

สำนักงานบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ระดับการประเมินคุณภาพ



ดีมาก



ดี



ดี



ปานกลาง





การประเมินความบริสุทธิ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง  
ด้วยเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟและสมบัติไดอิเล็กตริก

สายสุนีย์ สุทธปา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตเกษตร

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตร

ชื่อเรื่อง

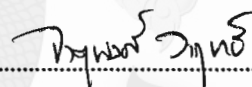
การประเมินความบริสุทธิ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง  
ด้วยเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟและสมบัติไดอิเล็กตริก

โดย

นายณัฏฐ์ สุทธปลา

พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการที่ปรึกษา



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตพงศ์ วาตุณี)

วันที่ 9 เดือน เม.ย. พ.ศ. 2553

กรรมการที่ปรึกษา



(รองศาสตราจารย์ ดร. ชงกiet ชำ่มศรี)

วันที่ 9 เดือน เม.ย. พ.ศ. 53

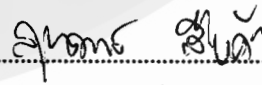
กรรมการที่ปรึกษา



(อาจารย์ ดร. พงษ์พัฒน์ พูนน้อย)

วันที่ 9 เดือน เม.ย. พ.ศ. 53

ประธานกรรมการประจำหลักสูตร



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุตเนต สิริคำ)

วันที่ 9 เดือน เม.ย. พ.ศ. 53

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. เทพ พงษ์พานิช)

ประธานกรรมการบัณฑิตศึกษา

วันที่ 12 เดือน เม.ย. พ.ศ. 53

|                        |                                                                                                  |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อเรื่อง             | การประเมินความบริสุทธิ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง<br>ด้วยเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟและสมบัติไดอิเล็กตริก |
| ชื่อผู้เขียน           | นางสาวสายสุนีย์ สุทรปา                                                                           |
| ชื่อปริญญา             | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการแปรรูป<br>ผลผลิตเกษตร                                      |
| ประธานกรรมการที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงศ์ วาฤทธิ์                                                           |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลการตอบสนองของคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ กับความบริสุทธิ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟประกอบด้วยสายอากาศสองตัว ทำหน้าที่ส่งและรับสัญญาณที่เข้าและออกจากผลทุเรียน การทดสอบใช้ทุเรียนที่มีอายุระหว่างวันที่ 91-123 วันหลังดอกบาน โดยติดตั้งเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับผลทุเรียน จากนั้นบันทึกผลการตอบสนองคลื่นเซนเซอร์ทุกวัน ในขณะเดียวกันเก็บผลทุเรียนที่มีขนาดและอายุใกล้เคียงกับผลที่ติดตั้งเซนเซอร์ทุก ๆ 3 วัน วันละ 3 ผล เพื่อตรวจวัดดัชนีการเจริญของผลทุเรียน ได้แก่ น้ำตาลรีดิวซ์ แป้ง ความชื้น น้ำหนักแห้ง และค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียน จากการทดสอบพบว่า ผลการตอบสนองของคลื่นไมโครเวฟมีแนวโน้มลดลงเป็นเชิงเส้นตรงในช่วงวันที่ 91-103 หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงในช่วงวันที่ 104-118 เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟของเซนเซอร์ที่ทะลุผ่านเปลือกทุเรียนอาจมีความสัมพันธ์กับดัชนีการเจริญของเนื้อทุเรียน ซึ่งอาจจะเป็นปริมาณความชื้นของผลทุเรียนที่ระดับความบริสุทธิ์ 50-70 เปอร์เซ็นต์ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ อาจจะไม่มีความสัมพันธ์กับความบริสุทธิ์โดยตรง แต่อาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ โดยจุดผกผันของค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟประมาณวันที่ 106 สามารถแสดงระดับความบริสุทธิ์ของทุเรียนประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเทคนิคการตรวจวัดความบริสุทธิ์ของทุเรียนแบบไม่ทำลายด้วยเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟสามารถทำนายระยะการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวผลผลิตสำหรับเกษตรกรได้

|                                       |                                                                                                   |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Title</b>                          | Evaluation of Maturity Index of 'Montong' Durian Using Microwave Sensor and Dielectric Properties |
| <b>Author</b>                         | Miss Saisunee Suttapa                                                                             |
| <b>Degree of</b>                      | Master of Engineering in Agro-Process Engineering                                                 |
| <b>Advisory Committee Chairperson</b> | Assistant Professor Dr. Jatuphong Varith                                                          |

### ABSTRACT

This research studied the microwave response of using a microwave sensor at frequency of 2.45 GHz to maturity development of durian fruit (*Durio zibethinus* L. cv. Monthong). The microwave sensor consisted of two patch antennas to couple the microwave signal from a durian fruit. Experiments were conducted on durian fruits at 91-123 days after full-bloom. One intact fruit on the tree was attached with the microwave sensor into the durian peel. Microwave sensor response was recorded everyday. Meanwhile, three durian fruits with same size and age were picked from the tree for every third day to determine their maturity indices e.g., reducing sugar, starch, moisture content, dry matter and dielectric properties of durian pulp. Results indicated that microwave sensor response linearly decreased during the first period during day 91-103, then linearly increased during day 104-118. As the wave from microwave sensor penetrated through the peel, it might have interacted to one of the maturity indices in the pulp, possibly moisture content, during 50-70% maturity. Dielectric constant of durian pulp at 2.45 GHz was not directly related to durian maturity thus, it may be considered as a confounding factor affecting microwave sensor response. The transition of microwave response was approximately at day 106, implying that durian maturity was about 70%. In conclusion, microwave responses may be beneficial for durian farmers to predict the suitable harvesting period because of its non-destructive characteristic for durian maturity prediction.

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงศ์ วาฤทธิ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการศึกษาดังแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา อีกทั้งยังมีส่วนช่วยในการให้คำปรึกษาในการวางแผนการทดลอง ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขจนกระทั่งได้วิทยานิพนธ์ที่สมบูรณ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ยงยุทธ ข้ามสี่ และอาจารย์ ดร.พูนพัฒน์ พูนน้อย กรรมการที่ปรึกษา ที่คอยให้คำแนะนำ เสนอแนะข้อคิดเห็นต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา อีกทั้งกรุณาตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ข้อเสนอแนะ เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีเนื้อหาที่สมบูรณ์ครบถ้วน เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษาต่อไปในอนาคต

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ โครงการทุนวิจัยมหาบัณฑิต สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่สนับสนุนทุนทรัพย์ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ถ่ายทอดวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร ทุกท่าน ตลอดจนพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่คอยช่วยเหลือให้การศึกษาลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อประพันธ์ และคุณแม่สุขศรี สุททปา รวมทั้งญาติพี่น้องทุกคนที่อบรมสั่งสอน ชี้แนะแนวทางในการดำเนินชีวิต ตลอดจนให้การสนับสนุน อุปการะเลี้ยงดูข้าพเจ้าตลอดมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

สายสุนีย์ สุททปา

เมษายน 2553

## สารบัญ

|                                          | หน้า |
|------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อ                                 | (3)  |
| ABSTRACT                                 | (4)  |
| กิตติกรรมประกาศ                          | (5)  |
| สารบัญ                                   | (6)  |
| สารบัญตาราง                              | (9)  |
| สารบัญภาพ                                | (10) |
| สารบัญตารางภาคผนวก                       | (13) |
| สารบัญภาพภาคผนวก                         | (14) |
| คำอธิบายอักษรย่อและสัญลักษณ์             | (15) |
| บทที่ 1 บทนำ                             | 1    |
| ความสำคัญของปัญหา                        | 1    |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย                  | 2    |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                | 3    |
| ขอบเขตของงานวิจัย                        | 3    |
| บทที่ 2 การตรวจเอกสาร                    | 4    |
| ทฤษฎี                                    | 4    |
| ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับทฤษฎี              | 4    |
| สรีรวิทยาของผลทฤษฎี                      | 5    |
| มาตรฐานความแก่สุกของทฤษฎี                | 6    |
| การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของทฤษฎี          | 8    |
| การตรวจสอบแบบใช้เทคนิคไม่ทำลาย           | 9    |
| ส่วนประกอบทางเคมีของทฤษฎี                | 10   |
| ปริมาณความชื้นและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง  | 13   |
| พื้นฐานด้านไมโครเวฟ                      | 14   |
| คลื่นไมโครเวฟ                            | 14   |
| การเกิดความร้อนด้วยไมโครเวฟ              | 15   |
| ระยะความลึกที่คลื่นไมโครเวฟผ่านชั้นวัสดุ | 16   |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| องค์ประกอบอาหารกับไมโครเวฟ                                     | 17 |
| สมบัติไดอิเล็กตริก                                             | 17 |
| การวัดค่าไดอิเล็กตริก                                          | 20 |
| เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ                                          | 27 |
| หลักการทำงาน                                                   | 27 |
| ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                                        | 30 |
| งานวิจัยเกี่ยวกับการตรวจสอบคุณภาพผลไม้                         | 30 |
| งานวิจัยเกี่ยวกับการวัดค่าไดอิเล็กตริก                         | 31 |
| สรุปกรอบแนวความคิดในการทำงานวิจัย                              | 37 |
| สมมติฐานการวิจัย                                               | 38 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง                                     | 39 |
| อุปกรณ์                                                        | 39 |
| สารเคมี                                                        | 39 |
| วิธีดำเนินการวิจัย                                             | 40 |
| การทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ                     | 40 |
| การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติกายภาพและทางเคมีของผล           |    |
| ทุเรียน                                                        | 41 |
| การทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริก                                     | 43 |
| แผนภูมิการดำเนินงาน                                            | 49 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์                                   | 50 |
| ผลการตอบสนองของเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ                           | 50 |
| การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเปลือกและเนื้อทุเรียน                | 52 |
| การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี                                    | 59 |
| การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในเปลือกและเนื้อทุเรียน            | 59 |
| การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และแป้งของเนื้อทุเรียน        | 60 |
| สมบัติไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียน                              | 62 |
| ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์ สมบัติทางกายภาพ-เคมี และ |    |
| ค่าไดอิเล็กตริก                                                | 65 |
| การวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการถดถอย                              | 66 |

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับ<br>ระดับความบริสุทธิ์                               | 66  |
| ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของ<br>ทุเรียน                                   | 68  |
| ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับ<br>สมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนและค่าไดอิเล็กตริก | 69  |
| การสอบเทียบแบบจำลอง                                                                                       | 70  |
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ                                                                                 | 72  |
| สรุป                                                                                                      | 72  |
| ข้อเสนอแนะ                                                                                                | 73  |
| บรรณานุกรม                                                                                                | 74  |
| ภาคผนวก                                                                                                   | 78  |
| ภาคผนวก ก ผลค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ สมบัติทางเคมี<br>และค่าไดอิเล็กตริก                        | 79  |
| ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการถดถอย                                                               | 87  |
| ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ปริมาณแป้งและน้ำตาลรีดิวซ์                                                          | 94  |
| ภาคผนวก ง การออกแบบชุดวัดค่าไดอิเล็กตริก                                                                  | 100 |
| ภาคผนวก จ ประวัติผู้วิจัย                                                                                 | 103 |

## สารบัญตาราง

| ตาราง |                                                                                                                    | หน้า |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1     | ลักษณะภายในชั้นต่ำของผลทุเรียนแก่ของแต่ละพันธุ์                                                                    | 8    |
| 2     | องค์ประกอบทางเคมีในเนื้อทุเรียนที่มีอายุเก็บเกี่ยว 118 และ 125 วันหลังดอกบาน                                       | 12   |
| 3     | ระดับความบริสุทธิ์ของผลทุเรียน                                                                                     | 12   |
| 4     | คุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกและการซึมผ่านของคลื่นของมันฝรั่งที่ใช้ทดลองที่ 25 องศาเซลเซียส และความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ต | 19   |
| 5     | สรุปเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก                                                                              | 26   |
| 6     | แบบจำลองการทำนายระดับความบริสุทธิ์ของทุเรียน                                                                       | 66   |
| 7     | แบบจำลองความสัมพันธ์ของค่าไดอิเล็กตริกเฉลี่ยกับสมบัติทางกายภาพ-เคมี                                                | 68   |
| 8     | แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนและค่าไดอิเล็กตริก      | 68   |

## สารบัญภาพ

| ภาพ                                                                                 | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 ช่วงความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า                                             | 15   |
| 2 การเคลื่อนที่ของสารประกอบที่มีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า                            | 16   |
| 3 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกและความชื้นของอาหารที่ 20 องศาเซลเซียส | 19   |
| 4 โครงสร้างของ vector network analyzers                                             | 21   |
| 5 วิธีการวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบ coaxial probe                                        | 21   |
| 6 ลักษณะของโพรบวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบอุณหภูมิสูง (a) และแบบโพรบบาง (b)               | 22   |
| 7 การวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบใช้สายส่งผ่านคลื่น                                        | 22   |
| 8 ชนิดของแกนสายส่งผ่านคลื่น                                                         | 23   |
| 9 ลักษณะการวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบ free space                                         | 23   |
| 10 การวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบ free space เมื่อวัดวัสดุที่มีอุณหภูมิสูง                | 24   |
| 11 การวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบ Resonant Cavity                                         | 24   |
| 12 ส่วนประกอบของโพรง Resonant Cavity                                                | 25   |
| 13 เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ (1) ตัวส่งสัญญาณและ (2) ตัวรับสัญญาณ                       | 27   |
| 14 เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟที่ใช้งานจริง                                               | 27   |
| 15 ไดอะแกรมของเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจสอบ                                                 | 28   |
| 16 วงจรการทำงานของเครื่องมือเก็บข้อมูล                                              | 28   |
| 17 แผ่นวงจรของเครื่องเก็บข้อมูล                                                     | 29   |
| 18 การประกอบอุปกรณ์และวงจรในการเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ                   | 29   |
| 19 ลักษณะการติดตั้งเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟบนผลทุเรียนบนต้นไม้                         | 30   |
| 20 วิธีการวัดค่าไดอิเล็กตริก                                                        | 32   |
| 21 ลักษณะการวัดที่ผิวแห้งโม                                                         | 33   |
| 22 ลักษณะการเจาะเนื้อแห้งโม                                                         | 33   |
| 23 ลักษณะการวัดที่เนื้อแห้งโม                                                       | 33   |
| 24 ค่าไดอิเล็กตริกจากการวัดที่ผิว (a) และเนื้อแห้งโม (b)                            | 34   |
| 25 ส่วนประกอบของชุดทดสอบวัดค่าไดอิเล็กตริก                                          | 35   |
| 26 ชุดทดสอบวัดค่าไดอิเล็กตริก                                                       | 36   |

| ภาพ                                                                                                                        | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 27 ส่วนประกอบชุดทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริก                                                                                 | 37   |
| 28 การติดเซ็นเซอร์บนผลทุเรียน                                                                                              | 41   |
| 29 ลักษณะโพรบที่ใช้วัดค่าไดอิเล็กตริกของทุเรียน                                                                            | 43   |
| 30 เครื่อง network analyzer ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 8530A                                                              | 44   |
| 31 ส่วนประกอบของชุดวัดไดอิเล็กตริกควบคุมอุณหภูมิน้ำได้                                                                     | 44   |
| 32 ภาพขณะพอลิโพรพิลีนสำหรับใส่เนื้อทุเรียนเพื่อวัดค่าไดอิเล็กตริก                                                          | 45   |
| 33 ทงกระบอกสแตนเลสด้านนอกสามารถวัดค่าไดอิเล็กตริกได้                                                                       | 45   |
| 34 ฝาปิดอุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียน                                                                           | 46   |
| 35 จุกปิดสำหรับประกอบกับอุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียน                                                           | 46   |
| 36 การประกอบชุดอุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กตริกของทุเรียน                                                                         | 47   |
| 37 การเชื่อมต่อชุดวัดค่าไดอิเล็กตริกกับอ่างควบคุมอุณหภูมิ                                                                  | 47   |
| 38 การตรวจสอบอุณหภูมิของตัวอย่างเนื้อทุเรียนก่อนการวัดค่าไดอิเล็กตริก                                                      | 48   |
| 39 การวัดค่าไดอิเล็กตริกของตัวอย่างเนื้อทุเรียน                                                                            | 48   |
| 40 แผนผังการดำเนินงาน                                                                                                      | 49   |
| 41 คำตอบสนองของคลื่นไมโครเวฟที่ติดกับผลทุเรียนเทียบกับจำนวนวันหลังดอก<br>บานและระดับความบริบูรณ์ของทุเรียน                 | 50   |
| 42 ภาพตัดขวางของทุเรียนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลทุเรียนที่ติดเซ็นเซอร์ไมโครเวฟ<br>ของปี พ.ศ. 2551                            | 52   |
| 43 ภาพตัดขวางของทุเรียนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลทุเรียนที่ติดเซ็นเซอร์ไมโครเวฟ<br>ของปี พ.ศ. 2552                            | 56   |
| 44 การเปรียบเทียบภาพตัดขวางทุเรียน วันที่ 106 (2551) และ 103 (2552) วัน หลังดอก<br>บาน                                     | 58   |
| 45 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในเปลือกและเนื้อทุเรียนที่ระดับความบริบูรณ์<br>ต่าง ๆ                                       | 59   |
| 46 กราฟอ้างอิงมาตรฐานค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายกลูโคส                                                                     | 61   |
| 47 ปริมาณแป้งในเนื้อทุเรียนที่ระดับความบริบูรณ์ต่าง ๆ                                                                      | 62   |
| 48 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเนื้อทุเรียนที่ระดับความบริบูรณ์ต่าง ๆ                                                             |      |
| 49 ค่า ก) dielectric constant และ ข) dielectric loss ของทุเรียนที่ระดับความบริบูรณ์<br>ต่าง ๆ ในการเก็บข้อมูล ปี พ.ศ. 2551 | 63   |

| ภาพ | หน้า                                                                                                                 |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 50  | ค่า ก) dielectric constant และ ข) dielectric loss ของทุเรียนที่ระดับความบริสุทธิ์ต่าง ๆ ในการเก็บข้อมูล ปี พ.ศ. 2552 |
| 51  | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์ คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี ค่าไดอิเล็กตริกกับความบริสุทธิ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง |
| 52  | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟเฉลี่ยกับระดับความบริสุทธิ์                                        |
| 53  | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟและระดับความบริสุทธิ์ ช่วงที่ 1 (ก) และช่วงที่ 2 (ข)               |
| 54  | ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความบริสุทธิ์ที่ได้จากทานทดสอบกับการทำนาย                                                    |

## สารบัญตารางภาคผนวก

| ตารางผนวก |                                                                                                               | หน้า |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1         | ค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ                                                                               | 80   |
| 2         | ปริมาณแป้งและน้ำตาลรีคิวด์ของเนื้อทุเรียน                                                                     | 82   |
| 3         | ปริมาณความชื้นและน้ำหนักแห้งของเนื้อทุเรียน                                                                   | 83   |
| 4         | ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียนปี พ.ศ. 2551                                                                    | 84   |
| 5         | ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียนปี พ.ศ. 2552                                                                    | 85   |
| 6         | ค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่น ไมโครเวฟที่ใช้ในการสอบเทียบ                                                           | 86   |
| 7         | Model Summary ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่น ไมโครเวฟกับระดับความบริสุทธิ์                                    | 88   |
| 8         | การวิเคราะห์ ANOVA ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่น ไมโครเวฟกับระดับความบริสุทธิ์                               | 88   |
| 9         | ค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่น ไมโครเวฟกับระดับความบริสุทธิ์                                   | 89   |
| 10        | Model Summary ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกกับกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียน                                      | 89   |
| 11        | การวิเคราะห์ ANOVA ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกกับกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียน                                 | 90   |
| 12        | ค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกกับกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียน                                     | 91   |
| 13        | Model Summary ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่น ไมโครเวฟกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนและค่าไดอิเล็กตริก      | 91   |
| 14        | การวิเคราะห์ ANOVA ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่น ไมโครเวฟกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนและค่าไดอิเล็กตริก | 92   |
| 15        | ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่น ไมโครเวฟกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนและค่าไดอิเล็กตริก                    | 93   |

## สารบัญภาพภาคผนวก

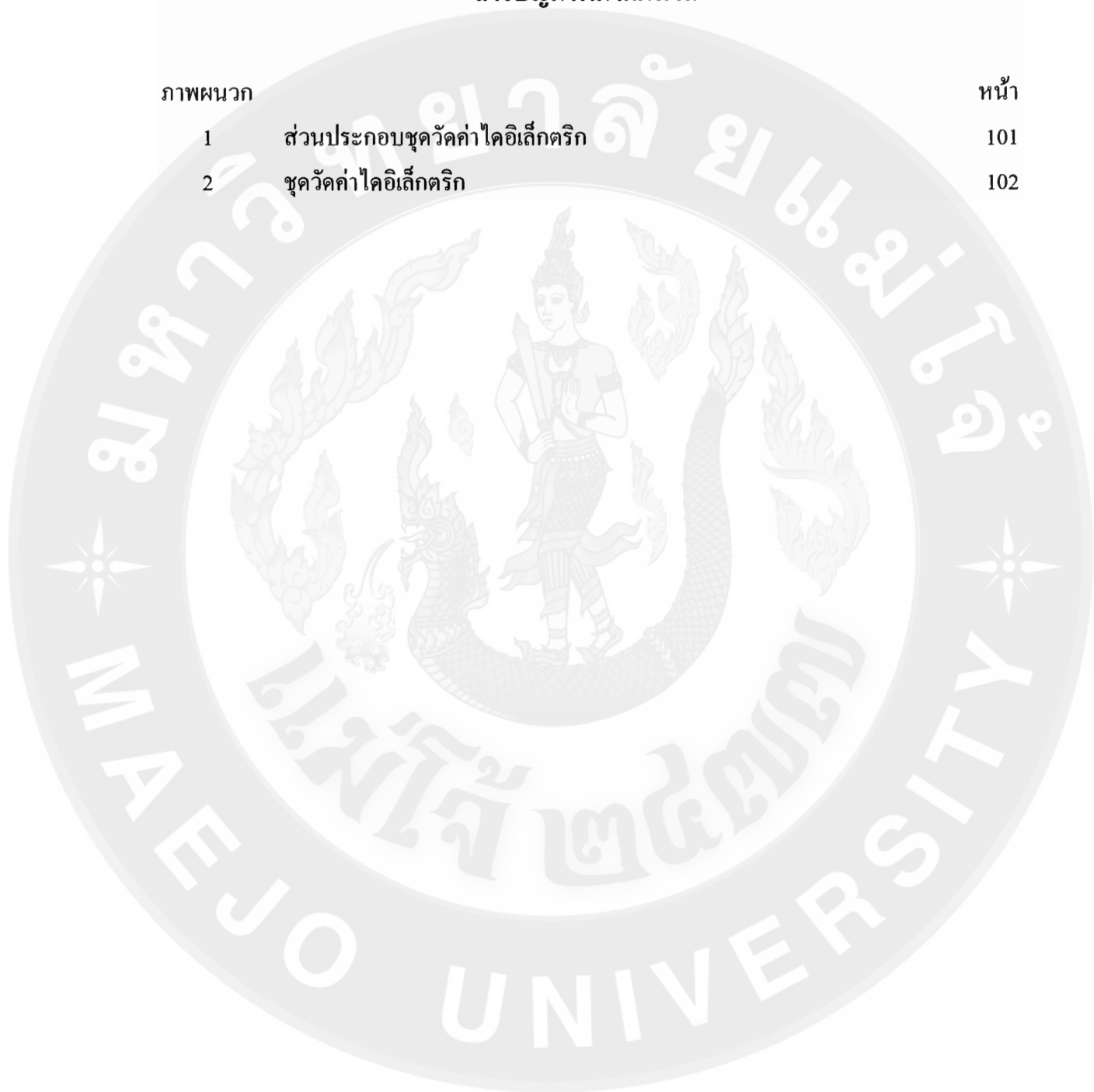
### ภาพผนวก

- 1 ส่วนประกอบชุดวัดค่าไดอิเล็กตริก
- 2 ชุดวัดค่าไดอิเล็กตริก

### หน้า

101

102



## อักษรย่อและสัญลักษณ์

### สัญลักษณ์ลาติน

| สัญลักษณ์ | ความหมาย                                     | หน่วย       |
|-----------|----------------------------------------------|-------------|
| A         | น้ำหนักของตัวอย่าง                           | กรัม        |
| B         | ปริมาณของเหลวทั้งหมดที่ใช้ (ในส่วนใส)        | มิลลิลิตร   |
| D         | ระยะความลึกที่คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านชั้นอาหาร | เซนติเมตร   |
| Dilution  | ระดับการเจือจาง                              | ไร้หน่วย    |
| $d_m$     | น้ำหนักเนื้อแห้ง                             | เปอร์เซ็นต์ |
| I         | ค่าการดูดกลืนแสง                             | ไร้หน่วย    |
| $K_1$     | $(\text{Slope})^{-1}I$                       | ไร้หน่วย    |
| $K_2$     | $(\text{Slope})(0.9)^{-1}I$                  | ไร้หน่วย    |
| $MC_{db}$ | ความชื้นมาตรฐานแห้ง                          | เปอร์เซ็นต์ |
| $MC_{wb}$ | ความชื้นมาตรฐานเปียก                         | เปอร์เซ็นต์ |
| $M_w$     | มวลของน้ำในผลผลิต                            | กรัม        |
| $M_s$     | มวลแห้งของผลผลิต                             | กรัม        |
| $R^2$     | ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ                   | ไร้หน่วย    |
| Slope     | ค่าที่ได้จากกราฟกฎโคสมมาตรฐาน                | ไร้หน่วย    |
| V         | ปริมาณของเหลวที่ใช้ (ในส่วนตะกอน)            | มิลลิลิตร   |
| 0.9       | ค่าคงที่ในการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแป้ง           | ไร้หน่วย    |

## อักษรย่อและสัญลักษณ์

### สัญลักษณ์กรีก โรมัน

#### สัญลักษณ์

#### ความหมาย

#### หน่วย

 $\epsilon'$ 

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

ไร้หน่วย

 $\epsilon''$ 

แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก

ไร้หน่วย

 $\lambda_0$ 

ความยาวคลื่นในที่ว่างอิสระ

เซนติเมตร

 $\tan \delta$ 

Loss tangent

ไร้หน่วย

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตทุเรียนส่งออกรายใหญ่ของโลก เฉลี่ยปีละ 853,197 ตัน โดยในปี พ.ศ. 2550 มีผลผลิต 686,487 ตัน และมีแนวโน้มการส่งออกเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ผลผลิตที่ส่งออกประกอบด้วย ทุเรียนสด แช่แข็ง และผลิตภัณฑ์แปรรูป ในปี พ.ศ. 2551 มีการส่งออกมากถึง 222,559 ตัน มูลค่า 3,824 ล้านบาท แบ่งออกเป็น ทุเรียนสดแช่เย็น 203,127 ตัน มูลค่า 3,132 ล้านบาท ทุเรียนสดแช่แข็ง 16,311 ตัน มูลค่า 417 ล้านบาท และผลิตภัณฑ์แปรรูป 3,122 ตัน มูลค่า 276 ล้านบาท (กรมการค้าต่างประเทศ, 2551) โดยแหล่งผลิตทุเรียนที่สำคัญของประเทศจะอยู่ในภาคตะวันออก ได้แก่ จันทบุรี ระยอง และตราด และภาคใต้ ได้แก่ ชุมพร สุราษฎร์ธานี และนครศรีธรรมราช

อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญในการส่งออกทุเรียนคือ คุณภาพของผลิตผลที่ส่งออกจำหน่ายไม่มีความสม่ำเสมอและไม่ตรงตามมาตรฐานของลูกค้าที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ โดยปัญหาที่มักพบคือมีทุเรียนผลอ่อนคละปนไปกับทุเรียนผลปกติจำนวนมาก ตลอดจนภายในทุเรียนบางผลมีหนอนเจาะเมล็ด ซึ่งกลายเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อชื่อเสียงการส่งออกทุเรียนของประเทศไทย และเพื่อเป็นการลดความเสียหายที่เกิดขึ้น ได้พยายามหาวิธีการต่าง ๆ มาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ ซึ่งวิธีการปฏิบัติส่วนใหญ่ที่ใช้ในการตรวจสอบได้แก่ การสังเกตลักษณะภายนอกของผลิตผล เช่น ขนาด รูปร่าง และสี เป็นต้น โดยที่วิธีการปฏิบัติเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญในการตรวจสอบ นอกจากนี้การสุ่มตัวอย่างผลิตผลเพื่อมาตรวจสอบบางครั้งยังเป็นวิธีที่ได้ผลไม่แน่นอน เนื่องจากผลิตผลที่สุ่มอาจมีไม่เพียงพอที่จะเป็นตัวแทนของผลิตผลทั้งหมด และยังต้องมีการทำลายผลิตผลที่ตรวจสอบ ซึ่งถือว่าเป็นการสูญเสียทางเศรษฐกิจ

จากการที่คุณภาพของผลิตผลมีความสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีบางประการ จึงได้นำเทคนิคการตรวจสอบคุณภาพโดยไม่ทำลายผลิตผล (non-destructive testing) มาใช้ในการตรวจสอบโดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพทั้งภายนอก ได้แก่ ขนาด รูปร่าง กลิ่น และสี ส่วนคุณภาพภายในได้แก่ ปริมาณความชื้น เนื้อสัมผัส ปริมาณน้ำตาล และปริมาณแป้ง เป็นต้น โดยได้มีการพัฒนาเทคนิคต่าง ๆ ในการใช้ในการตรวจสอบ เช่น การวัดความหนาแน่น (density) การวัดความแน่นเนื้อ (firmness) (Valero *et al.*, 2007) การใช้อัลตราโซนิก (ultrasonic methods) (Mizrach, 2007) การใช้เทคนิคจักรกลวิสัยทัศน์ (machinvision)

(Reese *et al.*, 2009) การใช้เทคนิค Near-infrared (NIR) (Valente *et al.*, 2009) และการใช้เทคนิค เอ็กซเรย์ (X-ray) (กัลย์, 2540) เป็นต้น โมโนย และคณะ (2551) ได้ทำการวิจัยด้านระบบโครงข่าย ไร้สายเพื่อควบคุมคุณภาพการผลิตผลไม้ ได้พัฒนาเซนเซอร์เพื่อการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของ ทุเรียนด้วยเซนเซอร์ไมโครเวฟแบบไร้สาย และโครงข่ายไร้สายที่สามารถตรวจสอบผลผ่านทาง อินเทอร์เน็ตได้ ซึ่งผลการดำเนินงานจะเน้นการพัฒนาตัวเซนเซอร์และระบบสื่อสารและได้มีการ ตรวจสอบในระดับหนึ่ง แต่ยังไม่สามารถระบุเชิงลึกได้ว่าดัชนีความบริสุทธิ์ของทุเรียนตัวแปรใดที่ ส่งผลต่อการตอบสนองของเซนเซอร์คลื่นและสมบัติไดอิเล็กตริกของทุเรียน ในการตรวจสอบ ความบริสุทธิ์ของทุเรียนก่อนการเก็บเกี่ยวซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ด้านไมโครเวฟที่ เปลี่ยนแปลงเทียบกับระดับความบริสุทธิ์ของทุเรียน เพื่อสามารถจัดระดับความบริสุทธิ์เป็น 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดหาความบริสุทธิ์ของผล ทุเรียนโดยการใช้เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟต้นแบบรุ่นที่ 1 ของโมโนย และคณะ (2551) โดยศึกษา คุณสมบัติของเนื้อทุเรียนคือ ปริมาณแป้ง น้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณความชื้น และค่าไดอิเล็กตริกของผล ทุเรียน และใช้ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของเนื้อทุเรียนเป็นมาตรฐานความบริสุทธิ์ และหา ความสัมพันธ์ของค่าการตอบสนองเซนเซอร์กับการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา เคมี กายภาพ รวมถึงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของทุเรียนในแต่ละระยะความบริสุทธิ์ว่าเป็นอย่างไร เพื่อให้ได้ผลที่ แม่นยำและเป็นการลดปัญหาการส่งออกทุเรียนที่ไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาเครื่องมือ ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ในอนาคต อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการตรวจสอบผลผลิตทางการ เกษตรอื่น ๆ เพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันทางการตลาดในต่างประเทศต่อไป

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อประเมินความบริสุทธิ์ของทุเรียนพันธุ์ หมอนทองโดยใช้เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟและสมบัติไดอิเล็กตริก และมีวัตถุประสงค์รองคือ

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองของเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ กับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อทุเรียนพันธุ์ หมอนทองในแต่ละระยะความบริสุทธิ์
2. เพื่อพัฒนาเทคนิคการวัดค่าไดอิเล็กตริกของทุเรียนในแต่ละช่วงความบริสุทธิ์

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบความสัมพันธ์ของค่าการตอบสนองของเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง ในช่วงระยะต่าง ๆ ของความบริบูรณ์
2. ได้เครื่องมือและดัชนีการตรวจสอบความบริบูรณ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง โดยใช้เซนเซอร์แบบคลื่นไมโครเวฟ
3. ได้รับความรู้และเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของทุเรียน เพื่อเป็นการนำไปประยุกต์ใช้กับผลไม้ชนิดอื่นต่อไป
4. ได้ข้อมูลเชิงประจักษ์ที่ผ่านการทวนสอบความแม่นยำในการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนที่สามารถนำไปเผยแพร่แก่เกษตรกรได้ถูกต้อง ของการใช้เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟทำนายความบริบูรณ์ทุเรียน

### ขอบเขตของงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้เป็นหาค้นหาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแป้ง น้ำตาลรีดิวซ์ ปริมาณความชื้น และค่าไดอิเล็กตริกของทุเรียนพันธุ์หมอนทองเปรียบเทียบกับค่าการตอบสนองของเซนเซอร์แบบคลื่นไมโครเวฟโดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของเนื้อทุเรียนเป็นมาตรฐานความบริบูรณ์
2. เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการตรวจสอบได้รับการออกแบบ ผลิตและพัฒนาโดยโมโนย และคณะ (2551) ซึ่งใช้ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต โดยค่าการตอบสนองของเซนเซอร์แสดงเป็นระดับค่าโวลเตจ
3. การทดสอบใช้ทุเรียนพันธุ์หมอนทองในช่วงนอกฤดูจากสวนของเกษตรกรในอำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร

#### ทุเรียน

##### ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับทุเรียน

ทุเรียน (durian) มีชื่อวิทยาศาสตร์เรียกว่า *Durio zibethinus* Murray อยู่ในวงศ์ Bombaceaceae มีถิ่นกำเนิดบริเวณหมู่เกาะอินเดีย ในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นไม้ผลที่มีขนาดผลใหญ่ มีหนามแหลม รสชาติหวานมัน ได้ชื่อว่าเป็นราชาของผลไม้เขตร้อน (king of tropical fruit)

โดยพันธุ์ที่นิยมปลูกในทางการค้าของประเทศไทยนั้นมี 4 พันธุ์ ได้แก่

1. พันธุ์กระดุม ผลจะมีขนาดค่อนข้างเล็ก น้ำหนักประมาณ 1 กิโลกรัม ผลมีลักษณะค่อนข้างกลมด้านหัวและด้านท้ายผลค่อนข้างป้าน ก้นผลบวมเล็กน้อย หนามเล็กสั้นและถี่ ขั้วค่อนข้างเล็กและสั้น ลักษณะของพูเต็มสมบูรณ์ ร่องพูค่อนข้างลึก เนื้อละเอียดอ่อนนุ่มสีเหลืองอ่อน ค่อนข้างบาง รสชาติหวานไม่ค่อยมัน และง่ายเมื่อสุกจัด และเมล็ดมีขนาดใหญ่
2. พันธุ์ชะนี ผลมีขนาดปานกลางถึงใหญ่ น้ำหนักประมาณ 2.5-3 กิโลกรัม ผลมีรูปทรงหอค คือ กลางผลป่อง หัวเรียว ก้นตัด ร่องพูค่อนข้างลึกเห็นได้ชัด ขั้วผลใหญ่และสั้น เนื้อละเอียด สีเหลืองจัด ปริมาณมาก รสชาติหวานมัน เมล็ดค่อนข้างเล็กและมีจำนวนเมล็ดน้อย
3. พันธุ์หมอนทอง ผลมีขนาดใหญ่ น้ำหนักประมาณ 3-4 กิโลกรัม ทรงผลค่อนข้างยาว มีป่าผลปลายผลแหลม พูมักไม่ค่อยเต็มทุกพู หนามแหลมสูง ฐานหนามเป็นเหลี่ยม ระหว่างหนามใหญ่จะมีหนามเล็กวางแซมอยู่ทั่วไป ซึ่งเรียกหนามชนิดนี้ว่า เขี้ยวงู ก้านผลใหญ่ แข็งแรง ช่วงกลางก้านผลจนถึงปากปลิงจะอ้วนใหญ่เป็นทรงกระบอก เนื้อหนาสีเหลืองอ่อน ละเอียด ค่อนข้างแห้งไม่ฉ่ำติดมือ รสชาติหวานมัน เมล็ดน้อยและดิบเป็นส่วนใหญ่
4. พันธุ์ก้านยาว ผลมีขนาดปานกลาง น้ำหนักประมาณ 3 กิโลกรัม ทรงผลกลม เห็นพูไม่ชัดเจน พูเต็มทุกพู หนามเล็กถี่สั้นสม่ำเสมอทั้งผล ก้านผลใหญ่และยาวกว่าพันธุ์อื่น ๆ เนื้อละเอียดสีเหลืองหนาปานกลาง รสชาติหวานมัน เมล็ดมากค่อนข้างใหญ่

### สรีรวิทยาของผลทุเรียน

ทุเรียนเป็นไม้ผลยืนต้น ลำต้นตรงสูงประมาณ 5-15 เมตร แตกกิ่งเป็นมุมแหลม ปลายกิ่งตั้งกระจายกิ่งกลางลำต้นขึ้นไป เปลือกชั้นนอกของลำต้นสีเทาแก่ ผิวขรุขระหลุดลอกออกเป็นสะเก็ด ไม่มียาง ใบเป็นใบเดี่ยวเกิดกระจายทั่วกิ่ง มีลักษณะเป็นคู่อยู่ตรงกันข้ามระนาบเดียวกัน ก้านใบกลมยาว 2-4 เซนติเมตร แผ่นใบรูปไข่แกมขอบขนานปลายใบ ผิวใบเรียบลื่น มีไขหนวล ด้านบนมีสีเขียว ด้านล่าง (ท้องใบ) มีสีน้ำตาล เส้นใบด้านล่างนูนเด่น ขอบใบเรียบ ดอกเป็นช่อเกิดตามลำต้น และกิ่งก้านยาว 1-2 เซนติเมตร ลักษณะดอกสมบูรณ์เพศ มีสีขาวมีกลิ่นหอม ลักษณะคล้ายระฆัง ผลเป็นชนิดผลเดี่ยวเปลือกมีหนามแหลมแตกตามแต่ละส่วนของผลซึ่งจะเรียกว่า พู เนื้อเมื่อเป็นผลอ่อนมีสีขาวเมื่อสุกมีสีเหลืองอ่อน ส่วนผลภายนอกเมื่อแก่ผลมีสีเขียวถ้าสุกมีสีน้ำตาลอ่อนเนื้อจะนุ่มกึ่งอ่อนกึ่งแข็งมีรสหวาน

พัฒนาการของผลสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระยะ (สุขวัฒน์ และคณะ, 2539) ตามการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแห้งของผลเป็นหลักเกณฑ์ในการแบ่ง ดังนี้

1. ระยะที่หนึ่ง เป็นช่วงตั้งแต่ 0-2 สัปดาห์หลังดอกบาน พบว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนผลอ่อนทั้งหมดในต้นจะหลุดร่วงไปถ้าสภาพแวดล้อมและการจัดการไม่เหมาะสม
2. ระยะที่สอง เป็นช่วงเวลาตั้งแต่ 3-7 สัปดาห์หลังดอกบาน ในระยะนี้แม้อัตราการเพิ่มของน้ำหนักแห้งจะเพิ่มสูงขึ้น แต่การหลุดร่วงของผลก็ยังสามารถเกิดขึ้นได้ถ้าสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่ได้จากการสังเคราะห์แสง และจากกระบวนการเมแทบอลิซึมไม่เพียงพอต่อความต้องการของผลที่จะใช้ในการพัฒนา การหลุดร่วงของผลในระยะนี้จะเรียกเป็นการสลัดผลตามธรรมชาติ
3. ระยะที่สาม เป็นช่วงเวลาตั้งแต่ 8-12 สัปดาห์หลังดอกบาน ในระยะนี้เป็นช่วงเวลาที่อัตราการเพิ่มน้ำหนักแห้งของผลเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทุเรียนจึงมีความสามารถในการดึงดูดสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่ได้จากการสังเคราะห์แสงและจากกระบวนการเมแทบอลิซึมมาใช้ในการเจริญเติบโตสูง
4. ระยะที่สี่ เป็นช่วงเวลาตั้งแต่ 13-16 สัปดาห์หลังดอกบาน ในระยะนี้อัตราการขยายขนาดของผลจะเริ่มลดลง แต่เนื้อมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว การพัฒนาการของทุเรียนประกอบด้วย การพัฒนาการของเปลือก เมล็ด และเนื้อ

การพัฒนาการในผลทุเรียนสามารถแบ่งตามลักษณะการเจริญของส่วนประกอบของผลดังนี้

### 1. การพัฒนาของเปลือก

เปลือกทุเรียนจะเริ่มมีการพัฒนาเมื่อ 3 วันหลังดอกบาน คือ หลังจากที่เกิดกระบวนการปฏิสนธิเสร็จสิ้นลงแล้ว โดยที่สีเปลือกจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวมากขึ้น หนามจะค่อย ๆ กางตัวทำมุมฉากกับผิวเปลือก ในระหว่าง 4 สัปดาห์แรกหลังดอกบานอัตราการเพิ่มน้ำหนักแห้งของเปลือกจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หลังจากนั้นจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และในสัปดาห์ที่ 14 ผิวเปลือกโดยเฉพาะบริเวณร่องหนามจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ปลายหนามเริ่มแห้งและค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลไหม้

### 2. การพัฒนาของเมล็ด

เมล็ดจะเริ่มพัฒนาทันทีหลังจากเกิดกระบวนการปฏิสนธิแล้วในช่วง 4 สัปดาห์แรกหลังดอกบาน เมล็ดจะมีลักษณะเป็นวุ้นใส มีเปลือกหุ้มเมล็ดบาง ๆ สีขาวขุ่นหุ้มอยู่ภายนอก เมล็ดจะพัฒนารูปร่างและขนาดเต็มที่เมื่อเข้าสู่สัปดาห์ที่ 9 หลังดอกบาน สีผิวของเปลือกหุ้มเมล็ดจะเริ่มเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีน้ำตาล และเป็นสีน้ำตาลเข้มเมื่อเข้าสู่สัปดาห์ที่ 13 หลังดอกบาน

### 3. การพัฒนาการของเนื้อ

ในสัปดาห์ที่ 5 หลังดอกบาน เนื้อจะเริ่มพัฒนาเป็นเนื้อเยื่อบางใส โดยจะเริ่มพัฒนาจากส่วนที่เป็นรอยต่อของ placenta บนเมล็ดก่อน และจะพัฒนาจนหุ้มเมล็ดได้ทั้งเมล็ด เมื่อผลทุเรียนเจริญเติบโตไปได้ 9 สัปดาห์หลังดอกบาน และมีการพัฒนาเพิ่มความหนาอย่างรวดเร็ว เนื้อจะเริ่มเป็นสีขาว เมื่อเข้าสู่สัปดาห์ที่ 10 เปลี่ยนเป็นสีเหลืองนวล และเป็นสีเหลืองเข้มในสัปดาห์ที่ 13 พร้อมกับการลดลงของอัตราการเพิ่มความหนาของเนื้อ

## มาตรฐานความแก่สุกของทุเรียน

เนื่องจากทุเรียนเป็นสินค้าเกษตรที่ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกที่สำคัญของโลก ดังนั้นเพื่อให้ทุเรียนของไทยเป็นที่ยอมรับในระดับนานาชาติและระดับสากล ในด้านความปลอดภัยของผู้บริโภคและส่งเสริมการส่งออก จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานทุเรียน ดังนี้

1. ข้อกำหนดด้านคุณภาพ โดยคุณภาพขั้นต่ำ (มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2546) ต้องมีคุณภาพดังต่อไปนี้

- 1.1 เป็นผลทุเรียนสดทั้งผลพร้อมขั้วที่สมบูรณ์และอาจมีก้านผล
- 1.2 สภาพภายนอกมีความสมบูรณ์ไม่เน่าเสีย
- 1.3 ไม่มีตำหนิที่เห็นชัดเจนและไม่มีผลกระทบถึงคุณภาพภายใน

- 1.4 ไม่มีศัตรูพืชที่มีผลต่อรูปลักษณะทั่วไปของผลิตผล
- 1.5 ปลอดภัยจากความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิต่ำหรืออุณหภูมิสูง
- 1.6 ปลอดภัยจากกลิ่นและรสชาติแปลกปลอม
- 1.7 สภาพความสมบูรณ์ภายในเมื่อสุกไม่มีอาการผิดปกติของเนื้อได้แก่ แก่นดำเทา และไส้ซึมหรือรวมกันต้องไม่เกินร้อยละ 5 ของส่วนที่บริโภคได้
2. การแบ่งชั้นคุณภาพ แบ่งเป็น 3 ชั้น ดังนี้
  - 2.1 ชั้นพิเศษ จะมีคุณภาพดีที่สุดตรงตามพันธุ์ จำนวนพุ่มสมบูรณ์ไม่น้อยกว่าสี่พุ่ม มีลักษณะหนามสมบูรณ์ตรงตามพันธุ์ ปลายหนามไม่แตกปลอดภัยจากตำหนิข่วนตำหนิเล็กน้อยที่ไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนและไม่มีผลกระทบต่อด้านรูปลักษณะทั่วไปของผล รวมทั้งต่อคุณภาพภายใน คุณภาพระหว่างการเก็บรักษาและการจัดเรียงในภาชนะบรรจุ
  - 2.2 ชั้นหนึ่ง มีคุณภาพดีตรงตามพันธุ์ จำนวนพุ่มสมบูรณ์ไม่น้อยกว่าสามพุ่ม และพุ่มไม่สมบูรณ์อีกสองพุ่ม และไม่ทำให้รูปทรงทุเรียนเสียไป มีลักษณะหนามสมบูรณ์ตรงตามพันธุ์ ปลายหนามไม่แตกปลอดภัยจากตำหนิข่วนตำหนิเล็กน้อยที่ไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนและไม่มีผลกระทบต่อด้านรูปลักษณะทั่วไปของผล รวมทั้งต่อคุณภาพภายใน คุณภาพระหว่างการเก็บรักษาและการจัดเรียงในภาชนะบรรจุ
  - 2.3 ชั้นสอง จะรวมทุเรียนที่ไม่เข้าชั้นชั้นที่สูงกว่าแต่มีคุณภาพขั้นต่ำ จำนวนพุ่มสมบูรณ์ไม่น้อยกว่าสองพุ่ม และพุ่มไม่สมบูรณ์อีกสองพุ่ม มีลักษณะหนามสมบูรณ์ตรงตามพันธุ์ มีตำหนิเล็กน้อยที่ไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจน
3. ข้อกำหนดด้านขนาด ผลทุเรียนแต่ละพันธุ์ต้องมีน้ำหนักต่อผลดังนี้
  - 3.1 พันธุ์ชะนี ไม่น้อยกว่า 1.5 กิโลกรัม และไม่มากกว่า 4 กิโลกรัม
  - 3.2 พันธุ์หมอนทอง ไม่น้อยกว่า 1.5 กิโลกรัม และไม่มากกว่า 6 กิโลกรัม
  - 3.3 พันธุ์ก้านยาว ไม่น้อยกว่า 1.5 กิโลกรัม
  - 3.4 พันธุ์กระดุมทอง ไม่น้อยกว่า 1.3 กิโลกรัม
4. วิธีตรวจสอบความแก่ของผลทุเรียน แบ่งเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้
  - 4.1 ลักษณะภายนอกคือ ขั้วผลแข็ง สีเข้ม เมื่อสัมผัสผิวขั้วจะรู้สึกสากมือ บริเวณรอยต่อระหว่างขั้วผลและก้านผล ซึ่งเรียกว่าปากปลิงบวมโต เมื่อจับขั้วผลแล้วแกว่งผล ทุเรียนจะรู้สึกขั้วผลแข็ง และมีสปริงมากขึ้น ร่องหนามห่าง เมื่อบีบปลายหนามเข้าหากันจะรู้สึกว่ามีสปริง ปลายหนามเริ่มแห้ง มีสีน้ำตาล สังเกตเห็นรอยเป็นแนวยาวบนสันพุ่มได้ชัดเจน
  - 4.2 ลักษณะภายในผลทุเรียนที่แก่เต็มที่ในแต่ละพันธุ์จะแตกต่างกัน แสดงดัง

ตาราง 1 ลักษณะภายในชั้นด้าของผลทุเรียนแก่ของแต่ละพันธุ์

| พันธุ์    | ลักษณะภายในของผลทุเรียนแก่ (ดิบ)              | ร้อยละน้ำหนักเนื้อแห้งชั้นด้า |
|-----------|-----------------------------------------------|-------------------------------|
| กระดุมทอง | เนื้อสีเหลือง ผิวเมล็ดสีน้ำตาล                | 27                            |
| ชะนี      | เนื้อสีเหลือง ผิวเมล็ดสีน้ำตาลปนครีม          | 30                            |
| หมอนทอง   | เนื้อสีขาวปนเหลืองอ่อน ผิวเมล็ดสีครีมปนน้ำตาล | 32                            |

ที่มา: มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2546)

#### การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของทุเรียน

การตรวจสอบความบริสุทธิ์ของทุเรียนที่นิยมใช้ในปัจจุบันจะอาศัยผู้ที่มีความชำนาญในการสังเกตลักษณะภายนอกของผลทุเรียน เช่น สังเกตปลายหนาม คมกลื่น และใช้ไม้เคาะเพื่อฟังเสียง เป็นต้น ซึ่งวิธีการตรวจสอบจะมีหลักเกณฑ์การสังเกตดังต่อไปนี้ (กัลย์, 2540)

1. สังเกตสีของผล โดยพิจารณาเปรียบเทียบภายในต้นเดียวกัน ทุเรียนแก่สีจะคล้ำกว่า เป็นมัน ทุเรียนอ่อนจะดูสดใสเป็นนวล
2. สังเกตก้านผล โดยก้านผลจะแข็งและมีสีเข้มขึ้น เมื่อลูบจะรู้สึกสากมือ เมื่อจับก้านผลแล้วแกว่งผลทุเรียน จะรู้สึกว่าก้านผลทุเรียนมีสปริงมากขึ้น ก้านผลบริเวณปากปลิงจะบวมโต เห็นรอยต่อชัดเจน
3. สังเกตหนาม ปลายหนามแห้ง มีสีน้ำตาลเข้ม เปราะและหักง่าย ดังนั้น เมื่อมองจากด้านบนของผลจะเห็นหนามเป็นสีเข้ม หนามมีลักษณะกว้างออก ร่องหนามห่าง เวลาบีบปลายหนามเข้าหากันจะรู้สึกว่าสปริง
4. สังเกตรอยแยกระหว่างพู ผลทุเรียนที่แก่จัดจะสังเกตเห็นรอยแยกบนพูได้อย่างชัดเจน ยกเว้นบางพันธุ์ที่ปรากฏไม่เด่นชัด เช่น พันธุ์ก้านยาว
5. การชิมปลิง ผลทุเรียนที่แก่จัด เมื่อตัดขั้วผลหรือปลิงออก จะพบน้ำใสซึ่งไม่ข้นเหนียวเหมือนในทุเรียนอ่อน และเมื่อใช้ลิ้นแตะชิมดูจะมีรสหวาน
6. การเคาะเปลือกหรือกรีดหนาม เมื่อเคาะเปลือกผลทุเรียนที่แก่จัดจะมีเสียงดังหลวม ๆ เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างเปลือกและเนื้อภายในผล เสียงหนักหรือเบาแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับพันธุ์และอายุของต้นทุเรียน

7. การปล่อยให้ทุเรียนร่วง ปกติดอกทุเรียนแต่ละรุ่นในแต่ละต้นจะบานไม่พร้อมกัน และมีช่วงต่างกันไม่เกิน 10 วัน ดังนั้น เมื่อมีผลทุเรียนในต้นเริ่มแก่สุก และร่วง ก็เป็นสัญญาณเตือนว่าผลทุเรียนที่เหลือในรุ้นนั้นแก่แล้วสามารถเก็บเกี่ยวได้

8. การนับอายุ โดยนับอายุผลเป็นจำนวนวันหลังดอกบาน เช่น พันธุ์ชะนี ใช้เวลา 100-105 วัน พันธุ์หมอนทองใช้เวลา 125-130 วัน การนับวันหรืออายุของผลจะแตกต่างกันเล็กน้อยในแต่ละปี และในแต่ละท้องถิ่นขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ เช่น ถ้าปีใดมีอุณหภูมิเฉลี่ยค่อนข้างสูง ผลทุเรียนจะแก่เร็วกว่าปีที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า

9. สังเกตรอยแตกกระของผิว โดยที่ทุเรียนแก่จะมีผิวแตกกระกระจายไปทั่วทั้งผล ตรงโคนหามจะมีเม็ดเล็ก ๆ ผุดขึ้นประปราย

10. การทดสอบในน้ำ ทุเรียนอ่อนถ้าเอาไปใส่น้ำจะจม ถ้าทุเรียนแก่จะลอย

11. น้ำหนักผล เมื่อตัดผลทุเรียนแล้วยกขึ้น ถ้าทุเรียนอ่อนจะรู้สึกหนักถ่วงมือ ถ้าทุเรียนแก่จะรู้สึกเบา

#### การตรวจสอบแบบใช้เทคนิคแบบไม่ทำลาย

การเก็บเกี่ยวผลทุเรียนที่แก่เหมาะสมแบบดั้งเดิม จะต้องอาศัยผู้ที่มีประสบการณ์และความชำนาญ โดยอาศัยดัชนีบ่งชี้ความแก่ทางกายภาพหลายตัวประกอบกัน ซึ่งเป็นการตรวจสอบที่มีโอกาสผิดพลาดสูงและมีโอกาสผันแปรตามตัวบุคคล ซึ่งส่วนใหญ่ยังเป็นการตรวจสอบแบบทำลาย ในปัจจุบันตลาดการค้าทุเรียนทั้งในและนอกประเทศต่างประสบปัญหาทุเรียนอ่อนอยู่เสมอ จึงได้มีการสร้างและพัฒนาที่เกี่ยวกับเครื่องมือตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย คือการตรวจวัดคุณลักษณะ คุณภาพและโครงสร้างของผลไม้ โดยไม่ทำให้ผลไม้เกิดความเสียหาย หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาดและคุณภาพ (Chen *et al.*, 1996) ซึ่งเป็นวิธีง่าย สะดวก รวดเร็วสามารถตรวจวัดผลไม้ได้ทุกชนิด โดยไม่จำเป็นต้องสับตัวอย่าง ทำให้การประกันคุณภาพมีความเชื่อมั่นมากยิ่งขึ้น การนำเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายมาใช้ในการตรวจสอบทุเรียน โดยอาศัยสมบัติทางกายภาพทั้งภายนอก ได้แก่ ขนาด รูปร่าง กลิ่น สี และคุณภาพภายใน ได้แก่ ความสุกของผลผลิต ความหนาแน่น ปริมาณน้ำตาล และปริมาณแป้ง เป็นต้น

## ส่วนประกอบทางเคมีของทุเรียน

ผลไม้หลายชนิดสะสมอาหารในรูปของแป้งเช่นเดียวกับพืชในตระกูลหัว เช่น มันฝรั่ง และมันเทศ เป็นต้น ปริมาณแป้งที่สะสมจึงเป็นดัชนีของความบริบูรณ์ได้ ในผลไม้หลังจากการสะสมแป้ง แป้งจะถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อผลใกล้จะบริบูรณ์ ดังนั้น การใช้แป้งเป็นดัชนีในผลไม้จึงใช้วิธีตรวจสอบดูว่าปริมาณแป้งลดลงเพียงพอหรือยัง

ผลไม้บางชนิดจะสะสมอาหารในรูปของน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่ เช่น องุ่น ลำไย เป็นต้น ยิ่งมีวัยมากขึ้นการสะสมน้ำตาลยิ่งมีมากขึ้น ปริมาณน้ำตาลในผลจึงเป็นดัชนีความบริบูรณ์ และดัชนีการการเก็บเกี่ยวที่ดี แต่ในผลไม้ประเภท climacteric ซึ่งสะสมอาหารในรูปแป้งแล้วเปลี่ยนเป็นน้ำตาลในภายหลัง การวัดปริมาณน้ำตาลในผลไม้ประเภทนี้อาจสายเกินไปสำหรับการเก็บเกี่ยว แต่เหมาะสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพ (จริงแท้, 2542)

ทุเรียนเป็นผลไม้ประเภท pulpy fruit คือ มีเนื้อมาก นํ้าน้อย และมีความหนืดสูง องค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่พบว่า ทุเรียนมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูง และยังมีไขมัน โปรตีน สารประกอบเพกทิน และกัม ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดเนื้อสัมผัสเหนียวในเนื้อทุเรียน (กุลกัญญา, 2548) องค์ประกอบทางเคมีของทุเรียนจะประกอบด้วย

1. คาร์โบไฮเดรต ทุเรียนมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบมากที่สุด คือ ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ขององค์ประกอบทั้งหมด โดยแบ่งเป็นแป้ง 12 เปอร์เซ็นต์ และน้ำตาล 12-18 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทุเรียนเริ่มสุกแป้งจะถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลซูโครสแล้วแตกตัวไปเป็นฟรุกโทส และกลูโคส ทุเรียนที่เริ่มสุกจะมีรสหวานขึ้นเพราะมีการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล ซึ่งการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาลนี้ขึ้นอยู่กับ สภาพแวดล้อมของการเก็บรักษา เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลาการเก็บรักษา และความแก่ของผล เป็นต้น

ซึ่งคาร์โบไฮเดรตจำแนกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามขนาดโมเลกุลดังนี้

1.1 โมโนแซ็กคาไรด์ (monosaccharides) เป็นหน่วยเล็กที่สุดของคาร์โบไฮเดรต มีสูตรอย่างง่าย (empirical formula) คือ  $(CH_2O)_n$  โดย n มีจำนวนตั้งแต่ 3 ขึ้นไป

1.2 โอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharides) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยโมโนแซ็กคาไรด์ในช่วง 2-20 หน่วย ที่รู้จักกันดีคือ พวกที่ประกอบด้วยโมโนแซ็กคาไรด์ 2 หน่วย เช่น น้ำตาลซูโครส และน้ำตาลมอลโทส เป็นต้น

1.3 พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนแซ็กคาไรด์มากกว่า 20 หน่วย

โดยโมโนแซ็กคาไรด์และน้ำตาลไดแซ็กคาไรด์ส่วนใหญ่จะมีหมู่คาร์บอนิลซึ่งจะถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย คาร์โบไฮเดรตเหล่านี้จัดเป็นกลุ่มที่เรียกว่าน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugars)

ซึ่งอาจตรวจสอบปริมาณได้โดยอาศัยคุณสมบัติที่สามารถรีดิวซ์โลหะไอออน เช่น  $\text{Cu}^{2+}$  หรือ  $\text{Ag}^+$  ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำ ตัวอย่างของน้ำตาลรีดิวซ์ เช่น กลูโคส มอลโทส เซลโลไบโอส และแลคโทส ส่วนคาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้เนื่องจาก อะโนเมอริกคาร์บอนทั้งคู่ถูกจับยึดไว้โดยพันธะไกลโคซิดิก เช่น น้ำตาลซูโครส จัดว่าเป็น Non-reducing sugars

2. โปรตีน ทุเรียนเป็นผลไม้ที่มีโปรตีนสูง โดยมีโปรตีน 3 เปอร์เซ็นต์ ในทางอ้อม โปรตีนมีส่วนเกี่ยวข้องกับกับรสชาติ ดังจะเห็นได้จากทุเรียนภายหลังการเก็บเกี่ยวในเวลานาน แป้งจะถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลอันเนื่องมาจากการทำงานของเอนไซม์ที่เป็นโปรตีน

3. ไขมัน ในทุเรียนมีองค์ประกอบประมาณ 3.9 เปอร์เซ็นต์ ไขมันที่มีมากที่สุด คือ กรดสเตียริก

4. แคโรทีน เป็นรงควัตถุที่ละลายได้ในไขมัน ไม่คงตัวในสภาพที่มีแสงและออกซิเจน ถูกออกซิไดซ์โดยเอนไซม์ lipooxidase โดยปกติแคโรทีนมีอยู่แล้วในเนื้อเยื่อผลไม้แต่ถูกบดบังไว้ด้วยสีของคลอโรฟิลล์ เมื่อผลไม้เริ่มสุกคลอโรฟิลล์จะสูญเสียไปทำให้แคโรทีนที่มีอยู่ปรากฏให้เห็น

5. สารระเหย กลิ่นทุเรียนเกิดจากสารระเหยพวกไทโออีเทอร์ (thioethers) และ เอสเทอร์ (esters) เมื่อทุเรียนสุกงอม สารให้กลิ่นจะเป็นพวกไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulphide) และไดเอทิลไดซัลไฟด์ (diethyl disulphide)

6. กรดอินทรีย์ โดยทั่วไปกรดจะมีปริมาณสูงสุดในระหว่างการเจริญเติบโต และการพัฒนาของผลขณะที่อยู่บนต้นและลดลงระหว่างการสุก ในทุเรียนปริมาณกรดจะลดลงเมื่อผลสุก นอกจากนั้นยังพบว่า ปริมาณกรดในผลไม้ยังขึ้นอยู่กับความแก่อ่อนของผลและอุณหภูมิที่ทำการเก็บรักษา

7. น้ำ เป็นองค์ประกอบที่มีมากในเซลล์พืช มีหน้าที่หลักคือ เป็นตัวทำละลายช่วยให้โปรโตพลาสซึมเคลื่อนที่ได้ และช่วยรักษาโครงสร้างของเซลล์ เนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองประกอบด้วยน้ำประมาณ 65.9 เปอร์เซ็นต์

ผลทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่มีอายุเก็บเกี่ยว 118 และ 125 วันหลังดอกบาน มีการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบทางเคมีในเนื้อทุเรียนสด 100 กรัม (กัลย์, 2540) ดังตาราง 2

**ตาราง 2** องค์ประกอบทางเคมีในเนื้อทุเรียนที่มีอายุเก็บเกี่ยว 118 และ 125 วันหลังดอกบาน

| องค์ประกอบทางเคมี<br>(เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักสด) | ทุเรียนพันธุ์หมอนทองอายุต่าง ๆ |         |
|------------------------------------------------|--------------------------------|---------|
|                                                | 118 วัน                        | 125 วัน |
| น้ำ                                            | 27.31                          | 36.90   |
| ของแข็งที่ละลายน้ำได้                          | 11.30                          | 13.90   |
| น้ำตาลทั้งหมด                                  | 4.91                           | 9.26    |
| น้ำตาลรีดิวซ์                                  | 0.83                           | 1.38    |
| แป้ง                                           | 10.47                          | 11.55   |
| ไขมัน                                          | 2.03                           | 2.16    |
| เบต้า-แคโรทีน (IU ต่อน้ำหนักสด)                | 24.63                          | 41.68   |

ที่มา: กัลย์ (2540)

การแบ่งระดับความบริบูรณ์ของผลทุเรียน โดยใช้ประสบการณ์ของผู้ชำนาญในการตัดและคัดผลทุเรียน สามารถแบ่งได้เป็น 6 ระดับ ดังแสดงดังตาราง 3

**ตาราง 3** ระดับความบริบูรณ์ของผลทุเรียน

| ระดับ | ความบริบูรณ์<br>(เปอร์เซ็นต์) | ลักษณะ                                                                                   |
|-------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | 50                            | ผลอ่อนมาก ไม่สามารถสุกได้ตามปกติ                                                         |
| 2     | 60                            | ผลอ่อน สามารถสุกได้แต่ใช้เวลานาน มีรสชาติไม่ดี                                           |
| 3     | 70                            | ผลแก่ระดับต่ำสุดสามารถจำหน่ายต่างประเทศโดยขนส่งทางเรือ สุกได้ใน 7-10 วัน รสชาติยอมรับได้ |
| 4     | 80                            | ผลแก่ สามารถจำหน่ายภายในหรือต่างประเทศโดยขนส่งทางเครื่องบิน สุกได้ใน 4-6 วัน รสชาติดี    |
| 5     | 90                            | ผลแก่มาก สุกได้ใน 2-3 วัน รสชาติดี                                                       |
| 6     | 100                           | ผลแก่มากที่สุด รับประทานได้หรือสุกได้ใน 1 วัน รสชาติดี                                   |

ที่มา: กัลย์ (2540)

### ปริมาณความชื้นและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง

ความชื้น คือปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ โดยทั่วไปแบ่งชนิดของน้ำเป็น 2 ชนิด คือ

1. น้ำอิสระ (free water) เป็นน้ำที่มีสารอื่น ๆ ละลายอยู่หรือแขวนลอยอยู่ น้ำชนิดนี้จะอยู่รอบ ๆ เซลล์หรืออยู่ภายในเซลล์เป็นน้ำส่วนใหญ่ที่พบในวัสดุ และสามารถแยกออกจากองค์ประกอบอื่น ๆ ได้ง่าย เช่น การระเหยจากการอบแห้ง การสกัดหรือคั้นออกได้ง่าย น้ำชนิดนี้มีผลต่อความสดของอาหารพวกผักและผลไม้ และมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

2. น้ำที่ถูกยึดไว้ (bound water) เป็นน้ำที่จับเกาะ หรือยึดอยู่กับ โครงสร้างของสารอาหารอื่น แยกออกจากอาหาร ได้ยาก เกาะจับกับสารอื่นด้วยพันธะทางเคมีที่แข็งแรง เช่น เป็นน้ำในผลึก เป็นต้น น้ำชนิดนี้ไม่สามารถเป็นตัวทำละลายของสารอาหารอื่น และมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำอิสระ

