

# รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัย

เรื่องการพัฒนากระบวนการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเพื่อ

ตรวจสอบคุณภาพวัสดุเพื่อการส่งออก

ศาสตราจารย์ ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

นายอาทิตย์ เหมือนชู

RCIT

TK

๗๘๗๘

๒๕๖๓

เลขหมู่..... ๒๙๖.๑๖๒.....

เลขทะเบียน..... 54609.....

วัน,เดือน,ปี 24 ส.ค. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลืมทั้งห้าฉบับให้ตัดแปลตีพิมพ์ และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ ๒๕๔๖

b.๖๗๗๖๖๖๐๖

## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัย

### เรื่องการพัฒนากระบวนการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเพื่อ ตรวจสอบคุณภาพวัสดุเพื่อการส่งออก

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2546 จำนวนเงิน 360,560 บาท  
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ระหว่าง 1 ตุลาคม 2545 ถึง 30 กันยายน 2546

#### รายนามคณะผู้วิจัย

1. ศาสตราจารย์ ดร. โมไนย ไกรฤกษ์
2. ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์
3. นายอาณัติ เหมือนชู

สถานที่ทำการวิจัย ห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสาร ไร้สาย สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณสำนัก  
วิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่  
สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์การวิจัย และขอขอบคุณ รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา และคุณปิยนฎ อินทนกุล  
จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยทดสอบคุณสมบัติ  
ทางเคมีระหว่างการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัตถุ (ในที่นี้ทดลองกับมะม่วง) เพื่อคัดแยกและตรวจสอบคุณภาพ ได้เสนอเทคนิคการคำนวณแบบผสมระหว่างวิธีโมเมนต์รวมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดการกระเจิงย้อนกลับ จากนั้นได้พัฒนาระบบการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยวิธีที่กล่าวมานี้ แล้วตรวจสอบความถูกต้องกับผลการวัดที่ทีมาก่อน โดยทำที่ความถี่ 12.4 GHz พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ทำให้มีความแม่นยำของการคำนวณเป็นที่ยอมรับได้โดยที่ไม่ใช้เวลาคำนวณนานเกินไป คือขนาดของวัตถุที่ต้องการวัดต้องมีขนาดไม่ใหญ่กว่าความยาวคลื่นมาก ทำให้เลือกใช้ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้ได้เสรีในย่านของอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ ในการวัดทดสอบคุณสมบัติของมะม่วงซึ่งโดยทั่วไปมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของความถี่นี้ ได้เปรียบเทียบผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของมะม่วงน้ำดอกไม้ แรด และเขียวสวย ที่วันต่างๆ หลังการเก็บเกี่ยว กับผลการวัดคุณสมบัติทางเคมี คือค่า Fructose และ pH พบความสัมพันธ์ที่เห็นได้ชัดเจน ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาเครื่องตรวจสอบคุณภาพผลไม้อัตโนมัติต่อไป

## Abstract

This research is aimed to develop a dielectric property measurement system to classify and inspect dielectric object (here is mango). Moment method and geometry theories of diffraction are combined in calculation process of inverse scattering measurement to improve accuracy. Then, a system utilizing such method is developed to operate at 12.4 GHz and calibrated with the measured results in literatures. Measurement results show that the dimension of the object under test should not be too large as compared to the wavelength of the operating frequency, to obtain acceptable accurate results in reasonable short calculation time. For mango measurement, the frequency of 2.45GHz in Industrial, Scientific and Medical band is selected to comply the mentioned condition. Measured dielectric properties of Namdokmai, Rad and Keausawuay mangoes at various days after harvested are compared to chemical properties, viz., Fructose and pH. The obvious relationship can be found and bring about the low cost fruit inspection system.

# สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมา.....	1
วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
กล่าวนำ.....	3
หลักการวัดการกระเจิงย้อนกลับ.....	3
การหาค่าสภาพยอมเชิงซ้อน.....	7
สรุป.....	8
บทที่ 3 ระบบการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดการกระเจิงย้อนกลับ.....	9
กล่าวนำ.....	9
ระบบการวัด.....	9
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด.....	10
เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย.....	10
เครื่องกวาดโพรบ.....	10
การทำงานของเครื่องกวาดโพรบ.....	11
การขับสแต็ปมอเตอร์.....	11
วงจรขับสแต็ปมอเตอร์แบบแบ่งละเอียด.....	12
การนำไปใช้ในการวัดค่าความเป็นฉนวน.....	14
ประสิทธิภาพของเครื่องกวาดโพรบ.....	14
อุปกรณ์อื่นๆ.....	15
สรุป.....	16
บทที่ 4 การเปรียบเทียบระบบการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ใช้การวัดการกระเจิงย้อนกลับ.....	17
กล่าวนำ.....	17
การจัดระบบการวัด.....	17
การเปรียบเทียบและผลการวัด.....	18
สรุป.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของมะม่วง.....	21
กล่าวนำ.....	21
การทดลอง.....	21
สรุป.....	25
บทที่ 6 สรุป.....	26
ภาคผนวก ก โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมเครื่องกวาดโพรบและการอินเตอร์เฟสกับเครื่องวิเคราะห์โครม ข่ายเพื่อส่งข้อมูลที่วัดได้มาเก็บไว้ในแฟ้มข้อมูล.....	27
ภาคผนวก ข โปรแกรมประมวลผลหาค่าความเป็นฉนวนจากสนามที่วัดได้เนื่องจากการกระเจิงและเลี้ยว จากวัตถุ.....	51
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์หาปริมาณ Reducing Sugar.....	59
เอกสารอ้างอิง.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ผลิตอาหารเพื่อส่งออกสู่ตลาดโลกเป็นอุตสาหกรรมหลัก สิ่งที่สำคัญของสินค้าที่ต้องส่งออกคือคุณภาพของสินค้าต้องได้มาตรฐานและมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างสม่ำเสมอและเที่ยงตรง ตัวอย่างได้แก่ ผลไม้ ซึ่งต้องสามารถคัดจำแนกได้อย่างแม่นยำว่าผลไม้ชนิดใด สุก หรือเสียมากน้อยเพียงใด การตรวจสอบคุณภาพสินค้าที่ทำอยู่ในปัจจุบันทำได้โดยใช้คนซึ่งอาศัยความชำนาญเป็นหลัก การพัฒนาเครื่องมือที่สามารถทำงานแทนคนได้อย่างแม่นยำ และมีจำนวนมากโดยที่มีความเที่ยงตรงสูงเป็นสิ่งที่สำคัญและควรได้รับการพัฒนา

การตรวจคุณสมบัติของสินค้าอาจทำได้ด้วยการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ได้แก่ สภาพยอม (Permittivity) และความนำไฟฟ้า (Conductivity) ซึ่งมักมีการแสดงผลวัสดุอย่างเป็นตารางใน [1] ในกรณีที่ไม่ได้มีการวัดเก็บข้อมูลไว้ดังเช่นในกรณีของวัสดุหรือสินค้าเกษตรที่ประเทศไทยผลิตอยู่ จำเป็นต้องจัดการวัดขึ้นมาใหม่ นอกจากนี้ในขบวนการผลิตอย่างต่อเนื่องการวัดจะต้องทำได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องทำลาย กล่าวคือไม่ต้องแกะห่อหรือปอกเปลือก ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ใช้ได้ผลได้แก่การวัดการกระเจิงแบบย้อนกลับ ที่ทำได้โดยส่งคลื่นไมโครเวฟให้ไปตกกระทบยังวัสดุที่ต้องการทดสอบ แล้ววัดคลื่นตรงจากแหล่งกำเนิดและคลื่นกระเจิงรวมทั้งคลื่นแล้วบน จากนั้นคำนวณย้อนกลับจากสมการอินทิกรัลเพื่อหาค่าสภาพยอมและความนำไฟฟ้า

การวัดด้วยวิธีดังกล่าวมีใช้แพร่หลายในการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของอวัยวะส่วนต่างๆของร่างกาย [2] การที่จะวัดได้อย่างถูกต้องจะต้องจัดระบบการวัดให้คลื่นที่เดินทางจากต้นกำเนิดมายังวัตถุ และจากวัตถุไปยังระบบการวัดซึ่งอยู่ห่างกันจนคลื่นเป็นคลื่นระนาบ ที่ต้องใช้ระยะทางไกลเมื่อวัตถุมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น

การที่จะทำให้ระบบกะทัดรัด ระบบส่งคลื่นและรับคลื่นมีขนาดเล็กที่ทำได้ที่มีความถี่สูงซึ่งมีผลทำให้การวัดด้วยวิธีที่แสดงใน [2] และ [3] มีความแม่นยำลดลงไป การแก้ปัญหาคือความแม่นยำดังกล่าวทำได้โดยคำนวณแบบผสมระหว่างวิธีโมเมนต์รวมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตที่มีการนำเสนอใน [4] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะประยุกต์การคำนวณใน [4] เพื่อการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่คณะผู้วิจัยได้นำเสนอใน [5] ซึ่งจากผลการวัดวัสดุที่ทราบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก พบว่ามีความแม่นยำเป็นที่น่าพอใจ แต่วัสดุทางการเกษตรที่เป็นสินค้าส่งออกยังไม่ได้ทำการวัดซึ่งเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญ นอกจากนี้ผลงานที่คณะผู้วิจัยได้เริ่มทำมาซึ่งอาศัยเครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการที่มีราคาแพง

### วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อพัฒนาระบบการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก โดยใช้วิธีการวัดการกระเจิงย้อนกลับที่มีความแม่นยำ มีขนาดกะทัดรัด เหมาะสมกับการใช้ในภาคสนาม และใช้เครื่องมือนี้ในการเก็บข้อมูลทางการเกษตร(ในที่นี้คือมะม่วง) ที่จะเป็นฐานข้อมูลที่สำคัญต่อไป

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

มีข้อมูลคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสินค้าส่งออก ได้แก่มะม่วง เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการคัดแยกสินค้าโดยอัตโนมัติ และเครื่องต้นแบบที่มีต้นทุนต่ำและเหมาะสมสำหรับใช้งานในภาคสนาม ซึ่งมีประโยชน์ต่อผู้ส่งออกผลิตภัณฑ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

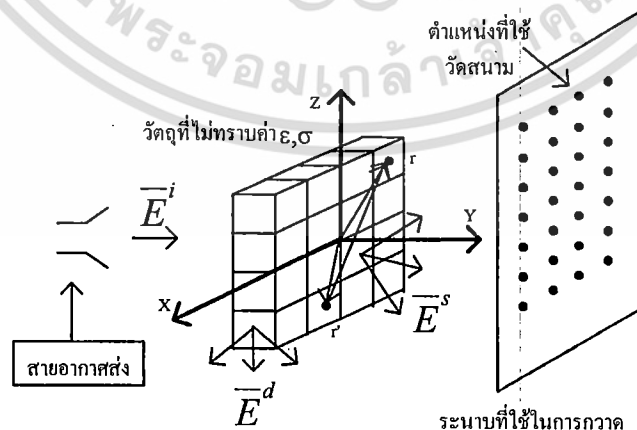
#### กล่าวนำ

การวัดการกระเจิงย้อนกลับเป็นวิธีการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยที่ไม่ต้องทำลาย (Non-destructive measurement) ทำได้โดยวัดคลื่นตกกระทบและคลื่นกระเจิง แล้วคำนวณย้อนกลับ ทำให้ทราบสภาพยอมเชิงซ้อนของวัตถุ เมื่อใช้ความถี่สูงอิทธิพลของคลื่นเลี้ยวเบนมีผลเพิ่มขึ้น ทำให้งานวิจัยนี้คิดรวมอิทธิพลของคลื่นเลี้ยวเบนเข้ามาด้วย ในการหาค่าสภาพยอมเชิงซ้อนจะทำได้โดยกระบวนการทำซ้ำในการแก้สมการ ในบทนี้กล่าวถึงหลักการการวัดการกระเจิงย้อนกลับเพื่อหาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัตถุที่คิดรวมผลของคลื่นเลี้ยวเบน

