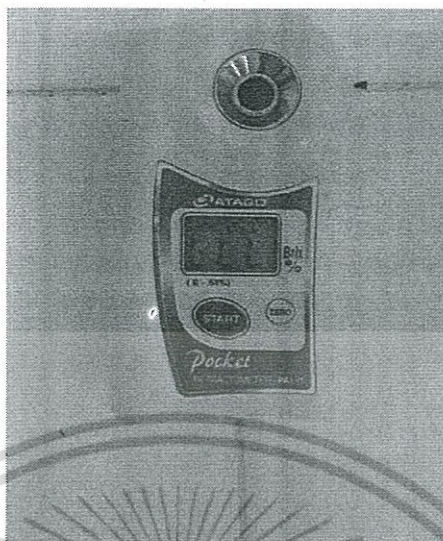
เครื่องมือ Pocket Refractometer (ATAGO รุ่น Pal-1)

- เปิดเครื่องล่วงหน้า 5 นาที เพื่อทำการอุ่นเครื่อง
- นำน้ำมะนาวแต่ละตัวอย่างมาทดสอบ โดยใช้ pocket refractometer

ก่อนใช้งานเครื่องให้เทียบเครื่องด้วยการกดปุ่ม zero เพื่อปรับค่าการหักเหของแสงให้เป็น 0 จากนั้นจึงหยดตัวอย่างลงไป

- กดปุ่ม start เพื่อให้เครื่องอ่านค่าการหักเหของแสง บันทึกค่าที่ได้ เมื่อเสร็จเรียบร้อยให้ทำความสะอาดเครื่องด้วยการฉีดน้ำกลั่น แล้วเช็ดให้แห้งด้วยกระดาษทิชชู

- สามารถทำการวัดตัวอย่างต่อได้ โดยไม่ต้องปรับค่าให้เป็น 0 (ยกเว้นกรณีปิดแล้วเปิดเครื่องใหม่ ทุกครั้งต้องปรับค่า 0)



ภาพที่ 3.4 Pocket Refractometer (ATAGO รุ่น Pal-1)

3.3.8.2 การตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ตามวิธีของ AOAC,2000

เครื่องมือ

- pH meter (INDEX รุ่น ID1000)

- น้ำกลั่น

- สารละลายบัฟเฟอร์

วิธีการวัด

- ก่อนทำการวัดทุกครั้ง ต้องทำการปรับมาตรฐานเครื่อง (calibration) ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์

- นำตัวอย่างน้ำมะนาวมาทำการวัด โดยใช้ electrode ของ pH meter จุ่มลงไปอ่านค่า pH โดย

วัดที่อุณหภูมิห้อง

- เมื่อวัดให้เสร็จให้ล้างหัววัด ด้วยน้ำกลั่น



ภาพที่ 3.5 pH meter (INDEX รุ่น ID1000)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.8.3. การหาค่าความเป็นกรดของมะนาว

ด้วยการไทเทรตน้ำมะนาว 1 มิลลิลิตรด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 mol/L โดยมีฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ ทำการคำนวณค่าความเป็นกรด

- ปิเปิดน้ำมะนาวมา 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 3 ใบ
- หยดฟีนอล์ฟทาลีน ประมาณ 2-3 หยด เขย่าให้เข้ากัน
- นำขวดรูปชมพู่ที่เตรียมไว้มาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 mol/L กระทั่งเห็นเป็นสีชมพูจาง ประมาณ 30 วินาที
- ทำซ้ำจนครบ 3 ครั้ง บันทึกผลทุกครั้ง
- นำค่าปริมาตรเฉลี่ยที่ไทเทรตได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นกรดของน้ำมะนาว โดยใช้กรดซิตริกซึ่งมีค่าแฟกเตอร์ (miliequivalent of citric acid) เท่ากับ 64 เป็นตัวเทียบเท่าจากสมการนี้ (กรดแต่ละชนิดจะมีค่านี้ที่ไม่เหมือนกัน กรดทาร์ทริกจะเท่ากับ 75 , กรดมาลิกเท่ากับ 67 , กรดแลคติกเท่ากับ 90 และกรดอะซิติกเท่ากับ 60)

$$\text{เปอร์เซ็นต์กรดซิตริกทั้งหมด (g/100 ml)} = (V_1 \times M \times 64 \times 100) / (1000 \times V_2) \quad (3.2)$$

โดย  $V_1$  = ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

$V_2$  = ปริมาณน้ำมะนาวที่ใช้ ในการทดลองนี้ใช้ 1 มิลลิลิตร

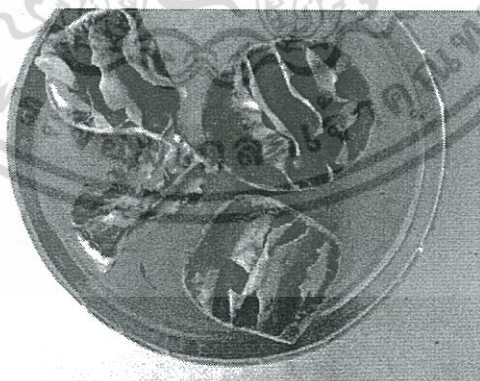
$M$  = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ในการทดลองนี้คือ 0.1 mol/L)

### 3.3.8.4 การวัดค่าความชื้น

นำผลมะนาวชั่งน้ำหนักเริ่มต้น (A) แล้วนำเข้าเตาอบ (hot air oven) ที่  $103^\circ\text{C}$  ระยะเวลาอบ 24 ชม. (ASAE standard (1994)) ชั่งน้ำหนักสุดท้าย (B) นำมาคำนวณหาความชื้นจากสูตร

$$MC = [(A-B) / A] \times 100 \quad (3.1)$$

มะนาวนำเข้าเตาอบ (hot air oven) และชั่งน้ำหนักตัวอย่างเมื่อครบกำหนดเวลาเรียบร้อยแล้ว



ภาพที่ 3.6 มะนาวหลังการอบแห้ง



ภาพที่ 3.7 การชั่งน้ำหนักมะนาวหลังการอบแห้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

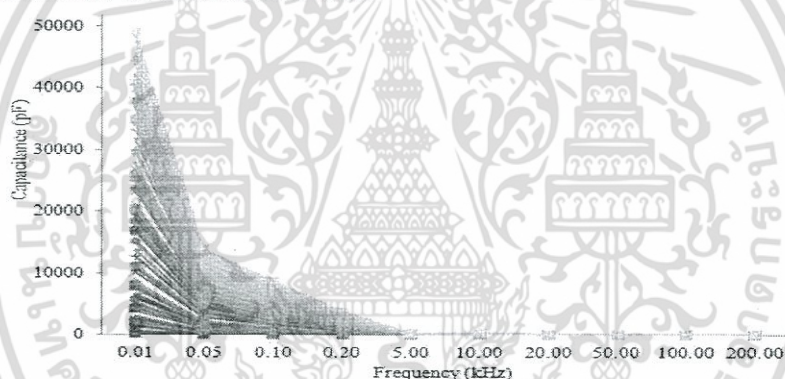
## บทที่ 4 ผลการวิจัย

การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงปริมาณจะหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ ( Multiple Linear Regression: MLR และ partial least square regression: PLSR) โดยการวิเคราะห์ทั้งหมดใช้โปรแกรม Statistical Package for Social Science (SPSS) และ Unscrambler

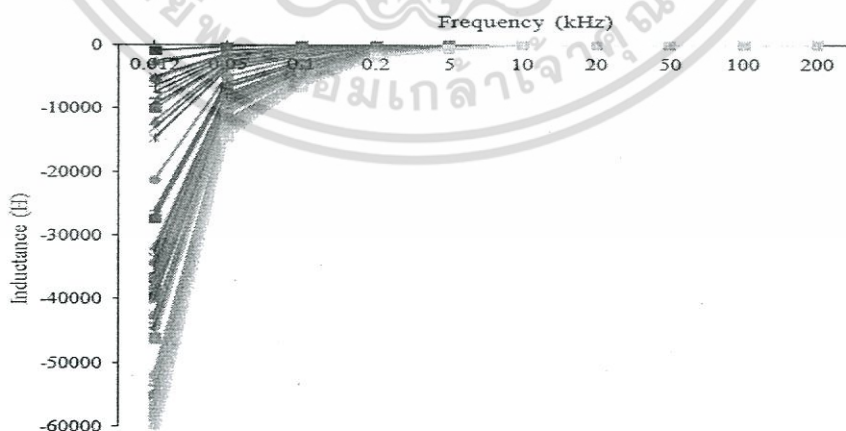
### 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางไฟฟ้ากับการทดลอง

ตามที่ทราบว่า การทดลองนี้มีตัวแปรหนึ่งที่สำคัญคือตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ที่ถูกแปลงค่าเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก , ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance) , ค่าความต้านทานไฟฟ้า (impedance) , ค่า quality factor , ค่า dissipation factor , มุมเฟส โดยทุกค่าทางไฟฟ้าจะทำการทดลองที่ 10 ความถี่ (0.012kHz., 0.05kHz., 0.1kHz., 0.2kHz., 5kHz., 10kHz., 20kHz., 50kHz., 100kHz., 200kHz.) และได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ความถี่ต่างๆดังกราฟด้านล่าง

#### 4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางไฟฟ้ากับความถี่



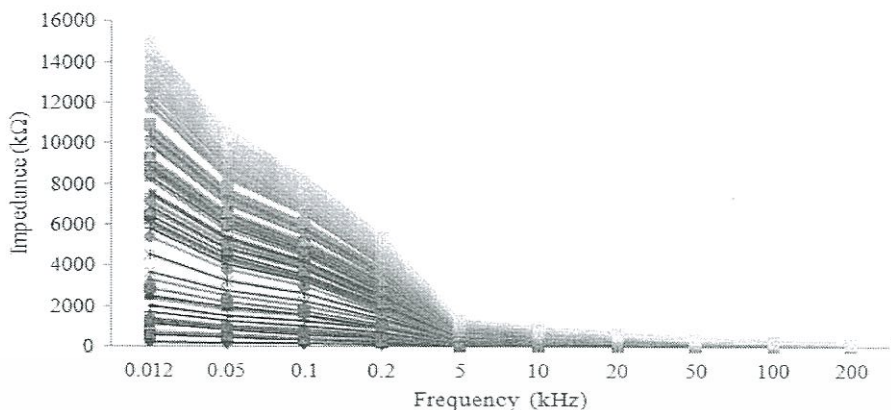
ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของมะนาวกับความถี่ จากภาพที่ 4.1 จะเห็นว่ายิ่งความถี่มากขึ้น ค่าความจุไฟฟ้าจะน้อยลง



ภาพที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ากับความถี่

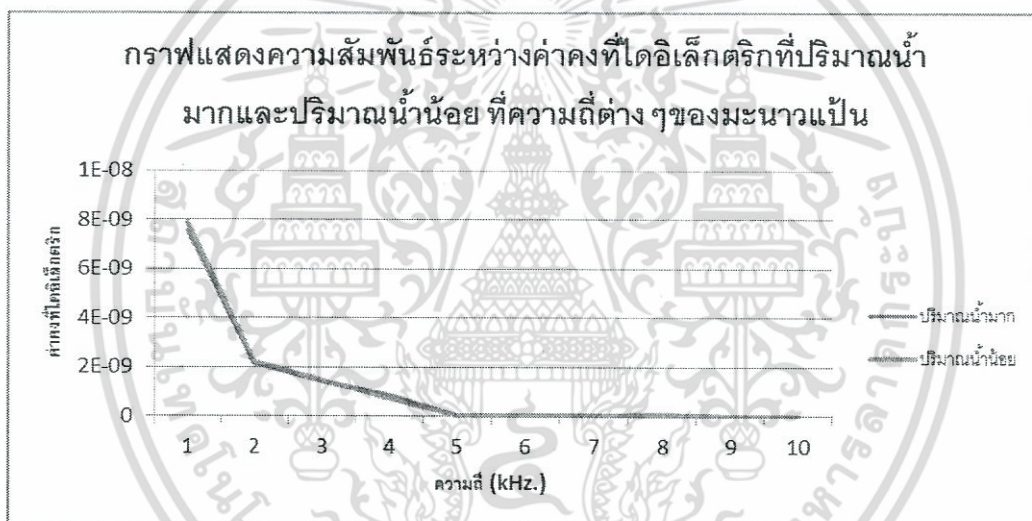
จากภาพที่ 4.2 จะเห็นว่ายิ่งความถี่ต่ำมาก ค่าความเหนี่ยวนำจะน้อยลง เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นค่าจนวนเป็นศูนย์ ในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