การหาความชื้นของผลิตภัณฑ์แบ่งออกเป็น 2 มาตรฐาน คือ มาตรฐานเปียกและมาตรฐานแห้ง เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกหาได้จากอัตราส่วนของมวลของน้ำต่อมวลชื้นของผลิตภัณฑ์ (จากทุ่งศรี, 2547) ดังสมการที่ 1

$$\%MC_{wb} = \frac{M_w}{M_w + M_s} \times 100 \quad (1)$$

ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้งของผลทุเรียนจะเป็นค่าที่แสดงถึงความบริสุทธิ์ของผลทุเรียน โดยทุเรียนที่มีน้ำหนักเนื้อแห้งมากกว่า จะมีความบริสุทธิ์ของผลสูงกว่าผลที่มีน้ำหนักเนื้อแห้งต่ำกว่า โดยค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้งเป็นค่าของอัตราส่วนของน้ำหนักเนื้อทุเรียนสดต่อน้ำหนักเนื้อทุเรียนแห้ง เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้งหาได้จากอัตราส่วนของมวลของน้ำในผลผลิตต่อมวลแห้งของผลิตภัณฑ์ ดังสมการที่ 2

$$\%MC_{db} = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

|       |             |                                     |
|-------|-------------|-------------------------------------|
| เมื่อ | $\%MC_{wb}$ | คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก |
|       | $\%MC_{db}$ | คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานแห้ง  |
|       | $M_w$       | คือ มวลของน้ำในผลผลิต               |
|       | $M_s$       | คือ มวลแห้งของผลผลิต                |

ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้งเป็นค่าร้อยละของอัตราส่วนของน้ำหนักเนื้อทุเรียนสดต่อน้ำหนักเนื้อแห้งทุเรียน (ณัฐวุฒิ, 2546) ดังสมการที่ 3

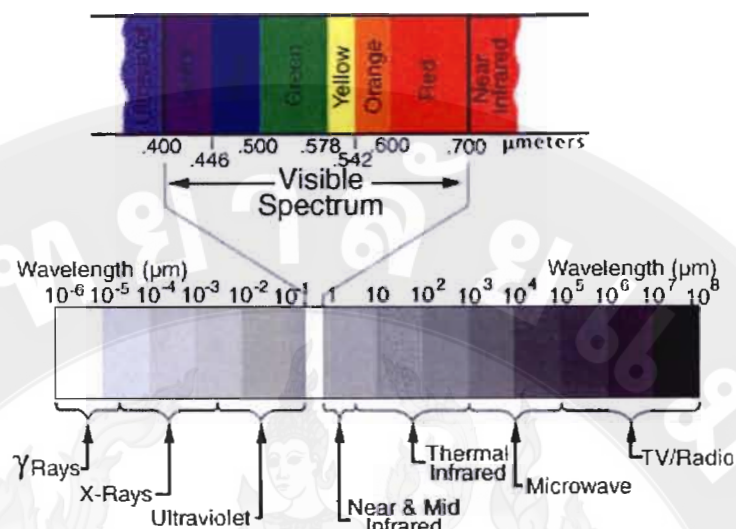
$$\%dm = \frac{M_s}{M_w} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ  $\%dm$  คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อแห้ง

### พื้นฐานด้านไมโครเวฟ

#### คลื่นไมโครเวฟ

ไมโครเวฟคือพลังงานที่เกิดจากการแผ่ของแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงซึ่งแตกต่างไปจากคลื่นแสง ความยาวคลื่นและความถี่ของช่วงคลื่นไมโครเวฟจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่าง 75 เซนติเมตรถึง 3 มิลลิเมตร มีความถี่ของช่วงคลื่นระหว่าง 300 เมกกะเฮิร์ต ถึง 300 กิกะเฮิร์ต โดยความถี่ช่วงดังกล่าวจะใกล้เคียงกับคลื่นวิทยุและบางส่วนจะเข้าไปคาบเกี่ยวในคลื่นของความถี่ของเรดาร์ โดยระดับความถี่ของคลื่นที่จะใช้ในด้านอุตสาหกรรมและการใช้ในบ้านเรือนคือ 915 และ 2450 เมกกะเฮิร์ต คลื่นไมโครเวฟจะมีลักษณะเหมือนลำแสงเดินทางเป็นเส้นตรง เมื่อกระทบกับโลหะจะสะท้อนกลับแต่สามารถผ่านทะลุอากาศ แก้ว กระจกและพลาสติกได้ ถูกดูดซับได้ดีในสารประกอบที่มีสมบัติเป็นไดอิเล็กตริก (dielectric) เมื่อคลื่นไมโครเวฟสะท้อนกลับจะไม่ก่อให้เกิดความร้อนขึ้นกับวัสดุนั้น แต่ถ้าสารใดสามารถดูดซับคลื่นไมโครเวฟไว้จะก่อให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นภายในสารนั้นโดยเปลี่ยนรูปจากพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สารใดที่ดูดซับพลังงานไมโครเวฟไว้ได้สูงจะเรียกสารนั้นว่า lossy หรือ lossiness สูง ซึ่งสารประเภทนี้จะทำให้ร้อนได้รวดเร็วเมื่อกระทบคลื่นไมโครเวฟ (สายสนม, 2543)



ภาพ 1 ช่วงความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

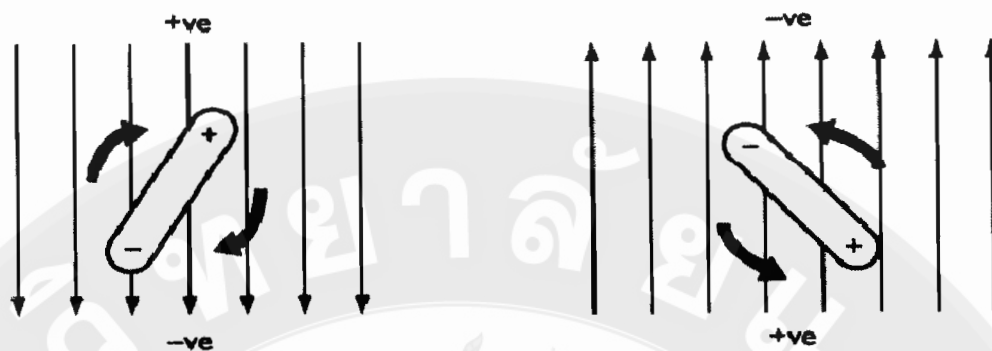
ที่มา: จักรกฤษ (2552)

### การเกิดความร้อนด้วยไมโครเวฟ

เมื่อคลื่นไมโครเวฟถูกดูดซับเข้าสู่ชิ้นอาหารจะเกิดความร้อนได้ในสองแบบรวมกัน (Mudgett, 1982) ซึ่งได้แก่

1. Ionic polarization เป็นการเกิดความร้อนเนื่องจากผลของการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเมื่อเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้า แต่ละไอออนซึ่งมีประจุไฟฟ้าประจำตัวจะถูกกระตุ้นและเร่งให้มีการเคลื่อนที่ จึงทำให้เกิดการเสียดสีกันขึ้นกับไอออนอื่นๆ และมีการเปลี่ยนพลังงานจลน์มาเป็นพลังงานความร้อน แล้วจึงกระจายความร้อน แล้วจึงกระจายความร้อนไปสู่ส่วนอื่นๆ ต่อไป การเกิดความร้อนแบบนี้เกิดได้ในของเหลวภายในเซลล์ซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย

2. Dipole rotation เป็นการเกิดความร้อนกับสารประกอบมีขั้ว (polar) ได้แก่ น้ำนั่นเอง ในสภาพปกติสารประกอบนั้นจะเรียงตัวประจุบวกและลบอย่างไม่มีระเบียบ (random oriented) เมื่อเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้า ประจุบวกและประจุลบของสารนั้นจะเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศทางเพื่อเรียงตัวอย่างมีระเบียบ ดังแสดงในภาพ 2



ภาพ 2 การเคลื่อนที่ของสารประกอบที่มีขั้วเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า

ที่มา: Singh and Heldman (2001)

การเคลื่อนที่ด้วยการหมุนตัวกลับไปกลับมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามระดับความถี่ของคลื่นไมโครเวฟคือ 915-2450 ล้านครั้งต่อ 1 วินาที ซึ่งผลของความเร็วในการหมุนตัวและการเสียดสีกันทำให้เกิดความร้อนขึ้นและเป็นลักษณะการเกิดความร้อนที่สำคัญ

ความร้อนที่เกิดจากทั้งสองรูปแบบดังกล่าวที่จุดซึ่งอาหารสัมผัสกับคลื่นแล้วจึงค่อยกระจายตัวออกไปยังส่วนอื่นเนื่องจากผลของการเคঁดคของน้ำโดยการนำความร้อนด้วยและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งการเกิดความร้อนจากสาเหตุต่าง ๆ ดังกล่าวนี้นำให้เกิดได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการหุงต้มโดยความร้อนแบบดั้งเดิม (รุ่งนภา, มปป.)

### ระยะความลึกที่คลื่นไมโครเวฟผ่านขึ้นวัสดุ

เมื่อคลื่นไมโครเวฟกระทบกับสารประกอบไดอิเล็กตริกจะเกิดความร้อนขึ้นแล้วพลังงานจะลดลง ยิ่งอาหารใดมีค่า loss factor สูงก็จะให้พลังงานสูง แต่ขณะเดียวกันพลังงานในการเจาะทะลุเข้าไปในชั้นอาหารก็จะยิ่งลดลงจึงทำให้ทะลุผ่านเข้าไปได้ระยะสั้น ๆ นอกจากนี้ยังพบว่าคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่ต่างกันจะทะลุผ่านเข้าไปในชั้นอาหารได้ระยะที่ต่างกันด้วย คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 915 เมกกะเฮิร์ต จะทะลุผ่านเข้าไปในชั้นอาหารได้ลึกกว่าคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ต ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการทะลุผ่านเข้าไปในชั้นอาหารนับว่ามีความสำคัญต่อการออกแบบหรือเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะอาหาร เช่น ถ้าชั้นอาหารที่แปรรูปด้วยไมโครเวฟมีความหนามาก ก็ควรจะเลือกคลื่นไมโครเวฟที่ต่ำกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของคลื่นและระยะทางที่คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านชั้นอาหารไปได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$D = \frac{\lambda_o \sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''} \quad (4)$$

เมื่อ  $D$  คือ ระยะความลึกที่คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านขึ้นอาหาร  
(เซนติเมตร)

$\lambda_o$  คือ ความยาวคลื่นในที่ว่างอิสระ (free space) (เซนติเมตร)

### องค์ประกอบอาหารกับไมโครเวฟ

อาหารต่าง ๆ มีส่วนประกอบที่แตกต่างกันมากรวมทั้งส่วนประกอบที่จำเป็นต้องใช้ในการปรุงแต่งอาหาร เช่น เกลือ น้ำตาล น้ำมัน และแป้ง เป็นต้น ล้วนแต่มีผลที่แตกต่างกันไปเมื่อนำมาให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ ในกรณีของโปรตีนจากเนื้อสัตว์ที่มีเนื้อเยื่อเกี่ยวพันอยู่ในปริมาณสูง จะมีความเหนียวมากเมื่อนำมาทำให้สุกด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากการให้ความร้อนที่รวดเร็วเกินไปจนเนื้อเยื่อเกี่ยวพันไม่มีโอกาสที่จะสลายตัว จึงมีความเหนียวมากกว่าการใช้ความร้อนแบบดั้งเดิม อาหารประเภทไข่ที่กะเทาะเปลือกออกแล้วจะทำให้สุกด้วยไมโครเวฟได้อย่างรวดเร็ว ในส่วนของน้ำตาลในการทำน้ำเชื่อมหรือลูกกวาด การใช้ไมโครเวฟจะสามารถทำให้เกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน แต่สำหรับเกลือแกงและเกลือในรูปแบบอื่น ๆ เช่น เกลือซีเมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในน้ำและในอาหารจะทำให้การดูดซับคลื่นไมโครเวฟได้ต่ำมีผลทำให้เกิดความร้อนได้ช้ากว่า (สายสนม, 2543)

### สมบัติไดอิเล็กตริก (dielectric properties)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของอาหารนั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อาหารแทบทุกชนิดมีสมบัติเป็นไดอิเล็กตริก แต่จะดูดซับคลื่นได้แตกต่างกันไปขึ้นกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ องค์ประกอบทางเคมีของอาหาร พบว่าปริมาณน้ำและเกลือแร่รวมถึงรูปแบบของน้ำที่เป็นส่วนประกอบในอาหารนั้นจะมีความสำคัญต่อการดูดซับคลื่นด้วย น้ำที่อยู่ในรูปอิสระ (free water) จะทำให้ดูดซับคลื่นได้ดีกว่าน้ำที่เกาะอยู่กับสารประกอบอื่น เช่น โปรตีน หรือคาร์โบไฮเดรต เช่นเดียวกับเกลือแร่ ถ้าอยู่ในรูปที่แตกตัว (dissociated) จะทำให้อาหารนั้นดูดซับคลื่นได้ดีกว่าเกลือที่อยู่ในรูปรวมตัวกับสารอื่น (associated) ส่วนปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการดูดซับคลื่นได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ อุณหภูมิและระดับความถี่ของคลื่น สำหรับอาหารแห้ง อาหารที่มีไขมันและน้ำมันเป็นองค์ประกอบอยู่สูงจะดูดซับคลื่นได้ดีกว่าและจะไม่มีผลต่ออุณหภูมิของอาหารรวมทั้งความถี่ของ

คลื่นด้วย (สายสนม, 2543) สมบัติไดอิเล็กตริกของอาหารต่าง ๆ สามารถแสดงเป็นค่าตัวเลขที่มีความเกี่ยวข้องกับค่าต่าง ๆ อยู่ 3 ค่า คือ

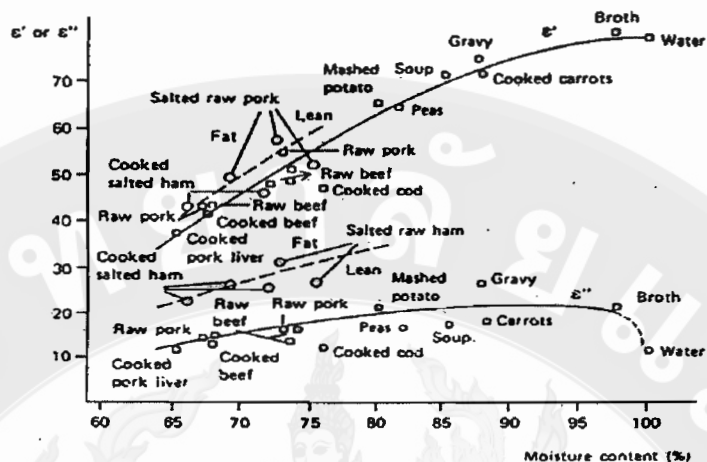
1. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant,  $\epsilon'$ ) คือ ค่าที่แสดงถึงความสามารถของสารประกอบที่กักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ได้เมื่อนำสารประกอบนั้นไปวางไว้ในสนามไฟฟ้า กระแสสลับ สารใดที่มีค่านี้สูงจะสามารถกักเก็บพลังงานได้สูง ค่านี้จะเปลี่ยนไปได้ตามอุณหภูมิและปริมาณความชื้นของสารนั้น ๆ

2. แฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor,  $\epsilon''$ ) คือ ค่าของพลังงานที่สูญเสียไปหรือที่แพร่กระจายไปในสารไดอิเล็กตริกเมื่อนำไปวางไว้ในสนามไฟฟ้า กระแสสลับ ซึ่งพลังงานไฟฟ้าจะสูญเสียไปเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในชิ้นอาหารนั้น ๆ ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนสูง แต่พลังงานก็จะดูดซับไปอย่างรวดเร็วเมื่อคลื่นไมโครเวฟผ่านเข้าไปในชิ้นงานอาหารนั้นเพียงระยะสั้น ๆ แล้วความร้อนนั้นจะลดลงโดยกระบวนการของการนำและการพาความร้อนนั่นเองเข้าสู่ภายในชิ้นอาหารด้วย ดังนั้นถ้าอาหารที่มีความหนาและขนาดใหญ่ มาก ๆ การดูดซับคลื่นจะเกิดได้เฉพาะผิวหน้าและความร้อนจะเข้าสู่ชิ้นอาหารได้ทั่วถึงก็จะเป็นไป ด้วยการนำหรือการพาซึ่งจะต้องใช้เวลานานกว่าอาหารที่มีขนาดเล็กและบาง

3. Loss tangent ( $\tan \delta$ ) หรือ Dissipation factor คือ ลักษณะของการสูญเสียพลังงานของสารนั้นซึ่งคิดออกมาในรูปของมุมที่ต่างไปจาก 90 องศา ในสภาพปกติทั่วไปของกระแสไฟฟ้า ค่านี้จะมีส่วนสัมพันธ์กับค่า  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  (Nelson, 1980; Nelson, 2005) ดังสมการที่ 5

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (5)$$

คุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกทั่ว ๆ ไป จะมีความสัมพันธ์กันระหว่างองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้าง ความถี่ และอุณหภูมิ (Nelson, 1999a) ดังภาพ 3 แสดงข้อมูล dielectric constant และ dielectric loss factor ของอาหารที่มีความชื้นแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความชื้นของอาหารสูงขึ้นจะมีค่าไดอิเล็กตริกที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย (Trabelsi and Nelson, 2004)



ภาพ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและความชื้นของอาหารที่ 20 องศาเซลเซียส  
ที่มา: Schubert and Regier (2005)

ปริมาณความชื้นของอาหารมีผลต่อค่าไดอิเล็กตริก และการซึมผ่านของคลื่น (penetration depth) ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 คุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกและการซึมผ่านของคลื่นของน้ำมันฝรั่งที่ใช้ทดลองที่ 25 องศาเซลเซียส และความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ต

| ปริมาณความชื้น  | dielectric constant | loss tangent | อัตราการซึมผ่าน (เซนติเมตร) |
|-----------------|---------------------|--------------|-----------------------------|
| ความชื้นสูง     | 60                  | 0.3          | 1.7                         |
| ความชื้นปานกลาง | 10                  | 0.2          | 3.0                         |
| ความชื้นต่ำ     | 4                   | 0.1          | 12.3                        |

ที่มา: Schubert and Regier (2005)

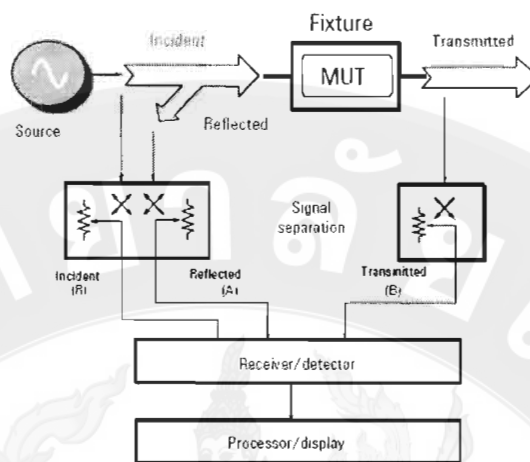
จากตารางแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณความชื้นของอาหารมีปริมาณที่ลดลงจะมีค่า dielectric constant และค่า loss tangent ลดลง และมีค่าอัตราการซึมผ่านเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นของวัสดุเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการใช้ไมโครเวฟ

ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อไดอิเล็กตริกประกอบด้วย ความถี่ อุณหภูมิ ความชื้น และ สารอาหารอื่น ๆ เช่น ไขมัน เกลือ เป็นต้น (Gracia *et al.*, 2000; Nelson, 2003; Venkatesh *et al.*, 2004)

1. ความถี่ ไอออนในน้ำมีบทบาทสำคัญในการนำไฟฟ้าเมื่อได้รับคลื่น ไอออนในน้ำจะหมุนตัวเกิดการเสียดสีกันแล้วทำให้เกิดความร้อน เมื่อความถี่สูงเท่าไร ไอออนในน้ำก็จะหมุนตามความถี่ที่ได้รับเช่น ถ้าใช้คลื่นความถี่ที่ 2450 เมกกะเฮิร์ต ไอออนหรืออะตอมที่มีอยู่ในน้ำบริสุทธิ์หรือน้ำที่มีสารละลายของแข็งอยู่ก็จะหมุนตัวเสียดสีกันด้วยความเร็ว 2450 รอบต่อวินาที
2. อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่อค่าไดอิเล็กตริก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้โมเลกุลที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไม่เป็นทิศเป็นทางแต่จะทำให้ค่า dielectric constant ลดลง
3. ความชื้น อาหารที่มีความชื้นจะดูดซับพลังงานความร้อน ได้มาก เมื่ออาหารมีพลังงานความร้อนสูงขึ้นอัตราการดูดซับพลังงานจะลดลง ค่า dielectric constant และ dielectric loss ในอาหารที่มีปริมาณความชื้นค่อนข้างน้อยหรืออาหารที่ค่อนข้างแข็ง อาหารเหล่านั้นก็จะมีสภาพของไอออนเหมือนกับอาหารที่ไม่แข็งตัวเป็นเพราะไม่มีผลต่อค่าคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริก

### การวัดค่าไดอิเล็กตริก

การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะใช้หลักการการวัดการสะท้อนและการส่งผ่านของ วัสดุ แสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของความสามารถในการยอมให้ส่งผ่านและการซึมผ่านของ วัสดุ โดยใช้ vector network analyzer เช่น PNA, PNA-L, ENA และ ENA-L วัดการตอบสนองที่ ความถี่สูงในช่วง 300 เมกกะเฮิร์ต-110 กิกะเฮิร์ต หรือ 325 กิกะเฮิร์ต โดย vector network analyzer จะประกอบด้วย ตัวส่งสัญญาณ ตัวรับสัญญาณและส่วนแสดงผล ดังภาพ 4 ตัวส่งสัญญาณจะส่ง ความถี่ค่าหนึ่งไปยังวัสดุที่ทดสอบ ตัวรับจะตรวจจับการสะท้อนและการยอมให้สัญญาณส่งผ่าน จากวัสดุ ผลการตอบสนองจะได้ข้อมูลในช่วงความถี่ที่ทดสอบ จากนั้นเมื่อเปลี่ยนระดับความถี่ แล้วทำการวัดการสะท้อนและการส่งผ่าน จะได้ผลการวัดการตอบสนองที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ (Nelson, 1999b)

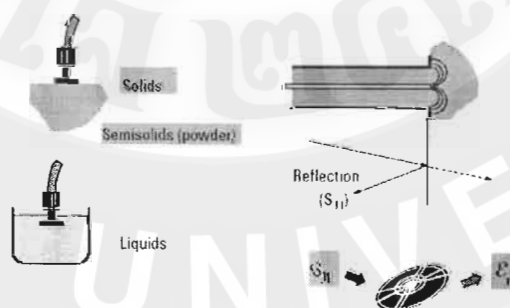


ภาพ 4 โครงสร้างของ vector network analyzers

ที่มา: Agilent Technologies (2006)

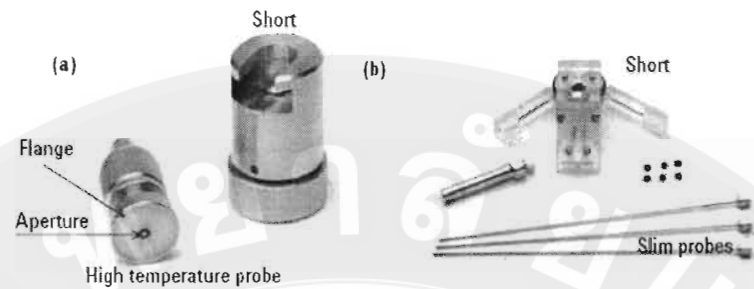
หลักการวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุจะใช้เทคนิคการวัดอยู่ 5 แบบ คือ

1. วิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด (coaxial probe) โพรบแบบ open-ended coaxial จะมีลักษณะเป็นสายส่งผ่านคลื่น ในการวัดจะจุ่มโพรบเข้าไปในของเหลวหรือสัมผัสผิวหน้าของของแข็ง (หรือผงฝุ่น) จากนั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากปลายโพรบจะถูกส่งเข้าไปในวัสดุและเปลี่ยนแปลงเมื่อสัมผัสกับวัสดุทดสอบ ดังภาพ 5 จะได้ผลของสัญญาณที่สะท้อนออกมาเป็นความสัมพันธ์กับค่าไดอิเล็กตริก



ภาพ 5 วิธีการวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบ coaxial probe

ที่มา: Agilent Technologies (2006)

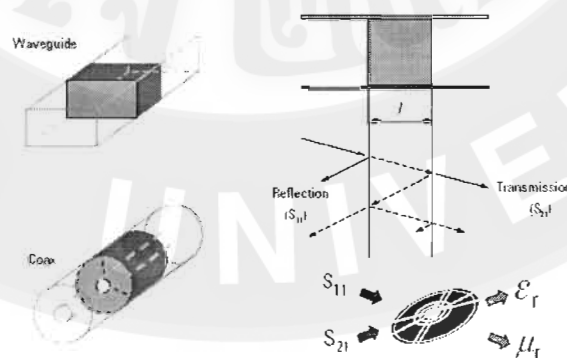


ภาพ 6 ลักษณะของโพรบวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบอุณหภูมิสูง (a) และแบบโพรบบาง (b)  
ที่มา: Agilent Technologies (2006)

โพรบอุณหภูมิสูงจะมีลักษณะเป็นแก้วและโลหะ ซึ่งจะเคลือบสารเคมีป้องกันการกัดกร่อน สามารถวัดได้ในช่วงอุณหภูมิ -40-200 องศาเซลเซียส ส่วนโพรบบางออกแบบเพื่อให้่ายต่อการวัดในถังหมัก ตู้ผสมสารเคมีหรือช่องขนาดเล็ก ใช้ในการวัดวัสดุที่มีขนาดเล็ก

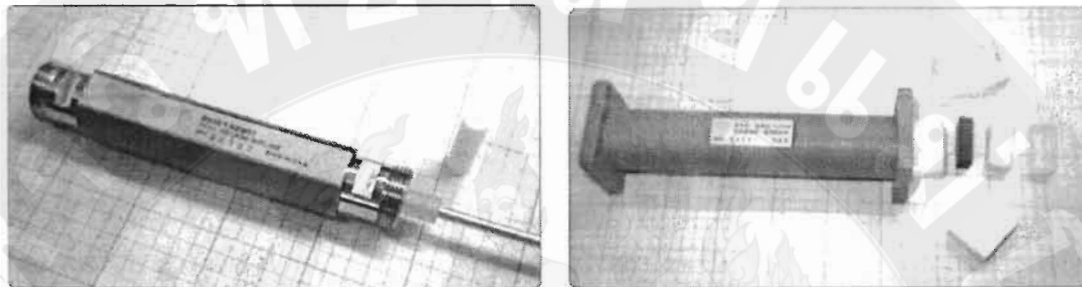
ก่อนการวัดจะต้องทำการเทียบมาตรฐาน โดยการวัดกับตัวมาตรฐานคือ อากาศ วงจรไฟฟ้า และน้ำกลั่นที่ไม่มีประจุ หลังจากนั้นต้องมีการเพิ่มการส่งสัญญาณเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด ซึ่งสิ่งที่ทำให้คลาดเคลื่อนคือ ความสม่ำเสมอของสายวัด ช่องว่างของอากาศ และความหนาของตัวอย่าง

2. วิธีสายส่งผ่าน (transmission line) เป็นวิธีการบรรจุวัสดุภายในสายส่งผ่านคลื่นแบบปิด โดยลักษณะของสายจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือแบบทรงกลม ดังภาพ 7



ภาพ 7 การวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบใช้สายส่งผ่านคลื่น  
ที่มา: Agilent Technologies (2006)

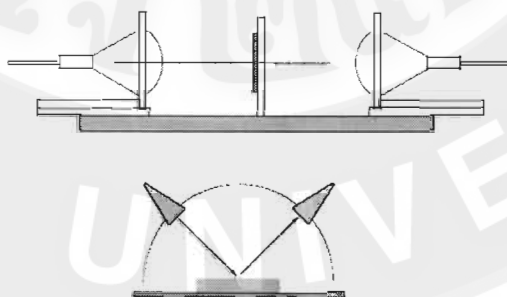
แกนของสายที่จะส่งผ่านคลื่นในช่วงแต่ละความถี่จะแตกต่างกันตามรูปร่างของวัสดุที่ทดสอบ ดังภาพ 8 ที่วัสดุจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกและภาพ 9 วัสดุจะมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยม



ภาพ 8 ชนิดของแกนสายส่งผ่านคลื่น

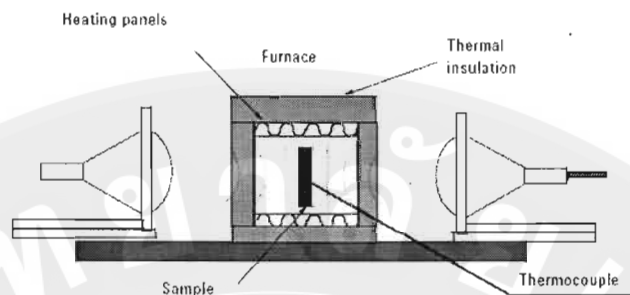
ที่มา: Agilent Technologies (2006)

3. การวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบ free space เป็นการวัดค่าโดยการลดทอนของการรวมศูนย์ของพลังงานไมโครเวฟ ดังภาพ 9 เป็นวิธีที่ไม่สัมผัสกับชิ้นทดสอบ และสามารถทดสอบที่อุณหภูมิสูงและสถานะที่ไม่เหมาะสมในการวัดโดยการวัดที่อุณหภูมิสูงสามารถทำได้โดยไม่ต้องสัมผัสหรือเชื่อมต่อกับวัสดุ ดังภาพ 10 ซึ่งสามารถวัดวัสดุร้อนที่อยู่ภายในเตาที่มีฉนวนที่มีลักษณะโปร่งใสและคลื่นไมโครเวฟสามารถส่งผ่านได้



ภาพ 9 ลักษณะการวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบ free space

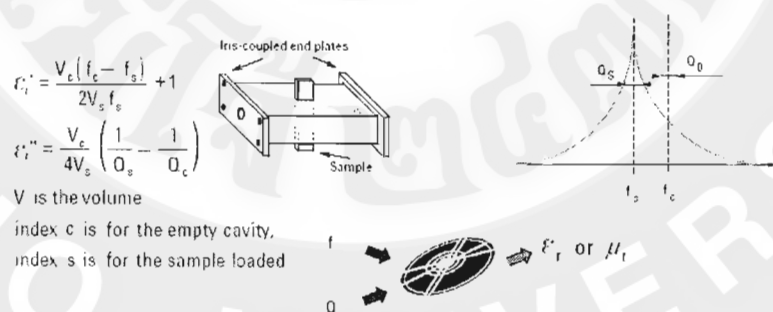
ที่มา: Agilent Technologies (2006)



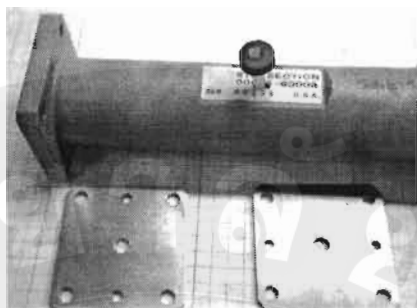
ภาพ 10 การวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบ free space เมื่อวัดวัสดุที่มีอุณหภูมิสูง  
ที่มา: Agilent Technologies (2006)

4. การวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบ Resonant cavity (resonant versus broadband techniques) ในการวัดโพรงสะท้อนต้องมีโครงสร้างที่สามารถสะท้อนที่ความถี่ที่ทดสอบได้ ชั้นทดสอบจะมีผลต่อจุดศูนย์กลางความถี่และคุณภาพการสะท้อนของโพรง จากพารามิเตอร์ดังกล่าวจะสามารถคำนวณหาค่าการยอมให้ส่งผ่านเชิงซ้อนหรือการซึมผ่านของของวัสดุที่ความถี่ใด ๆ ได้

ในการวัดจะมีชนิดและวิธีที่แตกต่างกัน แต่วิธีที่นิยมใช้คือ cavity perturbation ดังแสดงในภาพ 11 จะเป็นวิธีที่ใช้กับวัสดุที่มีขนาดเล็กมาก โดยลักษณะของท่อนำคลื่นไปใช้ในการวัดมีลักษณะดังภาพ 12 ซึ่งไม่ต้องการเทียบมาตรฐานก่อนการวัด



ภาพ 11 การวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบ Resonant Cavity  
ที่มา: Agilent Technologies (2006)



ภาพ 12 ส่วนประกอบของโพรง Resonant Cavity

ที่มา: Agilent Technologies (2006)

5. การวัดค่าไดอิเล็กตริกแบบ parallel plate วิธีนี้จะเป็นการวัดวัสดุที่เป็นแผ่นบาง อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าจากคาปาซิเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะที่ทำเป็นแผ่นเพลต 2 แผ่น วางใกล้กัน โดยให้วัสดุที่ต้องการวัดอยู่คั่นกลาง ค่าสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุ

ปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการเลือกวิธีการวัดคือ ความแม่นยำ ความสะดวก และรูปแบบ รูปร่างของวัสดุ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่ต้องการพิจารณาคือ ช่วงความถี่ ค่าไดอิเล็กตริกและการซึมผ่านที่ต้องการ ความแม่นยำในการวัด คุณสมบัติของวัสดุ สถานะของวัสดุ ขนาดของชิ้นทดสอบ การทำลายหรือไม่ทำลายวัสดุ การสัมผัสหรือไม่สัมผัสวัสดุ อุณหภูมิ และราคา