#### หลักการวัดการกระเจิงย้อนกลับ

การวัดการกระเจิงย้อนกลับเป็นวิธีที่จะวัดสนามไฟฟ้าที่กระเจิงจากวัตถุเมื่อมีคลื่นมาตกกระทบ แล้วคำนวณย้อนหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุนั้น ถ้าพิจารณาวัตถุที่มีค่าสภาพยอม (Permittivity) เป็น  $\epsilon(r)$  และค่าความนำ (Conductivity) เป็น  $\sigma(r)$  ที่ถูกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านดังรูปที่ 2.1 กระแสที่ถูกเหนี่ยวนำภายในวัตถุจะทำให้เกิดสนามกระเจิง  $\vec{E}^s$  และสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน  $\vec{E}^d$  ของสนามที่ตกกระทบ  $\vec{E}^i$  ดังนั้นสนามที่เกิดขึ้นในวัตถุ  $\vec{E}$  จะเกิดจากผลรวมของสนามที่ตกกระทบ สนามที่กระเจิง และสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน

$$\vec{E}(r) = \vec{E}^i(r) + \vec{E}^s(r) + \vec{E}^d(r) \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 หลักการวัดการกระเจิงแบบย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามที่กระเจิงภายในวัตถุสามารถแสดงในรูปของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า  $\bar{J}_{eq}$  โดยใช้ฟังก์ชันกรีนไดแอติก (Dyadic Green Function) ในอวกาศอิสระ  $\bar{G}(r, r')$  จะแสดงสนามกระเจิง  $\bar{E}^s$  ที่จุดภายในวัตถุได้ดังสมการ

$$\bar{E}^s(r) = \int_v \bar{J}_{eq}(r') \bullet \left[ PV \bar{G}(r, r') - \frac{1}{3j\omega\epsilon_0} |\delta(r-r')| \right] dv' \quad (2.2)$$

$$\bar{J}_{eq}(r') = \tau(r') \bar{E}(r') = [\sigma(r') + j\omega(\epsilon(r') - \epsilon_0) \bar{E}(r')] \quad (2.3)$$

$\tau(r)$  คือค่าสภาพยอมเชิงซ้อน ดังนั้น

$$\bar{E}^s(r) = PV \int_v \tau(r') \bar{E}(r') \bullet \bar{G}(r, r') dv' - \frac{\tau(r) \bar{E}(r)}{3j\omega\epsilon_0} \quad (2.4)$$

โดยที่  $\bar{G}(r, r')$  คือฟังก์ชันกรีนไดแอติกมีค่า

$$\bar{G}(r, r') = -j\omega\mu_0 \left[ I + \frac{\nabla\nabla}{k_0^2} \right] \psi(r, r') \quad (2.5)$$

และ  $\psi(r, r') = \frac{e^{-jk_0|r-r'|}}{4\pi|r-r'|}$ ,  $k_0 = \sqrt{\omega^2 \mu_0 \epsilon_0}$

$\mu_0$  คือค่าความซึมได้ที่อวกาศอิสระ  $\epsilon_0$  คือค่าสภาพยอมของอวกาศอิสระ และ PV แสดงถึงค่าที่สำคัญของการอินทิเกรต  $\delta(r, r')$  เป็นค่าฟังก์ชันเดลต้า I คือเมตริกซ์ที่มีค่าในแนวทแยงเป็น 1

พิจารณาสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบนที่เกิดจากคลื่นตกกระทบตั้งฉาก โดยวัตถุนั้นเป็นวัตถุผิวเรียบและตรง สนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบนหาได้จาก

$$\bar{E}^d(r) = \frac{\bar{E}^i(r) \bullet \bar{D}}{\sqrt{\rho}} e^{-j\omega\rho} \quad (2.6)$$

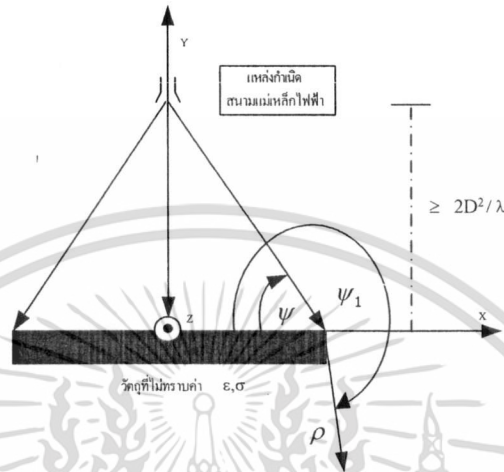
โดยที่  $\bar{D}$  เป็นสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนไดแอติก มีค่า

$$\bar{D} = \hat{a}_x \hat{a}_x \frac{e^{-j\omega\rho} \sin(\frac{\pi}{n})}{n\sqrt{2\pi k_0}} \left[ \frac{1}{\cos(\frac{\pi}{n}) - \cos(\frac{\psi_1 - \psi}{n})} - \frac{1}{\cos(\frac{\pi}{n}) - \cos(\frac{\psi_1 + \psi}{n})} \right] \quad (2.7)$$

$n$  ได้มาจากการหาค่าของมุมที่ขอบของวัตถุมีค่าเท่ากับ  $(2-n)\pi$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 2.2 ในกรณีที่ใช้การตกกระทบตั้งฉากและวัตถุนั้นเป็นวัตถุที่ขอบทำมุมศูนย์องศา( $n=2$ )  $D$  เป็นขนาดของด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศที่นำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และเมื่อคิดถึงการเลี้ยวเบนภายในวัตถุซึ่ง  $n = 2, \psi = \pi/2, \psi_1 = 0$  เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.6) จะได้  $\bar{E}^d = 0$



รูปที่ 2.2 สนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน

แทนค่าสมการที่ (2.4) ลงในสมการที่ (2.1) และเนื่องจากคิดสนามภายในวัตถุ ค่าสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน  $\bar{E}^d = 0$  ทำให้ได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (2.8) คือ

$$\left[1 + \frac{\tau(r)}{3j\omega\epsilon_0}\right] \bar{E}(r) - PV \int_V \tau(r') \bar{E}(r') \cdot \bar{G}(r, r') dV' = \bar{E}'(r) \quad (2.8)$$

ในสมการที่ (2.8)  $\bar{E}'(r)$  เป็นค่าสนามที่ตกกระทบและเป็นค่าที่ได้จากการวัด  $\bar{E}(r)$  เป็นค่าที่สามารถหาได้จากสมการที่ (2.8) ด้วยการแปลงสมการที่ (2.8) ให้เป็นเมตริกซ์โดยวิธีโมเมนต์ ที่ใช้พัลส์เอ็กซ์แพนชันและพอยท์แมตชิ่ง (Pulse Expansion and Point Matching) โดยแบ่งวัตถุออกเป็นบล็อก สามารถแปลงสมการที่ (2.8) เป็นเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.9)

$$[\bar{G}][\bar{E}] = -[\bar{E}'] \quad (2.9)$$

โดยที่  $[\bar{G}]$  เป็นเมตริกซ์ของฟังก์ชันกรีนไดโอดิกที่คิดในวัตถุนาน  $3N \times 3N$  ( $N$  เป็นจำนวนบล็อกของวัตถุที่ถูกแบ่งออก)  $[\bar{E}]$  และ  $[\bar{E}']$  เป็นเมตริกซ์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัตถุนาน  $3N \times 1$  ค่าสนามไฟฟ้าในเมตริกซ์ดังกล่าวจะมีค่าในทั้งสามแกน ( $x, y, z$ ) แต่เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการวัด จึงได้ทำการวัดค่าเฉพาะในแกน  $x$  เท่านั้น ซึ่งทำให้  $E_y$  และ  $E_z$  เท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

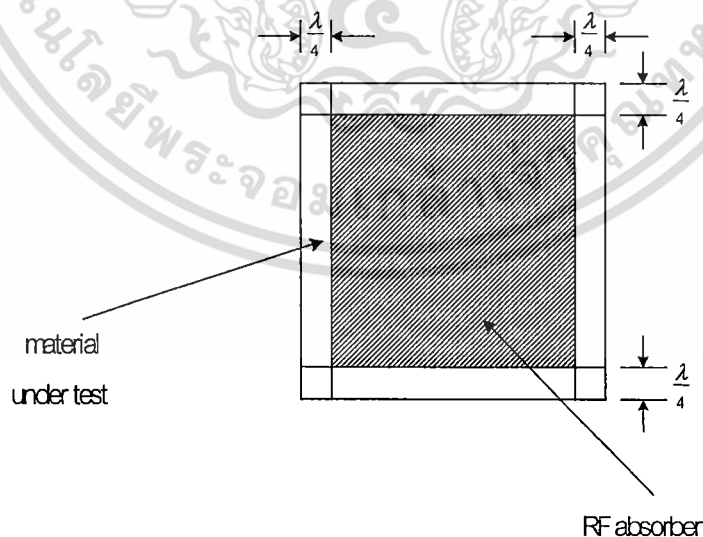
$$[\bar{E}] = \begin{bmatrix} E_x(r_1) \\ \dots \\ E_x(r_N) \\ E_y(r_1) = 0 \\ \dots \\ E_y(r_N) = 0 \\ E_z(r_1) = 0 \\ \dots \\ E_z(r_N) = 0 \end{bmatrix}, [\bar{E}^i] = \begin{bmatrix} E_x^i(r_1) \\ \dots \\ E_x^i(r_N) \\ E_y^i(r_1) = 0 \\ \dots \\ E_y^i(r_N) = 0 \\ E_z^i(r_1) = 0 \\ \dots \\ E_z^i(r_N) = 0 \end{bmatrix}$$

เมื่อคิดสนามไฟฟ้าที่กระเจิงออกสู่ภายนอกวัตถุ  $\bar{E}^T$  จะสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัตถุดังนี้

$$\bar{E}^T(r) = \bar{E}^s(r) + \bar{E}^d(r) \quad (2.10)$$

การวัดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนทำได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าบริเวณที่แรงจะเป็นบริเวณที่มีตัวดูดซับคลื่นวางอยู่ด้านหน้าวัตถุ โดยที่ระยะที่เหลือของขอบของวัตถุ จะมีขนาด  $\lambda/4$  เมื่อ  $\bar{E}^T$  เป็นค่าสนามรวมที่ได้จากการวัดโดยไม่มีตัวดูดซับคลื่นวางอยู่ข้างหน้า  $\bar{E}^s$  เป็นสนามไฟฟ้ากระเจิง  $\bar{E}^d$  เป็นสนามเลี้ยวเบนที่ได้จากการวัด

ในการคิดค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบน จะคิดเฉพาะการตกกระทบตั้งฉาก เพราะฉะนั้นในระนาบของการวัดจะเกิดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนเฉพาะในแนวเดียวกับวัตถุเท่านั้น



รูปที่ 2.3 การวัดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{E}^s(r) = \int_V \tau(r') \bar{E}(r') \cdot \bar{G}'(r, r') dV' \quad (2.11)$$

เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (2.10) จะเป็นดังนี้

$$\int_V \tau(r') \bar{E}(r') \cdot \bar{G}'(r, r') dV' = \bar{E}^T(r) - \bar{E}^d(r) \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.12) สามารถแปลงเป็นเมตริกซ์ได้ดังสมการ

$$[\bar{G}'] [\bar{E}] [T] = [\bar{E}^T] - [\bar{E}^d] \quad (2.13)$$

โดยที่  $[\bar{G}']$  เป็นเมตริกซ์ของฟังก์ชันที่คิดในวัตถุกับจุดที่ใช้ในการวัดมีขนาด  $3M \times 3M$  ( $M$  เป็นจำนวนจุดที่ใช้ในการวัด)  $[\bar{E}]$  เป็นเมตริกซ์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวัตถุขนาด  $3N \times 3N$  โดยที่มีการแปลงเมตริกซ์จากขนาด  $3N \times 1$  ให้มีขนาด  $3N \times 3N$   $[\bar{E}^T]$  เป็นสนามไฟฟ้ารวมที่ได้จากการวัด ขนาด  $3M \times 1$   $[\bar{E}^d]$  เป็นค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเลี้ยวเบนที่วัดได้ขนาด  $3M \times 1$   $[T]$  เป็นค่าสภาพยอมเชิงซ้อนของวัตถุ มีขนาด  $3N \times 1$  เช่นเดียวกับ  $[\bar{E}^T]$  และ  $[\bar{E}^d]$   $[\bar{E}^T]$  และ  $[\bar{E}^d]$  จะมีค่าเฉพาะในแกน  $x$  เช่นเดียวกับ  $[\bar{E}]$  และ  $\bar{E}^i$

$$[\bar{E}^T] = \begin{bmatrix} E_x^T(r_1) \\ \dots \\ E_x^T(r_M) \\ E_y^T(r_1) = 0 \\ \dots \\ E_y^T(r_M) = 0 \\ E_z^T(r_1) = 0 \\ \dots \\ E_z^T(r_M) = 0 \end{bmatrix}, \quad [\bar{E}^d] = \begin{bmatrix} E_x^d(r_1) \\ \dots \\ E_x^d(r_M) \\ E_y^d(r_1) = 0 \\ \dots \\ E_y^d(r_M) = 0 \\ E_z^d(r_1) = 0 \\ \dots \\ E_z^d(r_M) = 0 \end{bmatrix}$$

### การหาค่าสภาพยอมเชิงซ้อน

เมื่อพิจารณาการหาค่าสภาพยอมเชิงซ้อนที่ได้จากสนามไฟฟ้าตกกระทบ จากสมการที่ (2.9) สามารถหาสนามที่เกิดขึ้นในวัตถุจากสนามที่กระเจิงที่วัดได้ สนามเลี้ยวเบนที่วัดได้ สนามที่ตกกระทบและค่าสภาพยอมเชิงซ้อนจะสามารถหาค่าสนามที่เกิดขึ้นภายในวัตถุได้ เช่นเดียวกับถ้าทราบค่าสนามที่เกิดขึ้นในวัตถุ สนามกระเจิงและสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบน สามารถหาค่าสภาพยอมเชิงซ้อนได้จากสมการที่ (2.13)

ดังนั้นทางเลือกที่เป็นไปได้คือการใช้ขบวนการทำซ้ำ เพื่อหาค่าจากสองสมการ ซึ่งจะนำไปสู่การหาค่าสนามที่เกิดขึ้นในวัตถุและค่าสภาพยอมเชิงซ้อน โดยเริ่มจากการสมมติให้วัตถุมีค่าสภาพยอมเชิงซ้อนเท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับตัวกลาง (อากาศ) นำไปแทนค่าลงในสมการที่ (2.13) เพื่อหาค่าสภาพยอมเชิงซ้อน ซึ่งเป็นการประมาณในขั้นแรก โดยมีเงื่อนไขว่า

$$\|[\bar{E}^T - \bar{E}^a] - [\bar{G}][\bar{E}][T]\|^2 \Rightarrow \text{น้อยที่สุด} \quad (2.14)$$

$$\|[T]\|^2 \Rightarrow \text{น้อยที่สุด} \quad (2.15)$$

หลังจากนั้นนำค่าสภาพยอมเชิงซ้อน ไปแทนลงในสมการที่ (2.9) เพื่อทำขบวนการข้างต้นอีกครั้ง ผลที่ได้จะเป็นการประมาณขั้นที่สอง ทำซ้ำจนกว่าจะได้ผลตามเงื่อนไขข้างต้นจึงจะเป็นผลที่เชื่อถือได้

### สรุป

ในบทนี้ได้แสดงแนวความคิดของการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดการกระเจิงย้อนกลับที่เป็นพื้นฐานของงานวิจัยนี้ ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาโปรแกรมควบคุมและโปรแกรมคำนวณซึ่งจะใช้ในบทต่อไป

### บทที่ 3

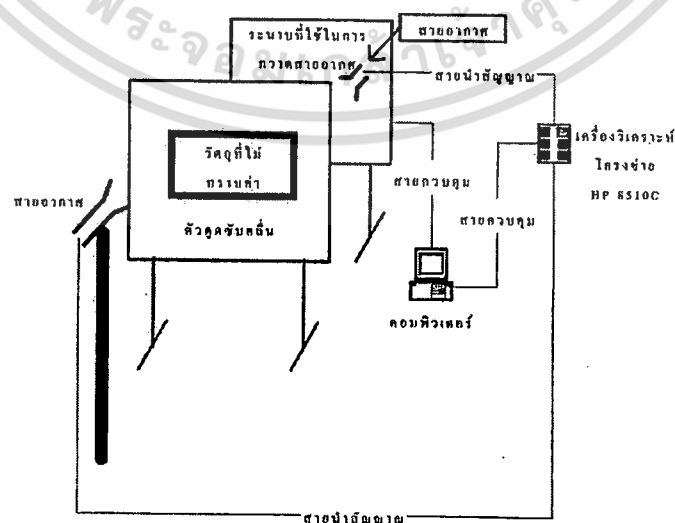
#### ระบบการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดการกระเจิงย้อนกลับ

##### กล่าวนำ

ขั้นตอนในการคำนวณหาค่าความเป็นฉนวนเริ่มจากเก็บค่าสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ สนามไฟฟ้าที่กระเจิง และสนามไฟฟ้าที่เลี้ยวเบนที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (HP8510C) และส่งมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะสร้างพิกัดของจุดในวัตถุและพิกัดของจุดที่ใช้ในการวัด หลังจากนั้นจะคำนวณค่าฟังก์ชันกรีนไดอิเล็กตริกของแต่ละจุดในวัตถุเทียบกับจุดที่ใช้ในการวัด โปรแกรมจะเริ่มคำนวณแบบวงรอบ ณ จุดนี้ด้วยการคำนวณค่าฟังก์ชันกรีนไดอิเล็กตริกของแต่ละจุดในวัตถุเทียบกับตัววัตถุเอง (โดยใช้ค่าสภาพยอมเชิงซ้อนของอากาศ) หลังจากนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าที่อยู่ในวัตถุได้ ผลต่างของสนามไฟฟ้าที่เลี้ยวเบนที่วัดได้กับค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการกระเจิง จะสามารถคำนวณหาค่าสภาพยอมเชิงซ้อนได้ ซึ่งเป็นค่าประมาณในขั้นแรก เมื่อได้ค่าสภาพยอมเชิงซ้อนแล้ว นำไปแทนค่าของสภาพยอมเชิงซ้อนของอากาศที่ใช้ในขั้นตอนการคำนวณแบบวงรอบ หลังจากนั้นจะคำนวณแบบวงรอบไปจนกว่าเป็นไปตามเงื่อนไขในสมการ (2.14) และ (2.15)

##### ระบบการวัด

ระบบที่ใช้ในการวัดค่าความเป็นฉนวนของวัตถุ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 โดยสายอากาศส่งจะถูกติดตั้งบนขาตั้ง สายอากาศรับจะถูกติดตั้งที่ตัวกวาดสายอากาศ ซึ่งทำหน้าที่ในการรับค่าสนามที่จุดต่างๆ โดยจำนวนจุดและระยะห่างระหว่างจุดในการกวาด ( $\lambda/4$ ) จะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจะส่งค่าขนาดและเฟสที่วัดได้ที่จุดต่างๆ กลับมาที่คอมพิวเตอร์ ซึ่งคอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่ในการเก็บข้อมูลและคำนวณค่าสภาพยอมเชิงซ้อนได้

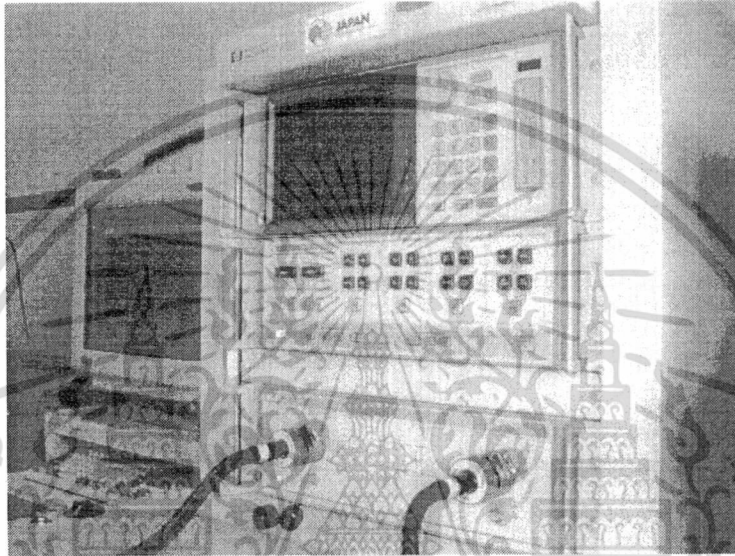


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ระบบการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

### เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

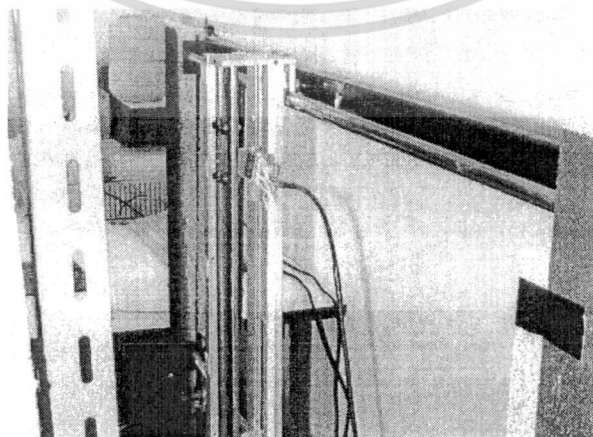
เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจะทำหน้าที่ในการวัดข้อมูลขนาดและเฟสของสนามในแต่ละตำแหน่ง ที่เครื่องกวาดโพรบเคลื่อนที่ไปในระนาบอะเพอร์เจอร์ที่ทำการวัด อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศส่งเพื่อแพร่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าออกมา เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (HP8510C)

### เครื่องกวาดโพรบ

อุปกรณ์ที่ใช้ขับเคลื่อนโพรบไปบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศ ในงานวิจัยนี้เรียกว่าเครื่องกวาดโพรบ มีลักษณะการทำงานพื้นฐานคล้ายกับพล็อตเตอร์ ที่มีการเคลื่อนที่เป็นระนาบ ซึ่งในการใช้งานจริงจะนำโพรบที่ใช้ในการวัดมายึดติดกับแท่นกวาดของตัวเครื่องกวาดโพรบ ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการเขียนโปรแกรมสั่งให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางต่างๆ ได้ตามต้องการสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่สามารถเผยแพร่ได้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การทำงานของเครื่องกวาดโพรบ