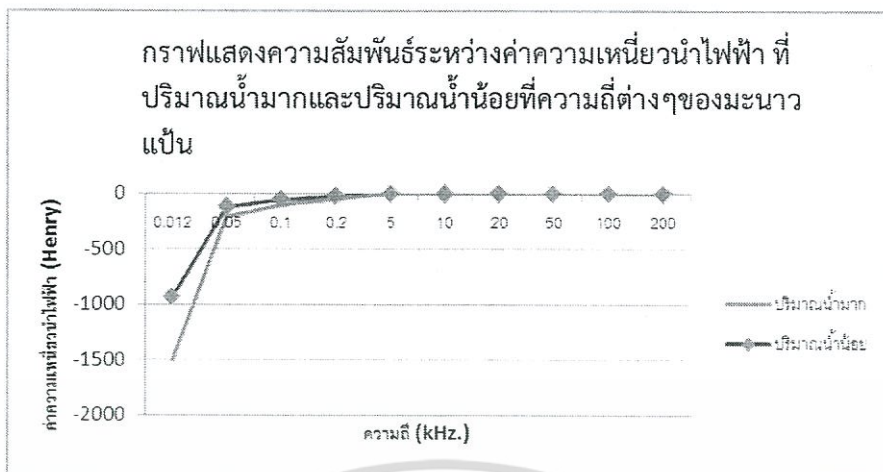
ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานเชิงซ้อน(อิมพีแดนซ์)กับความถี่ จากภาพที่ 4.3 จะเห็นว่าเมื่อความถี่มากขึ้นค่าอิมพีแดนซ์จะน้อยลงจนเข้าใกล้ศูนย์

#### 4.1.2 การใช้ตัวแปรทางไฟฟ้าในการจำแนกปริมาณน้ำมะนาว

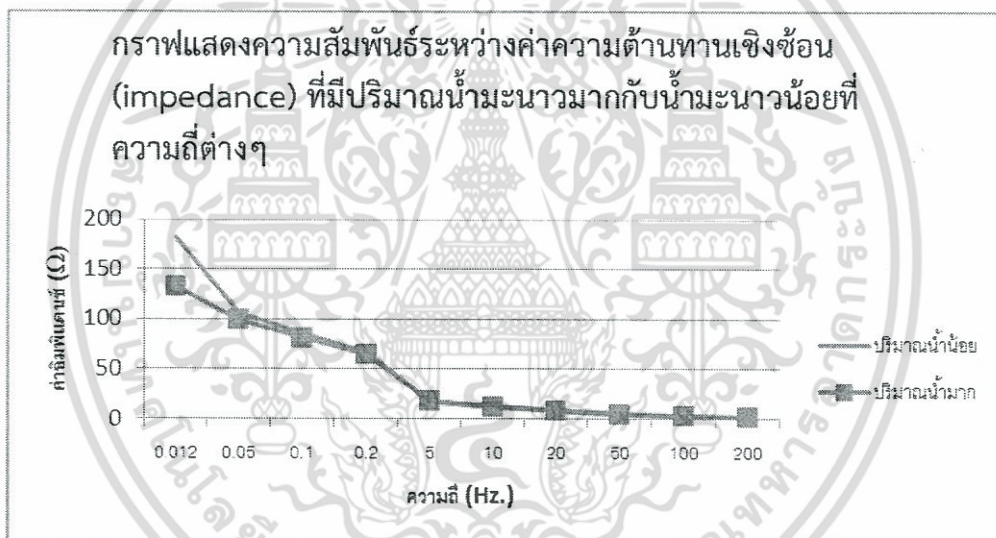


ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ปริมาณน้ำมะนาวมากกับน้ำมะนาวน้อย กับความถี่ต่างๆของมะนาวแป้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ปริมาณน้ำมะนาวมากกับน้ำมะนาวน้อยกับความถี่ต่างๆของมะนาวแป้น



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงซ้อน(อิมพีแดนซ์) ที่ปริมาณน้ำมะนาวมากกับน้ำมะนาวน้อยกับความถี่ต่างๆของมะนาวแป้น

จากภาพที่ 4.6 พบว่ามะนาวแป้นที่มีปริมาณน้ำน้อยจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่มากกว่า คำอธิบายคือ น้ำเป็นของเหลวที่นำไฟฟ้าได้ดี ส่วนอิมพีแดนซ์เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้า หากปริมาณน้ำมากย่อมสามารถนำไฟฟ้าได้ดี ค่าความต้านทานจะน้อยลง และถ้าปริมาณน้ำน้อย ความสามารถในการนำไฟฟ้าจะน้อยลง ความต้านทานจะมากขึ้น

#### 4.2. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุตัวแปร

การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อนหรือพหุคูณ คือ การวิเคราะห์การถดถอยที่มีตัวแปรอิสระที่เราศึกษานั้นมีค่ามากกว่า 1 ตัวแปร และตัวแปรตาม 1 ตัว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้เป็นความสัมพันธ์ในรูปของสมการเส้นตรง และสามารถอธิบายและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละตัว ว่าตัวแปรใดมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง  $y$  มากที่สุด สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปของสมการได้

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพภายนอกและทางเคมีเพื่อสร้างสมการทำนายปริมาณน้ำมะนาว ค่าความเป็นกรด และค่า pH ด้วยการพิจารณาคูสมบัติทางกายภาพภายนอกทั้งหมดทั้งขนาด สี ปริมาตร ความหนาแน่น น้ำหนัก ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ค่าความต้านทานเชิงซ้อน ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า ค่า quality & dissipation factor ที่ 10 ความถี่ไฟฟ้า (0.012kHz., 0.05kHz., 0.1kHz., 0.2kHz., 5kHz., 10kHz., 20kHz., 50kHz., 100kHz., 200kHz.) ของมะนาวแป้น เพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ Statistical Package for Social Science (SPSS) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยแบ่งมะนาว ทั้งหมด แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่กลุ่มสร้างสมการ (calibration set) และ กลุ่มทดสอบสมการ (validation set) ผลการทดลองแสดงผลทั้งจากการทำนายด้วยตัวแปรทางไฟฟ้าอย่างเดียว และ ทำนายด้วยทั้งตัวแปรทางกายภาพและไฟฟ้า

#### 4.2.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุของตัวอย่างมะนาวแป้น

##### 4.2.1.1 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับปริมาณน้ำมะนาว

ตารางที่ 4.1 การแจกแจงสถิติเชิงพรรณนาเปรียบเทียบปริมาณน้ำมะนาวของกลุ่มสร้างสมการและกลุ่มทดสอบสมการของมะนาวแป้น

statistic	ปริมาณน้ำมะนาวของกลุ่มสร้าง	ปริมาณน้ำมะนาวของกลุ่มทดสอบสมการ
	สมการ (Calibration set)	(Validation set)
	73 ผล	37 ผล
Mean	44.32 ml.	44.71 ml.
Std error of mean	0.464	0.69
SD	3.96	4.25
Min	36.69	37.74
Max	54.14	57.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อพยากรณ์ค่าปริมาณน้ำ โดยนำตัวแปรอิสระที่เป็นคุณสมบัติทางกายภาพ และไฟฟ้าเข้าสู่สมการ ประมวลผลด้วยวิธี STEPWISE

variable	unstandardized coefficients	Std.error	standardized coefficients	t	Sig.
(constant)	14.43	3.86		3.73	0.0004
weight	0.69	0.05	0.99	13.39	0.0000
inductance 20kHz.	-0.56	0.12	-0.34	-4.66	0.0000
phase angle 100kHz.	0.07	0.02	0.27	4.00	0.0002
dissipation factor 100kHz.	-6.42	2.65	-0.16	-2.42	0.0181

ผลจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ SPSS เพื่อสร้างสมการทำนายค่าปริมาณน้ำมะนาวโดยใช้ตัวแปรอิสระ 66 ตัวแปร ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรทางกายภาพเช่น ขนาด (Geometric Mean Diameter : GMD) , น้ำหนัก , ค่าทางแสงเช่นค่าความสว่างและ hue angle , ค่าความเข้มแสงจากเซนเซอร์วัดแสง ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง สุดท้ายคือค่าทางไฟฟ้า เช่น ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ที่ถูกแปลงค่าเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก , ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance) , ค่าความต้านทานไฟฟ้า (impedance) , ค่า quality factor , ค่า dissipation factor , มุมเฟส โดยทุกค่าทางไฟฟ้าจะทำการทดลองที่ 10 ความถี่ (0.012kHz., 0.05kHz., 0.1kHz., 0.2kHz., 5kHz., 10kHz., 20kHz., 50kHz., 100kHz., 200kHz.) ตัวแปรทั้งหมดนำไปประมวลผลด้วยวิธี Stepwise ผลออกมาพบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์ R<sup>2</sup> เท่ากับ 0.749 บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นที่ผลต่อตัวแปรตามคือค่าปริมาณน้ำมะนาว ว่ามีความสัมพันธ์ในระดับสูง โปรแกรมจะทำการเลือกตัวแปรที่ผ่านการทดสอบทางสถิติแล้วว่ามีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรดได้แก่ น้ำหนัก ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ความถี่ 20 kHz มุมเฟสที่ความถี่ 100 kHz. และค่า dissipation factor ที่ความถี่ 100 kHz.

หากพิจารณาที่แถว standardize coefficient แล้วพบว่าน้ำหนัก มีค่าสูงที่สุด (0.9942) รองลงมาเป็นค่ามุมเฟสที่ความถี่ 100 kHz. (0.2749) หากน้ำหนักมาก ย่อมหมายถึงปริมาณน้ำมากด้วยเช่นกัน ส่วนมุมเฟสนั้นเป็นผลมาจากการที่น้ำมะนาวนำไฟฟ้า จึงได้สมการพยากรณ์ค่าปริมาณน้ำสำหรับมะนาวแป้นพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระ เมื่อนำตัวแปรอิสระเข้าสู่สมการดังนี้

$$\text{Water content} = 14.43 + 0.69\text{weight} - 0.56\text{inductance}_{20 \text{ kHz.}} + 0.07\text{phase angle}_{100 \text{ kHz.}} - 6.72\text{dissipation factor}_{100 \text{ kHz.}} \quad (12)$$

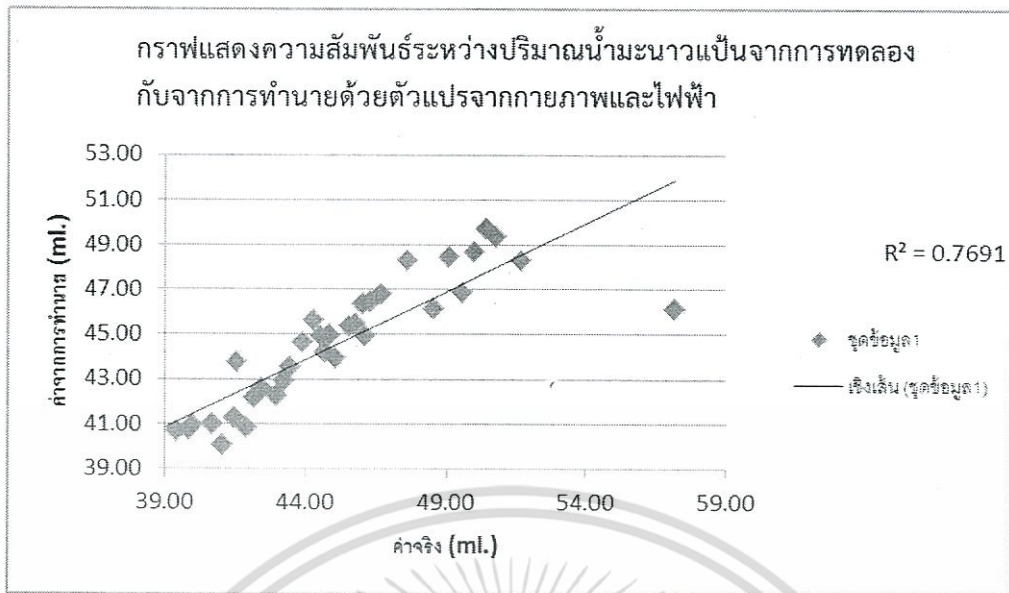
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสร้างสมการพยากรณ์ค่าปริมาณน้ำจึงหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการที่สร้างขึ้น ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่าปริมาณน้ำมะนาวแห้งที่ได้จากการทดลองกับค่าปริมาณน้ำมะนาวแห้งจากการทำนายได้จากตัวแปรทางตัวแปรทางกายภาพและทางไฟฟ้า