จากเทคนิคต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตาราง 5

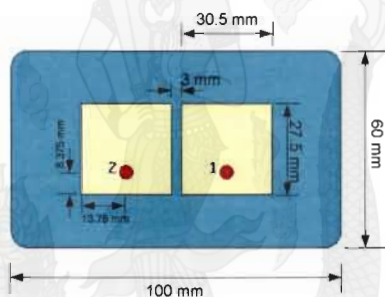
ตาราง 5 สรุปเทคนิคการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

| วิธีการวัด                                             | ลักษณะของวิธีการ                                                                                                                                                                                                                                                                                       | ลักษณะของขั้นตอนทดสอบ                                                                          |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| coaxial probe                                          | -เป็นการวัดแบบหยาบ<br>-เป็นวิธีที่ง่ายสะดวก<br>-จำกัดความแม่นยำของ $\epsilon_r$ และความละเอียดของ $\delta$                                                                                                                                                                                             | -มีความหนาแน่นสูงมาก<br>-คุณสมบัติไม่เป็นแม่เหล็ก<br>-เป็นเนื้อเดียวกัน<br>-ผิวสัมผัสเรียบ     |
| transmission line                                      | -เหมาะสำหรับของเหลวหรือกึ่งของแข็ง<br>-จำกัดขนาดความยาวของวัสดุ<br>-ความละเอียดต่ำ (ขึ้นอยู่กับความยาวของวัสดุ)                                                                                                                                                                                        | -ไม่มีช่องว่างอากาศ<br>-วัสดุที่มีความยืดหยุ่น<br>-ไม่มีช่องอากาศ                              |
| free space                                             | -วัดวัสดุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้า<br>-วัสดุที่ไม่มีมิติเท่ากัน สามารถวัดในท่อนำคลื่น<br>-ไม่สัมผัสกับขั้นตอนทดสอบ<br>-การกำหนดความถี่จะขึ้นอยู่กับขนาดชิ้นทดสอบ<br>-ใช้อุปกรณ์สูงได้<br>-การลดลงของการเปลี่ยนทิศทางของประจุอาจเกิดจากมิติไม่เท่ากันของวัสดุ<br>-วัดวัสดุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้า | -ผิวเรียบ<br>-เป็นเนื้อเดียวกัน<br>-ใหญ่และผิวเรียบทั้งสองด้านที่ขนานกัน<br>-เป็นเนื้อเดียวกัน |
| resonant cavity (resonant versos broadband techniques) | เทคนิค Resonant<br>-สถานะที่มีความต้านทานต่อกระแสกลับสูง<br>-สามารถวัดกับวัสดุขนาดเล็ก<br>-วัดได้เฉพาะความถี่เพียงช่วงเดียวหรือบางช่วง<br>-เหมาะสมกับวัตถุที่มีความสูญเสียต่ำ<br>เทคนิค Broadband<br>-วัดวัสดุที่มีขนาดใหญ่<br>-วัดได้ทุก ๆ ช่วงความถี่                                                |                                                                                                |

## เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ

### หลักการทำงาน

หลักการของระบบการตรวจสอบ เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟใช้หลักการของ mutual coupling ของสายอากาศ 2 ตัว ดังแสดงในภาพ 13 สามารถหาค่าไดอิเล็กตริกของตัวกลางที่อยู่ระหว่างสายอากาศ 2 ตัวได้ เมื่อสายอากาศวางไว้ใกล้ ๆ กันในตัวกลางที่เป็นอากาศ สายอากาศจะรับสัญญาณได้ค่าหนึ่ง เมื่อตัวกลางเปลี่ยนไปจะทำให้สัญญาณที่รับได้เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งเซนเซอร์ที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะดังภาพ 14 (โมไนย และคณะ, 2551)

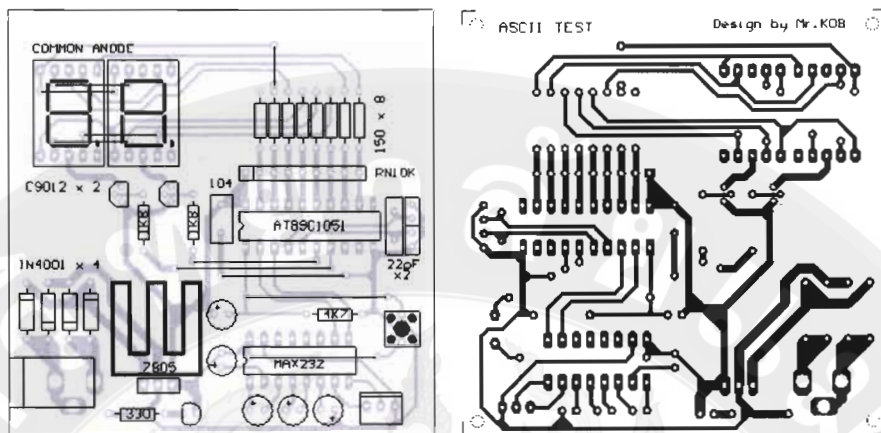


ภาพ 13 เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ (1) ตัวส่งสัญญาณและ (2) ตัวรับสัญญาณ  
ที่มา: โมไนย และคณะ (2551)



ภาพ 14 เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟที่ใช้งานจริง  
ที่มา: โมไนย และคณะ (2551)





ภาพ 17 แผ่นวงจรของเครื่องเก็บข้อมูล  
ที่มา: โมไนย และคณะ (2551)

ข้อมูลที่ได้จากของเซนเซอร์จะถูกส่งผ่านไปตามสายสัญญาณข้อมูลไปยังภาครับของเครื่องเก็บข้อมูลซึ่งใช้พอร์ต RS-232 เป็นมาตรฐานในการรับข้อมูล



ภาพ 18 การประกอบอุปกรณ์และวงจรในการเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ

เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟเมื่อทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้ว เซนเซอร์จะติดตั้งอยู่ที่ผลทุเรียนเพื่อวัดค่าแล้วส่งข้อมูลไปยังเครื่องเก็บข้อมูลที่อยู่บริเวณโคนต้นดังภาพ 19



ภาพ 19 ลักษณะการติดตั้งเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟบนผลทุเรียนบนต้นไม้

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### งานวิจัยเกี่ยวกับการตรวจสอบคุณภาพผลไม้

กัลย์ (2540) ได้ศึกษาคุณภาพของทุเรียนที่มีความแตกต่างกันโดยใช้เทคนิคเอกซเรย์ เปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อทุเรียน เพื่อหาดัชนีการตรวจสอบที่เป็นมาตรฐานของความแก่ที่เหมาะสม ในการทดสอบแบ่งผลทุเรียนเป็น 6 ระดับคือ ทุเรียนที่มีอายุ 97, 104, 111, 118, 125, และ 132 วันหลังดอกบาน และคิดเป็น 40, 50, 60, 70, 80, และ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีคือปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และปริมาณคาร์โบไฮเดรต สามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดแยกผลทุเรียนที่มีความแก่ที่ระดับต่าง ๆ ที่ประเมินโดยการชิมเมื่อผลสุกได้ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพพบว่าการสูญเสียน้ำหนักของผลอ่อนจะมากกว่าผลที่แก่กว่า และจากการทำ X-ray CT พบว่าภาพผลทุเรียนอ่อน 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีสีที่ดำมากที่สุดและความดำจะลดลงตามความแก่ที่มากขึ้น และขาวสว่างที่สุดเมื่อผลแก่ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าในการเก็บเกี่ยวผลผลิตจะต้องคำนึงถึงระดับความบริบูรณ์เพื่อทำให้ได้ผลทุเรียนที่มีคุณภาพเมื่อถึงปลายทางการขนส่ง

ธวัชชัย (2547) ได้ศึกษาการคัดแยกคุณภาพของมังคุดแบบไม่ทำลายโดยการตรวจสอบความชื้นด้วยไมโครเวฟ ในการตรวจสอบใช้ความถี่ย่านไมโครเวฟที่ 2.45 กิกะเฮิร์ต โดยใช้วิธีการส่งคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟเข้าไปยังผลมังคุด แล้วรับสัญญาณสะท้อนกลับด้วยโพรมโนโนโพล เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับโดยวัดในรูปของสเปกตรัม ซึ่งประกอบด้วยขนาดและเฟส โดยทำการวัดเป็นจุด ๆ รอบผลมังคุด ทำการทดลองกับผลมังคุดที่เป็นเนื้อปกติ 100

ลูก และผลมั่งคุดที่เป็นเนื้อแก้ว 50 ลูก วัดลูกละ 6 จุด รวมจุดที่ทดสอบทั้งหมด 900 จุด จากการทดลองพบว่า วัดจุดเนื้อปกติได้ถูกต้อง 73.25 เปอร์เซ็นต์ วัดจุดเนื้อแก้วปกติได้ถูกต้อง 58.59 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาทั้งลูกพบว่ามีความถูกต้อง 80.67 เปอร์เซ็นต์ของความแม่นยำ การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าคลื่นไมโครเวฟที่ย่านความถี่ 2.45 กิกะเฮิรต์ สามารถใช้ตรวจสอบคุณภาพของผลไม้ได้

อลงกรณ์ และ กรกฎ (2547) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแก่ของผลทุเรียนกับความแตกต่างระหว่างความกว้างของปากปลิงและก้านผลด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพทุเรียนที่ใช้ในการทดลองมี 6 ระดับอายุ คือ 92, 99, 106, 113, 120 และ 127 วันหลังดอกบาน โดยทดสอบระดับละ 25-30 ผล การประมวลผลภาพใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 0.15 วินาทีต่อภาพ ผลการทดลองชี้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความแตกต่างของความกว้างของปากปลิงและก้านผลกับอายุ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ 92-113 วัน และ 113-127 วัน แต่ละช่วงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) 0.98 และ 0.38 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของน้ำหนักแห้งกับอายุของทุเรียน พบว่าเป็นเชิงเส้น 2 ช่วงเช่นกัน มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.95 และ 0.59 ตามลำดับ การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าหากต้องการใช้น้ำหนักแห้งของผลทุเรียนเป็นดัชนีบอกความแก่สุกของทุเรียนควรแบ่งอายุของผลทุเรียนเป็น 2 ช่วง

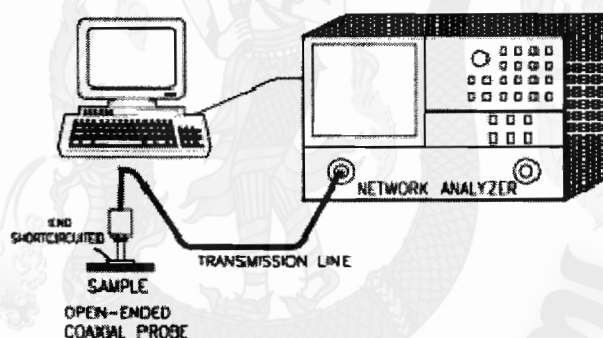
Rutpralom *et al.* (2002) ได้ศึกษาการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของทุเรียนโดยใช้เทคนิคไมโครเวฟตรวจสอบความชื้น ในการตรวจสอบจะใช้โพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด (open-ended co-axial probe) ที่ความถี่ 3 กิกะเฮิรต์ โดยออกแบบให้เหมาะสมกับผลทุเรียน แล้วเชื่อมต่อกับ network analyzer จากการทดสอบพบว่าค่าการตอบสนองเป็นแบบเชิงเส้นกับความชื้นของทุเรียน นอกจากนั้นยังได้เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นสามารถใช้เป็นดัชนีที่สัมพันธ์กับความบริสุทธิ์ของทุเรียน และเทคนิคการตรวจสอบแบบไมโครเวฟโดยใช้คลื่นไมโครเวฟสามารถตรวจสอบความบริสุทธิ์ของทุเรียนได้

#### งานวิจัยเกี่ยวกับการวัดค่าไดอิเล็กตริก

คำนึ่ง และ จาริณี (2550) ได้ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นยางธรรมชาติที่ความถี่ 915 และ 2450 เมกกะเฮิรต์ โดยศึกษาแผ่นยางธรรมชาติที่มีความชื้น 26.8-37.6 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก วัดโดยวิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิดที่ความถี่ 2 ค่า พบว่าที่ความถี่ 915 เมกกะเฮิรต์ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าระหว่าง 6.39-14.32 และค่า factor loss มีค่าระหว่าง 0.10-2.23 ส่วนที่ความถี่ 2450 เมกกะเฮิรต์ ค่า dielectric constant มีค่าระหว่าง 7.29-14.17 และค่า Factor loss มีค่าระหว่าง 0.48-2.32 ค่า dielectric constant และ ค่า factor loss มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้น โดย

ที่ความถี่ 2450 เมกกะเฮิร์ต มีค่ามากกว่าที่ความถี่ 915 เมกกะเฮิร์ต จากการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่าค่า dielectric constant และ ค่า factor loss มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับความชื้น

Martin-Esparza *et al.* (2006) ได้ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกแอปเปิลที่มีปริมาณความชื้นต่างกัน ทำการทดสอบที่ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยทำการวัดแบบ open-ended coaxial ชนิดโพรบแบบ HP 85070B เชื่อมต่อกับ network analyzer ลักษณะการวัดแสดงดังภาพ 20 ในการทดสอบจะวัดโดยใช้โพรบสัมผัสกับผิวทดสอบซึ่งหนา 20 มิลลิเมตรในการทดสอบจะได้ผลการสะท้อนของสัญญาณที่วัดได้ในรูปของความสัมพันธ์ของค่าไดอิเล็กตริกจากการทดสอบพบว่าปริมาณความชื้นและวอเตอร์แอคทิวิตีมีผลต่อค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแอปเปิล



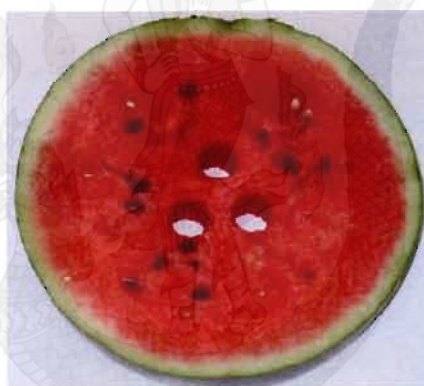
ภาพ 20 วิธีการวัดค่าไดอิเล็กตริก

ที่มา: Martin-Esparza *et al.* (2006)

Nelson *et al.* (2007) ได้ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแตงโมและความสัมพันธ์กับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ทำการทดสอบในช่วงความถี่ 10 เมกกะเฮิร์ต-1.8 กิกะเฮิร์ต โดยทำการวัดแบบสัมผัสผิวภายนอกและภายในของชิ้นทดสอบ ใช้วิธีการวัดแบบ open-ended coaxial-line ทำการทดสอบแบบใช้โพรบสัมผัสกับผิวภายนอกประมาณ 4 จุดต่อหนึ่งผล แต่ละจุดทำมุม 90 องศา ดังแสดงในภาพ 21 จากนั้นทำการวัดภายในชิ้นทดสอบโดยการตัดเนื้อแตงโมบริเวณกลางผลให้หนาประมาณ 4 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 18.6 มิลลิเมตร ดังภาพ 22 และมีลักษณะการวัดดังภาพ 23 จากการทดสอบจะได้ความสัมพันธ์ของค่าไดอิเล็กตริกดังภาพ 24 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า dielectric จากการวัดเนื้อแตงโมจะมีค่าสูงกว่าการวัดที่ผิวด้านนอก โดยค่า dielectric constant จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่ของคลื่นเพิ่มขึ้น



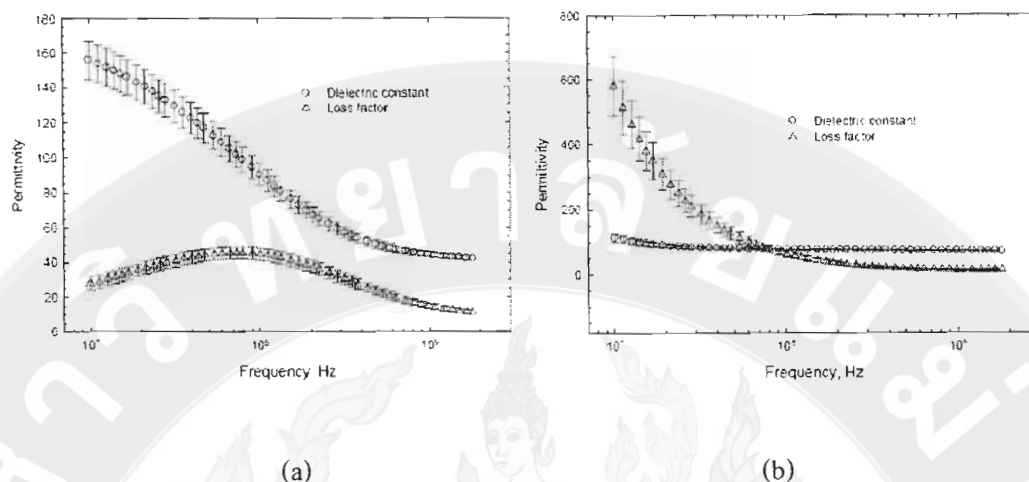
ภาพ 21 ลักษณะการวัดที่ผิวแตงโม  
ที่มา: Nelson *et al.* (2007)



ภาพ 22 ลักษณะการเจาะเนื้อแตงโม  
ที่มา: Nelson *et al.* (2007)



ภาพ 23 ลักษณะการวัดที่เนื้อแตงโม  
ที่มา: Nelson *et al.* (2007)



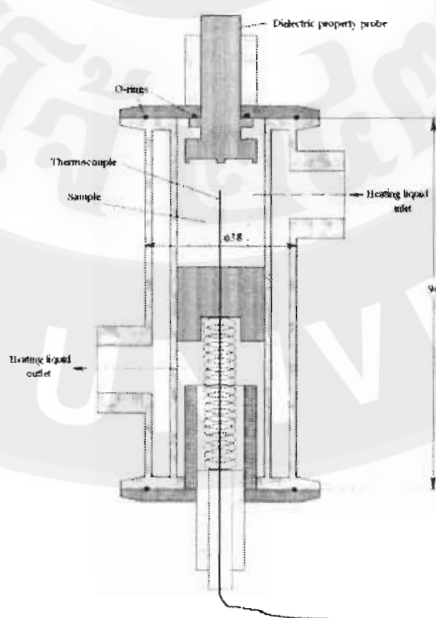
ภาพ 24 ค่าไดอิเล็กตริกจากการวัดที่ผิว (a) และเนื้อแดงโม (b)

ที่มา: Nelson *et al.* (2007)

Nelson and Bartley (2002) ได้ศึกษาผลของความถี่คลื่นและอุณหภูมิที่มีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุอาหาร โดยวัสดุที่ใช้ทดสอบคือ มะกะโรนีผสมชีส เจลโปรตีนจากนม แป้งข้าวสาลี และน้ำแอปเปิล ปริมาณความชื้นเท่ากับ 66, 74, 12 และ 88.5 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก การวัดค่าไดอิเล็กตริกใช้วิธีโพรมแบบแกนร่วมปลายเปิด เชื่อมต่อกับ microwave network analyzer ในการทดสอบนำวัสดุที่จะตรวจวัดใส่ในถ้วยสแตนเลส ทำการวัดที่อุณหภูมิ 5-100 องศาเซลเซียส ที่ระดับความถี่ที่เหมาะสมกับวัสดุแต่ละชนิด จากการทดสอบพบว่าเทคนิคการวัดแบบวิธีโพรมแบบแกนร่วมปลายเปิดที่มีการควบคุมอุณหภูมิวัสดุให้สมดุลและเหมาะสมในการวัด จะได้ว่าความถี่คลื่นและอุณหภูมิมีผลต่อค่าไดอิเล็กตริก ดังนั้นจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าในการตรวจวัดค่าไดอิเล็กตริกจะต้องมีการควบคุมความถี่คลื่นและอุณหภูมิให้เหมาะสมกับวัสดุ

Motwani *et al.* (2007) ได้ศึกษาอิทธิพลของการทำให้เข้มข้นและการทำให้เกิดเจลที่มีต่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำแป้ง โดยใช้น้ำแป้งข้าวโพดที่มีความชื้น 10-50 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ทำการวัดค่าไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิ 40-90 องศาเซลเซียส และช่วงความถี่คลื่น 15 เมกะเฮิร์ต ถึง 3 กิกะเฮิร์ต จากผลการทดสอบจะพบว่าค่า dielectric constant จะลดลงส่วนค่า loss factor จะเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า dielectric constant จะลดลง แต่ความถี่จะมีผลต่อค่า dielectric constant น้อยมาก ส่วนการทำให้เกิดเจลจะมีผลต่อค่า dielectric constant มากกว่าค่า loss factor จึงสามารถใช้ค่า dielectric constant ในการทำนายการเกิดเจลของแป้งได้ ดังนั้นจากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบภายในของแป้งจะมีผลต่อคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

Wang *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของอาหารที่ใช้ในการพาสเจอร์ไลส์และสเตอริไลส์ด้วยคลื่นวิทยุ และคลื่นไมโครเวฟ โดยใช้วัสดุทดสอบคือ เจลเวย์โปรตีน เจลเวย์โปรตีนเหลว และผลิตภัณฑ์หมักกะโรนีผสมชีส ที่อุณหภูมิ 20-121.1 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ 27, 40, 915 และ 1800 เมกกะเฮิร์ต ในการศึกษานี้ได้ทำการวัดด้วยวิธี agilent 4291B แบบ impedance analyzer ประกอบด้วยชุดทดสอบที่ได้จัดทำขึ้นแบบ VWR model 1157 ดังภาพ 25 ใช้สายสัญญาณแบบอุณหภูมิสูง และโพรบวัดเป็นแบบ hewlett packard 85070 วิธีการวัดดังกล่าวสามารถวัดได้ในช่วงความถี่ 1-1800 เมกกะเฮิร์ต และอุณหภูมิ -40-200 องศาเซลเซียส โดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้มีการสร้างโปรแกรมขึ้นคือ DMS 85070 ก่อนการวัดจะต้องมีการเปิดเครื่องประมาณ 30 นาที อุปกรณ์เชื่อมต่อจะต้องตรวจเช็คและทำความสะอาดด้วยเอทานอลบริสุทธิ์ จากนั้นจึงทำการเทียบมาตรฐานตามวิธี open-ended coaxial จากนั้นจึงใส่วัสดุทดสอบที่ควบคุมอุณหภูมิโดยโพรบจะต้องสัมผัสกับชิ้นทดสอบขณะทำการวัด ผลการทดสอบพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงค่า dielectric constant ของผลิตภัณฑ์เจลเวย์โปรตีนจะเพิ่มขึ้นที่ความถี่ 27 และ 40 เมกกะเฮิร์ต แต่ลดลงที่ 915 และ 1800 เมกกะเฮิร์ต ส่วนค่า dielectric loss จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ 27 และ 40 เมกกะเฮิร์ต แต่จะลดลงเล็กน้อยที่ 915 และ 1800 เมกกะเฮิร์ต ซึ่งผลจะคล้ายกับผลิตภัณฑ์หมักกะโรนีผสมชีส ดังนั้นจากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์สำหรับวัดค่าไดอิเล็กตริกที่ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุ



ภาพ 25 ส่วนประกอบของชุดทดสอบวัดค่าไดอิเล็กตริก

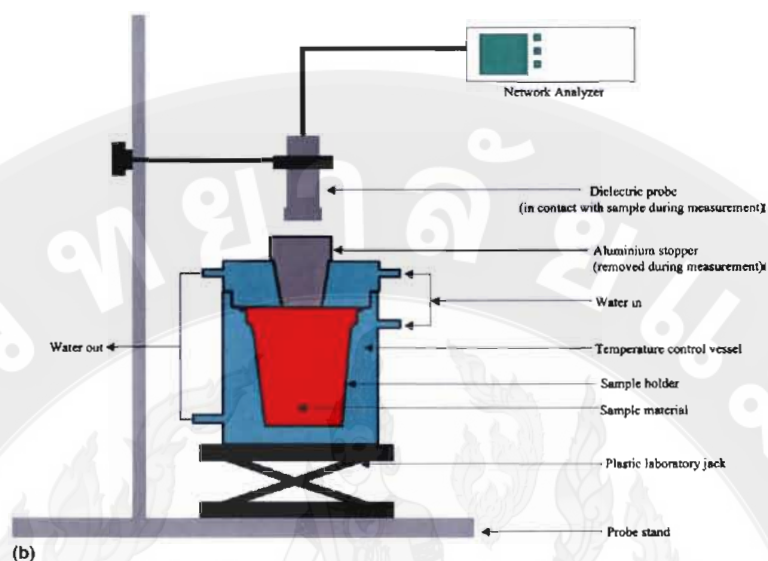
ที่มา: Wang *et al.* (2003)

Zhang *et al.* (2004) ได้ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและคุณสมบัติทางความร้อนของเนือบคที่อุณหภูมิ 5-85 องศาเซลเซียส ขึ้นทดสอบประกอบด้วย pork luncheon roll (PLR) และ white pudding (WP) ในการทดสอบวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกใช้ภาชนะบรรจุขึ้นทดสอบที่ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ใส่ด้วยวัสดุทดสอบโดยถ้วยมีขนาดเท่ากับ 140 มิลลิลิตร และส่วนปิดด้านบน ทั้ง 2 ส่วน ทำจากอะลูมิเนียม ดังภาพ 26 เมื่อประกอบชุดทดสอบแล้วจะเชื่อมต่อกับน้ำจากถังควบคุมอุณหภูมิเพื่อควบคุมอุณหภูมิวัสดุที่ใช้ในการวัด ในการศึกษาใช้วิธีการวัดแบบ open-ended co-axial เชื่อมต่อกับ hewlett packard network analyzer ดังภาพ 27 ก่อนทำการวัดจะต้องควบคุมอุณหภูมิของวัสดุให้มีความสมดุลกับน้ำในถังควบคุมอุณหภูมิและทำการเทียบมาตรฐาน จากนั้นจึงทำการทดสอบโดยใช้คลื่นในช่วงความถี่ไมโครเวฟและคลื่นวิทยุ จากการทดสอบพบว่าค่าไดอิเล็กตริกของ WR จะเพิ่มสูงขึ้นสูงสุดที่ 45 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับ PLR จะมีค่าสูงสุดที่ 65 องศาเซลเซียส จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบชุดอุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กตริก โดยต้องมีการเตรียมตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกันและควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามที่กำหนดก่อนทำการทดสอบ



ภาพ 26 ชุดทดสอบวัดค่าไดอิเล็กตริก

ที่มา: Zhang *et al.* (2004)



ภาพ 27 ส่วนประกอบชุดทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

ที่มา: Zhang *et al.* (2004)

### สรุปกรอบแนวความคิดในการทำงานวิจัย

จากการตรวจสอบเอกสารพบว่าการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของทุเรียน โดยการใช้เทคนิคแบบไม่ทำลายส่วนใหญ่จะเป็นการสร้างหรือออกแบบเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ศึกษาความสัมพันธ์ในด้านต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่น ลักษณะทางกายภาพ โดยยังไม่ได้มีการศึกษาที่เน้นถึงคุณสมบัติภายในของทุเรียนที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น คุณสมบัติไดอิเล็กตริก องค์ประกอบทางเคมี เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาคัดขั้วความบริสุทธิ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองด้วยเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟและสมบัติไดอิเล็กตริก เป็นการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ด้านไมโครเวฟที่เปลี่ยนแปลงไปเปรียบเทียบกับความบริสุทธิ์ของทุเรียน เพื่อที่จะสอดคล้องกับเซนเซอร์ในการตรวจวัดการปนเปื้อนของทุเรียนในส่วนด้วยเซนเซอร์แบบไร้สาย

### สมมติฐานการวิจัย

ในการทดสอบหาความบริสุทธิ์ของทุเรียน ผู้วิจัยมีแนวคิดในการหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ด้านไมโครเวฟที่เปลี่ยนแปลงไปเปรียบเทียบกับความบริสุทธิ์ของทุเรียน เช่น ผลทุเรียนสามารถจัดระดับความบริสุทธิ์ได้ตั้งแต่ 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งระดับการเก็บเกี่ยวเพื่อการส่งออกควรอยู่ที่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ แต่ระดับการเก็บเกี่ยวเพื่อบริโภคภายในประเทศอาจใช้ระดับที่ 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงของระดับความบริสุทธิ์นี้มีความสอดคล้องกับปริมาณแป้ง น้ำตาลรีดิวซ์ ความชื้น และคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผลทุเรียน ดังนั้นจึงมีการศึกษาค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาเคมีและกายภาพ รวมถึงคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในระยะความบริสุทธิ์ต่าง ๆ

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

##### อุปกรณ์

1. เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ
2. กล้องดิจิทัล ยี่ห้อ Fuji รุ่น S8000FD
3. ตู้แช่แข็ง
4. เครื่อง network analyzer ยี่ห้อ Hewlett Packard Agilent รุ่น 8530A
5. อ่างควบคุมอุณหภูมิ
6. ตู้อบไล่ความชื้น ยี่ห้อ Memmert รุ่น 100-800
7. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตัวเลข ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP 3202S
8. เครื่อง spectrophotometer ยี่ห้อ Novaspec II รุ่น 80-2088-64
9. ตู้แช่สารเคมี
10. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ เช่น บีกเกอร์ ขวดปรับปริมาตร หลอด

ทดลอง เป็นต้น

##### สารเคมี

1. Zinc acetate ยี่ห้อ Ajax
2. Potassium ferro cyanide ยี่ห้อ Ajax
3. Phosphotungstic acid ยี่ห้อ Hemedia
4. Sodium hydroxide ยี่ห้อ Ajax
5. Potassium sodium tartrate ยี่ห้อ Ajax
6. Dinitro salicylic acid ยี่ห้อ Fluka
7. Phenol discrete crystals ยี่ห้อ Prolabo
8. Sodium sulfite ยี่ห้อ Ajax
9. Hydrochloric acid ยี่ห้อ Prolabo
10. D-Glucose anhydrous ยี่ห้อ Ajax

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ การทดสอบจะประกอบด้วย การทดสอบการตอบสนองของ เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติกายภาพและทางเคมี และการทดสอบ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของผลทุเรียน โดยผลทุเรียนที่ใช้ในการทดลอง ได้มาจากสวนของเกษตรกร ใน อ.ชะอวด จ.นครศรีธรรมราช และมีระยะเวลาการทดสอบ 2 ฤดูกาล ดังนี้

วันที่ 13 กรกฎาคม ถึง 13 สิงหาคม พ.ศ. 2551 มีอายุหลังดอกบานในวันเริ่มเก็บ ข้อมูลประมาณ 91 วัน

วันที่ 19 กรกฎาคม ถึง 16 สิงหาคม พ.ศ. 2552 มีอายุหลังดอกบานในวันเริ่มเก็บ ข้อมูลประมาณ 94 วัน

### การทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ

ในการทดสอบหาค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟจะต้องทำการติดตั้ง เซนเซอร์ ซึ่งมีวิธีการดำเนินการดังนี้

1. จากโครงการวิจัย ระบบโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายเพื่อควบคุมคุณภาพการผลิต ผลไม้ โดยโมโนย และคณะ (2551) ได้ออกแบบและพัฒนาเซนเซอร์ ได้ออกแบบและสร้าง เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ โดยสายอากาศตัวที่หนึ่งเป็นสายอากาศสี่เหลี่ยมทำหน้าที่เป็นตัวส่งคลื่น เข้าไปในผลทุเรียน โดยที่สายอากาศตัวที่สองมีคุณสมบัติเหมือนสายอากาศตัวที่หนึ่งทุกประการ ทำหน้าที่รับคลื่นของสายอากาศตัวที่หนึ่งที่เข้าและออกมาจากผลทุเรียน

2. ในการทดสอบเลือกต้นทุเรียนพันธุ์หมอนทองจากสวนของเกษตรกรในอำเภอ ชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช ที่มีลักษณะที่สมบูรณ์ ไม่ติดโรค มีกำหนดวันดอกบานที่ชัดเจน ซึ่งเจ้าของสวนจะเป็นผู้ผสมเกสรในวันที่ดอกทุเรียนบาน และทำการดักแต่งดอกที่ไม่สมบูรณ์และ ให้มีจำนวนผลทุเรียนที่เหมาะสมในแต่ละกิ่ง

3. เลือกติดตั้งเซนเซอร์กับผลทุเรียนผลที่มีลักษณะดี ไม่ติดโรค ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางภาคตัดขวางประมาณ 20 เซนติเมตรและสามารถติดตั้งเซนเซอร์ตรงกับพูของผลทุเรียน ได้พอดี ดังภาพ 28



ภาพ 28 การติดเชนเซอร์บนผลทุเรียน

4. อ่านและบันทึกข้อมูลจากเซนเซอร์ทุกวัน โดยอ่านค่าการตอบสนองเซนเซอร์ของแต่ละวันในเวลาที่ใกล้เคียงกัน แต่ละวันจะบันทึกข้อมูลซ้ำ 10 ครั้ง แล้วนำค่ามาเฉลี่ยเป็นผล การตอบสนองของแต่ละวัน ซึ่งรูปแบบของข้อมูลที่ได้รับเป็นข้อมูลแบบดิจิทัล ซึ่งไม่สามารถที่จะอ่านค่าออกมาได้เนื่องจากเป็นตัวเลขในระบบเลขฐานสอง จึงต้องมีการคำนวณเพื่อแปลงค่าให้อยู่ ในรูปแบบของเลขฐานสิบ ซึ่งค่าที่ได้จะแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขแสดงค่าระดับของแรงดันไฟฟ้า

#### การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติกายภาพและทางเคมีของผลทุเรียน

เนื่องจากความบริสุทธิ์ของผลทุเรียนประกอบด้วยคุณภาพที่สามารถประเมินได้ ด้วยตาเปล่า เช่น สี ขนาด เป็นต้น และคุณภาพที่ไม่สามารถประเมินได้ด้วยตาเปล่า เช่น องค์ประกอบทางเคมี ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี เพื่อนำค่าที่ได้มาประเมินเพื่อแบ่งระดับความบริสุทธิ์ของผลทุเรียน โดยมีวิธีทดสอบดังนี้

1. เก็บตัวอย่างผลทุเรียนที่มีความแก่และขนาดผลใกล้เคียงกับผลที่ติดเซนเซอร์ คลื่นไมโครเวฟ จำนวน 3 ผล ทุก ๆ 3 วัน อ่านค่าการตอบสนองโดยใช้เซนเซอร์ที่เหมือนกับ เซนเซอร์ที่ติดกับผลทุเรียนบนต้นเพื่อนำไปใช้ในการสอบเทียบ หลังจากนั้นนำมาผ่าผลตามแนว ยาวและแนวนางแล้วถ่ายภาพดิจิทัลเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงเนื้อและเปลือกทุเรียน โดยทำการ ทดสอบที่สวนของเกษตรกร

2. เก็บตัวอย่างเนื้อทุเรียนและเปลือกทุเรียนตัวอย่างของผลตัวอย่างที่ทำการถ่ายภาพเรียบร้อยแล้ว โดยทำการแช่เยือกแข็งตัวอย่างที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสไว้ที่ส่วนของเกษตรกร เพื่อที่จะนำมาทดสอบหาค่าปริมาณความชื้น น้ำหนักแห้ง ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณแป้ง หลังจากทำการทดสอบเก็บข้อมูลและตัวอย่างทุเรียนจนถึงประมาณวันที่ 125 วันหลังดอกบาน หรือจนถึงระยะที่ผลทุเรียนที่ติดตั้งเซนเซอร์มีความสมบูรณ์เต็มที่โดยสังเกตจากลักษณะภายนอกที่ข้าวผลจะหลุดจากต้น หากมีสีน้ำตาล หรือเริ่มมีกลิ่น ก็จะทำการเก็บตัวอย่างผลทุเรียนทั้งหมดนำมาทดสอบที่ห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยแม่โจ้ต่อไป

3. การทดสอบหาปริมาณความชื้น นำตัวอย่างเนื้อและเปลือกทุเรียนอบด้วยตู้อบแห้งไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนน้ำหนักของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง โดยทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง (Nelson *et al.*, 2006) จากนั้นจึงคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นและน้ำหนักแห้ง ซึ่งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติได้กำหนดว่าทุเรียนพันธุ์หมอนทองสำหรับการจำหน่ายจะต้องมีน้ำหนักแห้งอย่างน้อยเท่ากับ 32 เปอร์เซ็นต์

4. การทดสอบหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และแป้ง โดยวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และแป้งในเนื้อทุเรียนโดยวิธี DNS-method ตามวิธีของ AOAC (1984) and Miller (1956) โดยใช้เครื่อง spectrophotometer novaspec II รุ่น 80-2088-64 ที่ระดับความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร แล้วคำนวณหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และแป้ง ดังสมการที่ 6 และ 7

$$\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{K_1 B(100)(\text{dilution})}{1000A} \quad (6)$$

$$\text{ปริมาณแป้ง (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{K_2 V(100)(\text{dilution})}{1000A} \quad (7)$$

|       |          |                                           |
|-------|----------|-------------------------------------------|
| เมื่อ | $K_1$    | คือ $(\text{Slope})^{-1}I$                |
|       | $K_2$    | คือ $(\text{Slope})(0.9)^{-1}I$           |
|       | Slope    | คือ ค่าที่ได้จากกราฟกฎโคสมมาตรฐาน         |
|       | I        | คือ ค่าการดูดกลืนแสง                      |
|       | 0.9      | คือ ค่าคงที่ในการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแป้ง    |
|       | B        | คือ ปริมาณของเหลวทั้งหมดที่ใช้ (ในส่วนใส) |
|       | V        | คือ ปริมาณของเหลวที่ใช้ (ในส่วนตะกอน)     |
|       | A        | คือ น้ำหนักของตัวอย่าง                    |
|       | Dilution | คือ ระดับการเจือจาง                       |

### การทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริก

ในการศึกษาค่าไดอิเล็กตริกของทุเรียนที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละระดับความบริบูรณ์ เนื่องจากค่าไดอิเล็กตริกเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับผลของคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อวัสดุ ในการทดสอบจะดำเนินการดังนี้

1. ศึกษาเทคนิคการวัดค่าไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมต่อการวัดค่าไดอิเล็กตริกของทุเรียนในการทดสอบใช้วิธีโพรบแบบแกนร่วมปลายเปิด (open-ended co-axial probe) จะมีลักษณะเป็นสายส่งผ่านคลื่น (วุฒิไกร และคณะ, 2551) ในการวัดจะจุ่มโพรบเข้าไปในของเหลวหรือสัมผัสผิวหน้าของของแข็ง จากนั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากปลายโพรบจะถูกส่งเข้าไปในวัสดุและเปลี่ยนแปลงเมื่อสัมผัสกับวัสดุทดสอบ จะได้ผลของสัญญาณที่สะท้อนออกมาเป็นความสัมพันธ์กับค่าไดอิเล็กตริก

ในการทดสอบจะต่อโพรบเชื่อมต่อกับ network analyzer ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 8530A ช่วงความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต-8.5 กิกะเฮิร์ต ดังแสดงในภาพ 29 ก่อนทำการวัดจะต้องทำการเทียบมาตรฐาน โดยการวัดกับตัวมาตรฐานคือ อากาศ วงจรไฟฟ้า และน้ำกลั่นที่ไม่มีประจุ หลังจากนั้นต้องมีการเพิ่มการส่งสัญญาณเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัด ซึ่งสิ่งที่ทำให้คลาดเคลื่อนคือ ความสม่ำเสมอของสายวัด ช่องว่างของอากาศและความหนาของตัวอย่าง (Ndife *et al.*, 1998)

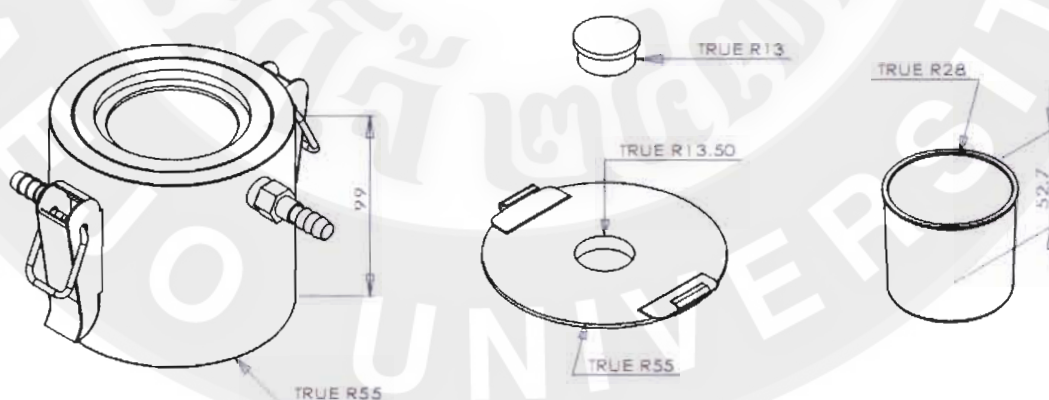


ภาพ 29 ลักษณะโพรบที่ใช้วัดค่าไดอิเล็กตริกของทุเรียน



ภาพ 30 เครื่อง network analyzer ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 8530A

2. ออกแบบอุปกรณ์ของชุดวัดค่าไดอิเล็กตริกดังภาพ 31 โดยจะออกแบบเป็นลักษณะทรงกระบอกสองชั้น ซึ่งได้ดัดแปลงมาจาก Zhang *et al.* (2004) และ Wang *et al.* (2003) เพื่อสามารถใช้น้ำควบคุมอุณหภูมิของเนื้อทุเรียน



ภาพ 31 ส่วนประกอบของชุดวัดค่าไดอิเล็กตริกควบคุมอุณหภูมิน้ำได้

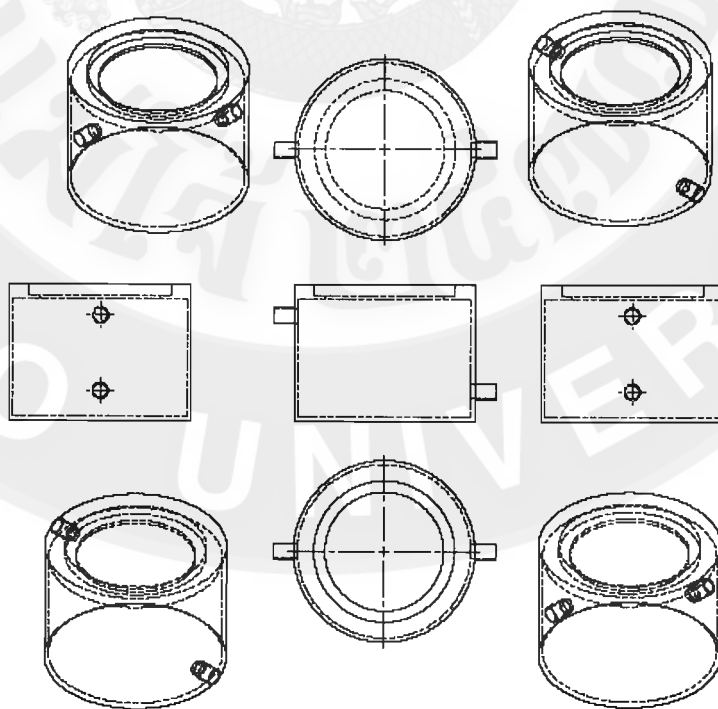
โดยชุดทดสอบวัดค่าไดอิเล็กตริกประกอบด้วย 4 ส่วน คือ

2.1 ภาชนะใส่เนื้อทุเรียน (ภาพ 32) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน (polypropylene) เนื่องจากเป็นพลาสติกซึ่งมีค่า loss tangent ต่ำ สามารถใช้กับอาหารและทนอุณหภูมิได้ระหว่าง 0-90 องศาเซลเซียส



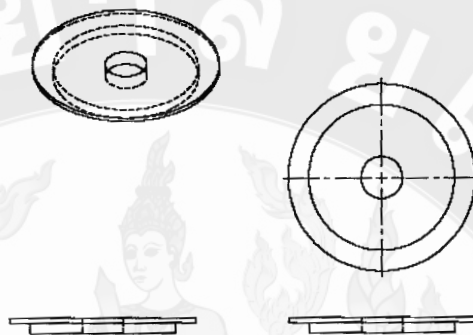
ภาพ 32 ภาชนะพอลิโพรพิลีนสำหรับใส่เนื้อทุเรียนเพื่อวัดค่าไดอิเล็กตริก

2.2 ทรงกระบอกด้านนอก (ภาพ 33) ทำจากสแตนเลสเพื่อควบคุมอุณหภูมิของชั้นทดสอบโดยสามารถต่อท่อน้ำไหลเวียนเข้าออกในทิศทางตรงข้ามกัน



ภาพ 33 ทรงกระบอกสแตนเลสด้านนอกสามารถวัดค่าไดอิเล็กตริกได้

2.3 ฝาปิด (ภาพ 34) เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชั้นทดสอบให้มีความสม่ำเสมอ และช่วยในการปิดล้อมภาชนะใส่ทุเรียนเนื่องจากขณะนำไหลเวียนจะเกิดแรงดันขึ้นมีลักษณะ



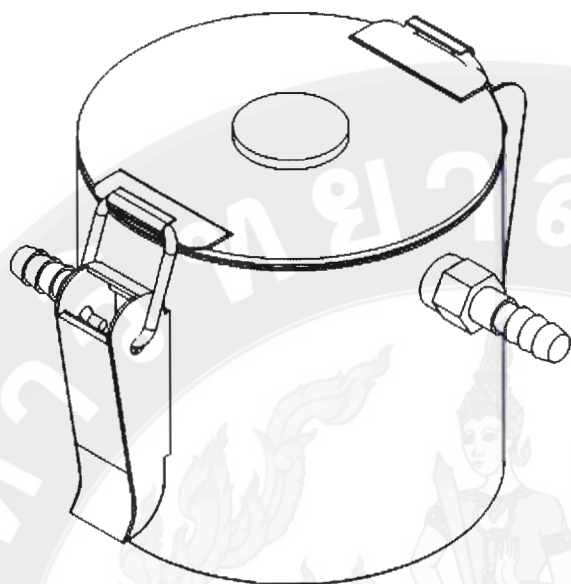
ภาพ 34 ฝาปิดอุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียน

2.4 จุกปิด (ภาพ 35) เพื่อปิดบริเวณชั้นทดสอบก่อนที่จะใช้โพรบวัด เพื่อควบคุมอุณหภูมิของชั้นทดสอบให้มีความสม่ำเสมอ โดยเฉพาะบริเวณที่จะใช้โพรบวัดจะต้องมีอุณหภูมิเท่ากับที่กำหนด มีลักษณะ



ภาพ 35 จุกปิดสำหรับประกอบกับอุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียน

3. เมื่อทำการออกแบบแล้วจึงจัดทำอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามที่ได้ออกแบบโดยเลือกใช้วัสดุเป็นสแตนเลส เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟจะเกิดการสะท้อนเมื่อกระทบกับโลหะและต้องใช้น้ำในการควบคุมอุณหภูมิเป็นการลดปัญหาการเกิดสนิม (ภาพ 36)



ภาพ 36 การประกอบชุดอุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กตริกของทุเรียน

4. ทำการเชื่อมต่อชุดวัดค่าไดอิเล็กตริกกับอ่างควบคุมอุณหภูมิ (ภาพ 37) เพื่อควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่าง ก่อนทำการวัดค่าไดอิเล็กตริกจะต้องตรวจสอบอุณหภูมิของตัวอย่างให้ตรงกับที่ต้องการ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด T วัดอุณหภูมิตัวอย่างเชื่อมกับดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์

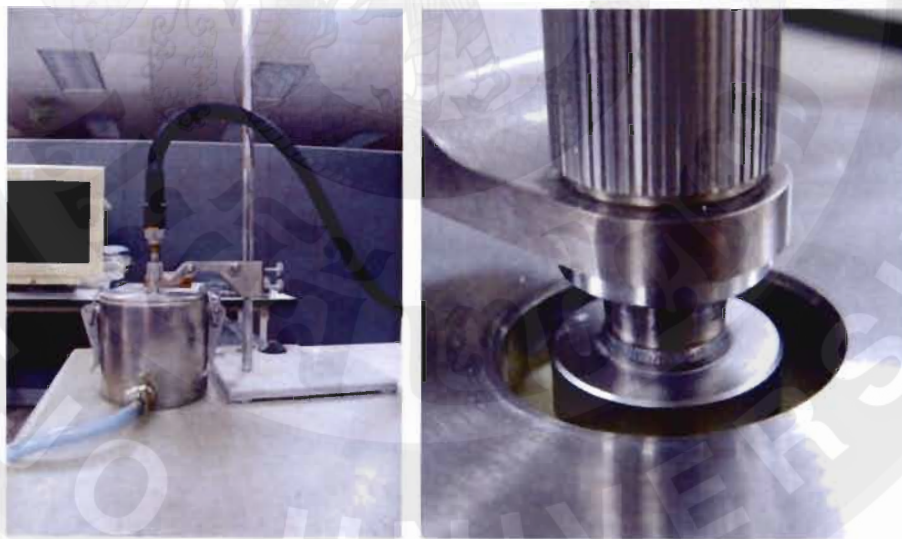


ภาพ 37 การเชื่อมต่อชุดวัดค่าไดอิเล็กตริกกับอ่างควบคุมอุณหภูมิ



ภาพ 38 การตรวจสอบอุณหภูมิของตัวอย่างเนื้อทุเรียนก่อนการวัดค่าไดอิเล็กตริก

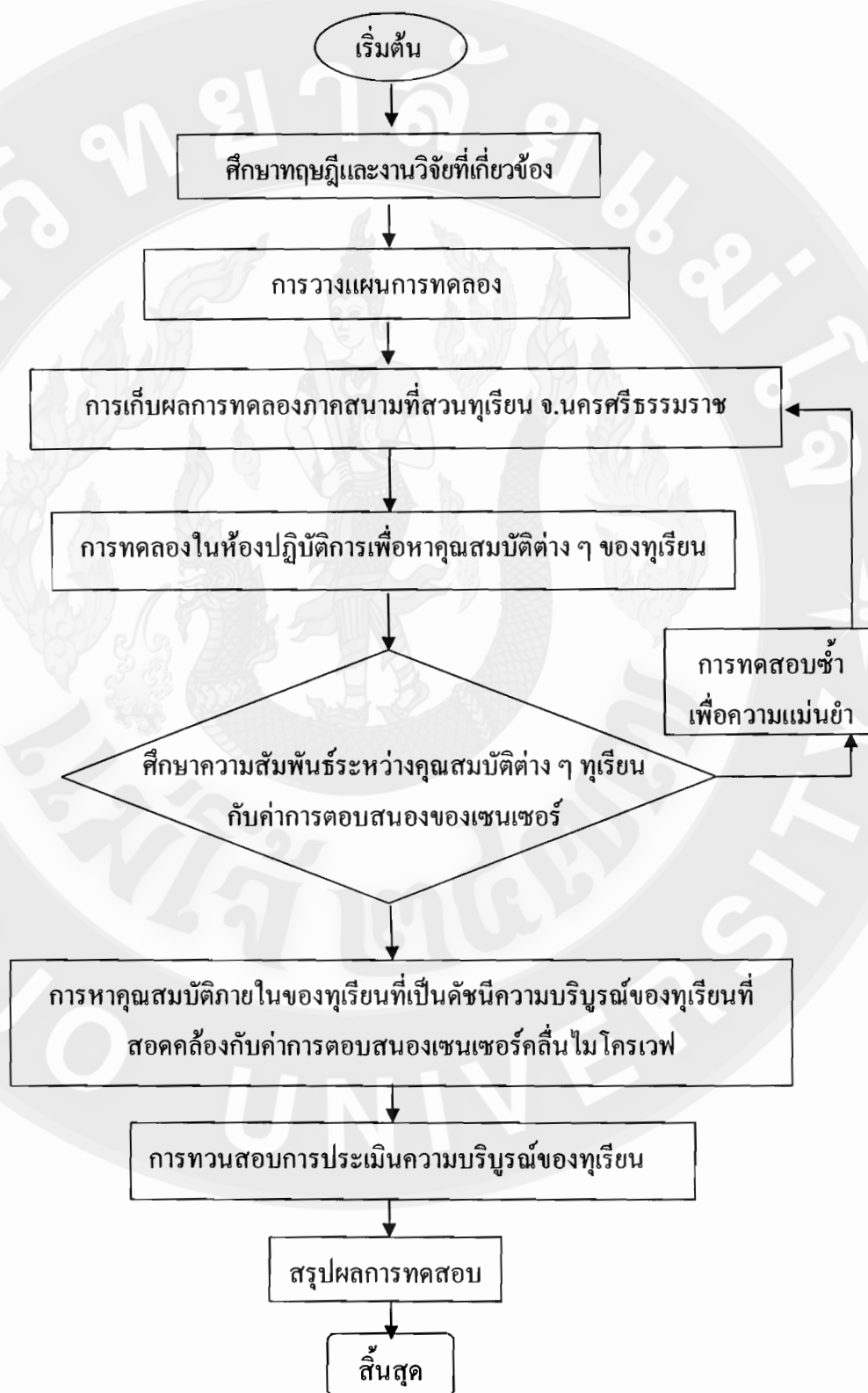
5. ทำการทดสอบวัดค่าไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิ 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ 2-3 กิโลเฮิร์ตซ์ (ภาพ 39)



ภาพ 39 การวัดค่าไดอิเล็กตริกของตัวอย่างเนื้อทุเรียน

ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ สามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังแผนภูมิการดำเนินงานดังภาพ 40

### แผนภูมิการดำเนินงาน



ภาพ 40 แผนผังการดำเนินงาน

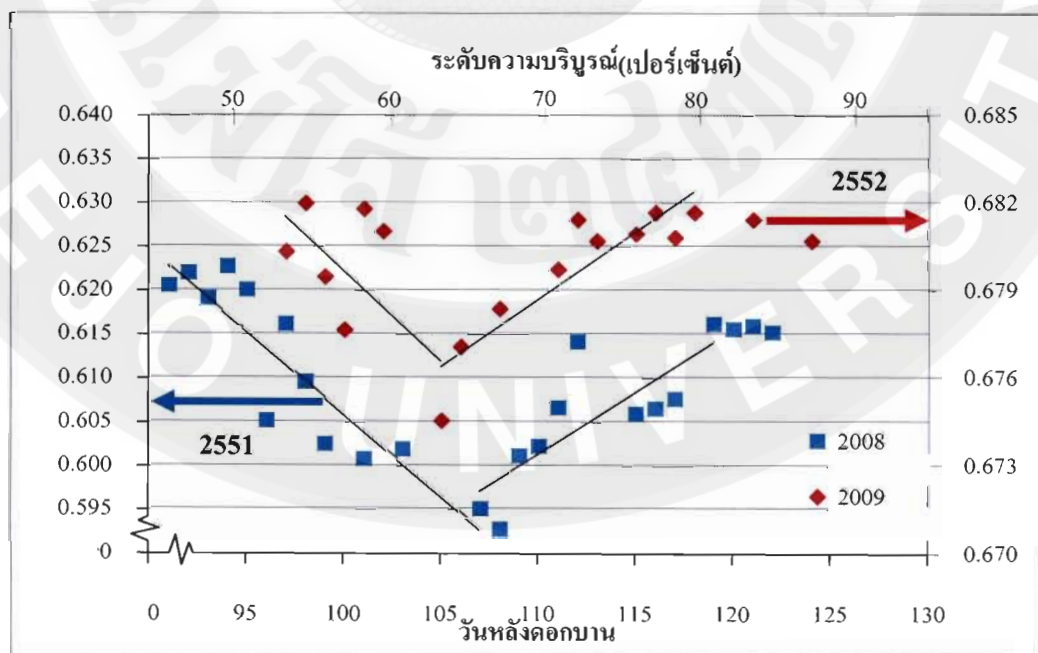
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิจารณ์

เมื่อทำการทดสอบตามแผนการทดลองในการหาดัชนีความบริบูรณ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง จะได้ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลประกอบด้วยผลการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ สมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง ค่าไดอิเล็กตริก รวมถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความบริบูรณ์กับค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ สมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง และค่าไดอิเล็กตริก

#### ผลการตอบสนองของเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ

ในการหาค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟได้ทำการทดลองซ้ำเป็นเวลา 2 ฤดูกาล คือ พ.ศ.2551 และ พ.ศ.2552 โดยการทดลองจะทำการติดตั้งเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับผลทุเรียนบนต้น และทำการบันทึกผลในแต่ละวัน จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel™ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังภาพ 41



ภาพ 41 ค่าตอบสนองของคลื่นไมโครเวฟที่ติดกับผลทุเรียนเทียบกับจำนวนวันหลังดอกบานและระดับความบริบูรณ์ของทุเรียน

จากผลของค่าเฉลี่ยของการตอบสนองเซนเซอร์จะพบว่าค่าการตอบสนองมีความสัมพันธ์กับความบริสุทธิ์ของทุเรียน มีค่าอยู่ในช่วง 0.595-0.623 โดยแบ่งเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกประมาณวันที่ 90-103 วันหลังดอกบาน พบว่าค่ามีแนวโน้มลดลง หลังจากนั้นแนวโน้มเพิ่มขึ้นประมาณวันที่ 103-115 วันหลังดอกบาน หลังจากนั้นค่าการตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่

เมื่อเปรียบเทียบผลของค่าการตอบสนองของเซนเซอร์ในการทดสอบทั้งสองครั้ง พบว่ามีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน มีจุดผกผันที่สามารถแสดงความบริสุทธิ์ของทุเรียนได้ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 65-70 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าของการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟที่ได้ของผลทั้งสองฤดูกาลจะมีความแตกต่างกัน เนื่องจากการทดสอบในปีที่ต่างกัน ซึ่งสภาพแวดล้อมของสวนทุเรียนที่เก็บข้อมูลก็มีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่จะมีความแปรปรวนในแต่ละวัน ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าการตอบสนองจากเซนเซอร์ เพราะในการติดตั้งเซนเซอร์จะเป็นการติดกับผลทุเรียนภายนอก เมื่ออุณหภูมิและความชื้นของอากาศรอบ ๆ มีการเปลี่ยนแปลงก็อาจส่งผลให้ค่าที่ได้มี นอกจากสภาพแวดล้อมยังมีผลต่อการเจริญของทุเรียน เช่น อุณหภูมิในช่วงประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศประมาณ 75-85 เปอร์เซ็นต์จะเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญของทุเรียน หรืออาจเป็นผลจากวิธีการดูแลทุเรียน เช่น การให้น้ำ ตำแหน่งของผลที่ได้รับแสง ดังนั้นจากปัจจัยต่าง ๆ จึงอาจส่งผลให้ค่าที่ได้ของการตรวจสอบซ้ำมีความแตกต่างกัน

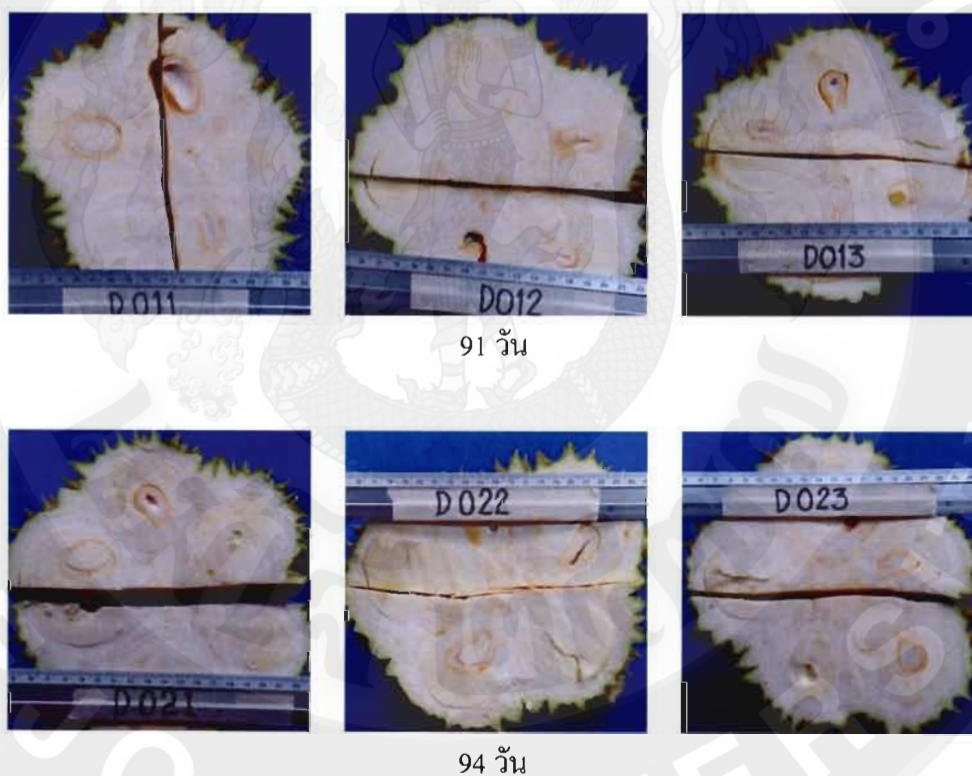
เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Kalayanamitra (2005) ซึ่งแบ่งระดับความบริสุทธิ์ของทุเรียนเป็น 50, 60, 70, 80 และ 90 เปอร์เซ็นต์ จะพบว่าจะมีความแตกต่างของระยะวันหลังดอกบานประมาณ 10 วัน ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากการนับระยะวันดอกบานของทุเรียนในแต่ละฤดูกาล และทุเรียนที่ใช้ทำการทดสอบมาจากแหล่งที่ต่างกัน โดยจากงานวิจัยของ Kalayanamitra (2005) ใช้ทุเรียนจากจังหวัดจันทบุรีซึ่งมีภูมิอากาศแบบร้อนชื้น มีฝนตกอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจส่งผลให้ทุเรียนพัฒนาให้แก่ช้ากว่าเมื่อเทียบกับแหล่งที่มาของทุเรียนในงานวิจัยนี้ที่ใช้ทุเรียนจากจังหวัดนครศรีธรรมราชซึ่งมีภูมิอากาศที่แตกต่างกันคือมีอุณหภูมิสูง (32 องศาเซลเซียส) ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (62 เปอร์เซ็นต์) และมีฝนตกน้อย (2791 มิลลิเมตร) (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2552) ในช่วงที่ทำการทดสอบ จึงทำให้ระยะเวลาในการพัฒนาของผลทุเรียนแตกต่างกัน

จากภาพ 43 จะให้เห็นได้ว่าจุดผกผันของค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟสามารถแสดงดัชนีความบริสุทธิ์ของทุเรียนจะอยู่ในช่วงประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นความบริสุทธิ์ของทุเรียนที่ระดับต่ำสุดสามารถจำหน่ายต่างประเทศโดยขนส่งทางเรือ สามารถสุกได้ใน 7-10 วันแล้วมีรสชาติยอมรับได้ (กัลย์, 2540) ดังนั้นเพื่อให้การประเมินความบริสุทธิ์มี

ความสอดคล้องกับคุณภาพของทุเรียนจึงต้องวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และเคมีต่อไป

### การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเปลือกและเนื้อทุเรียน

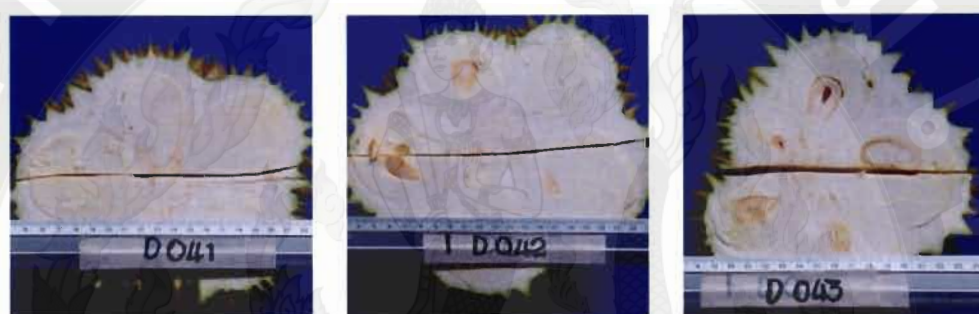
ในการศึกษาเปรียบเทียบการเจริญและพัฒนาของผลทุเรียน จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของเนื้อและเปลือกจากภาพถ่ายของทุเรียนที่มีลักษณะใกล้เคียงกับผลที่ติดเซนเซอร์ ดังภาพที่ 42 เนื่องจากเมื่อทุเรียนมีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้นจะมีการพัฒนาของเมล็ด เนื้อ และเปลือก



ภาพ 42 ภาพตัดขวางของทุเรียนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลทุเรียนที่ติดเซนเซอร์ไมโครเวฟ ของปี พ.ศ. 2551



97 วัน



100 วัน

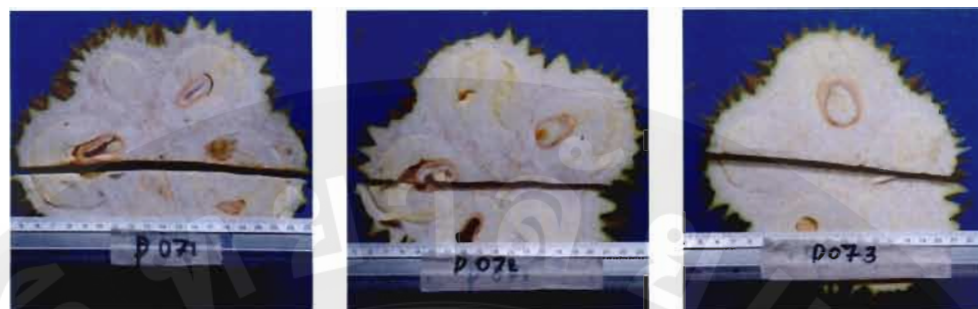


103 วัน



106 วัน

ภาพ 42 (ต่อ) ภาพตัดขวางของทุเรียนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลทุเรียนที่ติดเซนเซอร์ไมโครเวฟ ของ  
ปี พ.ศ. 2551



109 วัน



112 วัน



115 วัน



118 วัน

ภาพ 42 (ต่อ) ภาพตัดขวางของทุเรียนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลทุเรียนที่ติดเซนเซอร์ไมโครเวฟ ของ  
ปี พ.ศ. 2551