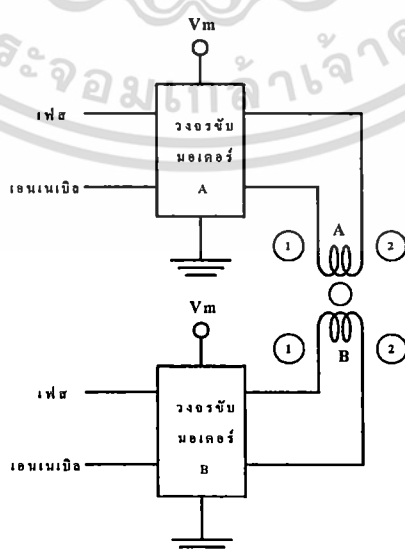
เครื่องกวาดโพรบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีพื้นฐานการออกแบบมาจากพล็อตเตอร์ โดยดัดแปลงให้สามารถนำมาใช้ในการทดสอบกับงานวิจัยในครั้งนี้ได้ ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องกวาดโพรบ แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ อุปกรณ์ชุดกลไก และอุปกรณ์แผงควบคุม โดยอุปกรณ์ชุดกลไกจะเป็นชิ้นส่วนอลูมิเนียม เหล็ก เส้นลวดสลิง เส้นเอ็น ตลับลูกปืนขนาดต่างๆ และส่วนที่สำคัญที่สุดของชุดกลไก คือ สเต็ปมอเตอร์ ซึ่งจะได้อีกกล่าวถึงในรายละเอียดอีกครั้งในส่วนต่อไป สำหรับอุปกรณ์แผงควบคุมนั้นเป็นส่วนของวงจรควบคุมให้สเต็ปมอเตอร์ทำงานตามโปรแกรมที่เขียนไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์

การทำงานของชิ้นส่วนของเครื่องกวาดโพรบ จะมีไมโครคอนโทรลเลอร์คอยรับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาคำนวณหาตำแหน่งที่จะเคลื่อนที่ไป แล้วส่งสัญญาณให้วงจรขับสเต็ปมอเตอร์ เพื่อหมุนสเต็ปมอเตอร์ไปตามจุดต่างๆที่คำนวณไว้

สำหรับสเต็ปมอเตอร์ที่ใช้ในเครื่องกวาดโพรบนี้ จะใช้ 2 ตัว เพื่อสามารถขับได้ทั้ง 2 แนว (x,y) โดยจะใช้ สเต็ปมอเตอร์แบบเคลื่อนที่ 1.8 องศาต่อสเต็ป หมายถึงในหนึ่งรอบของสเต็ปมอเตอร์มีการเคลื่อนที่ 200 สเต็ป (360 องศาหารด้วย 1.8) และถ้าเคลื่อนที่แบบครึ่งสเต็ปจะเคลื่อนที่ได้ 400 สเต็ปต่อรอบ ซึ่งในทางปฏิบัติภาคกลไกทำได้ยาก ถ้าใช้สเต็ปมอเตอร์ที่มีความละเอียดสูงกว่านี้ ก็จะหาสเต็ปมอเตอร์ได้ยาก และราคาแพง แต่เราสามารถที่จะทำให้สเต็ปมอเตอร์นั้นมีการเคลื่อนที่ ที่ละเอียดมากขึ้น โดยการใช่วงจรสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งสเต็ปละเอียด (Micro Step Driver)

### การขับสเต็ปมอเตอร์

การขับสเต็ปมอเตอร์ในเครื่องกวาดโพรบนี้ ใช่วงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งสเต็ปละเอียด แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 ใช่วงจรขับสเต็ปมอเตอร์ 2 วงจร ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ เพื่อขับสเต็ปมอเตอร์ โดยให้ขาเฟส(Phase) เป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของกระแสในขดลวดและส่วนขาเอนเนเบิล(Enable) ใช้ควบคุมให้เกิดกระแสไหลในขดลวด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.4 แสดงวงจรขับสเต็ปมอเตอร์เบื้องต้นให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความสัมพันธ์ของขาทั้งสองกับกระแสในขดลวดแสดงดังตารางที่ 3.1 ในการขับสเต็ปมอเตอร์แบบเต็มสเต็ป(Full Step Driver) นั้นมีหลักการง่ายๆคือ ให้มีกระแสไหลในขดลวด 2 ขดสลับกัน ซึ่งสามารถสลับได้ 4 แบบ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงการไหลของกระแสในขดลวดของสเต็ปมอเตอร์กรณีการหมุนแบบเต็มสเต็ป

สเต็ป	เอนเนเบิล A	เอนเนเบิล B	เฟส A	เฟส B	กระแสในขดลวด A	กระแสในขดลวด B
1	1	1	0	0	กระแสไหลจาก ① ไป ②	กระแสไหลจาก ① ไป ②
2	1	1	1	0	กระแสไหลจาก ② ไป ①	กระแสไหลจาก ① ไป ②
3	1	1	1	1	กระแสไหลจาก ② ไป ①	กระแสไหลจาก ② ไป ①
4	1	1	0	1	กระแสไหลจาก ① ไป ②	กระแสไหลจาก ② ไป ①

ถ้าต้องการขับให้สเต็ปมอเตอร์หมุนแบบครึ่งสเต็ป(Half Step Driver) ก็กำหนดให้มีการหยุดไหลของกระแสในขดลวด A และ B คั่นสลับอยู่ในลักษณะการหมุนแบบเต็มสเต็ปก็จะได้การหมุนของสเต็ปมอเตอร์ครึ่งสเต็ป ดังแสดงในตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าสามารถทำให้สเต็ปมอเตอร์เคลื่อนที่ได้ละเอียดขึ้นอีกเท่าตัวจากแนวคิดนี้ จึงนำมาพัฒนาเป็นวงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งละเอียด ซึ่งสามารถทำให้สเต็ปมอเตอร์ธรรมดา กลายเป็นสเต็ปมอเตอร์ที่มีสเต็ป การหมุนที่มีความละเอียดสูง ซึ่งในการสร้างเครื่องกวาดโพรบเครื่องนี้ได้ กำหนดไว้ที่ 1600 สเต็ปต่อรอบ

ตารางที่ 3.2 แสดงการไหลของกระแสในขดลวดของสเต็ปมอเตอร์ กรณีการหมุนแบบครึ่งสเต็ป

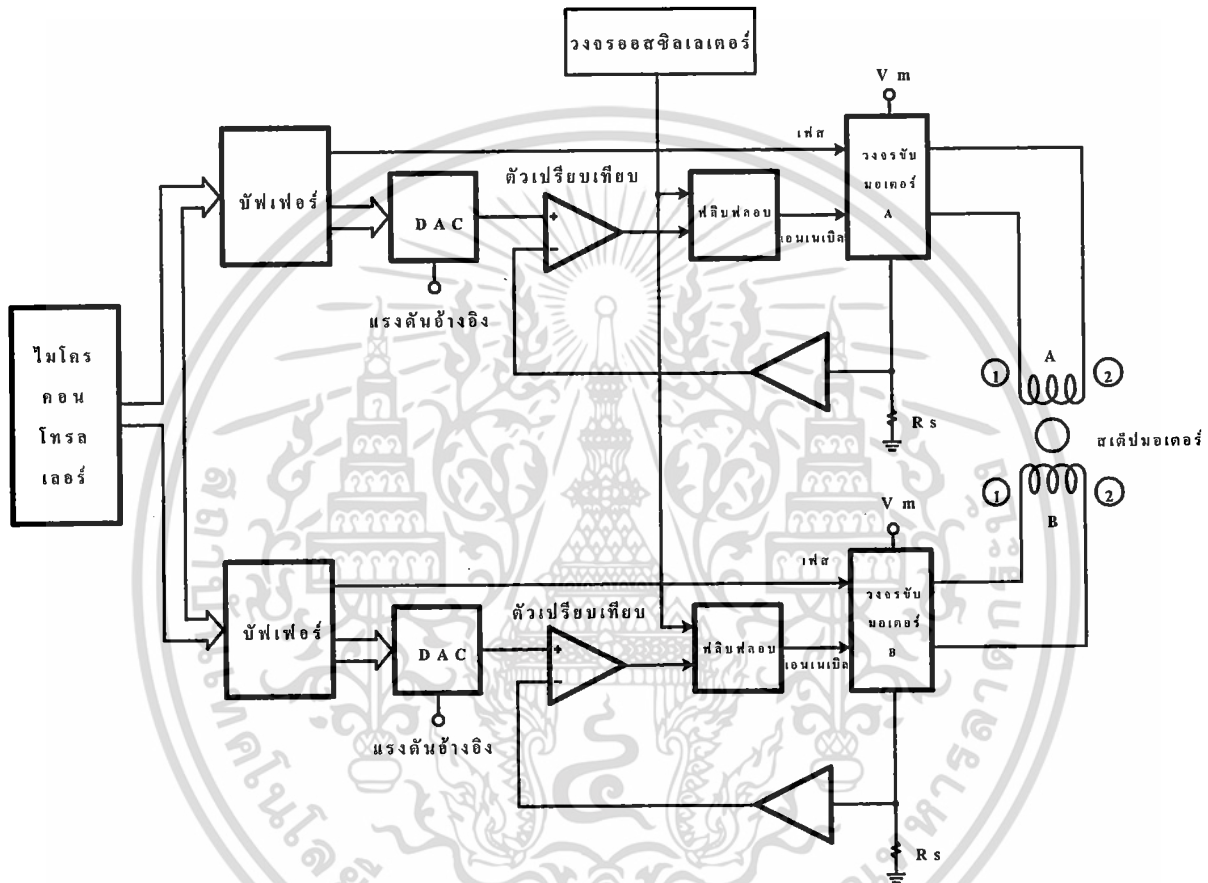
สเต็ป	เอนเนเบิล A	เอนเนเบิล B	เฟส A	เฟส B	กระแสในขดลวด A	กระแสในขดลวด B
1	1	1	0	0	กระแสไหลจาก ① ไป ②	กระแสไหลจาก ① ไป ②
2	1	0	1	0	กระแสไหลจาก ① ไป ②	ไม่มีกระแสไหล
3	1	1	1	1	กระแสไหลจาก ② ไป ①	กระแสไหลจาก ① ไป ②
4	0	1	0	1	ไม่มีกระแสไหล	กระแสไหลจาก ① ไป ②
5	1	1	1	1	กระแสไหลจาก ② ไป ①	กระแสไหลจาก ② ไป ①
6	1	0	1	1	กระแสไหลจาก ② ไป ①	ไม่มีกระแสไหล
7	1	1	0	1	กระแสไหลจาก ① ไป ②	กระแสไหลจาก ② ไป ①
8	0	1	0	1	ไม่มีกระแสไหล	กระแสไหลจาก ② ไป ①

### วงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งละเอียด

จากรูปที่ 3.5 แสดงผังภูมิของวงจรขับมอเตอร์แบบแบ่งละเอียด ที่ภาคขับสเต็ปมอเตอร์จะมีตัวต้านทานต่อลงกราวด์อยู่ภาคละหนึ่งตัว คือ  $R_1$  กระแสที่จะไหลผ่านขดลวด จะต้องไหลผ่าน  $R_1$  ก่อนลงกราวด์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลิปฟลอปจะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของภาคขับสเต็ปมอเตอร์ (ซึ่งหมายถึง ทำหน้าที่ส่งสัญญาณแอนเนบิลไปให้แก่ภาคขับ สเต็ปมอเตอร์นั่นเอง) ฟลิปฟลอปจะทำงานตามสัญญาณนาฬิกาที่ป้อนเข้ามาจากวงจรออสซิลเลเตอร์ มีวงจรเปรียบเทียบแรงดันอยู่บนหน้าฟลิปฟลอป ซึ่งได้รับอินพุท 2 ทาง ทางหนึ่งจากภาคเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก(DAC) อีกทางมาจากวงจรขยายแรงดันที่ได้มาจากแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน  $R_s$  ภาค DAC ถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยผ่านทางบัฟเฟอร์ ส่วนขาเฟสต่อเข้ากับบัฟเฟอร์โดยตรง