ค่าจริงจากทดลอง (mL.)	ค่าจากการทำนาย (mL.)
39.99	40.96
37.74	39.51
40.68	40.96
41.04	40.07
41.47	41.27
41.59	43.77
41.93	40.80
42.19	42.14
42.46	42.60
42.99	42.29
43.25	42.93
43.44	43.51
43.88	44.66
44.28	45.62
44.56	44.92
44.69	44.22
44.87	44.95
45.06	43.92
45.56	45.37
45.77	45.47
46.03	46.36
46.13	44.94
46.32	46.46
46.70	46.81
47.63	48.27
48.55	46.11
49.11	48.47
49.59	46.84
50.44	49.72
50.01	48.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณน้ำมะนาวที่ได้จากการทดลองกับค่าปริมาณน้ำมะนาวที่ได้จากการทำนายด้วยตัวแปรทางกายภาพและทางไฟฟ้าของมะนาวแป้น

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงจากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่ได้พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.7691 หมายความว่าสมการดังกล่าวสามารถพยากรณ์ค่าปริมาณน้ำที่แท้จริงได้สูง โดยมีความแม่นยำของการพยากรณ์เท่ากับ 76.91 %

#### 4.2.1.2 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับค่าความเป็นกรด

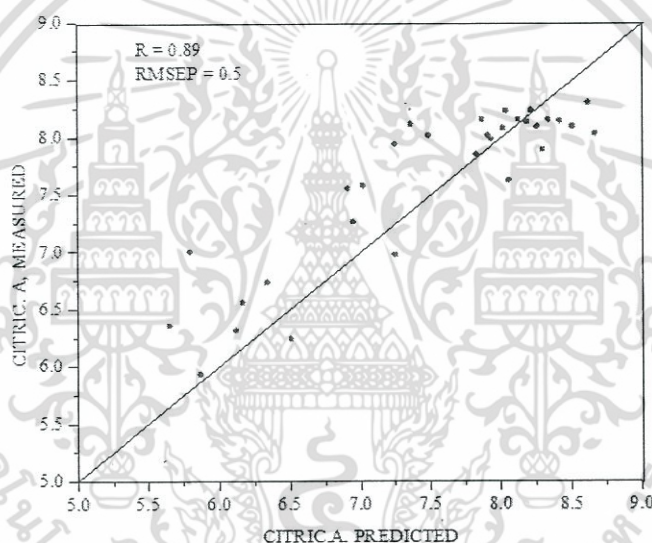
ตารางที่ 4.4 ตารางสถิติเชิงพรรณนาเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดของมะนาวแป้นระหว่างกลุ่มสร้างสมการกับกลุ่มทดสอบสมการ

Items	Calibration set	Prediction set
Number of sample	84	36
Range	4.59-8.9	4.86-8.67
Mean	7.31	7.43
Standard deviation	1.02	0.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการสร้างสมการและทดสอบสมการ โดยใช้ pretreatments ต่างๆ เพื่อการทำนายค่าความเป็นกรดของมะนาวเป็นโดยวิธี PLSR

Pretreatment	F	N	R	RMSECV
Original	10	84	0.90	0.45
SMOOTHING	12	84	0.88	0.51
1 <sup>st</sup> Derivative	10	84	0.82	0.61
2 <sup>nd</sup> Derivative	8	84	0.88	0.52
Smoothing+2 <sup>nd</sup> Derivative	11	84	0.90	0.46



ภาพที่ 4. 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดของมะนาวที่ได้จากการทดลองกับค่าความเป็นกรดน้ำมะนาวที่ได้จากการทำนายด้วยตัวแปรไฟฟ้าของมะนาวเป็น

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อสร้างสมการทำนายค่าความเป็นกรดโดยใช้ตัวแปรอิสระต่างๆ ซึ่งประกอบไปค่าทางไฟฟ้าทั้งหมด เช่น ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ที่ถูกแปลงค่าเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก, ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance), ค่าความต้านทานไฟฟ้า (impedance), ค่า quality factor, ค่า dissipation factor, มุมเฟส โดยทุกค่าทางไฟฟ้าจะทำการทดลองที่ 10 ความถี่ (0.012kHz., 0.05kHz., 0.1kHz, 0.2kHz, 5kHz, 10kHz, 20kHz, 50kHz, 100kHz, 200kHz) ตัวแปรทั้งหมดนำไปประมวลผลพบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์ R ในการทำนายเท่ากับ 0.89

#### 4.2.1.3 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด

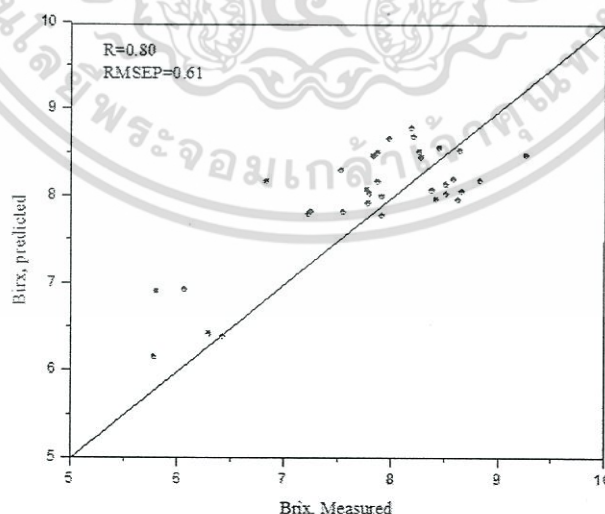
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ตารางสถิติเชิงพรรณนาเปรียบเทียบค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของมะนาวแป้นระหว่างกลุ่มสร้างสมการกับกลุ่มทดสอบสมการ

Items	Calibration set	Prediction set
Number of sample	70	35
Range	4.86-10.67	5.78-9.26
Mean	7.55	7.83
Standard deviation	0.92	0.89

ตารางที่ 4.7 ผลการสร้างสมการและทดสอบสมการ โดยใช้ตัวแปรต่างๆ เพื่อการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของมะนาวแป้นโดยวิธี PLSR

Variables	F	N	R	RMSECV
W+GMD+L+Z+C (0.012-200KHZ)	9	70	0.87	0.42
W+GMD+L+Z+C (1-200KHZ)	3	70	0.83	0.46
L+Z+C (0.012-200KHZ)	3	70	0.74	0.57
L+Z+C (1-200KHZ)	6	70	0.77	0.47



ภาพที่ 4. 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของมะนาวที่ได้จากการทดลองกับค่าความเป็นกรดน้ำมะนาวที่ได้จากการทำนายด้วยตัวแปรไฟฟ้าของมะนาวแป้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อสร้างสมการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด โดยใช้ตัวแปรอิสระต่างๆ ซึ่งประกอบไปค่าทางไฟฟ้าทั้งหมด เช่น ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ที่ถูกแปลงค่าเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก, ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance), ค่าความต้านทานไฟฟ้า (impedance), ค่า quality factor, ค่า dissipation factor, มุมเฟส โดยทุกค่าทางไฟฟ้าจะทำการทดลองที่ 10 ความถี่ (0.012kHz, 0.05kHz, 0.1kHz, 0.2kHz, 5kHz, 10kHz, 20kHz, 50kHz, 100kHz, 200kHz) ตัวแปรทั้งหมดนำไปประมวลผลพบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์ R ในการทำนายเท่ากับ 0.80

#### 4.2.1.4 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับค่า pH

ตารางที่ 4.8 ตารางสถิติเชิงพรรณนาเปรียบเทียบค่า pH ของมะนาวแป้นระหว่างกลุ่มสร้างสมการกับกลุ่มทดสอบสมการ

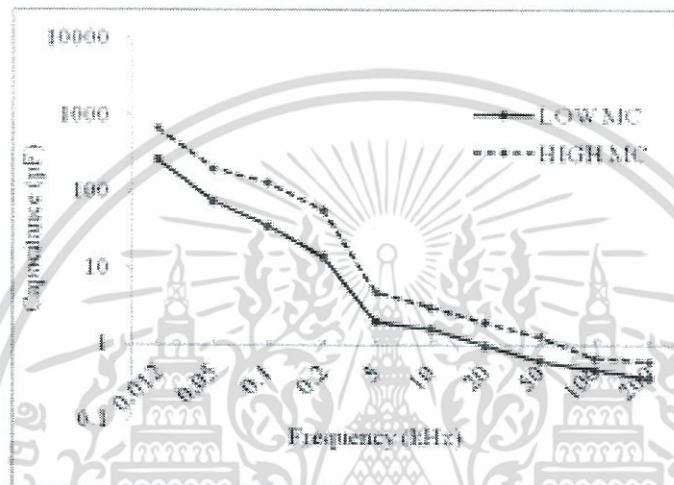
statistic	ค่า pH ของกลุ่มสร้าง	ค่า pH ของกลุ่มทดสอบสมการ
	สมการ (calibration set)	(validation set)
	70 ผล	40 ผล
Mean	2.46	2.48
Std error of mean	0.02	0.03
SD	0.32	0.2
Min	0.4	2
Max	3.1	3

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อสร้างสมการทำนายค่า pH โดยใช้ตัวแปรอิสระต่างๆ ซึ่งประกอบไปค่าทางไฟฟ้าทั้งหมด เช่น ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ที่ถูกแปลงค่าเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก, ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance), ค่าความต้านทานไฟฟ้า (impedance), ค่า quality factor, ค่า dissipation factor, มุมเฟส โดยทุกค่าทางไฟฟ้าจะทำการทดลองที่ 10 ความถี่ (0.012kHz, 0.05kHz, 0.1kHz, 0.2kHz, 5kHz, 10kHz, 20kHz, 50kHz, 100kHz, 200kHz) ตัวแปรทั้งหมดนำไปประมวลผลพบว่าได้ค่าสัมประสิทธิ์  $R^2$  มีความสัมพันธ์ในระดับต่ำมาก จึงไม่เหมาะสมสำหรับมาใช้ในการทำนาย

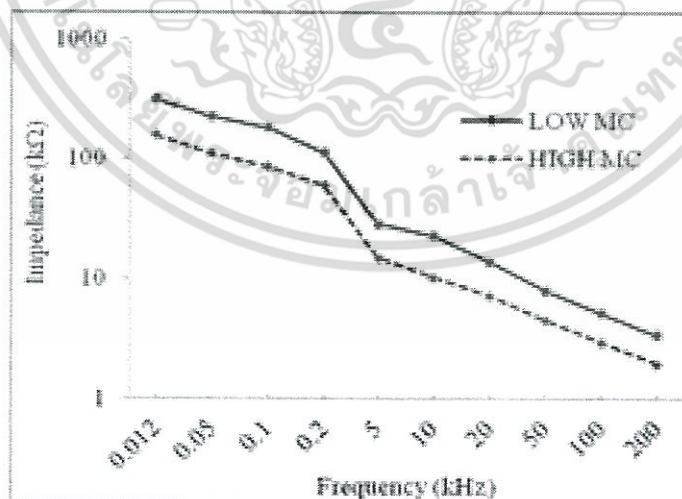
#### 4.2.1.5 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับค่าความชื้น