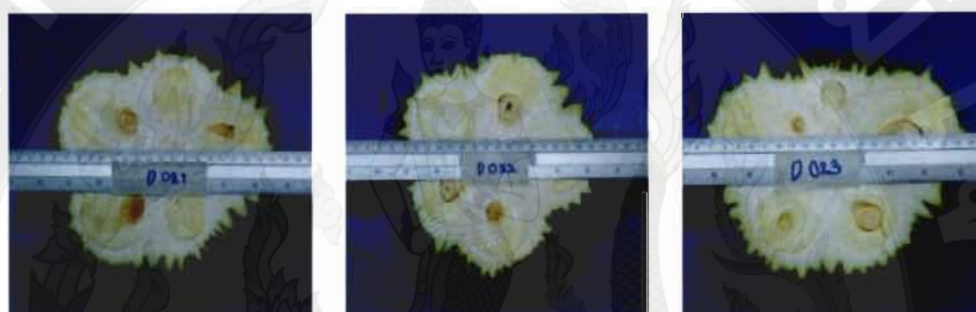
ภาพ 42 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของผลทุเรียนที่มีอายุหลังดอกบานใกล้เคียงกับผลทุเรียนที่ติดเซ็นเซอร์คลื่นไมโครเวฟ เมื่อสังเกตในการตัดแนวขวาง การเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพของเนื้อทุเรียน จะสังเกตเห็นว่าไม่มีการขยายของส่วนเนื้อทุเรียน เนื่องจากเป็นช่วงที่ทุเรียนพัฒนาไปสู่ระยะการแก่ โดยตั้งแต่วันที่ 106 ของวันหลังดอกบาน ผลทุเรียนจะเริ่มปรากฏโพรงอากาศเล็กน้อยเนื่องจากเนื้อทุเรียนเกิดการหดตัวแล้วเริ่มมีการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองอ่อน หลังจากนั้นก็มีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนวันเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับเมล็ดที่เริ่มมีการพัฒนาจากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้น ผลทุเรียนจะแก่เต็มที่อยู่เห็นได้ชัดคือตั้งแต่วันที่ 115 ของวันดอกบานเนื่องจากสังเกตได้ว่าเนื้อทุเรียนมีสีเหลืองและมีโพรงอากาศเกิดขึ้นอย่างชัดเจน

จากภาพตัดแนวขวางพบว่าขนาดของเนื้อมีการขยายตัวใกล้เคียงกัน และเปลือกมีความหนาอยู่ประมาณ 2-3 เซนติเมตร โดยไม่มีการเพิ่มความหนาของเปลือกเนื่องจากทุเรียนอยู่ในระยะพัฒนาไปสู่การแก่ จึงสังเกตได้จากสีของเปลือกที่ปลายหนามเริ่มเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นผลของปริมาณความชื้นในเปลือกที่เปลี่ยนแปลงไป

ดังนั้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบให้แม่นยำมากขึ้น จึงได้ทำการเก็บผลการทดสอบซ้ำ โดยเก็บผลการทดสอบในลักษณะเดียวกันโดยใช้ทุเรียนในสวนเดียวกัน ในปี พ.ศ. 2552 โดยการถ่ายภาพเช่นเดียวกัน จะได้ผลดังภาพ 43



94 วัน



97 วัน



100 วัน



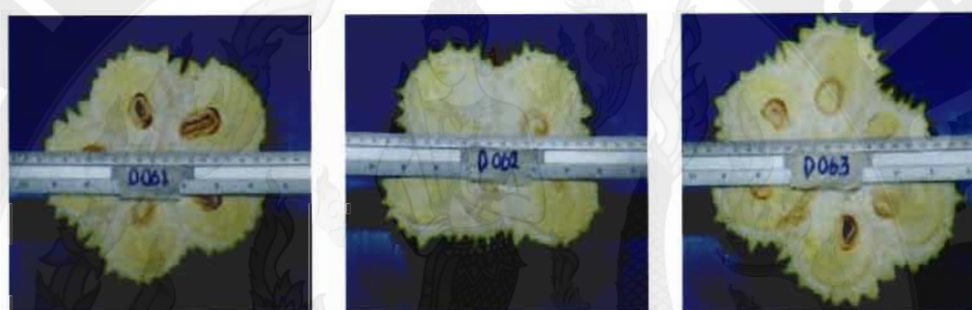
103 วัน

ภาพ 43 ภาพตัดขวางของทุเรียนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลทุเรียนที่ติดเซนเซอร์ไมโครเวฟ ของปี

พ.ศ. 2552



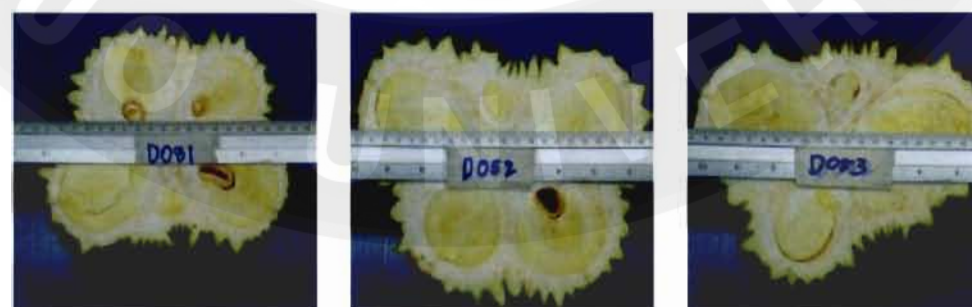
106 วัน



109 วัน



112 วัน



115 วัน

ภาพ 43 (ต่อ) ภาพตัดขวางของทุเรียนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลทุเรียนที่ติดเซนเซอร์ไมโครเวฟ ของ  
ปี พ.ศ. 2552



118 วัน



121 วัน

ภาพ 43 (ต่อ) ภาพตัดขวางของทุเรียนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลทุเรียนที่ติดเซนเซอร์ไมโครเวฟ ของ ปี พ.ศ. 2552

เมื่อเปรียบเทียบภาพถ่ายของทุเรียนของการทดสอบทั้งสองครั้งจะพบว่าผลทุเรียน ที่ระยะประมาณวันที่ 103-106 วันหลังดอกบาน มีลักษณะของเนื้อที่สอดคล้องกันดังภาพที่ 44 คือมี การเจริญเต็มที่และมีสีเหลืองอ่อนที่สามารถสังเกตเห็นได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการ ตอบสนองเซนเซอร์พบว่าผลทุเรียนในช่วงดังกล่าวจะมีระดับความบริบูรณ์ประมาณ 65-70 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสอดคล้องกับจุดผกผันของค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ



ก

ข

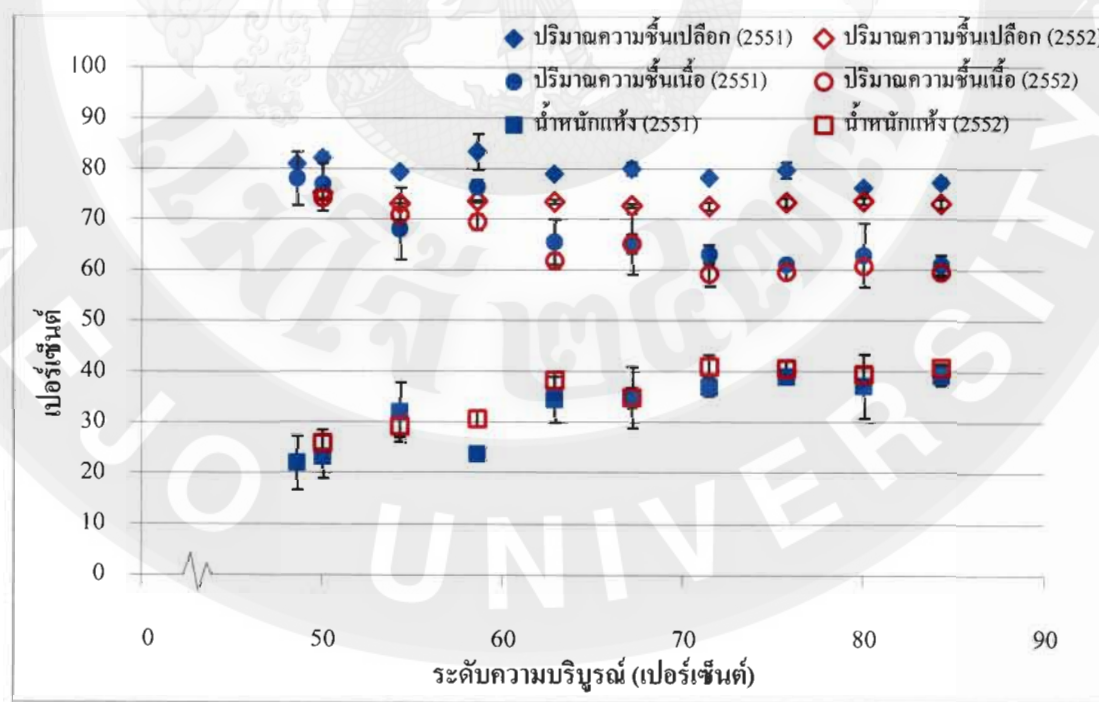
ภาพ 44 การเปรียบเทียบภาพถ่ายตัดขวางทุเรียน วันที่ 106 (2551) และ 103 (2552) วัน หลังดอกบาน

ผลจากภาพถ่ายตัดขวางของทุเรียนพบว่าวิธีการนับวันหลังดอกบานจะทำให้ได้ผลที่คลาดเคลื่อน คือทุเรียนที่มีความสมบูรณ์เท่ากัน อาจมีระยะวันดอกบานไม่เท่ากัน เนื่องจากผลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น สภาพแวดล้อมของสวนทุเรียนที่ทำให้ทุเรียนเจริญและพัฒนาต่างกัน ตำแหน่งของผลบนต้น เป็นต้น ดังนั้นการตรวจสอบความสมบูรณ์ของผลทุเรียนด้วยวิธีการนับดอกบานอาจจะไม่สามารถได้ผลที่มีความแม่นยำและถูกต้องได้ จึงต้องมีการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับความสมบูรณ์ในลำดับต่อไป

### การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี

#### การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในเปลือกและเนื้อทุเรียน

เมื่อนำตัวอย่างผลทุเรียนที่มีขนาดใกล้เคียงกับผลที่ติดเซนเซอร์ ทดสอบหาปริมาณความชื้นและร้อยละน้ำหนักแห้ง โดยการอบไล่ความชื้นจนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงจะได้ผลการทดสอบดังภาพ 45

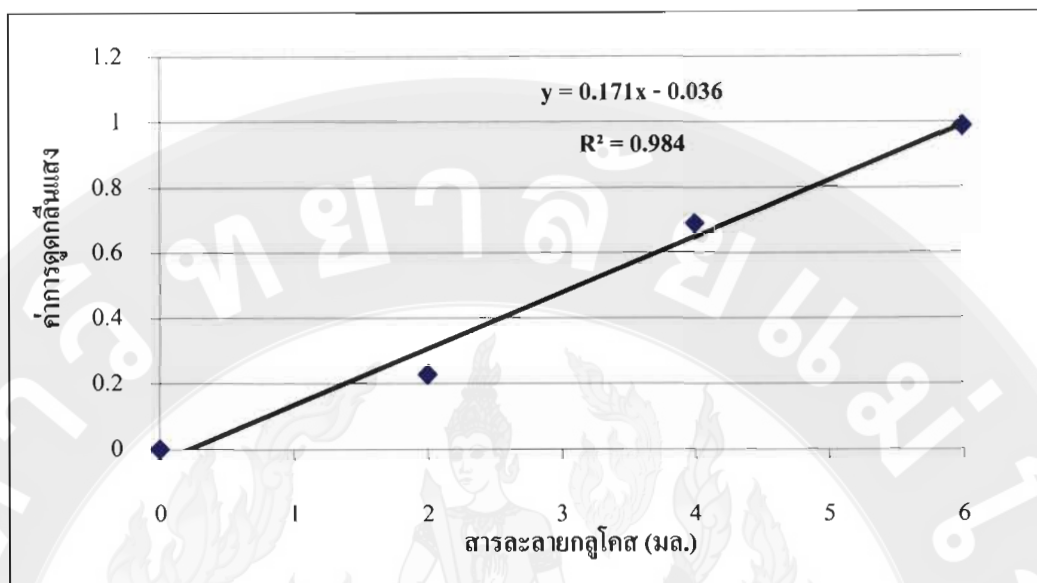


ภาพ 45 การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นในเปลือกและเนื้อทุเรียนที่ระดับความสมบูรณ์ต่าง ๆ

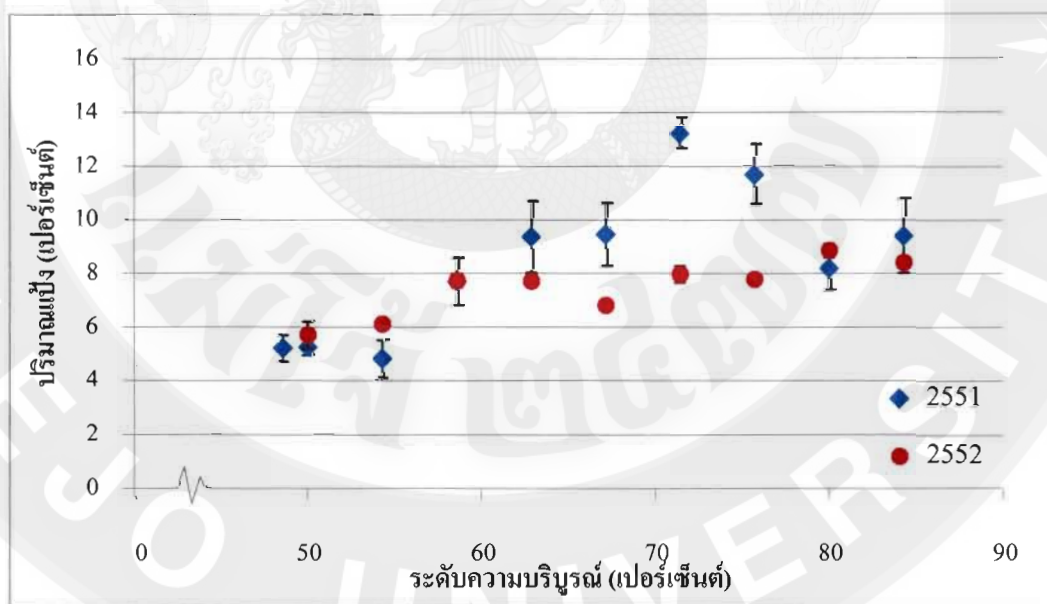
จากผลของปริมาณความชื้นในผลทุเรียนจะพบว่าเนื้อทุเรียนมีความชื้นอยู่ในช่วง 60-78 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปลือก และเปลือกมีความชื้นอยู่ในช่วง 76-83 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปลือก จึงเห็นได้ว่าความชื้นของเปลือกจะมีค่าสูงกว่าเนื้อทุเรียนและมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความบริบูรณ์เพิ่มขึ้น ส่วนความชื้นของเนื้อทุเรียนจะมีแนวโน้มลดลงเป็นส่วนผกผันกับค่าน้ำหนักแห้ง โดยน้ำหนักแห้งของเนื้อทุเรียนมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 22-41 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นปริมาณความชื้นของเปลือกจึงเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความบริบูรณ์น้อยกว่าปริมาณความชื้นของเนื้อทุเรียนและปริมาณน้ำหนักแห้ง เนื่องจากเนื้อทุเรียนมีความบริบูรณ์เพิ่มขึ้นจะมีส่วนประกอบที่เป็นมวลแห้งเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบจะพบว่าทุเรียนที่มีความบริบูรณ์ประมาณ 65-70 เปอร์เซ็นต์ มีค่าน้ำหนักแห้งมากกว่า 32 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ ทุเรียนพันธุ์หมอนทองจะต้องมีค่าร้อยละน้ำหนักแห้งขั้นต่ำเท่ากับ 32 ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าทุเรียนที่ระดับประมาณ 65-70 เปอร์เซ็นต์ สามารถที่จะเก็บเกี่ยวได้และมีรสชาติหลังการสุกเป็นที่ยอมรับได้

#### การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และแป้งของเนื้อทุเรียน

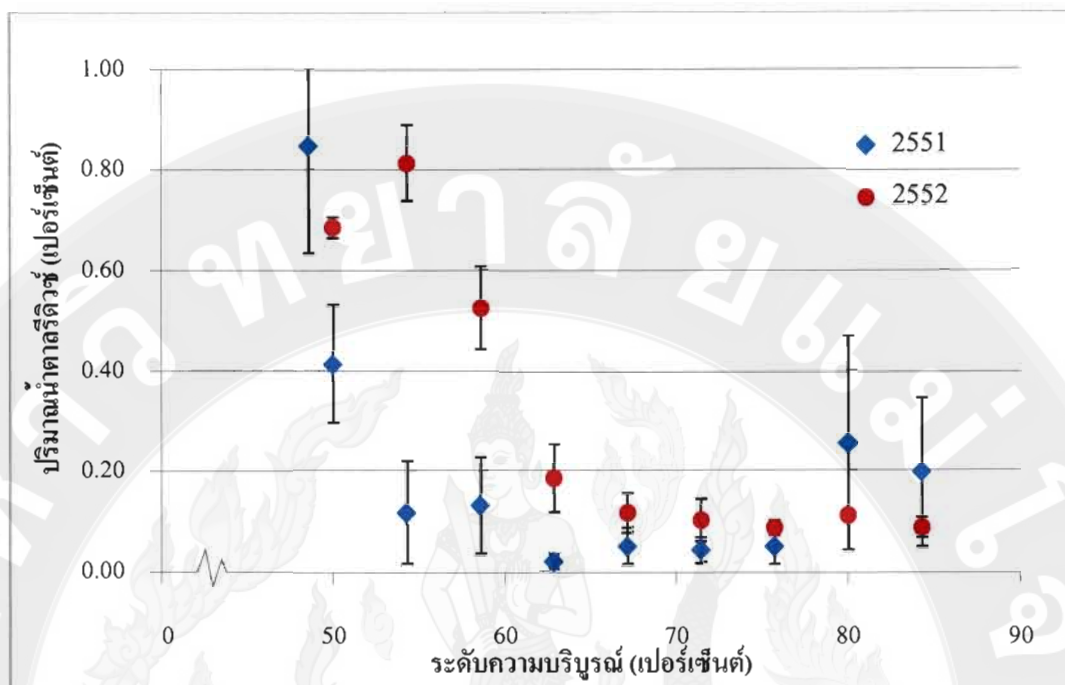
ในการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และแป้งของเนื้อทุเรียน ได้ทำการทดสอบโดยการนำตัวอย่างผลทุเรียนที่มีขนาดและอายุหลังดอกบานใกล้เคียงกับผลที่ติดเซนเซอร์มาตรวจสอบ ซึ่งในการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และแป้งในเนื้อทุเรียนจะทำการอ้างอิงมาตรฐานของการดูดกลืนแสงของสารละลายกลูโคส หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบหาปริมาณแป้งและน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธี DNS-method จะพบว่าปริมาณแป้งของเนื้อทุเรียนมีค่าอยู่ในช่วง 4.8-13.2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าอยู่ในช่วง 0.02-0.84 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกัลย์ (2540) ปริมาณแป้งจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นผกผันกับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นปริมาณแป้งจึงอาจจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติภายในของทุเรียนมากกว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์



ภาพ 46 กราฟอ้างอิงมาตรฐานค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายกลูโคส



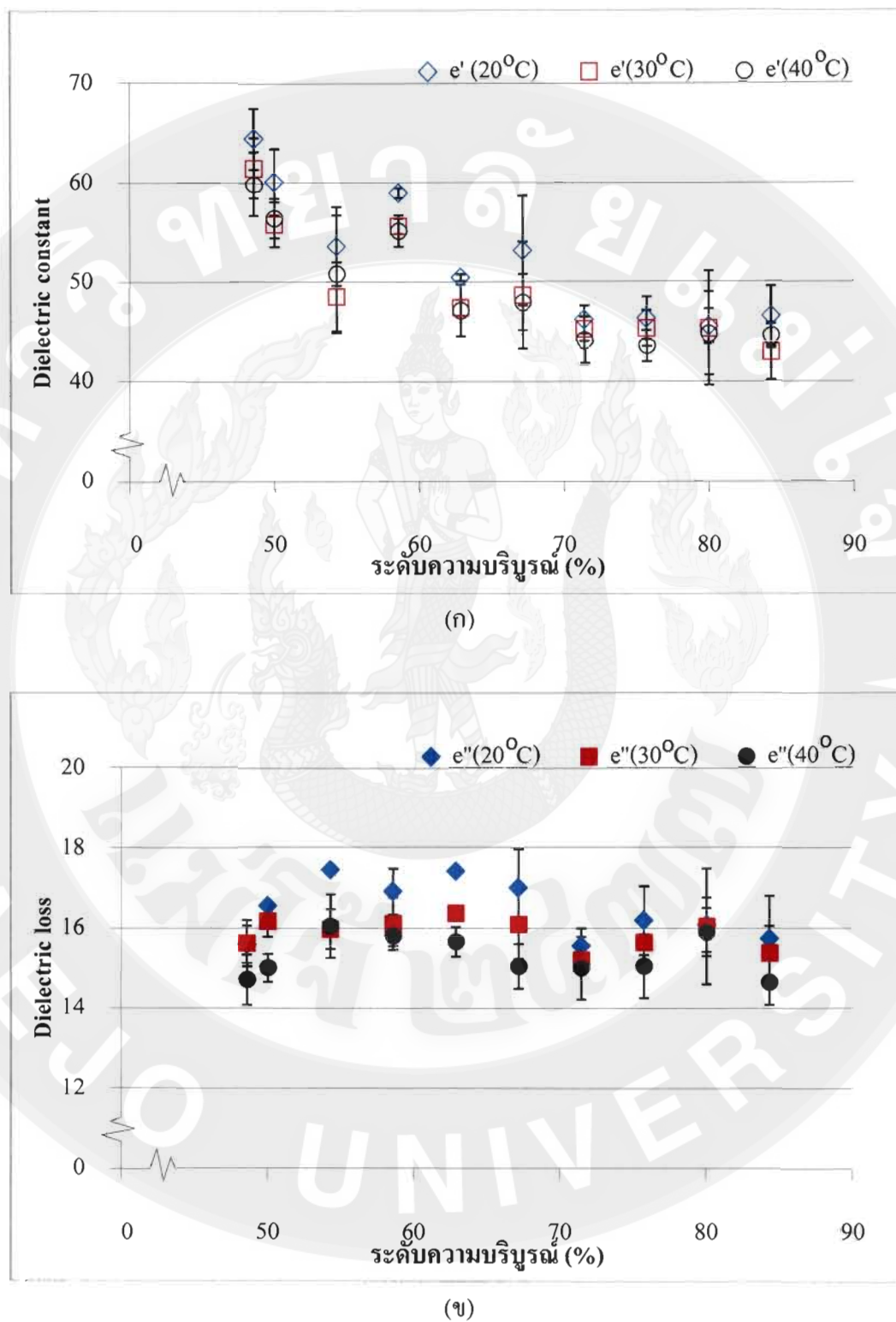
ภาพ 47 ปริมาณ팽ในเนื้อเยื่อที่ระดับความบริบูรณ์ต่างๆ



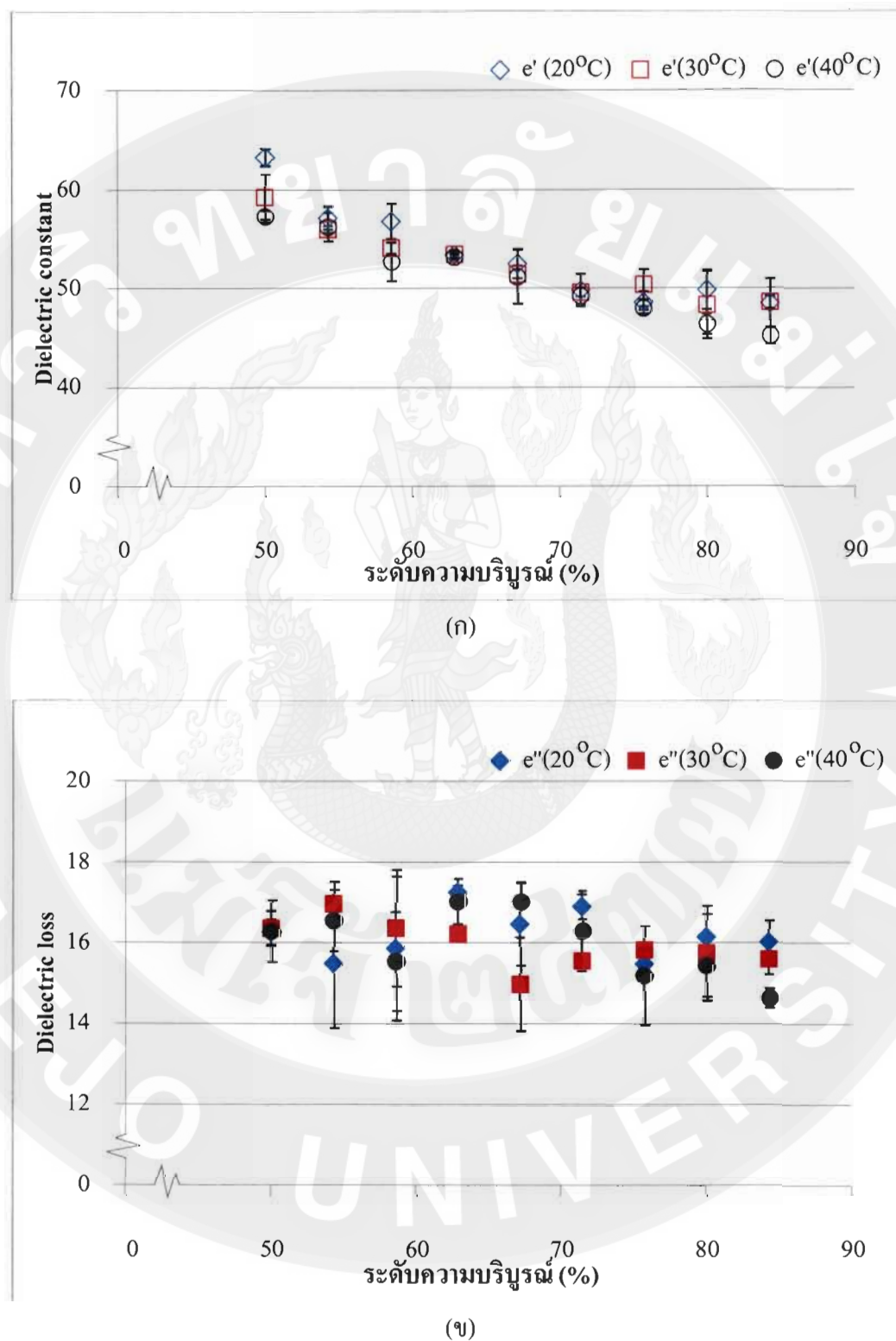
ภาพ 48 ปริมาณน้ำตาดริวซ์ในเนื้อทุเรียนที่ระดับความบริบูรณ์ต่าง ๆ

### สมบัติไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียน

จากการวัดค่าไดอิเล็กตริกของทุเรียนที่อุณหภูมิ 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส จะพบว่าค่า dielectric constant ( $\epsilon'$ ) มีค่าอยู่ในช่วง 43.1-64.4 โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อความบริบูรณ์ของทุเรียนเพิ่มขึ้น ซึ่งแนวโน้มจะสอดคล้องกับปริมาณความชื้น ส่วนค่า dielectric loss ( $\epsilon''$ ) 14.6-17.4 มีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างคงที่ จึงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลน้อยกว่าค่า dielectric constant แสดงว่าค่า dielectric constant เป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นมากกว่าค่า dielectric loss ซึ่งอาจจะสอดคล้องกับความบริบูรณ์ของทุเรียนได้

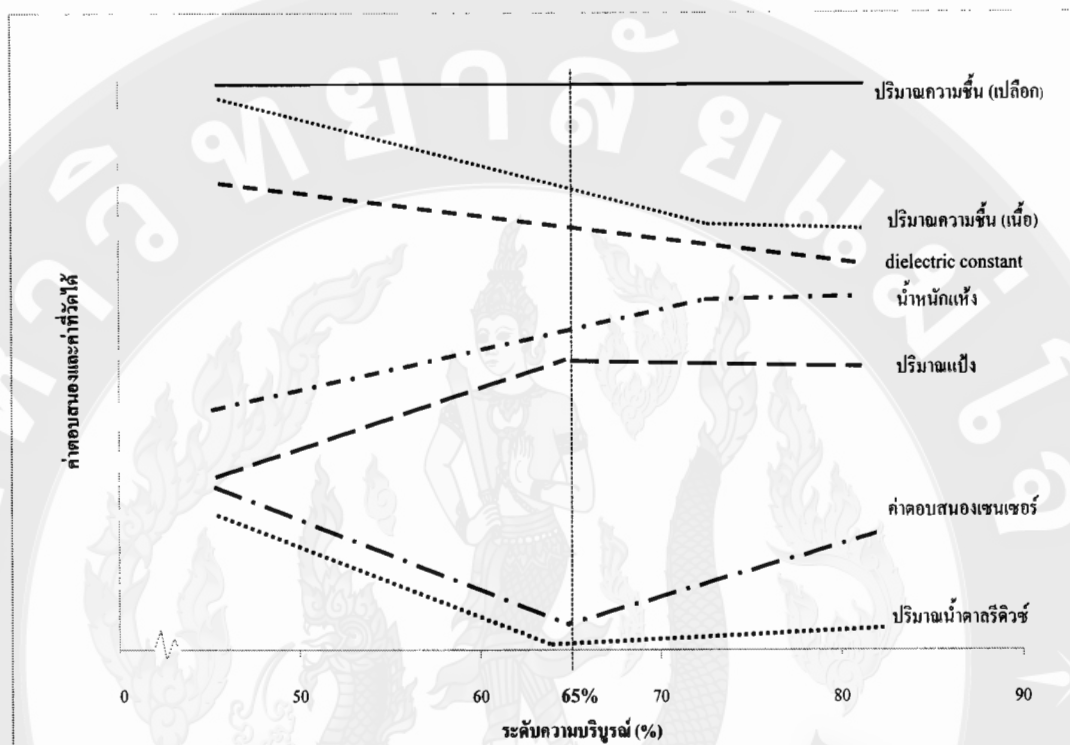


ภาพ 49 ค่า ก) dielectric constant และ ข) dielectric loss ของทุเรียนที่ระดับความชื้นต่าง ๆ ในการเก็บข้อมูล ปี พ.ศ. 2551



ภาพ 50 ค่า ก) dielectric constant และ ข) dielectric loss ของทุเรียนที่ระดับความบริบูรณ์ต่าง ๆ ในการเก็บข้อมูล ปี พ.ศ. 2552

### ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์ คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี และค่าไดอิเล็กตริก



ภาพ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์ คุณสมบัติทางกายภาพ-เคมี ค่าไดอิเล็กตริก กับความบวมของทุเรียนพันธุ์หมอนทอง

จากภาพ 51 พบว่าค่าการตอบสนองของเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟจะมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และผกผันกับปริมาณแป้ง ส่วนค่า dielectric constant มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความชื้น โดยจุดผกผันของค่าตอบสนองเซนเซอร์สามารถแสดงดัชนีความบวมของทุเรียนประมาณ 65-70 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นจุดผกผันดังกล่าวผลทุเรียนยังมีค่าน้ำหนักแห้งมากกว่า 32 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าปริมาณความชื้นและน้ำหนักแห้งของเนื้อทุเรียนเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า dielectric constant ซึ่งปริมาณความชื้นและน้ำหนักแห้งจึงเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความบวมของทุเรียน ซึ่งหมายความว่าเมื่อทุเรียนมีความบวมน้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ จะมีการสะสมแป้งเพิ่มมากขึ้น และมีความชื้นลดลงทำให้มีค่าน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า dielectric constant ลดลง เมื่อทุเรียนมีความบวมมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ อาจจะมีการเปลี่ยนแป้งบางส่วนไปเป็นน้ำตาล และส่งผลต่อค่า dielectric constant ดังนั้นค่าไดอิเล็กตริกจึงมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนมากกว่าค่าการ

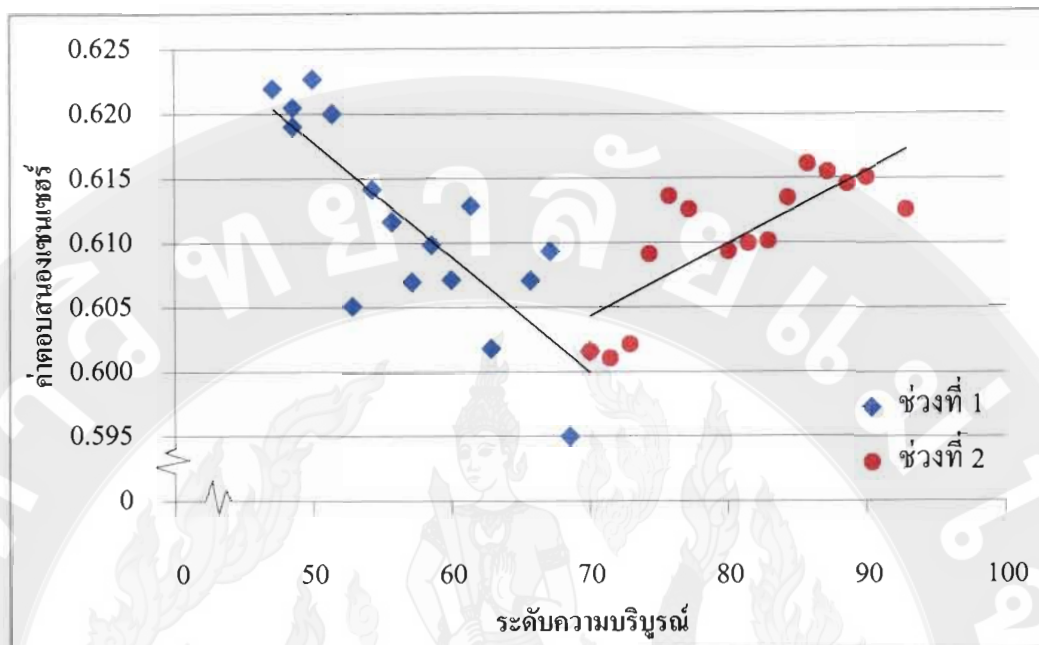
ตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ โดยที่ค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟสามารถแสดงดัชนีความบริสุทธิ์ของทุเรียนที่ระยะต่าง ๆ เท่านั้น ยังไม่สามารถสรุปได้ว่ามีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณน้ำหนักรากแห้ง แป้ง น้ำตาลรีดิวซ์และค่าไดออกไซด์รีดิวซ์ของทุเรียนโดยตรง เนื่องจากความสัมพันธ์เหล่านั้นยังแสดงผลสอดคล้องกับค่าตอบสนองของเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ

### การวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการถดถอย

ในการหาดัชนีความบริสุทธิ์ของทุเรียนหลังจากที่ได้ตรวจสอบค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ สมบัติทางกายภาพ-เคมี และค่าไดออกไซด์รีดิวซ์ พบว่าค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟสามารถแสดงระดับความบริสุทธิ์ที่เหมาะสมได้ แต่ไม่ได้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียน ในขณะที่เดียวกันค่าไดออกไซด์รีดิวซ์มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนมากกว่าค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นเพื่อเป็นการหาความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงได้ใช้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีสหสัมพันธ์และการถดถอย

### ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับระดับความบริสุทธิ์

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าการตอบสนองเซนเซอร์สามารถระบุระดับความบริสุทธิ์ได้ โดยจากผลการทดสอบจะพบว่าค่าการตอบสนองจะมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นระดับความบริสุทธิ์น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ และช่วงที่สองเป็นระดับตั้งแต่ 70 เปอร์เซ็นต์ แต่จากผลการทดสอบทั้งสองซ้ำจะมีค่าการตอบสนองเซนเซอร์ที่แตกต่างกัน โดยในผลการทดสอบปี พ.ศ. 2552 จะมีค่าสูงกว่าผลการทดสอบปี พ.ศ. 2551 จึงต้องมีการหาค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้งสองครั้ง โดยใช้ผลการทดสอบในปี พ.ศ. 2551 เป็นมาตรฐานในการวิเคราะห์ เนื่องจากผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของโมนินย และคณะ (2551) จะมีความสัมพันธ์ ดังภาพ 52

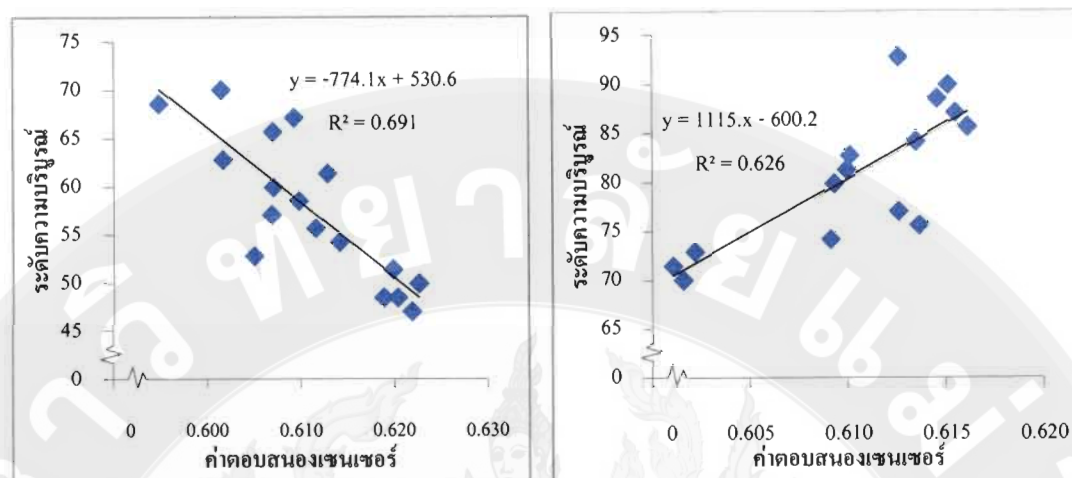


ภาพ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟเฉลี่ยกับระดับความบริบูรณ์

ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายระดับความบริบูรณ์ของทุเรียน (Y) โดยใช้ความสัมพันธ์กับค่าตอบสนองเซนเซอร์ (X) จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ช่วง ดังตาราง 6

ตาราง 6 แบบจำลองการทำนายระดับความบริบูรณ์ของทุเรียน

| ช่วงความบริบูรณ์        | แบบจำลอง                  | สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ | $Y = -774.133X + 530.525$ | 0.691                             |
| มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์  | $Y = 1115.222X - 599.848$ | 0.626                             |



ภาพ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่น ไมโครเวฟและระดับความบริสุทธิ์ ช่วงที่ 1 (ก) และช่วงที่ 2 (ข)

จากภาพ 53 พบว่าค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่น ไมโครเวฟจะมีความสัมพันธ์กับระดับความบริสุทธิ์ในช่วงระดับความบริสุทธิ์น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์มากกว่าช่วงระดับความบริสุทธิ์มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ โดยพิจารณาจากค่า  $R^2$  จึงแสดงให้เห็นว่าค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟมีความสัมพันธ์กับระดับความบริสุทธิ์ของทุเรียนที่เปลี่ยนแปลงไป และสามารถนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้ในการทำนายระยะการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมได้หลังจากที่ทำการสอบเทียบต่อไป

#### ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียน

จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า dielectric constant ซึ่งค่าความชื้นและน้ำหนักแห้งมีความสัมพันธ์กับค่าความบริสุทธิ์ของทุเรียน ซึ่งหมายถึงเมื่อทุเรียนมีความบริสุทธิ์น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ จะมีการสะสมแป้งเพิ่มมากขึ้น และมีความชื้นลดลง ทำให้มีค่าน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า dielectric constant ลดลง เมื่อทุเรียนมีความบริสุทธิ์มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ อาจจะมีการเปลี่ยนแป้งบางส่วนไปเป็นน้ำตาล และส่งผลต่อค่า dielectric constant

ดังนั้นในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของค่าไดอิเล็กตริก (Y) กับสมบัติทางกายภาพ-เคมี ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณความชื้น น้ำหนักแห้ง ปริมาณแป้งและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ จะได้ดังตาราง 7

**ตาราง 7** แบบจำลองความสัมพันธ์ของค่าไดอิเล็กตริกเฉลี่ยกับสมบัติทางกายภาพ-เคมี

| ตัวแปร (X)                | แบบจำลอง               | สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) |
|---------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| ปริมาณความชื้นเฉลี่ย      | $Y = 1.317X - 41.372$  | 0.945                             |
| น้ำหนักแห้งเฉลี่ย         | $Y = -0.806X + 78.639$ | 0.976                             |
| ปริมาณแป้งเฉลี่ย          | $Y = 18.878X + 46.528$ | 0.822                             |
| ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เฉลี่ย | $Y = -2.521X + 71.623$ | 0.744                             |

จากตารางจะพบว่าค่าไดอิเล็กตริกจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำหนักแห้งมากที่สุด รองลงมาคือ ปริมาณความชื้น ปริมาณแป้งและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ตามลำดับ โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.976, 0.945, 0.822 และ 0.744 ตามลำดับ

#### ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียน และค่าไดอิเล็กตริก

เนื่องจากในระหว่างการเจริญของทุเรียนจะมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมี ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าไดอิเล็กตริก ในขณะเดียวกันจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟมีการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ (Y) กับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนและค่าไดอิเล็กตริกจะได้ดังตารางที่ 8

**ตาราง 8** แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียน และค่าไดอิเล็กตริก

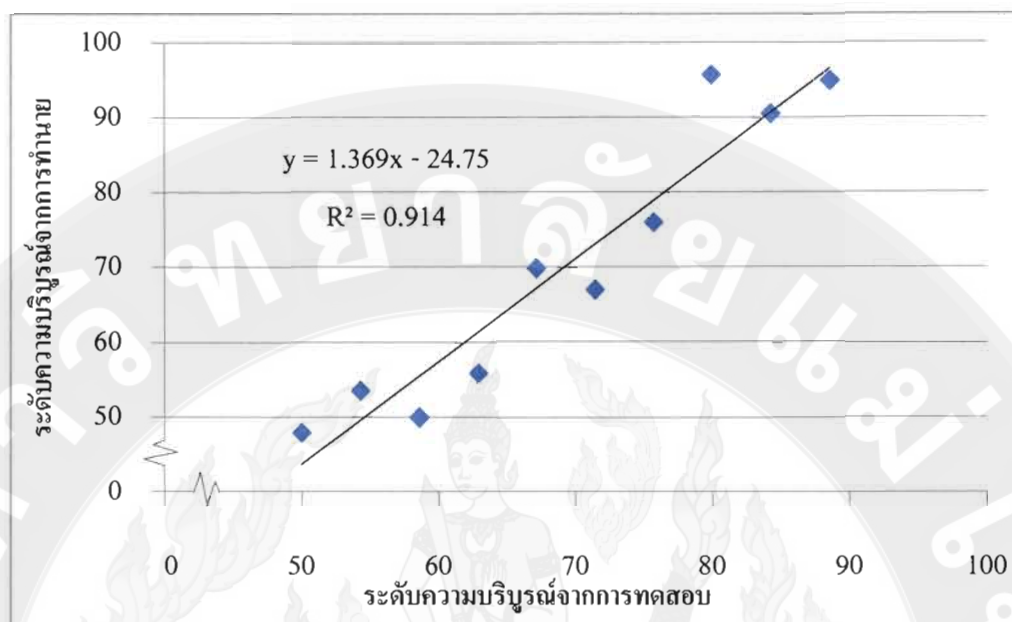
| ตัวแปร (X)                | แบบจำลอง              | สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| ปริมาณความชื้นเฉลี่ย      | $Y = 0.001X + 0.537$  | 0.375                             |
| น้ำหนักแห้งเฉลี่ย         | $Y = -0.001X + 0.634$ | 0.423                             |
| ปริมาณแป้งเฉลี่ย          | $Y = 0.02X + 0.606$   | 0.566                             |
| ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เฉลี่ย | $Y = -0.003X + 0.633$ | 0.559                             |
| ค่า dielectric constant   | $Y = 0.001X + 0.571$  | 0.388                             |

จากตารางจะพบว่าค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟอาจจะไม่ได้มีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้น น้ำหนักแห้ง ปริมาณแป้งและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งหมายถึงค่าสมบัติทางกายภาพ-เคมีอาจเป็นปัจจัยที่ไม่ได้มีผลต่อค่าการตอบสนองเซนเซอร์โดยตรง จึงทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ค่อนข้างต่ำ โดยค่าการตอบสนองเซนเซอร์จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณแป้งมากที่สุด และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ น้ำหนักแห้ง ค่า dielectric constant และปริมาณความชื้น ตามลำดับ โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.566, 0.559, 0.423, 0.388 และ 0.375 ตามลำดับ

### การสอบเทียบแบบจำลอง

การสอบเทียบแบบจำลองเพื่อทำนายระดับความบริสุทธิ์จากค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ จะเปรียบเทียบระดับความบริสุทธิ์จากแบบจำลองจากภาพ 55 โดยใช้ค่าการตอบสนองเซนเซอร์จากเซนเซอร์ที่อ่านค่าการตอบสนองจากผลทุเรียนที่มีลักษณะผลและมีอายุใกล้เคียงกับผลที่ติดตั้งเซนเซอร์ นำมาอ่านค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟก่อนที่จะนำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ-เคมี และค่าไดอิเล็กตริก ซึ่งเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจสอบจะเป็นเซนเซอร์ที่มีลักษณะเดียวกับเซนเซอร์ที่ติดตั้งกับผลทุเรียนที่อยู่บนต้น

จากแบบจำลองสามารถแบ่งช่วงการทำนายออกเป็น 2 ช่วง โดยพิจารณาจากผลการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ-เคมี ซึ่งทุเรียนจะมีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนดังภาพ 46 ประมาณวันที่ 106 วันหลังดอกบาน เพื่อใช้เป็นจุดผกผันในการแบ่งช่วงการทำนาย ดังนั้นจึงแบ่งการทวนสอบเป็น 2 ช่วงคือ ค่าการตอบสนองในวันที่ก่อนวันที่ 106 วันหลังดอกบาน และหลังจากวันที่ 106 วันหลังดอกบาน โดยผลค่าการตอบสนองเซนเซอร์ที่ได้จากผลที่มีลักษณะผลและมีอายุผลเท่ากับผลที่ติดตั้งเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟบนต้นจะมีค่าที่แตกต่างกับค่าผลการตอบสนองที่ได้จากผลทุเรียนที่อยู่บนต้น คือมีค่าที่สูงกว่าแต่มีแนวโน้มของค่าการตอบสนองเซนเซอร์ที่สอดคล้องกัน จึงต้องปรับเทียบผลที่ได้โดยใช้ผลที่ได้จากเซนเซอร์ที่ติดกับผลบนต้นเป็นมาตรฐานในการปรับเทียบ ซึ่งจะต้องปรับเทียบผลที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด หลังจากนั้นจึงนำค่าการตอบสนองที่ได้ไปคำนวณหาระดับความบริสุทธิ์จากแบบจำลองดังภาพ 53 จะได้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ดังภาพ 54



ภาพ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความวิตกกังวลที่ได้จากทานทดสอบกับการทำนาย

จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างระดับความวิตกกังวลที่ได้จากการทดสอบกับการทำนาย พบว่าแบบจำลองมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.914 จึงแสดงให้เห็นว่าค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟสามารถแสดงระดับความวิตกกังวลของทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่ระดับ 50-90 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจากการทวนสอบความแม่นยำแสดงให้เห็นว่าสามารถตรวจสอบความวิตกกังวลในกระบวนการเก็บเกี่ยวผลทุเรียนโดยใช้เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟได้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์ผลการวิจัยสามารถสรุปประเด็นสำคัญของผลการวิจัย ตามวัตถุประสงค์ คือ เพื่อประเมินความบริสุทธิ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยใช้เซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟและสมบัติไดอิเล็กตริก รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการตอบสนองของเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อทุเรียนพันธุ์หมอนทองในแต่ละระดับความบริสุทธิ์

#### สรุป

จากผลการวิจัยการประเมินความบริสุทธิ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองด้วยเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟและสมบัติไดอิเล็กตริก ได้ผลการทดสอบดังนี้

1. ค่าการตอบสนองเซนเซอร์จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.595-0.623 โดยสามารถระบุระดับความบริสุทธิ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองได้ทีละระยะ 50-90 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าที่ได้แบ่งเป็น 2 ช่วง โดยจุดผกผันสามารถแสดงระดับความบริสุทธิ์ประมาณ 65-70 เปอร์เซ็นต์
2. ผลทุเรียนที่ระยะประมาณวันที่ 103-106 วันหลังดอกบานมีระดับความบริสุทธิ์ประมาณ 65-70 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับผลค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ
3. ปริมาณความชื้นและน้ำหนักแห้งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของทุเรียน และค่าไดอิเล็กตริกมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนมากกว่าค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ โดยที่ค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟสามารถแสดงดัชนีความบริสุทธิ์ของทุเรียนที่ระยะต่าง ๆ
4. แบบจำลองในการทำนายระดับความบริสุทธิ์ของทุเรียนโดยค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ แบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ระดับความบริสุทธิ์น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ และระดับตั้งแต่ 70 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่า  $R^2$  0.691 และ 0.626 ตามลำดับ
5. ค่าไดอิเล็กตริกจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำหนักรวมมากที่สุด รองลงมาคือปริมาณความชื้น ปริมาณแป้งและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ตามลำดับ โดยมีค่า  $R^2$  0.976 0.945 0.822 และ 0.744 ตามลำดับ
6. ค่าการตอบสนองเซนเซอร์จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณแป้งมากที่สุด และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ น้ำหนักแห้ง ค่า dielectric constant และปริมาณความชื้น ตามลำดับ โดยมีค่า

$R^2$  เท่ากับ 0.566 0.559 0.423 0.388 และ 0.375 ตามลำดับ แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับว่ามีความสัมพันธ์กันโดยตรง

7. แบบจำลองทำนายระดับความบริบูรณ์ มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.914 ดังนั้นเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟสามารถใช้ตรวจสอบความบริบูรณ์ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองได้

#### ข้อเสนอแนะ

1. ทุเรียนที่ใช้ในการทดสอบมาจากสวนของเกษตรกรใน จ. นครศรีธรรมราช ดังนั้นผลที่ได้จากการทดสอบอาจแตกต่างกัน ถ้าหากทำการทดสอบกับสวนทุเรียนทางภาคตะวันออก เนื่องจากมีภูมิอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของทุเรียน นอกจากนั้นทุเรียนแต่ละภูมิภาคให้ผลผลิตในระยะเวลาที่ต่างกันด้วย
2. ในการเลือกผลทุเรียนที่มีลักษณะใกล้เคียงกับผลที่ติดเซนเซอร์จำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการคัดเลือก รวมถึงทุเรียนผลดังกล่าวอาจมีความแตกต่างกันเนื่องจากผลที่มีอายุหลังดอกบานเท่ากันอาจมีการเจริญไม่เท่ากัน ซึ่งอาจจะเป็นผลจากตำแหน่งบนต้น การได้รับสารอาหาร เป็นต้น
3. ในการนำเซนเซอร์ไปใช้ในการตรวจสอบ ควรลดขนาดให้เล็กลงเพื่อสะดวกต่อการติดตั้ง และสามารถติดตั้งได้พอดีกับผลมากขึ้น
4. จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เป็นปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์กับความบริบูรณ์ของทุเรียนโดยตรง ควรมีการศึกษาองค์ประกอบเคมีอื่น ๆ ของทุเรียน เช่น ซูโครสของแข็งที่ละลายน้ำได้ เป็นต้น

## บรรณานุกรม

- กรมการค้าต่างประเทศ. 2551. สถิติการส่งออกทุเรียน. [ระบบออนไลน์].  
แหล่งข้อมูล [www.dft.moc.go.th](http://www.dft.moc.go.th) (20 กันยายน 2552).
- กรมอุตุนิยมวิทยา. 2552. นครศรีธรรมราช. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล [www.tmd.go.th](http://www.tmd.go.th)  
(25 กันยายน 2552).
- กัลย์ กัลยาณมิตร. 2540. การใช้เทคนิค x-ray ตรวจสอบความแก่ของผลทุเรียน. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 107 น.
- กุลกัญญา ศะสุริ. 2548. การผลิตแป้งเค้กทุเรียนสำเร็จรูปเพื่อการอบด้วยไมโครเวฟ.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 67 น.
- คำนึง วาทยะ และ จาริณี จงปลื้มปิติ. 2550. คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของแผ่นยางธรรมชาติที่  
ความถี่ 915 และ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 38(5): 275-278.
- จาดุพงศ์ วาฤทธิ์. 2547. คุณสมบัติทางกายภาพของผลผลิตเกษตร. เอกสารประกอบการสอน  
วท 341 ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- จริงแท้ ศิริพานิช. 2542. สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้. พิมพ์ครั้งที่ 3.  
กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 396 น.
- จักรกฤษ ระวังใจ. 2552. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล  
<http://laydok.blogspot.com> (2 กันยายน 2552).
- ณัฐวุฒิ เนียมสอน. 2546. การหาดัชนีความสุกแก่ของทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยใช้ความถี่  
ธรรมชาติ และความแข็งแรงก้าน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.  
96 น.
- ธวัชชัย ทองเหลื่อม. 2547. การคัดแยกคุณภาพของมังคุดแบบไม่ทำลายโดยการตรวจสอบ  
ความชื้นด้วยไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
ธนบุรี. 188 น.
- มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหาร. 2546. ทุเรียน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล  
<http://www.acfs.go.th/standard/download/turian.pdf> (21 กันยายน 2552).
- โมนัย ไกรฤกษ์, อภินันท์ ธนชยานนท์, มิตร์ชัย จงเชียวชาญ, เผ่าศักดิ์ ศิริสุข,  
ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์, จาดุพงศ์ วาฤทธิ์ และ อภิขาน กาญจนวาปสติดย์. 2551. ระบบ  
โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สายเพื่อควบคุมคุณภาพการผลิตผลไม้. โครงการวิจัยสนับสนุนโดย

- สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติประจำปีงบประมาณ 2551. อยู่ระหว่างดำเนินการ.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. มปป. **การใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหาร**. เอกสารประกอบการสอน. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 16 น.
- สายสนม ประดิษฐ์ดวง. 2543. การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและการฉายรังสีอาหาร. น. 173-195. ใน **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสุโขทัย จันทพรปรณิก, อัมภิกา ปุณนจิต และ เสริมสุข สลักเพ็ชร. 2539. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการควบคุมปริมาณและคุณภาพผลผลิตทุเรียน. **วารสารกสิกร** 69: 524-533.
- วุฒิไกร จำรัสแนว, ปานหทัย บัวศรี และ กิตติพงษ์ ดันมิตร. 2551. ศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเพื่อใช้ในการวัดระดับความเข้มข้นของน้ำยางพารา. ใน **การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน**. วันที่ 28-29 มกราคม 2551. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- อลงกรณ์ ธรรมบุตร และ กรกฎ วัฒนวิเชียร. 2547. การวิเคราะห์ความแก่ของผลทุเรียนพันธุ์หมอนทองโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพที่ก้านผล. ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43**. วันที่ 1-4 กุมภาพันธ์ 2548. สาขาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Agilent Technologies. 2006. Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล [www.agilent.com](http://www.agilent.com) (25 สิงหาคม 2552).
- Association of Official Analytical Chemists. 1984. **Official Methods of Analysis**. 14<sup>th</sup> ed. USA: The Association Washington, DC. 1105 P.
- Chen, P., M.J. McCarthy, S.M. Kim and B. Zion. 1996. Development of a high speed NMR technique for sensing maturity of avocados. **Transactions of the ASAE** 39(6): 2205-2209.
- Garcia, A., J.L. Torres, E. Prieto and M. De Blas. 2000. Dielectric properties of grape juice at 0.2 and 3 GHz. **Journal of Food Engineering** 48: 203-211.
- Kalayanamitra, K. 2005. Evaluation and classification of durian fruit maturity and its relationship with chemical constituents. **Thai Journal of Agricultural Science** 38(1-2): 45-54.
- Martin-Espasa, M.E., N. Martinez-Navarrete, A. Chiralt. and P. Fito. 2006. Dielectric behavior of apple (var. Granny Smith) at different moisture content effect of vacuum impregnation.

**Journal of Food Engineering** 70: 51-56.

Miller, G. L. 1956. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar.

**Journal of Analytical Chemistry** 31:426-428

Mizrach, A. 2007. Nondestructive ultrasonic monitoring of tomato quality during shelf-life storage. **Journal of Postharvest Biology and Technology** 46: 271-274.

Motwani T., K. Seetharaman, R. C. Anantheswaran. 2007. Dielectric properties of starch slurries as influenced by starch concentration and gelatinization. **Journal of Carbohydrate Polymers** 67:73-79

Mudgett, R. 1982. Electrical properties of foods in microwave processing. **Journal of Food Technology** 50: 109-115.

Ndife, M.K., G. Sumnu and L. Bayindirli. 1998. Dielectric properties of six different species of starch at 2450 MHz. **Food Research International** 31(1): 43-52

Nelson, S.O. 1980. Microwave dielectric properties of fresh fruits and vegetables. **Transactions of the ASAE** 23(5):1314-1317.

\_\_\_\_\_. 1999a. Dielectric properties measurement techniques and applications.

**Transactions of the ASAE** 42(2): 523-529.

\_\_\_\_\_. 1999b. Dielectric Spectroscopy of Fresh Fruit and Vegetable Tissues.

**In 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting.** 1-4 August 2004. Canada:

Fairmont Chateau Laurier, the Westin, Government Centre Ottawa, Ontario. 11 P.

\_\_\_\_\_. 2003. Frequency and temperature-dependent permittivities of fresh fruits and vegetables from 0.01 to 1.8 GHz. **Transactions of the ASAE** 46(2): 567-574.

\_\_\_\_\_. 2005. Dielectric spectroscopy in agriculture. **Journal of Non-Crystalline Solids** 351: 2940-2944.

Nelson, S.O. and P.G. Bartley. 2002. Frequency and temperature dependence of the dielectric properties of food materials. **Transactions of the ASAE** 45: 1223-1227.

Nelson, S.O., S. Trabelsi, and S. J. Kays. 2006. Dielectric spectroscopy of honeydew melons from 10 MHz to 1.8 GHz for quality sensing. **Transactions of the ASABE** 49(6): 1977-1981.

Nelson, S. O., Wen-chuan Gue, S. Trabelsi and S. J. Kays. 2007. Dielectric properties of watermelons and correlation with soluble solids content. **In 2007 ASABE Annual**

- international meeting.** 17-20 June 2007. Minnesota: Minneapolis Convention Center Minneapolis.
- Reese, D., A. M. Lefcourt, M. S. Kim and Y. M. Lo. 2009. Using parabolic mirrors for complete imaging of apple surfaces. **Journal of Bioresource Technology** 100: 4499–4506.
- Rutpralom, T., P. Kumhom and K. Chamnongthai. 2002. Nondestructive maturity determination of durian by using microwave moisture sensing. pp 155-158. **In Proceeding of the 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, Bangkok, Thailand.**
- Schubert, H. and M. Regier. 2005. **The Microwave Processing of Food.** USA: Woodhead Publishing Washington, DC. 345 P.
- Singh, R. P. and D. R. Heldman. 2001. Microwave Heating. pp. 306 – 331. **In Introduction to Food Engineering, 3<sup>rd</sup>.** London: Academic Press.
- Trabelsi, S. and S. O. Nelson. 2004. Calibration methods for nondestructive microwave sensing of moisture content and bulk density of granular materials. **Transactions of the ASAE** 47(6): 1999-2008.
- Valente, M., R. Leardi, G. Self, G. Luciano and J. P. Pain. 2009. Multivariate calibration of mango firmness using vis/NIR spectroscopy and acoustic impulse method. **Journal of Food Engineering** 94: 7-13.
- Valero, C., C.H. Crisosto and D.Slaughter. 2007. Relationship between nondestructive firmness measurements and commercially important ripening fruit stages for peaches, nectarines and plums. **Journal of Postharvest Biology and Technology** 44: 248-253
- Venkatesh, M.S. and G.S.V. Raghavan. 2004. An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials. **Journal of Biosystems Engineering** 88: 1-18.
- Wang, S., J. Tang, J.A. Johnson, E. Mitcham, J.D. Hansen, G. Hallman, S.R. Drake and Y. Wang. 2003. Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as related to Radio Frequency and Microwave Treatments. **Journal of Biosystems Engineering** 85: 201-212.
- Zhang, L., J.G. Lyng, N. Brunton, D. Morgan and B. McKenna . 2004. Dielectric and thermo physical properties of meat batters over a temperature range of 5-85 °C. **Journal of Meat Science** 68: 173-184.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลค่าการตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ สมบัติทางเคมีและค่าไดอิเล็กตริก

ตารางผนวก 1 ค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ

| วันหลังดอก<br>บาน | ระดับความบริสุทธิ์<br>(%) | พ.ศ. 2551         |                               | พ.ศ. 2552         |                                  |
|-------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------------------|
|                   |                           | ค่าการ<br>ตอบสนอง | ส่วนเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน (SD) | ค่าการ<br>ตอบสนอง | ส่วนเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน<br>(SD) |
| 91                | 48.57                     | 0.6205            | 0.0101                        | -                 | -                                |
| 92                | 47.14                     | 0.6219            | 0.0067                        | -                 | -                                |
| 93                | 48.57                     | 0.6190            | 0.0072                        | -                 | -                                |
| 94                | 50.00                     | 0.6227            | 0.0058                        | 0.6803            | 0.0060                           |
| 95                | 51.43                     | 0.6200            | 0.0068                        | 0.6820            | 0.0066                           |
| 96                | 52.86                     | 0.6051            | 0.0053                        | 0.6794            | 0.0073                           |
| 97                | 54.29                     | 0.6161            | 0.0048                        | 0.6776            | 0.0113                           |
| 98                | 55.71                     | 0.6095            | 0.0043                        | 0.6818            | 0.0035                           |
| 99                | 57.14                     | 0.6024            | 0.0028                        | 0.6810            | 0.0034                           |
| 100               | 58.57                     | 0.6267            | 0.0064                        | 0.6833            | 0.0054                           |
| 101               | 60.00                     | 0.6007            | 0.0038                        | 0.6825            | 0.0058                           |
| 102               | 61.43                     | 0.6151            | 0.0065                        | 0.6745            | 0.0023                           |
| 103               | 62.86                     | 0.6018            | 0.0052                        | 0.6770            | 0.0047                           |
| 104               | 64.29                     | 0.6166            | 0.0041                        | 0.6808            | 0.0070                           |
| 105               | 65.71                     | 0.6169            | 0.0053                        | 0.6783            | 0.0030                           |
| 106               | 67.14                     | 0.6371            | 0.0060                        | 0.6812            | 0.0041                           |
| 107               | 68.57                     | 0.5950            | 0.0075                        | 0.6763            | 0.0066                           |
| 108               | 70.00                     | 0.5927            | 0.0089                        | 0.6797            | 0.0047                           |
| 109               | 71.43                     | 0.6011            | 0.0082                        | 0.6814            | 0.0038                           |
| 110               | 72.86                     | 0.6022            | 0.0076                        | 0.6807            | 0.0060                           |
| 111               | 74.29                     | 0.6066            | 0.0065                        | 0.6761            | 0.0122                           |
| 112               | 75.71                     | 0.6140            | 0.0073                        | 0.6809            | 0.0057                           |
| 113               | 77.14                     | 0.5978            | 0.0081                        | 0.6816            | 0.0060                           |

## ตารางผนวก 1 ต่อ

| วันหลังดอก<br>บาน | ระดับความบริสุทธิ์<br>(%) | พ.ศ. 2551         |        | พ.ศ. 2552         |        |
|-------------------|---------------------------|-------------------|--------|-------------------|--------|
|                   |                           | ค่าการ<br>ตอบสนอง | SD     | ค่าการ<br>ตอบสนอง | SD     |
| 114               | 78.57                     | 0.6025            | 0.0020 | 0.6805            | 0.0036 |
| 115               | 80.00                     | 0.6058            | 0.0070 | 0.6816            | 0.0052 |
| 116               | 81.43                     | 0.6064            | 0.0067 | 0.6774            | 0.0046 |
| 117               | 82.86                     | 0.6075            | 0.0081 | 0.6791            | 0.0053 |
| 118               | 84.29                     | 0.5923            | 0.0961 | 0.6814            | 0.0047 |
| 119               | 85.71                     | 0.6161            | 0.0038 | 0.6782            | 0.0040 |
| 120               | 87.14                     | 0.6155            | 0.0087 | 0.6827            | 0.0064 |
| 121               | 88.57                     | 0.6158            | 0.0055 | 0.6807            | 0.0051 |
| 122               | 90.00                     | 0.6151            | 0.0037 | 0.6736            | 0.0095 |

ตารางผนวก 2 ปริมาณแป้งและน้ำตาลรีดิวซ์ของเนื้อทุเรียน

| วันหลัง<br>ดอกบาน | ระดับความ<br>บริบูรณ์ (%) | พ.ศ. 2551                   |       |                |       | พ.ศ. 2552                   |       |                   |        |
|-------------------|---------------------------|-----------------------------|-------|----------------|-------|-----------------------------|-------|-------------------|--------|
|                   |                           | ปริมาณน้ำตาล<br>รีดิวซ์ (%) | SD    | ปริมาณแป้ง (%) | SD    | ปริมาณน้ำตาล<br>รีดิวซ์ (%) | SD    | ปริมาณแป้ง<br>(%) | SD     |
| 91                | 50                        | 0.846                       | 0.212 | 5.215          | 0.500 | -                           | -     | -                 | -      |
| 94                | 54                        | 0.414                       | 0.118 | 5.254          | 0.300 | 0.686                       | 0.021 | 5.714             | 8.330  |
| 97                | 59                        | 0.117                       | 0.102 | 4.820          | 0.700 | 0.812                       | 0.075 | 6.127             | 7.542  |
| 100               | 63                        | 0.131                       | 0.096 | 7.697          | 0.892 | 0.525                       | 0.083 | 7.741             | 14.733 |
| 103               | 67                        | 0.022                       | 0.015 | 9.365          | 1.319 | 0.185                       | 0.067 | 7.723             | 41.779 |
| 106               | 71                        | 0.051                       | 0.037 | 9.444          | 1.170 | 0.117                       | 0.039 | 6.817             | 58.388 |
| 109               | 76                        | 0.044                       | 0.025 | 13.227         | 0.576 | 0.102                       | 0.041 | 7.986             | 78.171 |
| 112               | 80                        | 0.051                       | 0.037 | 11.690         | 1.115 | 0.088                       | 0.015 | 7.789             | 88.950 |
| 115               | 84                        | 0.255                       | 0.213 | 8.196          | 0.817 | 0.112                       | 0.008 | 8.862             | 79.200 |
| 118               | 89                        | 0.197                       | 0.148 | 9.405          | 1.375 | 0.088                       | 0.021 | 8.406             | 96.000 |