รูปที่ 3.5 แสดงผังภูมิการขับสเต็ปมอเตอร์ในแผงวงจรควบคุม

จากจุดมุ่งหมายเดิมคือ ต้องควบคุมกระแสในขดลวดให้ได้ ในการควบคุมแบบหยุดกระแสในขดลวด A และ B สลับกันในจังหวะที่เหมาะสมแทรกอยู่ในการหมุนแบบเต็มสเต็ป แต่ในวงจรขับสเต็ปมอเตอร์แบบแบ่งละเอียดต้องทำให้การไหลของกระแสในขดลวด A และ B ให้มีการลดหลั่นกัน คือไม่ถึงกับหยุดไปเลย แต่จะลดหลั่นกันเป็นลำดับแทรกอยู่ในช่วงการหมุนแบบเต็มสเต็ปเหมือนเดิม วิธีการนี้ได้จากการที่กระแสของขดลวดไหลผ่าน  $R_s$  จะเกิดแรงดันคร่อม  $R_s$  แล้วถูกขยายก่อนที่จะส่งไปยังขาลบของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน แรงดันที่ขาลบของวงจรเปรียบเทียบแรงดันต้องเท่ากับแรงดันที่ขาบวกจะมากกว่าไม่ได้ ถ้ามากกว่าวงจรเปรียบเทียบแรงดัน จะทำให้ฟลิปฟลอปหยุดทำงานกระแสในขดลวดหยุดไหล ดังนั้นกระแสในขดลวดจึงถูกควบคุมด้วยแรงดันที่ขาบวกของวงจรเปรียบเทียบที่ต่ออยู่กับภาค DAC ซึ่งถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนโทรลเลอร์ในขั้นสุดท้าย สรุปก็คือ การทำงานทุกอย่าง จะถูกควบคุมด้วยโปรแกรม ซึ่ง โปรแกรมนี้จะทำการควบคุมให้ขาเฟส A และ B ทำงานสลับกัน 4 ครั้ง ในลักษณะของเต็มสเต็ป และส่งข้อมูล 7 บิต ให้ภาค DAC ทำการแปลงสัญญาณเป็นขั้นบันไดสามเหลี่ยมมีเฟสต่างกัน 180 องศา

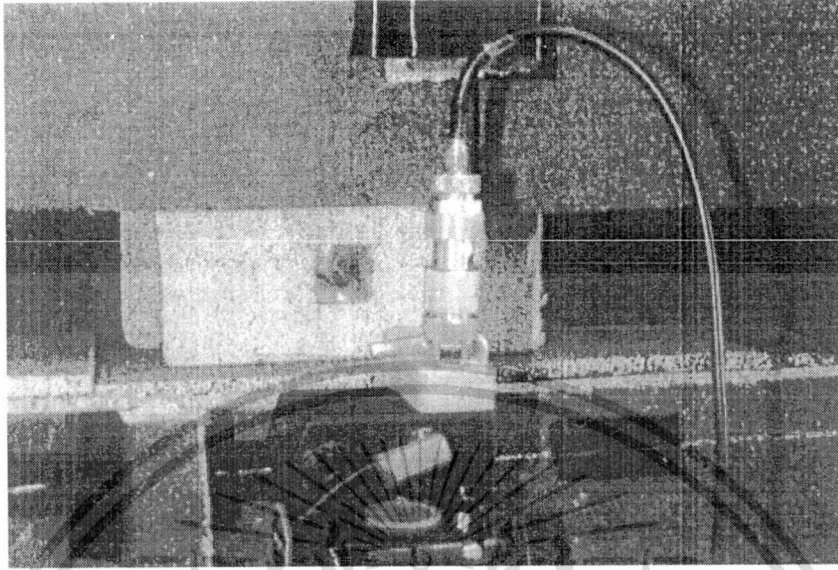
### การนำไปใช้ในการวัดค่าความเป็นฉนวน

เนื่องจากวงจรควบคุมของเครื่องกวาดโพรบเป็นแบบเล็กกะทัดรัด จึงไม่มีหน่วยความจำบัฟเฟอร์การส่งคำสั่งจากคอมพิวเตอร์มาที่เครื่องกวาดโพรบ จึงใช้พอร์ตขนานเพียงอย่างเดียว เพราะสามารถทำการตรวจสอบแฮนด์เชคกิ้ง (Handshaking) ได้ดีกว่าพอร์ตอนุกรม RS-232 และมีความเร็วในการส่งสูงมากกว่า โดยเครื่องกวาดโพรบจะรับคำสั่งเข้ามาทีละคำสั่งแล้วปฏิบัติการทันที สำหรับการนำมาใช้กับระบบการวัดสนามระยะใกล้แบบระนาบนี้ เครื่องกวาดโพรบจัดเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากขึ้นหนึ่ง เนื่องจากการวัดไปตามตำแหน่งต่างๆบนอะเพอร์เจอร์ของวัตถุที่ทำการทดสอบนั้น ระยะห่างของการกวาดจะต้องที่เที่ยงตรงแม่นยำ เพื่อให้โพรบจะได้วัดค่าได้ถูกต้อง ดังนั้นการสร้างเครื่องกวาดโพรบขึ้นมาใช้งาน จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงระบบกลไกทางกลศาสตร์เป็นสำคัญ เพราะถึงแม้ว่าวงจรขับสเต็ปมอเตอร์จะดีเพียงใดก็ตาม แต่ถ้าระบบกลไกไม่ดีแล้ว ค่าความละเอียดถูกต้องของการกวาดบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศทดสอบก็จะคลาดเคลื่อนไปด้วยเช่นกัน

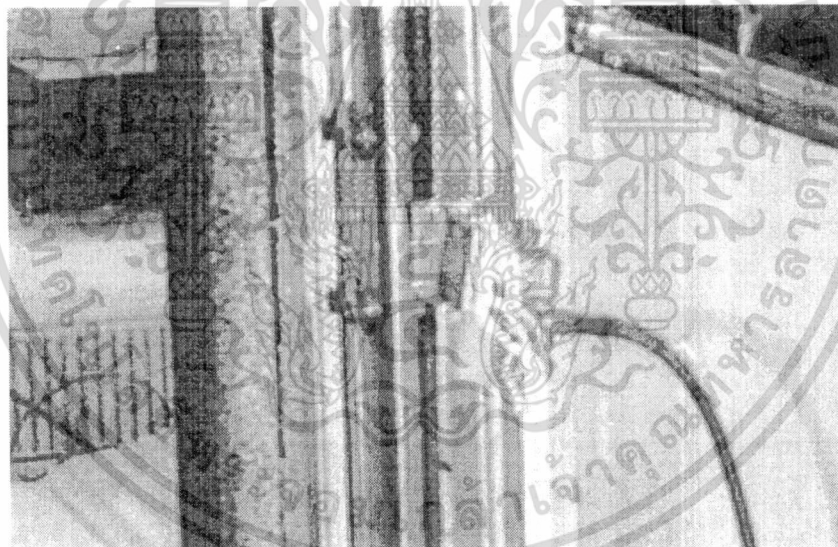
### ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกวาดโพรบ

ในการออกแบบสร้างเครื่องกวาดโพรบ เพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นการนำเอาหลักการการทำงานของเครื่องพล็อตเตอร์มาช่วยในการประดิษฐ์ โดยมีความสามารถสูงสุดของการกวาดโพรบไปบนอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศที่ต้องการวัดเท่ากับขนาดพื้นที่  $54 \times 38$  ตารางเซนติเมตร ในระนาบ  $x, y$  ซึ่งเหมาะสำหรับใช้วัดสายอากาศที่มีขนาดเล็กที่มีพื้นที่ของ อะเพอร์เจอร์ไม่เกิน  $54 \times 38$  ตารางเซนติเมตรดังกล่าว สำหรับความเที่ยงตรงของการเคลื่อนที่ของเครื่องกวาดโพรบนี้ สามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งต่างๆได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เนื่องจากใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมการเคลื่อนที่และใช้สเต็ปมอเตอร์ในการหมุนที่มีความละเอียดสูง

## อุปกรณ์อื่นๆ



รูปที่ 3.6 การติดตั้งสายอากาศส่ง



รูปที่ 3.7 การติดตั้งสายอากาศรับ

นอกจากเครื่องกวาดโพรบที่ได้กล่าวถึงแล้วนั้น ยังมีอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในระบบการวัดนี้อีก ได้แก่ สายอากาศส่ง สายอากาศรับ ตัวดูดซับคลื่น และเครื่องคอมพิวเตอร์ รูปที่ 3.6 และ 3.7 แสดงการติดตั้งสายอากาศส่งและสายอากาศรับ โดยที่สายอากาศส่งจะติดตั้งอยู่บนตัวยึดที่อยู่กับที่ สายอากาศรับจะติดตั้งอยู่ที่เครื่องกวาดโพรบเพื่อเก็บข้อมูลของสนามไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณ

สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็น ซึ่งทำหน้าที่หลายอย่างในระบบการวัดค่าความเป็นฉนวนดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ทำหน้าที่ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องกวาดโพรบ ให้เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการวัดบนระนาบอะเพอร์เจอร์
2. ทำหน้าที่ในการอินเตอร์เฟสกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย เพื่อส่งข้อมูลที่วัดได้มาเก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลของเครื่องคอมพิวเตอร์ ก่อนนำไปประมวลผลต่อไป
3. ทำหน้าที่ในการประมวลผล และคำนวณหาค่าความเป็นฉนวน

### สรุป

ระบบการหาค่าความเป็นฉนวนในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย สายอากาศส่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟส่งไปยังวัตถุที่ทำการทดสอบ สายอากาศรับซึ่งติดตั้งอยู่บนเครื่องกวาดโพรบ ทำหน้าที่เก็บค่าสนามไฟฟ้าทั้งขนาดและเฟสที่ได้จากการวัด แล้วส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำการคำนวณ เครื่องกวาดโพรบทำหน้าที่ในการกวาดในแนวระนาบเพื่อเก็บข้อมูลของสนามไฟฟ้า เครื่องคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยผ่านแผงวงจรของฮิวเลตแพคการ์ดและควบคุมการทำงานของเครื่องกวาดโพรบผ่านทางช่องต่อเครื่องพิมพ์แบบขนาน ตัวดูดซับคลื่นทำหน้าที่ในการดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้การวัดค่าสนามไฟฟ้านั้นได้ค่าที่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

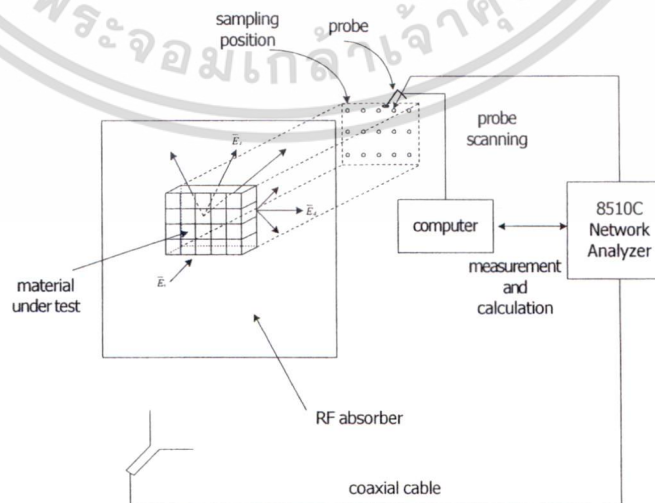
การเปรียบเทียบระบบการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ใช้การวัดการกระเจิงย้อนกลับ