ตารางที่ 4.9 ตารางสถิติเชิงพรรณนาเปรียบเทียบค่าความชื้นของมะนาวเป็นระหว่างกลุ่มสร้างสมการกับกลุ่มทดสอบสมการ

Items	Calibration set	Prediction set
Number of sample	55	27
Range	50.13-84.83	52.90-82.80
Range	73.76	71.79
Standard deviation	6.92	6.90

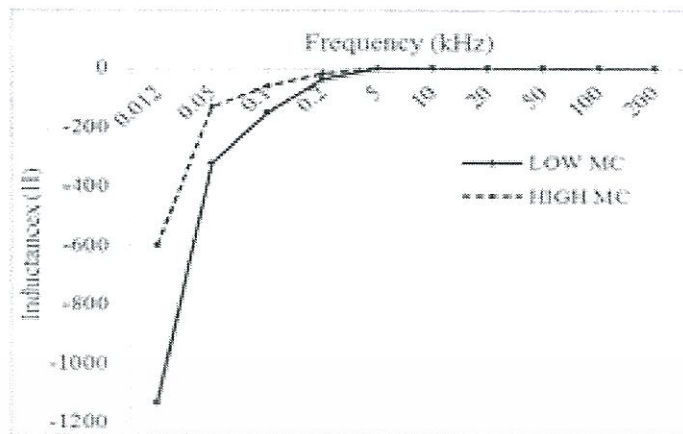


ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่ปริมาณค่าความชื้นมากกับค่าความชื้นน้อยกับความถี่ต่างๆของมะนาวเป็น



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงซ้อน(อิมพีแดนซ์) ที่ปริมาณค่าความชื้นมากกับค่าความชื้นน้อยกับความถี่ต่างๆของมะนาวเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

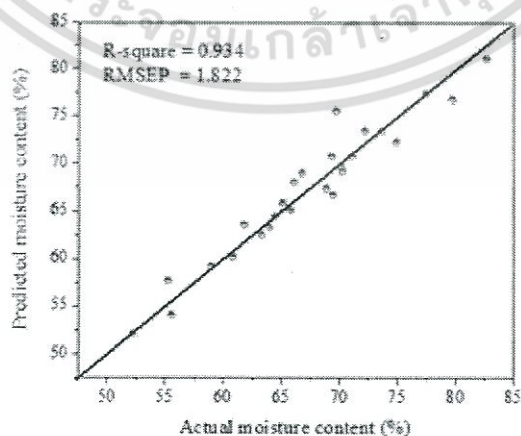


ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ปริมาณค่าความชื้นมากกับค่าความชื้นน้อยกับความถี่ต่างๆของมะนาวแป้น

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อพยากรณ์ค่าความชื้น โดยนำตัวแปรอิสระที่เป็นคุณสมบัติทางกายภาพและไฟฟ้า

Items	Calibration set	Prediction set
F	3	3
N	55	27
R-square	0.951	0.934
RMSEC/RMSEP (%wet basic)	1.793	1.822

F = Factors, N= number of sample, R= coefficients of correlation, RMSEC= root mean square error calibration, RMSEP= root mean square error prediction



ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองกับค่าความชื้นที่ได้จากการทำนายด้วยตัวแปรทางกายภาพและทางไฟฟ้าของมะนาวแป้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงจากการทดลองกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่ได้พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.934 หมายความว่าสมการดังกล่าวสามารถพยากรณ์ค่าความชื้นที่แท้จริงได้สูง โดยมีความแม่นยำของการพยากรณ์เท่ากับ 93.4 %



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผล

จากการศึกษาคุณสมบัติทั้งทางกายภาพ ได้แก่ขนาด , น้ำหนัก, ปริมาตร,ค่าทางสีอันได้แก่ค่าความสว่าง ในระบบ (L , a, b) , hue angle , ค่าความเข้มแสงจากเซนเซอร์วัดแสง , ค่าทางไฟฟ้า อันได้แก่ ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ที่ถูกแปลงค่าเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก , ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (inductance) , ค่าความต้านทานไฟฟ้า (impedance) , ค่า quality factor , ค่า dissipation factor , มุมเฟส โดยทุกค่าทางไฟฟ้าจะทำการทดลองที่ 10 ความถี่ (0.012kHz, 0.05kHz. , 0.1kHz., 0.2kHz., 5kHz., 10kHz., 20kHz., 50kHz., 100kHz., 200kHz) ของมะนาวแป้น เพื่อนำมาทำนายคุณสมบัติภายในของมะนาว พบว่า สำหรับการทำนายค่าความเป็นกรด ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณน้ำและความชื้น ด้วยตัวแปรทางกายภาพและทางไฟฟ้ามีความเป็นไปได้

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1. ควรศึกษาการทำนายคุณภาพมะนาวกับวิธีอื่นด้วย อาทิเช่น การใช้คลื่นเสียง หรือการใช้เทคนิค Near Infrared Spectroscopy (NIRS)

5.2.2. เทคนิคการใช้งานนี้ควรทดสอบกับผลไม้ชนิดอื่น ที่มีปริมาณน้ำสูงเช่น สับปะรด

## เอกสารอ้างอิง

### ภาษาไทย

กนกพร แก้วสมนึก, และ มาลินี รังษี. 2552. การตรวจวัดความฟามของส้มโดยใช้ค่าความจุทางไฟฟ้า (Evaluation of granulation in tangerine using electrical capacitance). *ปริญญาานิพนธ์คณะอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.* (วันที่สืบค้น 30 มกราคม 2558)

กัลยาทัศน์ วัฒนบุตร, และอนัญญา หอวัฒนพานิชย์. 2554. สมการหลายตัวแปรสำหรับทำนายคุณภาพภายในของมะพร้าวอ่อน (Multivariate detective model for internal quality of fresh young coconut). *ปริญญาานิพนธ์คณะอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.* (วันที่สืบค้น 4 กุมภาพันธ์ 2558)

กิตติชัย บรรจง. 2537. เอกสารประกอบการสอนวิชาคุณสมบัติทางกายภาพของชีววัสดุ. *ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร.* (วันที่สืบค้น 15 มกราคม 2558)

จันทร์จิรา พิมพ์าเรียน และ อนุวัตร แจ่มชัด. 2544. การจัดลำดับชั้นและการศึกษาดัชนีคุณภาพของมะนาวโดยใช้วิธีวิเคราะห์ตัวแปรแบบพหุ (Classification and study of qualities index of lime multivariate analysis technique), น. 462-470. *ใน การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 40 สาขาอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.* (วันที่สืบค้น 9 กุมภาพันธ์ 2558)

ทัศนีย์ ชิววิวัฒน์, ธนาภรณ์ แซ่เล้า. 2556. การตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมะนาวโดยใช้สมการหลายตัวแปร (Detection of internal quality intact lime using multivariate equations). *ปริญญาานิพนธ์คณะอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.* (วันที่สืบค้น 2 กุมภาพันธ์ 2558)

ทอง ธรรมดา. พันธุ์มะนาวที่นิยมปลูก. ปีไม่ระบุ. แหล่งที่มา : [www.การเกษตร.com/category/พันธุ์มะนาวที่นิยมปลูก](http://www.การเกษตร.com/category/พันธุ์มะนาวที่นิยมปลูก). (วันที่สืบค้น 15 มกราคม 2558)

นิรันดร์ สุวรรรัตน์. 2553. ฟิสิกส์ ไฟฟ้าสถิต ไฟฟ้าและแม่เหล็ก1 และ 2. สำนักพิมพ์ พ.ศ. พัฒนา, กรุงเทพมหานคร. (วันที่สืบค้น 30 มกราคม 2558)

พรพิไล เกียรติสกุล, เสาวณีย์ ผาบชมภู. 2554. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเพื่อทำนายคุณภาพภายในของมะนาวทั้ง 2 สายพันธุ์ (Analysis of physical and chemical properties to

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

predict internal quality of two varieties of limes). ปรินญาณิพนธ์คณะอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (วันที่สืบค้น 2 กุมภาพันธ์ 2558)

พิชชา เจริญภาค, วิชาวี ยกสวัสดิ์. 2556. การสร้างสมการสหสัมพันธ์เพื่อทำนายคุณภาพภายในของมังคุด (Multivariate equations for internal qualities prediction of mangosteens). ปรินญาณิพนธ์คณะอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (วันที่สืบค้น 2 กุมภาพันธ์ 2558)

สนธิสุข ชีระชัยชยติ. 2552. เทคนิคการตรวจสอบเปลือกแข็งในมังคุดแบบไม่ทำลายโดยวิธีการวัดการดูดกลืนแสงในย่านใกล้อินฟราเรด. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.), กรุงเทพมหานคร.

### ภาษาอังกฤษ

GW Instek Co.,Ltd. 2011. LCR 800's user manual. New Taipei city, Taiwan. (วันที่สืบค้น 30 มกราคม 2558)

Hambley, A.R., 2005. Electrical engineering principles and applications. 3<sup>rd</sup> edition. Pearson Prentice hall, 286, United state of America. (วันที่สืบค้น 2 กุมภาพันธ์ 2558)

Jha, S.H., K. Narsaia, A.L. Basediya, R. Sharma, P. Jaiswal, R. Kumar and R. Bhardwaj. 2011. Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods—a review. Journal of food science and technology. 48: 387-411. (เดือนที่สืบค้น กันยายน 2557)

Li, X., K. Toyoda and I. Ihara. 2011. Coagulation process of soymilk characterized by electrical impedance spectroscopy. Journal of food engineering. 105: 563-568. (วันที่สืบค้น 17 กุมภาพันธ์ 2558)

Masut, R., M. Alcaniz, A. Fuentes, F.C. Schmidt, J.M. Barat, L. Gil, D. Baigts, R.M. Manez and J. Soto. 2010. Design of a low-cost non-destructive system for punctual measurements of salt levels in food products using impedance spectroscopy. Journal of Sensors and Actuators A: Physical. 158: 217-223.

Roadstrum. W.H. and D.H. Wolaver. 1994. Electrical engineering for all engineers. 2<sup>nd</sup>. John Wiley & Sons, Inc, United state of America. (วันที่สืบค้น 28 มกราคม 2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Yokochi. H. and Y. Ohkura. 2014. Changes of bioelectrical impedance parameter during food processing, pp. 1-5. *In* special lecture in Sakura exchange program in science. Department of biosphere resources science. Graduate school of bio –agricultural sciences, Nagoya University, Japan. (วันที่สืบค้น 30 มกราคม 2558)

Zywica, R., G. Pierzynowska-Korniak, J. Wojcik. 2005. Application of food products electrical model parameters for evaluation of apple puree dilution. *Journal of food engineering*, 67: 413-418. (วันที่สืบค้น 17 กุมภาพันธ์ 2558)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26/7/2559

Gmail - Fwd: Acta Horticulturae - fulltext accepted : Nondestructive...



สนธิสุข ชีระชัยขุมดี &lt;sontisuk2211@gmail.com&gt;

**Fwd: Acta Horticulturae - fulltext accepted : Nondestructive...**

1 ข้อความ

**Thanh huong Ho** <hthuong807@gmail.com>  
 ถึง: สนธิสุข ชีระชัยขุมดี <sontisuk2211@gmail.com>

26 กรกฎาคม 2559 19:20

----- Forwarded message -----

From: <symposiacontributions@ishs.org>  
 Date: 11 Jul 2016 09:27  
 Subject: Acta Horticulturae - fulltext accepted : Nondestructive...  
 To: <hthuong807@gmail.com>  
 Cc:

Dear author,

This is to confirm that your article:  
 Nondestructive prediction of moisture content of lime (*Citrus aurantifolia* Swingle cv. Paan) by multiple regression analysis of its electrical and physical properties has been reviewed and is accepted by the editorial board of:  
 III International Conference on Agricultural and Food Engineering for publication in Acta Horticulturae

Presenting Author: Ho Thanh Huong hthuong807@gmail.com

Symposium details + contact information are available from:  
<http://www.ishs.org/symposium/564>

<https://mail.google.com/mail/u/0/?ui=2&ik=4f60b0af9&view=pt&search=inbox&th=1562725e17b582b4&siml=1562725e17b582b4>

1/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UPM/FK/CAFEi2016/40 (3000)  
29 September 2016

TO WHOM IT MAY CONCERN



Dear Sir/Madam,

**Confirmation of Acceptance for Publication in Acta Horticulturae**

On behalf of the organizing committee of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Agricultural and Food Engineering (CAFEi/2016) held from 23-25 August 2016 at Seri Pacific Hotel, Kuala Lumpur, Malaysia, we would like to inform that the manuscript entitled: "Nondestructive prediction of moisture content lime (Citrus aurantifolia Swingle cv. Paan) by multiple regression analysis of its electrical and physical properties" by "H. T. Huong and S. Teerachaichayut" has been accepted by the International Society for Horticultural Science (ISHS) and will be published in Acta Horticulturae Book in early 2017.