ตารางผนวก 3 ปริมาณความชื้นและน้ำหนักแห้งของเนื้อทุเรียน

| วันหลัง<br>ดอก<br>บาน | ระดับ<br>ความ<br>บริบูรณ์<br>(%) | พ.ศ. 2551                   |      |                                 |      |                        |      | พ.ศ. 2552                       |      |                           |      |                        |      |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------|------|---------------------------------|------|------------------------|------|---------------------------------|------|---------------------------|------|------------------------|------|
|                       |                                  | ปริมาณความชื้น<br>เปลือก(%) | SD   | ปริมาณ<br>ความชื้น<br>เนื้อ (%) | SD   | น้ำหนัก<br>แห้ง<br>(%) | SD   | ปริมาณ<br>ความชื้น<br>เปลือก(%) | SD   | ปริมาณ<br>ความชื้น<br>(%) | SD   | น้ำหนัก<br>แห้ง<br>(%) | SD   |
| 91                    | 50                               | 80.97                       | 0.53 | 78.06                           | 5.30 | 21.94                  | 5.30 | -                               | -    | -                         | -    | -                      | -    |
| 94                    | 54                               | 82.11                       | 1.07 | 76.94                           | 4.14 | 23.06                  | 4.14 | 75.18                           | 1.58 | 74.17                     | 2.58 | 25.83                  | 2.58 |
| 97                    | 59                               | 79.37                       | 0.74 | 68.02                           | 5.95 | 31.98                  | 5.95 | 73.05                           | 3.24 | 70.84                     | 2.25 | 29.16                  | 2.25 |
| 100                   | 63                               | 83.36                       | 3.49 | 76.36                           | 1.42 | 23.64                  | 1.42 | 73.51                           | 0.23 | 69.40                     | 1.62 | 30.60                  | 1.62 |
| 103                   | 67                               | 78.97                       | 0.55 | 65.52                           | 4.48 | 34.48                  | 4.48 | 73.43                           | 0.41 | 61.75                     | 1.55 | 38.25                  | 1.55 |
| 106                   | 71                               | 80.00                       | 1.27 | 65.09                           | 6.01 | 34.91                  | 6.01 | 72.68                           | 0.36 | 65.17                     | 1.92 | 34.83                  | 1.92 |
| 109                   | 76                               | 78.20                       | 0.63 | 63.07                           | 1.85 | 36.93                  | 1.85 | 72.52                           | 0.75 | 59.12                     | 2.34 | 40.88                  | 2.34 |
| 112                   | 80                               | 79.71                       | 1.61 | 61.04                           | 0.90 | 38.96                  | 0.90 | 73.26                           | 0.88 | 59.49                     | 1.44 | 40.51                  | 1.44 |
| 115                   | 84                               | 76.20                       | 0.40 | 62.89                           | 6.28 | 37.11                  | 6.28 | 73.53                           | 0.63 | 60.64                     | 1.38 | 39.36                  | 1.38 |
| 118                   | 89                               | 77.20                       | 0.92 | 60.90                           | 1.93 | 39.10                  | 1.93 | 72.97                           | 0.85 | 59.37                     | 0.81 | 40.63                  | 0.81 |

ตารางผนวก 4 ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียนปี พ.ศ. 2551

| วันหลังดอก | ระดับความบริสุทธิ์ | 20 องศาเซลเซียส |       | 30 องศาเซลเซียส |       | 40 องศาเซลเซียส |       | 20 องศาเซลเซียส |       | 30 องศาเซลเซียส |       | 40 องศาเซลเซียส |       |
|------------|--------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
| บาน        | (%)                | e'              | SD    | e''             | SD    | e'              | SD    | e''             | SD    | e'              | SD    | e''             | SD    |
| 91         | 50                 | 64.388          | 3.012 | 15.597          | 0.468 | 61.475          | 3.006 | 15.622          | 0.581 | 59.862          | 3.213 | 14.710          | 0.632 |
| 94         | 54                 | 60.040          | 3.313 | 16.553          | 0.117 | 55.768          | 2.268 | 16.166          | 0.378 | 56.405          | 2.002 | 15.005          | 0.349 |
| 97         | 59                 | 53.576          | 3.975 | 17.445          | 0.127 | 48.516          | 3.461 | 15.971          | 0.496 | 50.771          | 5.928 | 16.048          | 0.792 |
| 100        | 63                 | 58.929          | 0.486 | 16.905          | 0.571 | 55.605          | 0.756 | 16.104          | 0.651 | 55.107          | 1.591 | 15.811          | 0.261 |
| 103        | 67                 | 50.440          | 0.337 | 17.410          | 0.093 | 47.424          | 0.801 | 16.365          | 0.033 | 47.136          | 2.618 | 15.658          | 0.372 |
| 106        | 71                 | 53.162          | 5.506 | 16.997          | 0.969 | 48.659          | 5.372 | 16.088          | 0.859 | 47.935          | 2.823 | 15.041          | 0.555 |
| 109        | 76                 | 46.237          | 1.369 | 15.552          | 0.447 | 45.308          | 1.195 | 15.207          | 0.309 | 44.184          | 2.364 | 15.000          | 0.783 |
| 112        | 80                 | 46.377          | 2.099 | 16.186          | 0.864 | 45.348          | 1.820 | 15.641          | 0.653 | 43.599          | 1.594 | 15.050          | 0.799 |
| 115        | 84                 | 45.578          | 1.687 | 16.080          | 0.681 | 45.336          | 5.730 | 16.037          | 1.442 | 44.818          | 4.162 | 15.898          | 0.604 |
| 118        | 89                 | 46.584          | 2.901 | 15.735          | 1.067 | 43.053          | 2.914 | 15.379          | 0.679 | 44.617          | 1.174 | 14.643          | 0.562 |

ตารางผนวก 5 ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อทุเรียนปี พ.ศ. 2552

| วันหลังดอก<br>บาน | ระดับความบริบูรณ์<br>(%) | 20 องศาเซลเซียส |       | 30 องศาเซลเซียส |       | 40 องศาเซลเซียส |       | 20 องศาเซลเซียส |       | 30 องศาเซลเซียส |       | 40 องศาเซลเซียส |       |
|-------------------|--------------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
|                   |                          | e'              | SD    | e''             | SD    | e'              | SD    | e''             | SD    | e'              | SD    | e''             | SD    |
| 91                | 50                       |                 |       |                 |       |                 |       |                 |       |                 |       |                 |       |
| 94                | 54                       | 63.301          | 0.846 | 16.265          | 0.312 | 59.281          | 2.267 | 16.359          | 0.431 | 57.283          | 0.596 | 16.292          | 0.766 |
| 97                | 59                       | 57.152          | 1.165 | 15.489          | 1.596 | 56.000          | 0.341 | 16.967          | 0.549 | 56.233          | 1.461 | 16.554          | 0.760 |
| 100               | 63                       | 55.077          | 0.358 | 16.053          | 1.475 | 54.105          | 0.589 | 16.366          | 1.443 | 52.687          | 1.952 | 15.544          | 1.224 |
| 103               | 67                       | 53.393          | 0.246 | 17.252          | 0.173 | 53.452          | 0.440 | 16.221          | 0.178 | 53.171          | 0.271 | 17.026          | 0.561 |
| 106               | 71                       | 52.499          | 1.472 | 16.462          | 1.025 | 51.428          | 0.875 | 14.977          | 1.157 | 51.170          | 2.741 | 17.020          | 0.483 |
| 109               | 76                       | 49.817          | 1.642 | 16.899          | 0.307 | 49.593          | 0.445 | 15.556          | 0.167 | 49.223          | 0.850 | 16.296          | 0.995 |
| 112               | 80                       | 48.537          | 1.142 | 15.480          | 0.170 | 50.377          | 1.524 | 15.829          | 0.105 | 47.960          | 0.176 | 15.195          | 1.225 |
| 115               | 84                       | 49.829          | 1.986 | 16.147          | 0.572 | 48.304          | 3.419 | 15.749          | 1.176 | 46.366          | 1.025 | 15.443          | 0.774 |
| 118               | 89                       | 48.448          | 2.481 | 16.027          | 0.531 | 48.569          | 0.619 | 15.602          | 0.376 | 45.202          | 0.838 | 14.640          | 0.242 |

ตารางผนวก 6 ค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการสอบเทียบ

| ค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟ |                         |        | ระดับความบริสุทธิ์<br>จากสมการ | ระดับความบริสุทธิ์จาก<br>การทดสอบ |
|---------------------------------|-------------------------|--------|--------------------------------|-----------------------------------|
| ค่าก่อนการ<br>ปรับเทียบ         | ค่าหลังการ<br>ปรับเทียบ | SD     |                                |                                   |
| 0.6634                          | 0.6234                  | 0.0062 | 47.94                          | 50.00                             |
| 0.6562                          | 0.6162                  | 0.0159 | 53.51                          | 54.29                             |
| 0.6608                          | 0.6208                  | 0.0235 | 49.94                          | 58.57                             |
| 0.6532                          | 0.6132                  | 0.0080 | 55.82                          | 62.86                             |
| 0.6405                          | 0.6005                  | 0.0042 | 69.80                          | 67.14                             |
| 0.6380                          | 0.5980                  | 0.0069 | 67.08                          | 71.43                             |
| 0.6460                          | 0.6060                  | 0.0077 | 76.00                          | 75.71                             |
| 0.6637                          | 0.6237                  | 0.0067 | 95.67                          | 80.00                             |
| 0.6590                          | 0.6190                  | 0.0059 | 90.52                          | 84.29                             |
| 0.6630                          | 0.6230                  | 0.0052 | 94.91                          | 88.57                             |



ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์และการถดถอย

**ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับระดับความบริสุทธิ์**

**ตารางผนวก 7 Model Summary** ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับระดับความบริสุทธิ์

| Model                   | R     | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
|-------------------------|-------|----------|-------------------|----------------------------|
| น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ | 0.831 | 0.691    | 0.671             | 4.26907                    |
| มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์  | 0.791 | 0.626    | 0.597             | 4.55608                    |

**ตารางผนวก 8 การวิเคราะห์ ANOVA** ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับระดับความบริสุทธิ์

| Model                   |            | Sum of Squares | df | Mean Square | F      | Sig.  |
|-------------------------|------------|----------------|----|-------------|--------|-------|
| น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ | Regression | 612.041        | 1  | 612.041     | 33.583 | 0.000 |
|                         | Residual   | 273.374        | 15 | 18.225      |        |       |
|                         | Total      | 885.415        | 16 |             |        |       |
| มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์  | Regression | 451.183        | 1  | 451.183     | 21.735 | 0.000 |
|                         | Residual   | 269.853        | 13 | 20.758      |        |       |
|                         | Total      | 721.035        | 14 |             |        |       |

**ตารางผนวก 9** ค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับระดับความบริสุทธิ์

| Model                   |                    | Unstandardized |            | Standardized | t      | Sig.  |
|-------------------------|--------------------|----------------|------------|--------------|--------|-------|
|                         |                    | Coefficients   |            | Coefficients |        |       |
|                         |                    | B              | Std. Error | Beta         |        |       |
| น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ | (Constant)         | 530.626        | 81.624     |              | 6.501  | 0.000 |
|                         | ค่าตอบสนองเซนเซอร์ | -774.133       | 133.585    | -.831        | -5.795 | 0.000 |
| มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์  | (Constant)         | -599.848       | 146.032    |              | -4.108 | 0.001 |
|                         | ค่าตอบสนองเซนเซอร์ | 1115.222       | 239.209    | 0.791        | 4.662  | 0.000 |

**ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียน**

**ตารางผนวก 10** Model Summary ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียน

| Model               | R     | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
|---------------------|-------|----------|-------------------|----------------------------|
| ปริมาณความชื้น      | 0.972 | 0.945    | 0.939             | 1.35667                    |
| น้ำหนักแห้ง         | 0.988 | 0.976    | 0.973             | 0.90548                    |
| ปริมาณแป้ง          | 0.907 | 0.822    | 0.800             | 2.44710                    |
| ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ | 0.863 | 0.744    | 0.712             | 2.93643                    |

ตารางผนวก 11 การวิเคราะห์ ANOVA ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกกับกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของ  
ทุเรียน

| Model                       |            | Sum of Squares | df | Mean Square | F       | Sig.  |
|-----------------------------|------------|----------------|----|-------------|---------|-------|
| ปริมาณ<br>ความชื้น          | Regression | 255.138        | 1  | 255.138     | 138.620 | 0.000 |
|                             | Residual   | 14.724         | 8  | 1.841       |         |       |
|                             | Total      | 269.862        | 9  |             |         |       |
| น้ำหนักแห้ง                 | Regression | 263.303        | 1  | 263.303     | 321.142 | 0.000 |
|                             | Residual   | 6.559          | 8  | 0.820       |         |       |
|                             | Total      | 269.862        | 9  |             |         |       |
| ปริมาณแป้ง                  | Regression | 221.956        | 1  | 221.956     | 37.065  | 0.000 |
|                             | Residual   | 47.906         | 8  | 5.988       |         |       |
|                             | Total      | 269.862        | 9  |             |         |       |
| ปริมาณ<br>น้ำตาล<br>รีดิวซ์ | Regression | 200.882        | 1  | 200.882     | 23.297  | 0.001 |
|                             | Residual   | 68.981         | 8  | 8.623       |         |       |
|                             | Total      | 269.862        | 9  |             |         |       |

ตารางผนวก 12 ค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างค่าไดอิเล็กตริกกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียน

| Model    |               | Unstandardized |            | Standardized | t       | Sig.  |
|----------|---------------|----------------|------------|--------------|---------|-------|
|          |               | Coefficients   |            | Coefficients |         |       |
|          |               | B              | Std. Error | Beta         |         |       |
| ปริมาณ   | (Constant)    | -41.372        | 7.931      |              | -5.216  | 0.001 |
| ความชื้น | ปริมาณ        | 1.317          | 0.112      | 0.972        | 11.774  | 0.000 |
|          | ความชื้น      |                |            |              |         |       |
| น้ำหนัก  | (Constant)    | 78.639         | 1.521      |              | 51.704  | 0.000 |
| แห้ง     | น้ำหนักแห้ง   | -.806          | 0.045      | -0.988       | -17.920 | 0.000 |
| ปริมาณ   | (Constant)    | 46.528         | 1.170      |              | 39.767  | 0.000 |
| แป้ง     | ปริมาณแป้ง    | 18.878         | 3.101      | 0.907        | 6.088   | 0.000 |
| ปริมาณ   | (Constant)    | 71.623         | 4.197      |              | 17.067  | 0.000 |
| น้ำตาล   | ปริมาณ        |                |            |              |         |       |
| รีดิวซ์  | น้ำตาลรีดิวซ์ | -2.521         | 0.522      | -0.863       | -4.827  | 0.001 |

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนและค่าไดอิเล็กตริก

ตารางผนวก 13 Model Summary ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนและค่าไดอิเล็กตริก

| Model                   | R     | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
|-------------------------|-------|----------|-------------------|----------------------------|
| ปริมาณความชื้น          | 0.612 | 0.375    | 0.297             | 0.005838092                |
| น้ำหนักแห้ง             | 0.651 | 0.423    | 0.351             | 0.005606710                |
| ปริมาณแป้ง              | 0.752 | 0.566    | 0.511             | 0.004866260                |
| ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์     | 0.748 | 0.559    | 0.504             | 0.004902332                |
| ค่า dielectric constant | 0.623 | 0.388    | 0.311             | 0.005777873                |

**ตารางผนวก 14** การวิเคราะห์ ANOVA ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียนและค่าไดอิเล็กตริก

| Model                   |            | Sum of Squares | df | Mean Square | F      | Sig.  |
|-------------------------|------------|----------------|----|-------------|--------|-------|
| ปริมาณความชื้น          | Regression | 0.000          | 1  | 0.000       | 4.794  | 0.060 |
|                         | Residual   | 0.000          | 8  | 0.000       |        |       |
|                         | Total      | 0.000          | 9  |             |        |       |
| น้ำหนักแห้ง             | Regression | 0.000          | 1  | 0.000       | 5.872  | 0.042 |
|                         | Residual   | 0.000          | 8  | 0.000       |        |       |
|                         | Total      | 0.000          | 9  |             |        |       |
| ปริมาณแป้ง              | Regression | 0.000          | 1  | 0.000       | 10.414 | 0.012 |
|                         | Residual   | 0.000          | 8  | 0.000       |        |       |
|                         | Total      | 0.000          | 9  |             |        |       |
| ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์     | Regression | 0.000          | 1  | 0.000       | 10.144 | 0.013 |
|                         | Residual   | 0.000          | 8  | 0.000       |        |       |
|                         | Total      | 0.000          | 9  |             |        |       |
| ค่า dielectric constant | Regression | 0.000          | 1  | 0.000       | 5.062  | 0.055 |
|                         | Residual   | 0.000          | 8  | 0.000       |        |       |
|                         | Total      | 0.000          | 9  |             |        |       |

ตารางผนวก 15 ระหว่างค่าตอบสนองเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟกับสมบัติทางกายภาพ-เคมีของทุเรียน  
และค่าไดอิเล็กตริก

| Model      |                | Unstandardized Coefficients |            | Standardized Coefficients | t       | Sig.  |
|------------|----------------|-----------------------------|------------|---------------------------|---------|-------|
|            |                | B                           | Std. Error | Beta                      |         |       |
| ปริมาณ     | (Constant)     | 0.537                       | 0.034      |                           | 15.733  | 0.000 |
| ความชื้น   | ปริมาณ         |                             |            |                           |         |       |
|            | ความชื้น       | 0.001                       | 0.000      | 0.612                     | 2.190   | 0.060 |
| น้ำหนัก    | (Constant)     | 0.634                       | 0.009      |                           | 67.320  | 0.000 |
| แห้ง       | น้ำหนักแห้ง    | -0.001                      | 0.000      | -0.651                    | -2.423  | 0.042 |
| ปริมาณ     | (Constant)     | 0.606                       | 0.002      |                           | 260.443 | 0.000 |
| แป้ง       | ปริมาณแป้ง     | 0.020                       | 0.006      | 0.752                     | 3.227   | 0.012 |
| ปริมาณ     | (Constant)     | 0.633                       | 0.007      |                           | 90.400  | 0.000 |
| น้ำตาล     | ปริมาณ         |                             |            |                           |         |       |
| รีดิวซ์    | น้ำตาลรีดิวซ์  | -0.003                      | 0.001      | -0.748                    | -3.185  | 0.013 |
| ค่า        | (Constant)     | 0.571                       | 0.018      |                           | 31.117  | 0.000 |
| dielectric | ค่า dielectric |                             |            |                           |         |       |
| constant   | constant       | 0.001                       | 0.000      | 0.623                     | 2.250   | 0.055 |



ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ปริมาณแป้งและน้ำตาลรีดิวซ์

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar as glucose, DNS-method) และ  
 แบ่งในเนื้อทุเรียน ตามวิธีของ AOAC (1984) and Miller (1956) มีวิธีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

### 1. วิธีการเตรียมสารเคมี

1.1 Zinc acetate solution: ละลาย Zn (OAc)<sub>2</sub> 6 กรัม ในน้ำ แล้วปรับปริมาตรให้  
 ครบ 100 มิลลิลิตร

1.2 Potassium ferrocyanide solution: ละลาย K<sub>4</sub>Fe (CN)<sub>6</sub> 6 กรัม ในน้ำ แล้วปรับ  
 ปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร

1.3 Phosphotungstic acid solution: ละลาย phosphotungstic acid 20 กรัม ในน้ำ  
 แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง

#### 1.4 Dinitro salicylic acid reagent (DNS)

|                           |     |             |
|---------------------------|-----|-------------|
| Sodium hydroxide          | 10  | กรัมต่อลิตร |
| Potassium sodium tartrate | 182 | กรัมต่อลิตร |
| Dinitro salicylic acid    | 2   | กรัมต่อลิตร |
| Phenol                    | 2   | กรัมต่อลิตร |
| Sodium sulphite           | 0.5 | กรัมต่อลิตร |
| H <sub>2</sub> O          | 1   | ลิตร        |

นำสารทั้งหมดละลายเข้าด้วยกันแล้วใส่ในขวดสีชา เก็บไว้ในตู้เย็น

1.5 สารละลายกลูโคสมาตรฐาน (Standard glucose solution) : ละลายกลูโคส  
 (A.R. grade) 1 กรัม ในน้ำ แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1 ลิตร

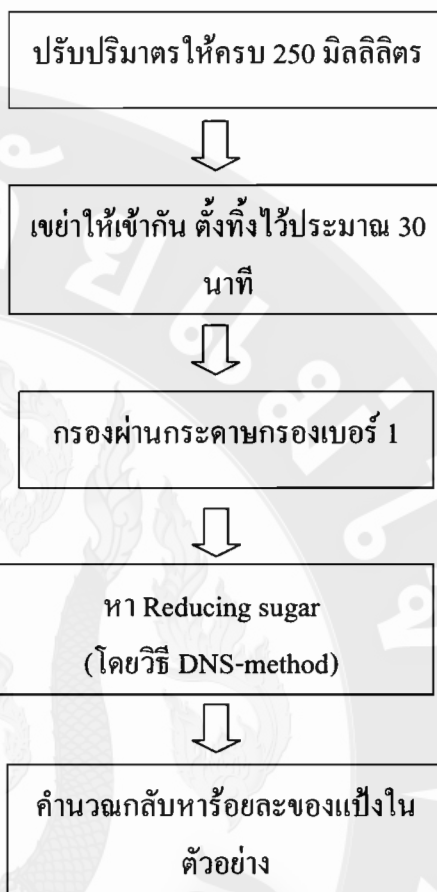
1.6 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid solution) ความเข้มข้น 1.5 N

1.7 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 20 % : ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  
 200 กรัม ในน้ำแล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1 ลิตร

## 2. วิธีการทดสอบ







### 3. การทำกราฟกลูโคสมาตรฐานสำหรับอ้างอิง

3.1 ปิเปตสารละลายกลูโคสมาตรฐานจำนวน 0, 2, 4 และ 6 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 10 มิลลิลิตร ในหลอดทดลอง

3.2 เติม DNS reagent 4 มิลลิลิตร เขย่า แล้วทำให้ร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส (ใน water bath) เป็นเวลา 30 นาที

3.3 เติมน้ำให้ได้ปริมาตรทั้งหมด 30 มิลลิลิตร แล้วทำให้อย่างรวดเร็ว

3.4 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็น blank แทนตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร และเติม DNS reagent 4 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 30 มิลลิลิตร

### 4. สูตรในการคำนวณปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และแป้ง

$$\text{ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{K_1 B(100)(\text{dilution})}{1000 A}$$

$$\text{ปริมาณแป้ง (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{K_2 V (100)(\text{dilution})}{1000 A}$$

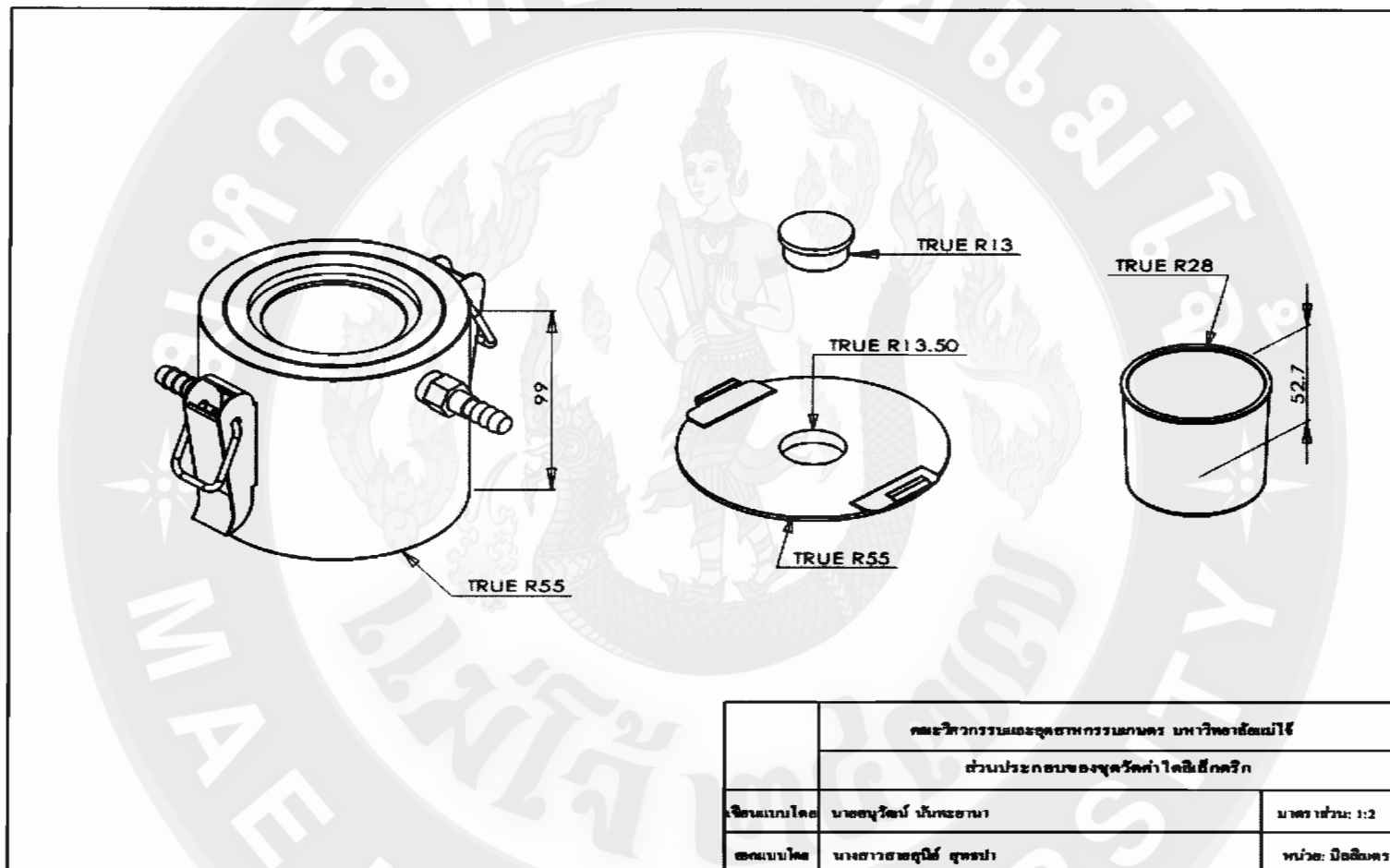
|       |          |   |                                       |
|-------|----------|---|---------------------------------------|
| เมื่อ | $K_1$    | = | $(\text{Slope})^{-1} I$               |
|       | $K_2$    | = | $(\text{Slope}) (0.9)^{-1} I$         |
|       | Slope    | = | ค่าที่ได้จากกราฟกฎโคสมมาตรฐาน         |
|       | I        | = | ค่าการดูดกลืนแสง                      |
|       | 0.9      | = | ค่าคงที่ในการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแป้ง    |
|       | B        | = | ปริมาณของเหลวทั้งหมดที่ใช้ (ในส่วนใส) |
|       | V        | = | ปริมาณของเหลวที่ใช้ (ในส่วนตะกอน)     |
|       | A        | = | น้ำหนักของตัวอย่าง                    |
|       | Dilution | = | ระดับการเจือจาง                       |

หมายเหตุ: ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี “DNS- method” หลังจากที่เราสารถละลายเอ็นตัวต้องนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงทันทีห้ามปล่อยทิ้งไว้ และค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มากกว่า 0.5 ให้เจือจางตัวอย่างที่เป็นส่วนใสก่อนนำไปวัดค่าดูดกลืนแสง

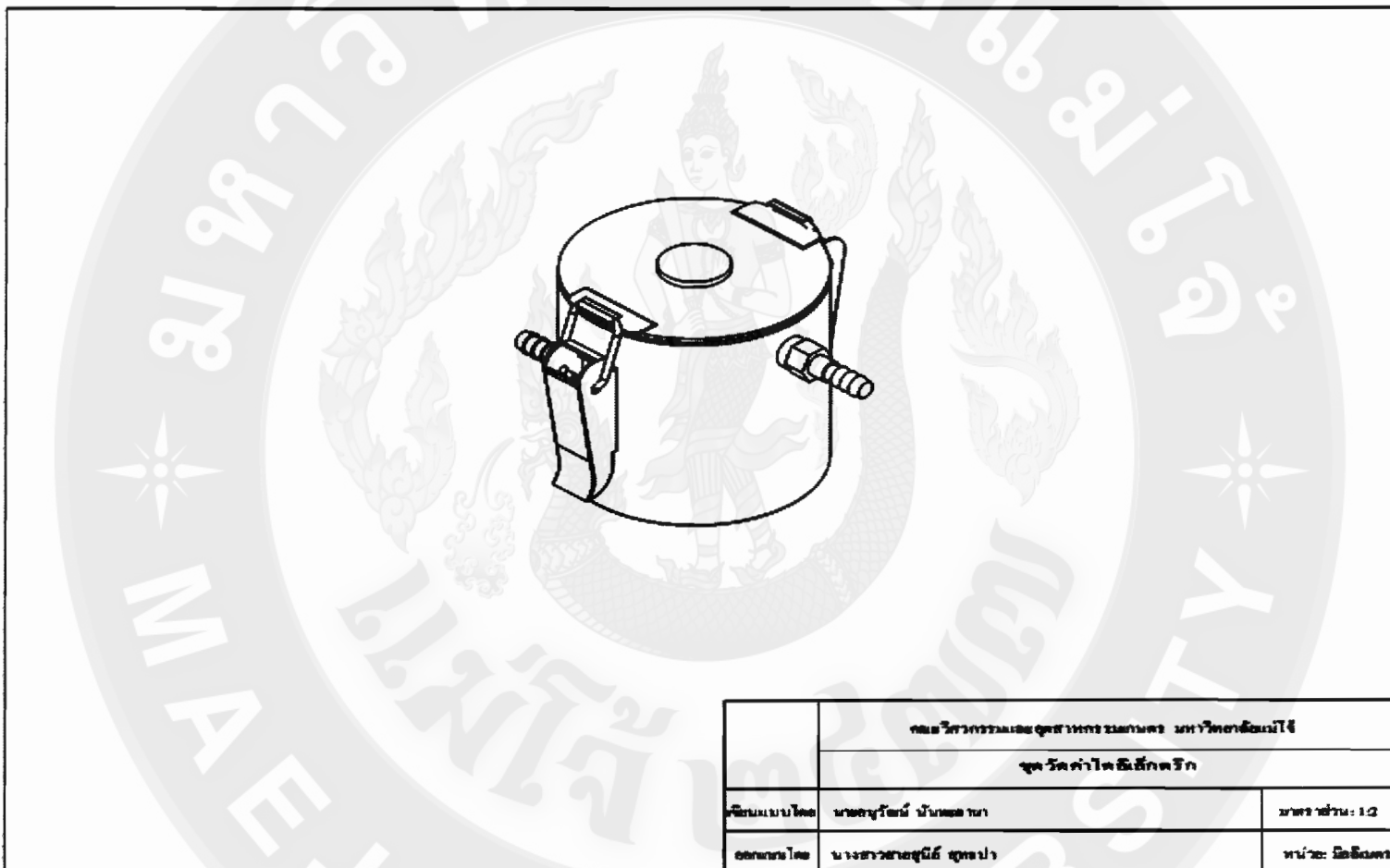


ภาคผนวก ง

การออกแบบชุดวัดคำไคอิเล็กทรอนิกส์



ภาพผนวก 1 ส่วนประกอบชุดวัดค่าไดอิเล็กตริก



ภาพผนวก 2 ชุดวัดค่าไดอิเล็กตริก



ภาคผนวก จ

ประวัติผู้วิจัย

### ประวัติผู้วิจัย

|                  |           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ-สกุล        |           | นางสาวสายสุนีย์ สุธรปา                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| เกิดเมื่อ        |           | 28 ตุลาคม 2528                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| สถานที่เกิด      |           | จังหวัดลำปาง                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| ประวัติการศึกษา  | พ.ศ. 2546 | จบมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย จังหวัดลำปาง                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|                  | พ.ศ. 2550 | ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่                                                                                                                                                                                                                                                            |
| ประวัติการฝึกงาน | พ.ศ. 2549 | นักศึกษาฝึกงาน บริษัท พอลลาร์ด จำกัด จังหวัดปทุมธานี                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| ผลงานทางวิชาการ  | พ.ศ. 2550 | จดนศาสตร์การอบแห้งลำไยแผ่นด้วยลมร้อนและรังสีอินฟราเรด โครงการงานวิศวกรรมปริญญาตรี มหาวิทยาลัยแม่โจ้                                                                                                                                                                                                                                  |
|                  | พ.ศ. 2552 | สายสุนีย์ สุธรปา, จาตุพงศ์ วาฤทธิ์, ชนิสรา หนูช่วย, จักรพงษ์ พิมพ์ม และโมไนย ไกรฤกษ์. 2552. ผลการตอบสนองของเซนเซอร์คลื่นไมโครเวฟที่สัมพันธ์ต่อความแก่-สุกของทุเรียน ใน รายงานการประชุมวิชาการวิทยาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 8 ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่  |
|                  |           | S. Suttapa, J. Varith, M. Krairiksh, C. Noochuay and J. Phimpimol .2009. Microwave Sensor Response In Relation To Durian Maturity . In: 5 <sup>th</sup> CIGR Section VI International Symposium on Food Processing, Monitoring Technillogy In Bioprocess and Food Quality Management. 31 August-02 September 2009. Potsdam, Germany. |