กล่าวนำ

ในการที่จะทราบว่าระบบการวัดไดอิเล็กตริกที่ใช้การวัดการกระเจิงย้อนกลับที่พัฒนาขึ้นทำงานได้ดีหรือไม่จะต้องมีการเปรียบเทียบ ซึ่งจะทำได้โดยวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ทราบค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) และความนำ( $\sigma$ ) แล้วนำผลการวัดมาเปรียบเทียบกับค่าที่ทราบค่าอยู่แล้วนั้น เมื่อแน่ใจว่ามีความแม่นยำถูกต้องจึงนำไปวัดคุณสมบัติของวัตถุอื่นต่อไป

การจัดระบบการวัด

เริ่มแรกคณะผู้วิจัยได้จัดการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ใช้การวัดการกระเจิงย้อนกลับเพื่อวัดคุณสมบัติของวัตถุที่มีความถี่ 12.4 GHz ( $\lambda = 2.4\text{cm}$ ) มีผังภูมิของระบบดังแสดงในรูปที่ 4.1 (การเลือกใช้ความถี่นี้เพราะเป็นความถี่ที่มีอุปกรณ์หลายอย่างหาได้ง่าย เนื่องจากมีใช้งานในเชิงพาณิชย์) จากรูปเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8510C จะส่งคลื่นระนาบความถี่ 12.4 GHz โดยใช้สายอากาศส่ง และจะวัดคลื่นกระเจิงโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายนี้ ซึ่งใช้สายอากาศรับทำหน้าที่โพรบที่จะกวาดตำแหน่งไปวัดสนามกระเจิงบนระนาบการวัด ในที่นี้ใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการกวาดโพรบและคำนวณค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก จะเห็นว่าวัตถุที่ต้องการวัดวางอยู่ระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละตัวกับวัตถุห่างกันจนทำให้เป็นคลื่นระนาบ ที่วัตถุมีตัวดูดซับคลื่นล้อมรอบ เมื่อจะวัดคลื่นตกกระทบ ( $\bar{E}_i$ ) จะนำวัตถุและตัวดูดซับคลื่นออกไป แล้ววัดสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่จะวางวัตถุ แต่เมื่อจะวัดคลื่นกระเจิง ( $\bar{E}_s$ ) จะนำตัวดูดซับคลื่น มาวางข้างหน้าวัตถุ ค่าที่วัดเหล่านี้จะถูกเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้คำนวณสภาพยอมเชิงซ้อนต่อไป

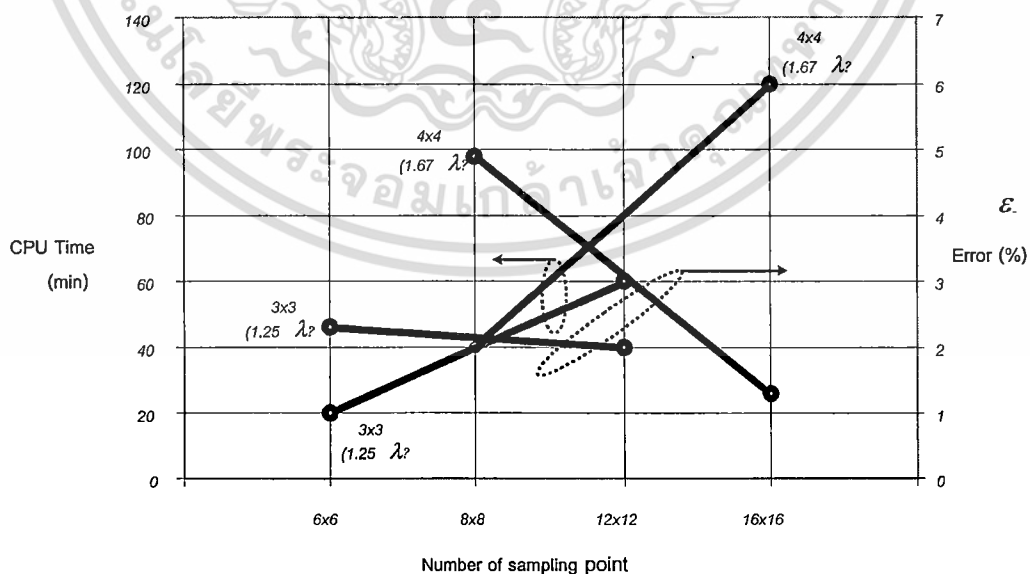


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่รูปที่ 4.1 ระบบการวัดอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การเปรียบเทียบและผลการวัด

เนื่องจากน้ำเกลือความเข้มข้น 1% เป็นวัสดุที่มีการวัดทดสอบและทราบค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกอยู่แล้ว [6] เราจึงจัดระบบเพื่อวัดน้ำเกลือเป็นอย่างแรกเพื่อเปรียบเทียบระบบ ในการที่จะหาว่ามิติของวัสดุที่จะวัดควรมีขนาดเท่าไรและมีการสุ่มการวัดค่าสนามไฟฟ้ากี่จุด จะใช้ถุงพลาสติกขนาด  $3 \times 3 \text{ cm}^2 (1.25\lambda)$  และ  $4 \times 4 \text{ cm}^2 (1.67\lambda)$  บรรจุน้ำเกลือเพื่อวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 12.4 GHz ในแต่ละกรณีจะทดลองให้ระยะการสุ่มห่างกัน  $0.25\lambda$  และ  $0.125\lambda$  ดังนั้นสำหรับกรณีที่มีวัสดุขนาด  $1.25\lambda$  จะวัดสนามไฟฟ้าจำนวน  $6 \times 6$  จุด และ  $12 \times 12$  จุด ในขณะที่เมื่อวัสดุมีขนาด  $1.67\lambda$  จะวัดสนามไฟฟ้าจำนวน  $8 \times 8$  และ  $16 \times 16$  จุด [7]

รูปที่ 4.2 แสดงเวลาที่ใช้ในการคำนวณและความผิดพลาดของการคำนวณค่า  $\epsilon_r$  เวลาที่ใช้ในการคำนวณเมื่อวัสดุมีขนาด  $1.25\lambda$  เท่ากับ 20 นาที สำหรับการสุ่ม  $6 \times 6$  จุดและจะเพิ่มขึ้นสามเท่าเป็น 60 นาทีเมื่อสุ่ม  $12 \times 12$  จุด ความผิดพลาดของ  $\epsilon_r$  มีค่าอยู่ระหว่าง 2.0 ถึง 2.3% ในกรณีที่วัสดุมีขนาด  $1.67\lambda$  จะใช้เวลาคำนวณเมื่อสุ่ม  $8 \times 8$  จุด และ  $16 \times 16$  จุด เป็น 40 นาที และ 120 นาทีตามลำดับ ซึ่งในกรณีนี้จะมีค่าผิดพลาดของการคำนวณ  $\epsilon_r$  อยู่ระหว่าง 1.3 ถึง 4.3% จากผลการทดสอบนี้ทำให้ทราบว่าเราควรจะหาความเหมาะสมของจำนวนการสุ่มเพื่อให้ใช้เวลาคำนวณน้อยและมีความผิดพลาดน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เช่นกรณีที่วัสดุมีขนาด  $1.25\lambda$  ควรใช้จำนวนสุ่ม  $9 \times 9$  จุด ในขณะที่กรณีขนาด  $1.67\lambda$  ควรสุ่ม  $11 \times 11$  จุด จะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มขึ้นกว่าสองเท่าในขณะที่ความผิดพลาดในการคำนวณไม่มากนัก จึงอาจสรุปได้ว่าขนาดของวัสดุไม่ควรมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นมาก ผู้วิจัยจึงใช้วัสดุขนาด  $1.25\lambda$  นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างจำนวนการสุ่มขนาด  $6 \times 6$  จุดกับ  $9 \times 9$  จุด พบว่าความผิดพลาดมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้การวัด  $6 \times 6$  จุด เพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณและค่าผิดพลาดกับ

จำนวนจุดที่ใช้ในการสุ่มวัดสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไปจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำเกลือ 1% ของวิธีที่ใช้ในการวิจัยนี้กับข้อมูลที่มีการวัดไว้แล้วของ Strogryn [6] ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นว่ามีความผิดพลาดของการวัด  $\epsilon_r$  และ  $\sigma$  อยู่ 2.26% และ 14.93% ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าผลการวัด  $\epsilon_r$  มีความผิดพลาดน้อยกว่าการคำนวณที่ใช้วิธี โมเมนต์แต่เพียงอย่างเดียวที่แสดงโดย Wang [2] ซึ่งวัดที่ความถี่ 1.0 GHz แล้วแปลงมาเป็นข้อมูลที่ความถี่ 12.4 GHz ด้วย Debye equation [8] อย่างไรก็ตามความผิดพลาดของค่า  $\sigma$  มีค่าค่อนข้างสูง

Measuring method	$\epsilon_r$		$\sigma$ (S/m)	
	Measured	Error (%)	Measured	Error (%)
Proposed	78.327	2.26	1.853	14.93
Strogryn [5]	76.596	Reference	1.612	Reference
Wang [6]	73.271	4.34	1.542	4.34

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลการวัด

เมื่อเราพิจารณาตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ได้แก่ น้ำเกลือ เอธิลแอลกอฮอล์ และกลีเซอริน ซึ่งต่างก็เป็นของเหลวใส เมื่อมองด้วยตาเปล่าจะไม่เห็นความแตกต่าง พบว่าจะมีค่า  $\epsilon_r$  และ  $\sigma$  ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ทำให้เราสามารถใช้ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ในการจำแนกวัสดุที่แม้มีหน้าตาที่เหมือนกันแต่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Material	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
1 % Saline Solution	78.327	1.853
Ethyl alcohol	37.347	2.926
Glycerin	27.383	2.208

ตารางที่ 4.2 ผลการวัด  $\epsilon_r$  และ  $\sigma$  ของวัสดุต่างๆ

	Kaew Mango				Nam-dokmai Mango			
	immature		mature		immature		mature	
	peeled	Not peeled	peeled	Not peeled	peeled	Not peeled	peeled	Not peeled
$\epsilon_r$	96.9 - 97.7	105.3 - 109.7	157.4 - 170.1	130.6 - 145.9	101.3 - 102.3	105.3 - 107.0	147.0 - 165.3	154.4 - 176.1
$\sigma$ (S/m)	13.0 - 15.5	8.0 - 10.5	11.7 - 19.7	28.3 - 33.2	3.2 - 3.5	0.83 - 1.02	5.2 - 12.2	30.0 - 32.1

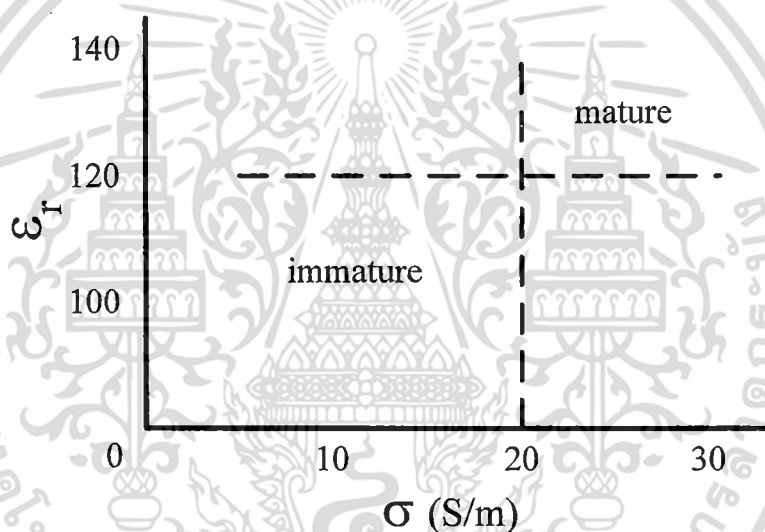
ตารางที่ 4.3 ผลการวัด  $\epsilon_r$  และ  $\sigma$  ของมะม่วง