We really appreciate your contribution.

Thank you.

"Sustaining Agriculture, Preserving Life".

*Su.*

**(DR. SAMSUZANA ABD AZIZ)**  
Chairperson  
CAFEi 2016 Organizing Committee  
Faculty of Engineering  
Universiti Putra Malaysia

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Journal Homepage

### Acta Horticulturae

Subject Area: Horticulture  
Publisher: International Society for Horticultural Science  
ISSN: 0567-7572

Scopus Coverage Years: 1976, 1988, from 1996 to 2015

#### Journal Metrics

Scopus Journal Metrics offer the value of context with their citation measuring tools. The metrics below allow for direct comparison of journals, independent of their subject classification. To learn more, visit: [www.journalmetrics.com](http://www.journalmetrics.com).

SJR (SCImago Journal Rank) (2015) : 0.171  
IPP (Impact per Publication) (2015) : 0.154  
SNIP (Source Normalized Impact per Paper) (2015) : 0.185

Compare with other journals

Follow this source

Receive emails when new documents are available in Scopus

#### SJR, IPP, and SNIP

SJR = SCImago Journal Rank is weighted by the prestige of a journal. Subject field, quality and reputation of the journal have a direct effect on the value of a citation. SJR also normalizes for differences in citation behavior between subject fields.

IPP = Impact per Publication (IPP) measures the ratio of citations per article published in the journal.

SNIP = Source Normalized Impact per Paper measures contextual citation impact by weighting citations based on the total number of citations in a subject field.

#### Documents available from

2016	614 documents
2015	2212 documents
2014	2198 documents
2013	2285 documents
2012	2828 documents
2011	2379 documents
2010	2702 documents
2009	2746 documents
2008	2462 documents
2007	2158 documents
2006	1998 documents
2005	2206 documents
2004	2279 documents
2003	1889 documents
2002	1969 documents
2001	1607 documents
2000	1734 documents
1999	1673 documents
1998	1526 documents
1997	1693 documents
1996	1183 documents
1995 and before	2 documents

Top of page

#### Open Access Journals

Journals covered by Scopus are indicated as Open Access if the journal is listed in the Directory of Open Access Journals (DOAJ) and/or the Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD).

For questions regarding Open Access Journals please see the Content info page.

For questions regarding the Open Access Journal search options please see the Scopus OA help file.

#### About Scopus

What is Scopus  
Content coverage  
Scopus Blog  
Scopus API  
Privacy Matters

#### Language

日本語に切り替える  
切换到繁体中文  
切换到繁體中文

#### Customer Service

Help and Contact  
Live Chat

ELSEVIER

Terms and Conditions Privacy policy  
Copyright © 2016 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.  
Cookies are set by this site. To decline them or learn more, visit our Cookies page

RELX Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 1 Nondestructive prediction of moisture content of 2 lime (*Citrus aurantifolia* Swingle cv. Paan) by multiple 3 regression analysis of its electrical and physical 4 properties

5  
6 Ho Thanh Huong<sup>1</sup> and Sontisuk Teerachaichayut<sup>1,a</sup>

7  
8 <sup>1</sup>Faculty of Agro-Industry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand  
9

## 10 Abstract

11 Large quantity of juice is an important index of lime quality that consumers  
12 seek for. Therefore, a nondestructive technique for prediction of lime juice quantity is  
13 needed. In this study, moisture content (MC) of lime which is an indicator of its juice  
14 quantity was predicted by multiple regression analysis of its electrical properties—  
15 capacitance (C), inductance (L) and impedance (Z) at various frequencies (0.012, 0.05,  
16 0.1, 0.2, 5, 10, 20, 50, 100 and 200 kHz)—and physical parameters—weight and  
17 geometric mean diameter (GMD). Samples (N=82) were divided into a calibration set  
18 (N=55) and a prediction set (N=27). A calibration model for moisture content of lime  
19 was established and cross-validated by partial least squares regression (PLSR).  
20 Prediction results achieved a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.934 and a root  
21 mean square error of prediction (RMSEP) of 1.822% wet basic, demonstrating that  
22 this technique has a real potential for development into a practical nondestructive  
23 lime screening method.

24  
25 **Keywords:** lime, impedance, capacitance, inductance, GMD, weight, moisture content.

## 26 INTRODUCTION

27  
28 Lime (*Citrus aurantifolia* Swingle cv. Paan) is an economically significant  
29 horticultural crop in Thailand and the harvest season is from July to September  
30 (Pranmornkith et al., 2005). The price of lime strongly depends on its availability and  
31 quality characteristics. Outside of this harvest period, the price rises gradually and reaches  
32 the highest price in the dry season (February to April) (Pranmornkith et al., 2005).  
33 Consumers buy lime based on acceptable quality using juice quantity as one of indicators.  
34 After harvesting and handling, lime should be sorted to meet grade and quality standards.  
35 Rapid nondestructive tests for determining the quality of intact fruit have been proposed  
36 using modern techniques such as visible and near infrared spectroscopy (Vis/NIR) (Juan,  
37 2015), hyper-spectral imaging techniques (Hailong et al., 2015) and dielectric measurement  
38 (Grant et al., 1978). It has been proven that dielectric properties of agricultural products can  
39 be used as a simple, reliable, robust and nondestructive sensing technique (Nelson and  
40 Bartely, 2000; Venkatesh and Raghavan, 2004, 2005). The use of dielectric properties to  
41 study the composition of materials and the structure of their constituent molecules has been  
42 carried out in recent years (Grant et al., 1978). The dielectric properties of hygroscopic  
43 materials such as food and agricultural products depend strongly on the amount of water in  
44 the materials, the frequency of the applied alternating electric field, the temperature, the  
45 density, the composition and the structure of the materials (Nelson and Trabelsi, 2012).

<sup>a</sup>Email: ktsontis@kmitl.ac.th

46 Dielectric properties of materials that were determined by dielectric spectroscopy were a  
 47 function of frequency (Skierucha et al., 2012). The high capacitance of a capacitor is due to  
 48 the existence of a dielectric material in it (Grant, et al., 1978).

49 Various methods have been developed to determine the electrical properties of  
 50 materials. Some of the most commonly used devices for measuring dielectric properties of  
 51 food materials include parallel plate capacitor, coaxial probe, wave guide, resonant  
 52 structure, inductance (L) - capacitance (C) - resistance (R) meter (LCR meter), impedance  
 53 analyzer, and scalar and vector network analyzer (Ragni et al., 2006). Nigmatullin and  
 54 Nelson (2005) studied dielectric characterization of many kinds of fresh fruit and vegetables  
 55 (apple, avocado, banana, cantaloupe, carrot, cucumber, grape, orange, and potato) using  
 56 various frequencies from 0.01 to 1.8 GHz. Juansah et al., (2012) described that the electrical  
 57 behavior (resistance and capacitance) of Garut citrus fruit changed during ripening. The  
 58 capacitance and impedance of Garut citrus decreased while the conductance increased when  
 59 the frequency was increased. Mizukami et al., (2006) measured the moisture content of tea  
 60 leaves using electrical impedance and capacitance. They used four stainless steel electrodes  
 61 to measure electrical impedance, resistance, reactance and capacitance. Their results  
 62 showed that the logarithmic functions of impedance and capacitance could be used to  
 63 estimate the moisture content of tea leaves at 3 kHz. Ragni et al., (2006) also studied  
 64 dielectric properties for predicting internal qualities of shelled eggs by measuring the  
 65 differences in capacitance (DC) and voltage (DV) using a sine wave radio frequency  
 66 oscillator with a parallel plate capacitor. The non linear regression models for predicting the  
 67 quality indices of the eggs—such as storage duration, air cell height, yolk index, albumen  
 68 height, and Haugh unit using the DC/DV and egg mass parameters as predictive variables—  
 69 gave coefficients of determination from 0.64 to 0.85. Weidong (2007) designed a low cost,  
 70 high precision and good repeatability equipment using a concentric cylinder type  
 71 capacitance sensor for measuring capacitance for predicting water content of grain. It was  
 72 applied at a dryer's outlet and found to be accurate. All of the research studies mentioned  
 73 above show that nondestructive determination of internal properties of fruits and  
 74 vegetables can be done by employing their electrical properties. A positive linear  
 75 relationship between geometric mean diameter and moisture content was observed for  
 76 pistachio nut and its kernel by Kashaninejad et al., (2005) and Seyed et al., (2007).

77 However, no study has been conducted to determine moisture content in lime by using  
 78 electrical and physical properties. Using multivariate analysis to forecast quality of  
 79 agricultural products is a challenge that presents itself in many industrial problem domains  
 80 (Misty et al., 2009). We aimed to find correlations between electrical as well as physical  
 81 properties—capacitance, inductance, impedance, weight, GMD—and moisture content of  
 82 lime samples. It was expected we could gain good information for evaluation without  
 83 damaging samples. Therefore, the primary objective of this proposed research was to  
 84 develop an accurate and non-destructive method for predicting moisture content of lime.

## 85 MATERIALS AND METHODS

### 86 Materials

87 Limes of good appearance and similar size (N=82) were purchased from a wholesale  
 88 market in Bangkok, Thailand (Figure 1). Each sample was measured of its capacitance,  
 89 inductance and impedance (electrical parameters) and weight and GMD (physical  
 90 parameters) which were the independent variables as well as its moisture content which  
 91 was the dependent variable.  
 92  
 93  
 94

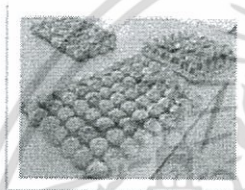
95 **Equipment**

96 The length, width and height of each sample and its weight were measured by a vernier  
97 caliper (Auto-lock vernier caliper, Long jer, Taiwan) and an electronic digital weighing scale  
98 (WANT, Jiangsu, China) having resolutions of 0.01mm and 0.001g, respectively. Its  
99 geometric mean diameter was calculated by the following formula:

$$100 \quad GMD = (lwh)^{1/3} \quad (1)$$

101 where l is length (mm), w is width (mm) and h is height (mm) (Mohsenin, 1970). Electrical  
102 parameters of lime were measured (Figure 2) with an LCR meter (LCR 821, GW INSTEK,  
103 Taiwan) at the frequencies of 0.012, 0.05, 0.1, 0.2, 5, 10, 50, 100 and 200 kHz. Each sample  
104 was placed in a standard fixture consisted of two parallel stainless steel plates (15 cm length  
105 and 10 cm width) which were connected to the LCR meter by four wire-type connections:  
106 two outer terminals (H force and L force for providing electric current) and two inner  
107 terminals (H sense and L sense for measuring electric potential). The input voltage of the  
108 signal was 1 volt. Each sample was placed in the fixture once and repeatedly measured for  
109 fifty times, and the average value was calculated and shown on the LCR screen  
110 automatically.

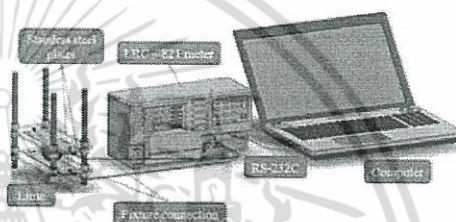
111



112

113

114 Figure 1. Sorted limes for measurement  
115 measuring system  
116



117 **Moisture content analysis (ASAE standard, 1994)**

118 After measurement, each sample was dried to a constant weight in a hot air oven at  
119 103°C for 24 hours according to the ASAE standard (1994). The moisture content of the  
120 sample was calculated by this formula:

$$121 \quad MC = [(A-B) / A] \times 100 \quad (2)$$

122 where A is the original weight of the sample and B is the dried weight.