คราวนี้เราจะมาพิจารณาผลการวัดค่า  $\epsilon_r$  และ  $\sigma$  ของมะม่วงสองพันธุ์ คือ มะม่วงแก้วและมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยที่จะวัดแต่ละพันธุ์ในกรณีที่ยังดิบและสุก นอกจากนี้ยังแบ่งเป็นปอกเปลือกและไม่ปอกเปลือก ซึ่งมีผลการวัดในตารางที่ 4.3 ยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่ปอกเปลือก มะม่วงแก้วดิบมี  $\epsilon_r$  อยู่ระหว่าง 96.9 และ 97.7 ในขณะที่  $\sigma$  อยู่ระหว่าง 13.0 ถึง 15.5 S/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างมะม่วงเปลือกและไม่มีเปลือก ค่า  $\varepsilon_r$  จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในทุกกรณี ยกเว้นมะม่วงแก้วสุก ผลการทดลองนี้ทำให้เห็นได้ว่าเปลือกมีผลต่อความแตกต่างของ  $\varepsilon_r$  และ  $\sigma$  เพียงเล็กน้อย ซึ่งทำให้พิจารณาว่ามะม่วงเป็นตัวกลางเอกพันธ์ ความแตกต่างของ  $\varepsilon_r$  และ  $\sigma$  ระหว่างมะม่วงดิบและมะม่วงสุกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดซึ่งมีประโยชน์ในการคัดแยกมะม่วง ความแตกต่างของ  $\sigma$  ระหว่างเปลือกและไม่มีเปลือกไม่ชัดเจน อย่างไรก็ตามจะแตกต่างกันระหว่างมะม่วงสุกกับมะม่วงดิบ นอกจากนี้ยังพบว่าความแตกต่างของ  $\varepsilon_r$  และ  $\sigma$  ระหว่างมะม่วงสองพันธุ์ยังไม่ชัดเจน

จากตารางที่ 4.3 สามารถสรุปได้ว่ามะม่วงดิบมี  $\varepsilon_r$  น้อยกว่า 110 และ  $\sigma$  น้อยกว่า 10.5 S/m ในทางกลับกันมะม่วงสุกมี  $\varepsilon_r$  มากกว่า 130 และ  $\sigma$  มากกว่า 28.3 S/m ดังนั้นจึงอาจตั้งเกณฑ์สำหรับคัดแยกความสุกของมะม่วงโดยกำหนดให้  $\varepsilon_r = 120$  และ  $\sigma = 20 \text{ S/m}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งมีประโยชน์มากในการคัดแยกมะม่วง



รูปที่ 4.3 เกณฑ์การคัดแยกมะม่วง

## สรุป

จากการที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุทะลวงเข้าไปในวัตถุเช่นมะม่วงได้คั้น ทำให้คลื่นเดี่ยวเบนมีผลต่อการวัดการกระเจิงย้อนกลับมาก ผู้วิจัยจึงได้เสนอเทคนิคการวัดการกระเจิงย้อนกลับที่คิดรวมผลของการเดี่ยวเบนด้วย ได้เปรียบเทียบระบบที่นำเสนอนี้โดยวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของน้ำเกลือเข้มข้น 1% ซึ่งพบว่ามี ความแม่นยำกว่าการคิดจากวิธีโมเมนต์แต่เพียงอย่างเดียว จากการศึกษาพบว่าวัตถุที่จะวัดทดสอบควรมีขนาดประมาณความยาวคลื่นของความถี่ที่ทดสอบ และระยะห่างของการสุ่มวัดสนามไฟฟ้าเท่ากับเศษหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น เพื่อให้คำนวณได้เร็วและมีความแม่นยำ ระบบที่นำเสนอนี้สามารถแยกวัตถุที่มีหน้าตาเหมือนกันได้อย่างแม่นยำ เมื่อใช้วัดมะม่วงพบว่าค่า  $\varepsilon_r$  และ  $\sigma$  ของมะม่วงสุกต่างจากมะม่วงดิบอย่างชัดเจน ผลจากการศึกษานี้ทำให้สามารถคัดแยกผลไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องเปลือก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของมะม่วง

#### กล่าวนำ

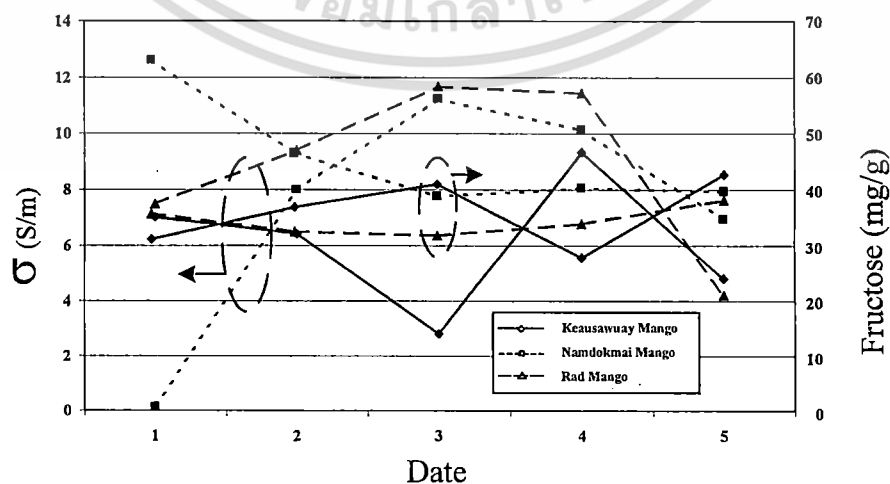
ในบทที่ 4 ได้แสดงผลการเปรียบเทียบระบบการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดการกระเจิงย้อนกลับ ซึ่งพบว่า การที่จะได้ผลการคำนวณที่เชื่อถือได้และใช้เวลาไม่นานเกินไป วัดควรมีขนาดไม่ใหญ่กว่าความยาวคลื่นเกินไป จากการวัดขนาดมะม่วงที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไปพบว่ามีความยาวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 117-155 มิลลิเมตร ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้ได้เสรีใน Industrial, Scientific and Medical Band และความถี่นี้มีความยาวคลื่น 122.4 มิลลิเมตร ที่เป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้น

#### การทดลอง

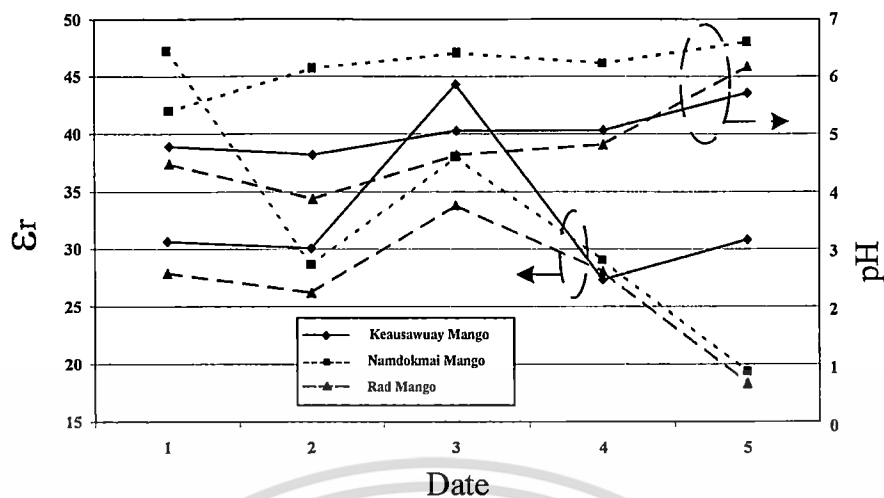
ได้จัดการวัดมะม่วงสามพันธุ์ คือน้ำดอกไม้ แรด และเขียวเสวย จากการวัดขนาด กว้าง ยาว หนา ของมะม่วงแต่ละพันธุ์ อย่างละ 20 ลูก สามารถหาค่าเฉลี่ยของมิติ และน้ำหนัก ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ตารางที่ 5.1 ขนาดและน้ำหนักเฉลี่ยของมะม่วง

พันธุ์	กว้าง(มม)	ยาว(มม)	หนา(มม)	น้ำหนัก(กรัม)
น้ำดอกไม้	60	155	54	400
แรด	64	117	55	289
เขียวเสวย	59	142	56	354

จากนั้นนำมะม่วงแต่ละพันธุ์มาวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยการวัดการกระเจิงย้อนกลับที่วันต่างๆ หลังการเก็บเกี่ยว แล้วนำมะม่วงบางส่วนไปวัดคุณสมบัติทางเคมี คือค่า Fructose และ pH ในแต่ละวัน ได้สุ่มชิมรสชาติของมะม่วงด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



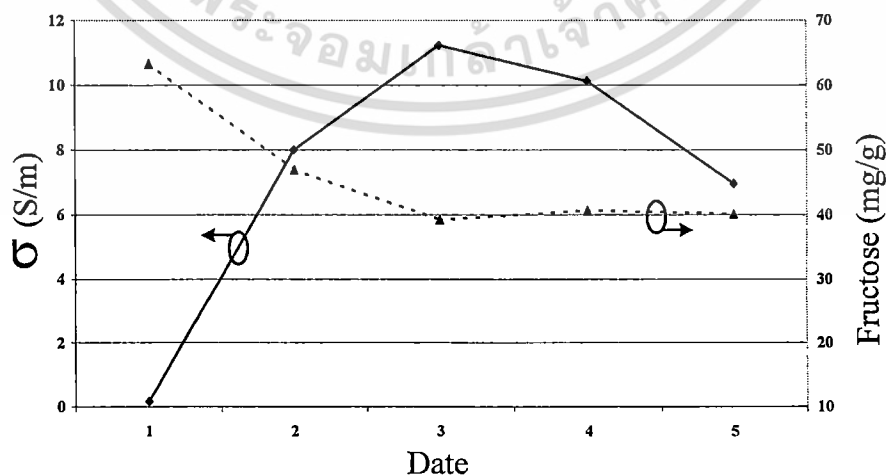
ข)

รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและคุณสมบัติทางเคมีของมะม่วงทั้งสามพันธุ์

ก)  $\sigma$  และ Fructose ข)  $\epsilon_r$  และ pH

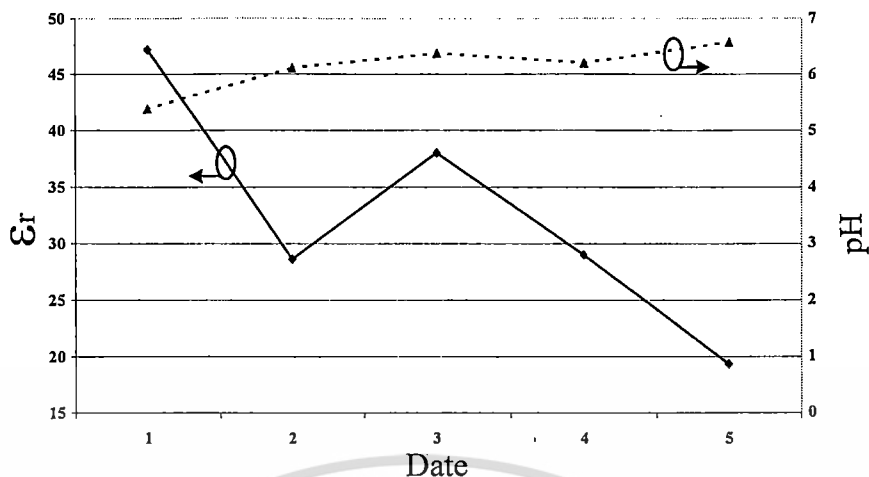
รูปที่ 5.1 ก) แสดงความสัมพันธ์ของ  $\sigma$  และ Fructose ของมะม่วงทั้งสามพันธุ์  $\sigma$  ของมะม่วงแรดและมะม่วงน้ำดอกไม้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน โดยจะมีค่าต่ำแล้วมีค่าสูงสุดในวันที่สาม จากนั้นจะมีค่าลดลง นอกจากนี้มะม่วงแรดมีค่า  $\sigma$  สูงกว่ามะม่วงน้ำดอกไม้ สำหรับมะม่วงเขียวเสวยมีการเปลี่ยนแปลงของค่า  $\sigma$  ตามวันต่างๆแตกต่างจากมะม่วงสองพันธุ์แรก ซึ่งโดยเฉลี่ยจะมีค่าต่ำที่สุด ส่วนค่า Fructose มีการเปลี่ยนแปลงค่าสวนทางกับ  $\sigma$  ในทุกกรณี