123 **Data analysis**

124

125

Table 1. Statistical characteristics of calibration set and prediction set for moisture content (%wet basic) determination.

Items	Calibration set	Prediction set
Number of sample	55	27
Range	50.13-84.83	52.90-82.80
Mean	73.76	71.79
Standard deviation	6.92	6.90

126

127

128

129

Statistical analysis was performed by using Unscrambler software (CAMO, Oslo, Norway). Moisture content was assigned to be the dependent variable. The independent variables were weight, GMD, capacitance, impedance and inductance at the frequencies of

130 0.012, 0.05, 0.1, 0.2, 5, 10, 50, 100 and 200 kHz. The entire data (N=82) were split into two  
131 sets for calibration and prediction.

132 The calibration set (N= 55) was used to establish a partial least square regression  
133 calibration model and then fully cross-validate, while a prediction set (N=27) was used to  
134 evaluate the predictive ability of the calibration model. Calibration performance was  
135 reported as root mean square error of calibration (RMSEC) and coefficient of determination  
136 for calibration ( $R^2_c$ ). Prediction performance of the model was evaluated by using root mean  
137 square error of prediction (RMSEP) and coefficient of determination for prediction ( $R^2_p$ ). A  
138 calibration model with  $R^2 > 0.8$  and a prediction model with  $R^2 > 0.5$ , in addition to low  
139 RMSEC or RMSEP, were assumed to be valid by Kiralj and Ferreira (2009), while Chirico and  
140 Gramatica (2011) accepted values of  $R^2 > 0.7$  for their calibration model and  $R^2 > 0.6$  for  
141 their prediction model.

142

### 143 RESULTS AND DISCUSSION

144 The relationship between electrical properties and moisture content, and the  
145 relationship between electrical properties and frequencies were examined by curve plotting.  
146 Figure 3A shows that the average C of lime samples with higher MC was higher than that of  
147 lime samples with lower MC at all frequencies. The reason that it was higher can be  
148 described as follows. The capacitance of a parallel plate capacitor is:

$$149 \quad C = (\epsilon_r \epsilon_0 A) / D \quad (3)$$

150 where C is in Farads,  $\epsilon_r$  is the relative permittivity of the substance between the plates  
151 ( $F \cdot m^{-1}$ ),  $\epsilon_0$  is the dielectric constant of vacuum ( $8.854 \times 10^{-12} F \cdot m^{-1}$ ), A is the area of the  
152 plates ( $m^2$ ), and D is the gap between the plates (m) (Baxter, 1997).  $\epsilon_r$  of a biological  
153 material can be calculated by the following formula:

$$154 \quad \epsilon_r = \epsilon' + j\epsilon'' = \epsilon' + j\sigma/w \quad (4)$$

155 where  $\epsilon'$  is complex permittivity, j is an imaginary unit,  $\sigma$  is the electrical conductivity of the  
156 material, w is angular frequency (Hippel, 1995). Water has high conductivity (Walstra,  
157 2001) and thus higher moisture content in lime samples resulted in a higher electrical  
158 conductivity that led to an increase in the value of  $\epsilon_r$ , therefore, the value of the capacitance  
159 also increased. On the other hand, the average C of lime samples decreased when the  
160 frequency increased as described by the formula below:

$$161 \quad Z_c = 1 / (2\pi fC) \quad (5)$$

162 where  $Z_c$  is capacitive impedance in ohms,  $\pi = 3.1416$ , f is frequency in hertz, C is in Farads  
163 (Baxter, 1997).

164 The average Z of lime samples with lower MC was higher than that of lime samples with  
165 higher MC at all frequencies (Figure 3B). This can be explained as follows. Total impedance  
166 is defined as:

$$167 \quad Z = R + jX \quad (6)$$

168 where R is resistance (the real part of impedance), and X is reactance (the imaginary part)  
169 (Barsoukov and Macdonald, 2005). The resistance, in turn, can be calculated by the  
170 following formula:

$$171 \quad R = \rho l / A \quad (7)$$

172 where  $\rho$  is resistivity, l is length of the conductor and A is cross sectional area of the  
173 conductor (Breitkopf, 2012). Conductivity is the reciprocal of resistivity:

$$174 \quad \sigma = 1/\rho \quad (8)$$

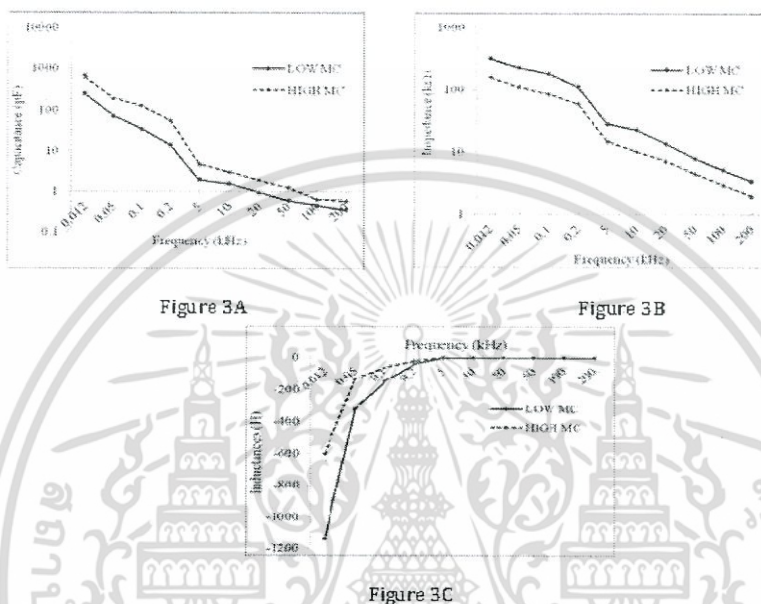
175 Therefore, as MC increased, electrical conductivity increased, resistivity decreased, and  
176 resistance decreased. That is the reason that impedance decreased when moisture content  
177 of lime increased. Furthermore, the average Z of lime samples decreased when frequency  
178 increased that can be explained by the formula (5).

179 In Figure 3C, the average L of lime samples with higher MC was higher than that of lime  
180 samples with lower MC. This can be explained by the following formula:

181  
182  
183  
184  
185  
186  
187

$$L = R/Z\omega f \quad (9)$$

where L is in Henry, R is in Ohm (Dolmage, M. M., 1928). Resistance was determined by formula (7). In addition, electrical conductivity was calculated by formula (8). The increase in the amount of water content led to the decrease in resistance, and the inductance went up as the moisture content of lime samples increased. The formula (9) mentioned above also explains why the average inductance of lime samples increased when frequency increased.



188  
189  
190  
191

Figure 3. Electrical properties of lime in the range of 0.0012-200 kHz: Capacitance (Figure 3A), Impedance (Figure 3B) and Inductance (Figure 3C)

Table 2. Results of the PLSR model for moisture content (%wet basic) determination in the calibration set and prediction set

Items	Calibration set	Prediction set
F	3	3
N	55	27
R-square	0.951	0.934
RMSEC/RMSEP (%wet basic)	1.793	1.822

192 F = Factors, N= number of sample, R= coefficients of correlation, RMSEC= root mean square error calibration,  
193 RMSEP= root mean square error prediction.  
194

195 To ensure good performance of the model, we made sure that the standard deviations of  
196 the MC of the samples in the calibration and the prediction set were similar. Also, the  
197 range of MC in the prediction set was covered by the range of the calibration set as shown in  
198 Table 1. The linearity and error between the measured value and the predicted value of MC  
199 using a combination of independent variables of electrical (capacitance, inductance and  
200 impedance) and physical properties (GMD and weight) are shown in Table 2.

201

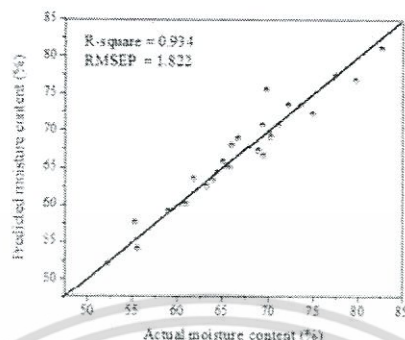


Figure 4. Scattered plots of actual and predicted moisture content of limes

202 For a better illustration of the model's performance, a scatter plot between the measured  
 203 moisture content and the predicted moisture content in the prediction set is shown in  
 204 Figure 4. The plot shows that the model was able to predict the MC in lime samples with  
 205 high accuracy ( $R^2 = 0.934$ , RMSEP = 1.822%). Therefore, the model which was established  
 206 from nondestructive variables such as physical and electrical parameters can be used to  
 207 accurately predict MC in limes.

208

#### 209 CONCLUSION

210 A calibration model for MC was established by PLSR using physical and electrical  
 211 variables of intact limes. The results obtained in this paper show high MC prediction  
 212 accuracy. Therefore, it is possible to use a multivariate model that utilizes physical and  
 213 electrical properties in an online sorting system as a low cost technique for non-destructive  
 214 measurement of MC in limes.

215

#### 216 ACKNOWLEDGMENT

217 The authors are grateful to King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and  
 218 Agro-Industry Faculty of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for providing  
 219 the laboratory equipment and financial support for this research. Finally, the authors would  
 220 like to thank Assoc. Prof. Panmanas Sirisomboon for technical help.

221

#### 222 Literature cited

223

224 ASAE Standards. (1994). Moisture Measurement-forages. ASAE535B2 DEM93, 471. American Society of  
 225 Agricultural Engineering, 2950 Niles Road, Michigan, USA.

226

227 Barsoukov, E. and Macdonald, J. R. (2005). Impedance spectroscopy, Theory, Experiment, and Applications.  
 228 Canada. ISBN: 0-471-64749-7, p. 7.

229

230 Baxter, L. K. (1997). Capacitive Sensors. Design and Applications. The Institute of Electrical and Electronics  
 231 Engineers, Inc. New York, NY 10017-2394, p. 14 - 4B.

232

233 Breittkopf, C. (2012). Impedance Spectroscopy. Old technique - New application. Lecturer Series at Fritz-Haber-  
 234 Institute Berlin "Modern Methods in Heterogeneous catalysis. p.12.

235

236 Chirico, N. and Gramatica, P. (2011). Real external predictivity of QSAR models: how to evaluate it? Comparison  
 237 of different validation criteria and proposal of using the concordance correlation coefficient. Journal of Chemical  
 238 Information and Modeling, 51, 2320-2335.

- 239  
240 Dolmage, M. M. (1928). Negative inductance. United state patent office. Serial No. 310, 395.  
241  
242 Grant, E. H., Sheppard, R. J. and South, G. P. (1978). Dielectric Behavior of Biological Molecules in Solution. Oxford  
243 University Press. 1-120.  
244  
245 Hailong, W., Jiyu, P., Chuanqi, X., Yidan, B., and Yong, H. (2015). Fruit quality evaluation using spectroscopy  
246 technology. *Sensors* 2015, 15, 11689-11927. ISSN 1424-8220.  
247  
248 Hippel, A. V. (1995). Dielectric materials and application. Cambridge: Technology Press of MIT. p. 4.  
249  
250 Juansah, J., Budiastira, I. W., Dahlan, K. and Seminar, K. B. (2012). Electrical Behavior of Garut Citrus Fruits during  
251 Ripening Changes in Resistance and Capacitance Models of Internal Fruits. *International Journal of Engineering &*  
252 *Technology IJET-IJENS Vol: 12, No: 04.*  
253  
254 Juan, F. G. M. (2015). Optical path length and wavelength selection using Vis/NIR spectroscopy for olive oil's free  
255 acidity determination. *International Journal of Food Science and Technology* 2015, 50, 1461-1467.  
256  
257 Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A. and Tabil, L. G. (2005). Some physical properties of Pistachio  
258 (*Pistachia vera* L.) nuts and its kernel. *Journal of Food Engineering*, 72: 30-38.  
259  
260 Kiral, R. and Ferreira, M. M. C. (2009). Basic validation procedures for regression models in QSAR and QSPR  
261 studies: theory and application. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 20(4), 770-787.  
262  
263 Mizukami, Y., Sawai, Y. and Yamaguchi, Y. (2006). Moisture Content Measurement of Tea Leaves by Electrical  
264 Impedance and Capacitance. *Biosystems Engineering*, 93 (3), 293-299.  
265  
266 Misty, B., Jose, I. and Gary, S. (2009). Multivariate analysis, correlation and prediction. *Proc. SPIE 7347,*  
267 *Evolutionary and Bio-Inspired Computation: Theory and Applications III*, 734702 (April 28, 2009);  
268 doi:10.1117/12.821899.  
269  
270 Mohsenin, N. N. (1970). Physical properties of plants and animal materials. New York: Gordon and Breach  
271 Science Publishers, NW, p. 59  
272  
273 Nelson, S. O. and Bartley Jr, P. G. (2000). Measuring frequency- and temperature-dependent dielectric properties  
274 of food materials. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1733-1736.  
275  
276 Nelson, S. O. and Trabelsi, S. (2012). Factors influencing the dielectric properties of agricultural and food  
277 products. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 46(2), 93-107.  
278  
279 Nigmatullin, R. R. and Nelson, S. O. (2006). Recognition of the "fractional" kinetics in complex system: Dielectric  
280 properties of fresh food and vegetables from 0.01 to 1.8 GHz. *Signal processing* 86 (10), 2744-2759.  
281  
282 Prannornkith, T., Mawson, A. J. and Heyes, J. A. (2005). Effect of CA and alternative postharvest treatments on  
283 quality of lime (*Citrus latifolia* Tanaka) fruit. In: *Proceedings of 9th International Controlled Atmosphere*  
284 *Research Conference, Michigan State University, ISHS, 5-10 July, 21-27.*  
285  
286 Ragni, L., Gradari, P., Berardinelli, A., Giunchi, A. and Guarnieri, A. (2006). Predicting quality parameters of shell  
287 eggs using a simple technique based on the dielectric properties. *Biosystems Engineering* 94 (2): 255-262.  
288  
289 Seyed, M.A.R., Baharch, E., Ali, R., and Asad, M. A. (2007). The physical properties of pistachio nut and its kernel  
290 as a function of moisture content and variety: Part I. Geometrical properties. *Journal of Food Engineering* 81:  
291 209-217.  
292  
293 Siderucha, W., Wlczek, A. and Sypowski, A. (2012). Dielectric spectroscopy in agrophysics. *International*  
294 *Agrophysics*, 26: 187-197.  
295  
296 Venkatesh, M. S., Raghavan, G. S. V. (2004). An overview of microwave processing and dielectric properties of  
297 agri-food materials. *Biosystems Engineering* 88(1): 1-18.  
298  
299 Venkatesh, M. S. and Raghavan, G. S. V. (2005). An overview of dielectric properties measuring techniques.  
300 *Canadian Biosystems Engineering*, 47(7): 15-30.  
301

- 302 Walstra, P. (2001). Bonds and interaction force. *Physical chemical of foods*. Marcel Deekker, New York, p. 41-51.  
303  
304 Weidong, C. (2007). On-line Monitoring System for Grain Moisture Content During Dryer Processing.  
305 *International Conference on Agriculture Engineering*, 591-594.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยเรื่อง “Nondestructive prediction for moisture content of lime (*Citrus aurantifolia* Swingle cv. Paan) using multivariate analysis of electrical and physical properties”

รศ.ดร.สนธิสุข ธีระชัยชยุติ คณะอุตสาหกรรมเกษตร สจล.

ได้รับรางวัล: ISHS award for best poster presentation

จากงานประชุมวิชาการ: 3<sup>rd</sup> International Conference on Agricultural and Food Engineering (CAFEi 2016)

จัดที่ The Ser Pacific Hotel , Kuala Lumpur ประเทศมาเลเซีย ในระหว่างวันที่ 23-25 สค. 2559



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2559

แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ)  แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การทำนายคุณภาพของผลมะนาวแบบไม่ทำลายโดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้า  
(ภาษาอังกฤษ) Non-destructive prediction of lime's qualities using electrical properties

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัย รศ.ดร. สนธิสุข อีระชัยขยติ

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 01/10/2558 ถึงวันที่ 30/09/2559

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ 01/10/2558 ถึงวันที่ 30/09/2559

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ

งวดที่ 1 36,550 บาท 85 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป) 17/12/2558

งวดที่ 2 6,450 บาท 15 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ว/ด/ป) 30/06/2559

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้บังคับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณทั้งหมด	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (บาท)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว	-	-	-
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	10,000	10,000	-
ค่าใช้สอย	5,000	3,500	1,500
ค่าวัสดุ	28,000	29,965.92	(1,965.92)
งบลงทุน			
ค่าครุภัณฑ์	-	-	-
รวม	43,000	43,465.92	(465.92)

(รศ.ดร. สนธิสุข อีระชัยขยติ)

หัวหน้าโครงการวิจัย

25 / เม.ย. / 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

#### หัวหน้าโครงการ

- ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นายสนธิสุข ธีระชัยชยติ  
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mr.SontisukTeerachaichayut
- เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3-1002-01948-41-2
- หน่วยงานที่อยู่ คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โทรศัพท์ 02-3298000 ext. 7267 โทรสาร 02-3298627  
E-mail :ktsontis@kmitl.ac.th

#### 4. ประวัติการศึกษา

คุณวุฒิ	ปี พ.ศ. ที่จบ	ชื่อสถานศึกษา
ปร.ด.(เทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว)	2550	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ประเทศไทย
วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี)	2537	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยประเทศไทย
วศ.บ. (วิศวกรรมเกษตร)	2529	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ประเทศไทย

- ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

#### 5.1 หัวหน้าโครงการวิจัย :

สนธิสุข ธีระชัยชยติ. 2547. ประเมินผลเทคนิคการแช่แข็งข้าวโพดอ่อน.

สนธิสุข ธีระชัยชยติ, น.ส.จุฑามาศ ผลอุดม, น.ส.วรรณชยา เอี่ยมเสถียรพร.2552.การสร้างโมเดลของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ในน้ำมัจคุดจากสเปกตรัมสะท้อนกลับความยาว คลื่นใกล้อินฟราเรด.

สนธิสุข ธีระชัยชยติ, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, วารุณี ธนะแพสย์.2552.เทคนิคการตรวจสอบเปลือกแข็งในมัจคุดแบบไม่ทำลายโดยวิธีการดูดกลืนแสงในย่านใกล้อินฟราเรด.

สนธิสุข ธีระชัยชยติ, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล,วารุณี ธนะแพสย์.2553.เทคนิคการตรวจสอบยางไหลภายในผลมัจคุดแบบไม่ทำลายโดยวิธีการวัดการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นและช่วงใกล้อินฟราเรด.

สนธิสุข ธีระชัยชยติ. น.ส.กนกพร แก้วสมนึก น.ส.มาลินี รังษี 2553.การทำนายอาการฟ้ามในผลส้มแบบไม่ทำลายโดยใช้ค่าทางไฟฟ้า.

สนธิสุข ธีระชัยชยติ. 2554. แ่งเชื้อเพลิงแข็งชีวมวลจากเปลือกแห้ว.

สนธิสุข ธีระชัยชยติ. 2554. การตรวจสอบคุณภาพภายในของผลสับปะรดแบบไม่ทำลายโดยวิธีการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้นแบบทะลุผ่าน.

สนธิสุข ธีระชัยชยติ. 2555. การสกัดน้ำสับปะรดและผลิตเชื้อเพลิงแข็งชีวมวลจากเปลือกสับปะรด.

#### 5.2 ชื่องานวิจัยที่เผยแพร่

สนธิสุข ธีระชัยชยติ. 2535. อุตสาหกรรมน้ำผลไม้ไทย: อะไรคืออะไร.วารสารการวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 7 (1): 67-70.

- ศรีศักดิ์ ตรังวัชรกุล, ชลิต ชูประทีป, สนธิสุข ชีระชัยชยติ. 2535. โรงงานนำทางผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้ วท.วารสารการวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 7 (1): 73-82.
- สนธิสุข ชีระชัยชยติ, ดำรงชัย สิทธิสำอางค์, เพ็ญศิริ อนันต์รักสกุล, พรภัทธา ศรีนรคุตร, ยุพาภรณ์ ทับนาโคก. 2536. การวิจัยเครื่องเคลือบแบบต่อเนื่องชนิดเคลือบเค็มสำหรับอาหารขบเคี้ยว. โครงการวิจัยที่ ภ.32-06, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 36 หน้า
- สนธิสุข ชีระชัยชยติ. 2547. ประเมินผลเทคนิคการแช่แข็งข้าวโพดอ่อน. วารสารพระจอมเกล้าลาดกระบัง 12(2):39-41.
- วารุณี ณะแพสย์, สนธิสุข ชีระชัยชยติ, ศุมาพร เกษมสำราญ, and Young Kil Kwon. 2548. การตรวจสอบคุณภาพภายในของส้มโดยวิธีไม่ทำลายด้วยเทคนิคแสงย่านใกล้อินฟราเรดในช่วงคลื่นสั้น. สัมมนาวิชาการ วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ครั้งที่ 3, 10-11 ตุลาคม 2548, หน้า 57.
- สนธิสุข ชีระชัยชยติ, วารุณี ณะแพสย์, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, ศุมาพร เกษมสำราญ. 2551. การหาปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ในผลมังคุดแบบไม่ทำลายโดยใช้เทคนิคแสงย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 39 (3 พิเศษ): 156-159.
- สนธิสุข ชีระชัยชยติ, วารุณี ณะแพสย์, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, ศุมาพร เกษมสำราญ. 2552. การประเมินปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของมังคุดแบบไม่ทำลายโดยใช้แสงย่านความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 40 (1): 55-64.
- สนธิสุข ชีระชัยชยติ, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, จุฑามาศ ผลอุดมและวรรณชยา เอื้ออมเสถียรพร. 2553. การทำนายอาการเนื่อแก้วจากน้ำมังคุดโดยใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นใกล้อินฟราเรด. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 41 (1 พิเศษ): 385-388.
- ชนิษฐา แสงแก้วและสนธิสุข ชีระชัยชยติ, 2553. คุณสมบัติทางกายภาพของเปลือกมังคุดภายหลังการตกกระทบ. วารสารอุตสาหกรรมเกษตรพระจอมเกล้า. 2(1): 27-35.
- สนธิสุข ชีระชัยชยติ, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, วารุณี ณะแพสย์และชนิษฐาแสงแก้ว. 2554. ความเป็นไปได้ในการคัดแยกผลมังคุดเปลือกแข็งแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคการวิเคราะห์พหุตัวแปร. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 42 (1 พิเศษ): 143-146.
- สนธิสุข ชีระชัยชยติ. 2554. การตรวจสอบคุณภาพผลไม้โดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี. วารสารอุตสาหกรรมเกษตรพระจอมเกล้า 3(1): 44-52
- สนธิสุข ชีระชัยชยติ, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล และวารุณี ณะแพสย์. 2554. ความเป็นไปได้ในการประเมินระดับอาการยางไหลในผลมังคุดแบบไม่ทำลายโดยใช้สมการหลายตัวแปร. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 42 (3 พิเศษ): 173-176.
- นารธระพี นาคะวัจนะ, อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, อาทิตย์ จันท์หิรัญ, สนธิสุข ชีระชัยชยติ และ ศิวลักษณ์ ปฐวีรัตน์. 2554. การศึกษาการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เพื่อทำนายปริมาณเนื้อแก้วในผลมังคุด. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 42 (1 พิเศษ) : 123-126.
- สนธิสุข ชีระชัยชยติ. 2555. การตรวจสอบคุณภาพภายในของผลมังคุดแบบไม่ทำลาย. วารสารการวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 27 (1): 55-60.
- กัญญาพัชร เพชรภรณ์ และ สนธิสุข ชีระชัยชยติ. 2555. ผลกระทบของการเกิดเชื้อราภายในมะเขือเทศต่อคุณสมบัติทางเคมี. การประชุมวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร สจล. ครั้งที่ 1, 7 กันยายน 2555,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ. 279-284.
- ศรัญญา วอขวา และ สนธิสุข ธีระชัยชยุติ. 2555. การศึกษาสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในมังคุดเปลือกแห้งภายหลังการตกกระทบ.การประชุมวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร สจล. ครั้งที่ 1, 7 กันยายน 2555, คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ. 285-290.
- สนธิสุข ธีระชัยชยุติ, วิฑิตพงศ์ ทิพย์แก้ว, ธนภฤต ชุตะรัตน์ และรัชคม ลีลับ. 2556. เครื่องวัดความแน่นเนื้อของผลไม้แบบน้ำหนักกด. การประชุมวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร สจล. ครั้งที่ 2, 30 สิงหาคม 2556, คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ. 185-190.
- สนธิสุข ธีระชัยชยุติ. 2556. สถานการณ์ระบบคัดแยกคุณภาพผลไม้สดแบบออนไลน์ในประเทศไทย. วารสารวิชาการเกษตร ปีที่ 31 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม 2556: 194-210.
- ปิยะมาศ จานนอก, อธิยาภรณ์ การรุ่งเรือง, อรวรรณ ทองนาค, อัฐพรส จานนอก, ภาณุวัฒน์ ทรัพย์ปรุง และ สนธิสุข ธีระชัยชยุติ. 2556. การทำนายความถ่วงจำเพาะของไซโกต์ด้วยเทคนิค NIRS. การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานทางวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 4 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น, 135-139.
- Teerachaichayut, S., K. Y. Kil, A. Terdwongworakul, W. Thanapase and Y. Nakanishi. 2007. Non-destructive prediction of translucent flesh disorder in intact mangosteen by short wavelength near infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology* 43. 202-206.
- Teerachaichayut, S., A. Terdwongworakul, and S. Pathaveerat. 2008. Multiple Parameters for Prediction of Translucent Flesh in Mangosteens. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Vol.X. Manuscript FP 08 007.
- Teerachaichayut S., W. Thanapase, K. Shigefuji, T. Otoi, Y. Nitta, S. Saranwong, and S. Kawano. 2008. Online Near Infrared Detection of Translucent and Gamboge Mangosteen. *Proceeding of The First Asian NIR Symposium and The 24<sup>th</sup> Japanese NIR Forum*, 158-159. Tsukuba city, Japan, 10-14 November.
- Kasemsumran, S., W. Thanapase, S. Teerachaichayut, A. Terdwongworakul, K. Y. Kil, K. Shigefuji, and Y. Nakanishi. Nondestructive Internal Quality Evaluation of Thai Orange Fruit using Short Wavelength Near Infrared Spectroscopy. *Japan-Korea Joint Symposium on Near Infrared Spectroscopy*, 284-285. Hanyang University, Korea, 28-30 June.
- Thanapase, W., S. Kaseamsumran, A. Janhiran, S. Teerachaichayut, K. Shigefuji, K. Kiji, Y. Nitta, S. Saranwong and S. Kawano. 2009. Recent collaborative researches between Japan and Thailand on NIR applications for Tropical Fruits. *Proceedings of the 25<sup>th</sup> NIR Forum*. 31-35. Japan, 13-15 May.
- Teerachaichayut, S., A. Terdwongworakul, J. Phonudom and W. Uamsatianporn. 2009. The Robustness of PLS Models for Soluble Solids Content of Mangosteen using

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Near Infrared Reflectance Spectroscopy. Global Science Books, Fresh Produce 3(1): 60–63.
- Teerachaichayut, S., A. Terdwongworakul, W. Thanapase, K. Saengkaew and R. Suwapanich. 2010. Feasibility of visible and SW-NIR spectroscopy to detect gamboge disorder in mangosteen fruits. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Asian Symposium on Near Infrared Spectroscopy, China, 15-18 Oct. 81-82.
- Teerachaichayut, S, W. Thanapase, S. Kasemsumran, K. Shigefuji, K. Kiji, Y. Nitta, S. Saranwong and S. Kawano. 2010. The methods of illumination and scanning for detecting internal disorders and quality of mangosteen by near infrared spectroscopy. Near Infrared Spectroscopy: Proceedings of the 14<sup>th</sup> international Conference. IM Publications LLP, West Sussex, UK., 219-223.
- Teerachaichayut, S., A. Terdwongworakul, W. Thanapase, K. Kiji. 2011. Non-destructive prediction of hardening pericarp disorder in intact mangosteen by near infrared transmittance spectroscopy. Journal of Food Engineering 106 (2011) 206–211.
- Terdwongworakul, A., N. Nakawajana, S. Teerachaichayut, A. Janhira. 2012. Determination of translucent content in mangosteen by means of near infrared transmittance. Journal of Food Engineering 109: 114–119.
- Teerachaichayut, S., A. Terdwongworakul. 2012. Empirical investigation of the optimal fruit presentation in near infrared transmittance for mangosteen quality evaluation. NIR news 23(1) :8-18.
- Teerachaichayut, S., K. Petcharaporn and S. Suktanarak. 2012. Calibration model of soluble solids content for Intact Tomato by Transmittance SW-NIR Spectroscopy. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Asian Symposium on Near Infrared Spectroscopy, Thailand, 14-18 May. 120-121.
- Teerachaichayut, S., A. Terdwongworakul, K. Keawsumnuk, M. Rangsi and K. Seangkeaw. 2012. A Feasibility Study for the Nondestructive Detection of Granulation in Tangerine Fruit Using a Capacitance based Technique. Proceedings of the CIGR-AgEng 2012: International Conference of Agricultural Engineering, Spain, 8-12 July, P0122.
- Terdwongworakul A., S. Teerachaichayut, S. Noypitak. 2012. Non-Destructive Classification of Translucent Flesh Mangosteen by Near Infrared Interactance. Proceedings of the CIGR-AgEng 2012: International Conference of Agricultural Engineering, Spain, 8-12 July. C0059.
- Sompong Nandee and Sontisuk Teerachaichayut. 2012. Brix-acid ratio detection for pomegranates using multivariate equation. International Conference on Nutrition and Food Sciences, July 23-24. IPCBEE vol.39 (2012) IACSIT Press, Singapore. 82-86.

- Sineenart Suktanarak and Sontisuk Teerachaichayut. 2012. Detection for Moisture Content of Sweet Tamarind flesh by Transmittance Short Wavelength Near Infrared Spectroscopy. International Conference on Nutrition and Food Sciences, July 23-24. IPCBEE vol.39 (2012) IACSIT Press, Singapore. 71-75.
- Kanyapat Petcharaporn and Sontisuk Teerachaichayut. 2012. Detection of Undesirable Internal Discoloring of Intact Tomatoes by Non-Destructive, Transmittance VIR-NIR Spectroscopy. International Conference on Food and Applied Bioscience 2012, 6-7 February. Chiang Mai, Thailand. 82-86.
- Suktanarak, S. and S. Teerachaichayut. 2013. Quantitative Analysis of Total Soluble Solids and Titratable Acidity of Sweet Tamarind by SW-NIRS. International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics, Vol. 3, No. 4, 328-331.
- Sukwani, S. and Teerachaichayut, S. 2013. Non-destructive prediction of internal browning in pineapple using transmittance short wavelength near infrared spectroscopy. Acta Hort. (ISHS) 989: 395-399.
- Kaewsaard, S., Kerdpi boon, S., Peuchkamut, Y., Teerachaichayut, S. 2013. Relationships between Physical property, Chemical composition and Marbling Score of Sirloin Beef Steak. 13th ASEAN Food Conference, 9-11 September 2013, Singapore. Meeting Future Food Demands: Security & Sustainability.
- Siriporn Kaewsaard, Yuporn Peuchkamut, Sontisuk Teerachaichayut, Pramoun Sriklong and Soraya Kerdpi boon. Correlation determination between morphology, chemical compositions and physical properties of sirloin beef steak. 2014. The proceedings of 52<sup>th</sup> Kasetsart university annual conference, Thailand, February 4-7, 201-207.
- Sasathorn Srivichien and Sontisuk Teerachaichayut. 2014. Comparison of nitrate content in 'Smooth Cayenne' pineapple flesh related to its different cut sections, maturity and crop season. Journal of Advanced Agricultural Technologies, Vol. 1, No.1, 65-68.
- Sasathorn Srivichien and Sontisuk Teerachaichayut. 2014. Comparison of nitrate content in 'Smooth Cayenne' pineapple flesh related to its different cut sections, maturity and crop season. Proceeding of The 4th International Conference on Asia Agriculture and Animal (ICAAA 2014), Bangkok, Thailand, June 9-10, 33-36.
- Sasathorn Srivichien and Sontisuk Teerachaichayut. 2014. Quality classification of pineapple based on nitrate level by Vis-NIRS. Proceeding of The 4<sup>th</sup> Asian NIR Symposium, Daegu, Korea, June 17-20, 130-132.
- Sontisuk Teerachaichayut, Isayapron Kanrungrueng, Orawan Thongnak, Oattharod Channok, Panuwat Supprung, Piyamart Jannok. 2014. Freshness Prediction of Hen Eggs Using NIR Spectroscopy Based on Specific Gravity. Proceeding of International Research Conference on Engineering and Technology (IRCET 2014), Bali, Indonesia, June 27-29, 585-592.

- Pattama Supaphon, Soraya Kerdpi boon, Yuporn Peuchkamut, Sontisuk Teerachaichayut, Pramoun Srikalong, Panadda Nonthanum. 2014. Surface Images and Physical Properties Correlation of Sirloin Steak by Pearson'S Correlation And Multiple Linear Regression Analysis. Proceeding of International Research Conference on Engineering and Technology (IRCET 2014), Bali, Indonesia, June 27-29, 593-601.
- 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.
- Teerachaichayut, S., Suktanarak, S. and Kasemsumram, S. 2014. Non-destructive detection of internal mold infection in sweet tamarind using short wavelength near infrared spectroscopy. *Acta Hort. (ISHS)* 1053:113-119
- Srivichien, S., A. Terdwongworakul, S. Teerachaichayut. 2015. Quantitative prediction of nitrate level in intact pineapple using Vis-NIRS. *Journal of Food Engineering* 150: 29-34.
- Teerachaichayut S., Yokswad W., Terdwongworakul A., Jannok P., Fernandes S.V. 2015. Application of Image Analysis for Determination of Mangosteen Density. *Journal of Advanced Agricultural Technologies*, 2(2): 92-97.
- Natrapee Nakawajana, Anupun Terdwongworakul, Sontisuk Teerachaichayut. 2016. Minimally destructive assessment of mangosteen translucency based on electrical impedance measurements. *Journal of Food Engineering* 171: 137-144.
- Sineenart Suktanarak, Sontisuk Teerachaichayut and Panuwat Supprung. 2016. Prediction of moisture content in sweet corn by reflectance NIR spectroscopy. Proceedings of the 5th Asian Near Infrared Symposium and the 32nd Japanese NIR Forum, Kagoshima, Japan, 30 Nov-3 Dec. 260-261.
- Sirikarn Boonpiam, Nattaporn Suttiwijitpukdee and Sontisuk Teerachaichayut. 2016. Nondestructive Classification of Pork Meatball Containing Borax by Near Infrared Spectroscopy. Proceedings of the 5th Asian Near Infrared Symposium and the 32nd Japanese NIR Forum, Kagoshima, Japan, 30 Nov-3 Dec. 268-269.
- Ho Thanh Huong, Sontisuk Teerachaichayut, Panuwat Supprung and Tiradech Damrongpowan. 2016. Classification of lime varieties by NIR spectroscopy. Proceedings of the 5th Asian Near Infrared Symposium and the 32nd Japanese NIR Forum, Kagoshima, Japan, 30 Nov-3 Dec. 264-265.
- Sadudee Phonmakham and Sontisuk Teerachaichayut. 2016. Transmittance near infrared spectroscopy for firmness detection of marian plum (*Bouea burmanica* Griff.). Proceedings of the 5th Asian Near Infrared Symposium and the 32nd Japanese NIR Forum, Kagoshima, Japan, 30 Nov-3 Dec. 226-227.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้