ในขณะที่รูปที่ 5.1 ข) แสดงความสัมพันธ์ของ  $\epsilon_r$  และ pH ของมะม่วงทั้งสามพันธุ์ สำหรับ  $\epsilon_r$  ของมะม่วงทั้งสามพันธุ์จะมีค่าสูงในวันที่สาม โดยมะม่วงเขียวเสวยมีค่าสูงที่สุด รองลงมาเป็นมะม่วงน้ำดอกไม้และมะม่วงแรด ตามลำดับ จากรูปที่ 5.1 ข) จะพบว่า pH เพิ่มขึ้นตามวัน โดยมะม่วงน้ำดอกไม้มีค่า pH สูงที่สุด รองลงมาเป็นมะม่วงเขียวเสวยและมะม่วงแรด ตามลำดับ



ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข)

รูปที่ 5.2 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกและคุณสมบัติทางเคมีของมะม่วงน้ำดอกไม้

ก)  $\sigma$  และ Fructose

ข)  $\epsilon_r$  และ pH

รูปที่ 5.2 ก) แสดงความสัมพันธ์ของ  $\sigma$  และ Fructose ของมะม่วงน้ำดอกไม้ เมื่อวันหลังการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้น Fructose จะลดลงมาต่ำที่สุดในวันที่สาม แล้วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในวันที่สี่ และวันที่ห้า สิ่งที่เห็นได้ชัดคือ  $\sigma$  มีการเปลี่ยนแปลงสวนทางกับ Fructose คือจะเริ่มจากวันแรกมีค่าต่ำที่สุด และเพิ่มขึ้นจนสูงที่สุดในวันที่สาม จากนั้นจะมีค่าลดลงในวันที่สี่ และวันที่ห้า

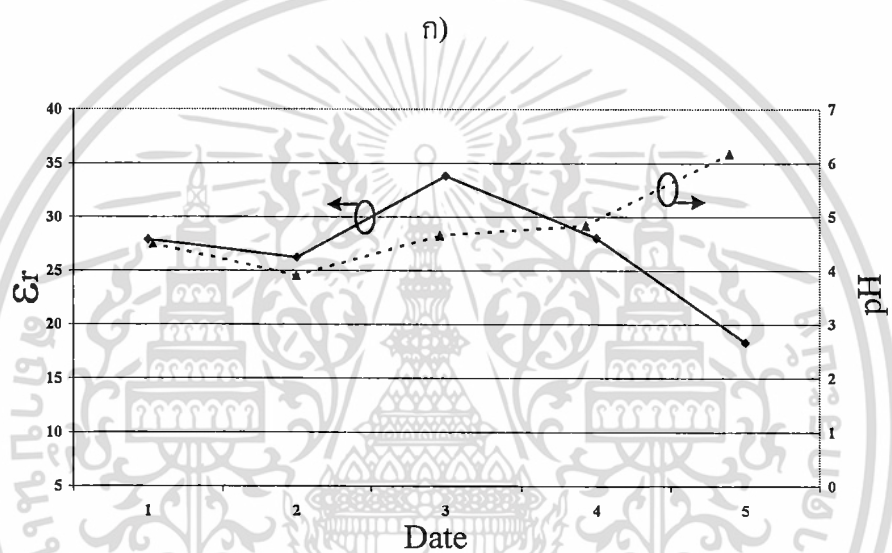
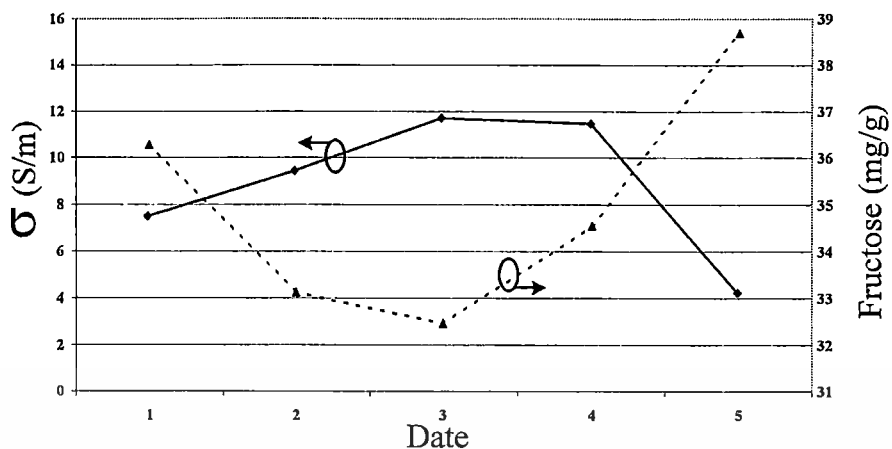
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับ  $\epsilon_r$  ในรูปที่ 5.2 ข) ก็มีลักษณะที่ค่อนข้างสวนทางกันคือ pH จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนสูงที่สุดในวันที่สาม แล้วจะลดลงในวันที่สี่ จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอีกในวันที่ห้า ในขณะที่  $\epsilon_r$  จะลดลงสวนทางกับ pH ในวันที่สอง แล้วเพิ่มขึ้นในวันที่สาม ซึ่งไปในทิศทางเดียวกับค่า pH จากนั้นจะมีค่าลดลงสวนทางกับค่า pH อีก

สำหรับมะม่วงน้ำดอกไม้จะเห็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\sigma$  กับ Fructose และ  $\epsilon_r$  กับ pH ได้ค่อนข้างชัดเจน แต่ยังไม่อาจสรุปได้ แต่เมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับรสชาติที่สุ่มชิมทุกวัน ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 รวมทั้งธรรมชาติของการรับประทานมะม่วงน้ำดอกไม้ ที่ปกติรับประทานเมื่อสุกและมีรสหวาน เห็นได้ว่าในวันที่สาม จะมีรสหวาน ซึ่งเป็นวันที่  $\sigma$  มีค่ามากที่สุด และ Fructose มีค่าต่ำที่สุด สำหรับ  $\epsilon_r$  และ pH ในวันที่สามเป็นจุดเปลี่ยนจากค่าต่ำไปสูง แล้วลดลงต่ำอีก ในขณะที่ pH มีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามวันที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.1 รสชาติของมะม่วง

พันธุ์มะม่วง	วันที่ 2	วันที่ 3	วันที่ 4	วันที่ 5
น้ำดอกไม้	หวานน้อย	หวาน	จัดปนหวาน	หวานปนจัด
แรด	เปรี้ยว	เปรี้ยวปนหวาน	เปรี้ยวปนหวาน	หวานสุก
เขียวเสวย	เปรี้ยวปนหวาน	หวานมัน	หวานสุก	หวานสุก

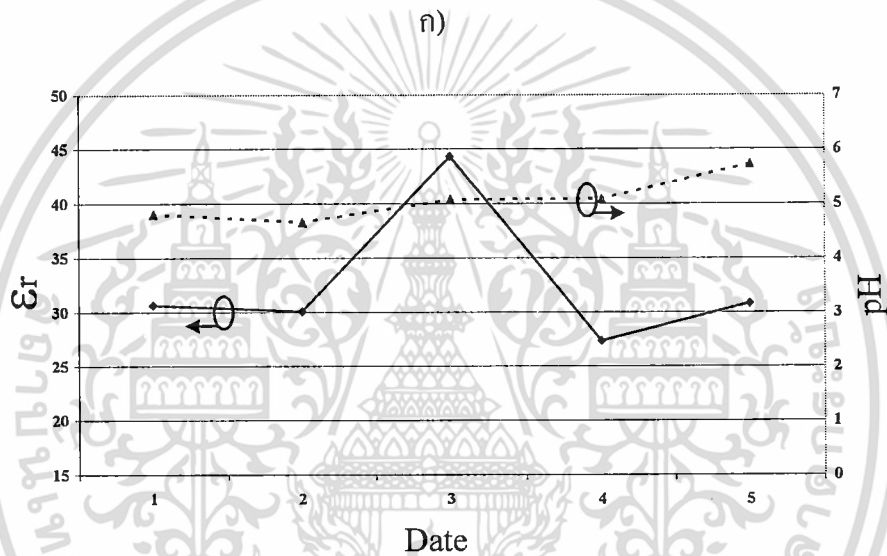
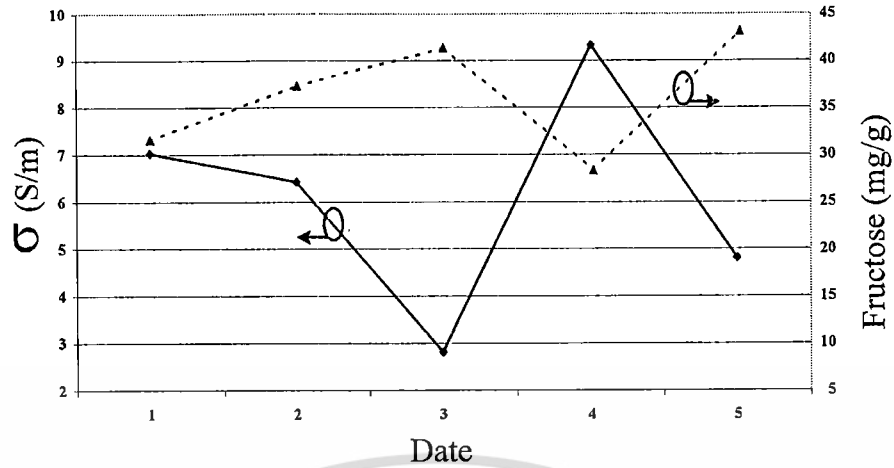
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกและคุณสมบัติทางเคมีของมะม่วงแรด

ก)  $\sigma$  และ Fructose      ข)  $\epsilon_r$  และ pH

ต่อมาพิจารณามะม่วงแรดซึ่งปกติรับประทานเมื่อเริ่มสุกและมีรสชาดเปรี้ยวอมหวาน ผลการวัดในรูปที่ 5.3ก) แสดงให้เห็นว่าจะมีความเหมาะสมในวันที่สาม ซึ่งมี Fructose ต่ำที่สุดและ  $\sigma$  สูงที่สุด สำหรับ  $\epsilon_r$  ในรูปที่ 5.3 ข) ก็เช่นเดียวกันมีค่ามากที่สุดในวันที่มีรสชาดดีที่สุด ในขณะที่ pH มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย



รูปที่ 5.4 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกและคุณสมบัติทางเคมีของมะม่วงเขียวเสวย

ก)  $\sigma$  และ Fructose ข)  $\epsilon_r$  และ pH

และเมื่อศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกมะม่วงเขียวเสวยที่มักรับประทานตอนที่ดิบและให้รสชาติหวาน มัน เราพบว่าการเปลี่ยนแปลงของ  $\sigma$  และ Fructose ตามจำนวนวันในรูปที่ 5.4 ก) ไม่เป็นไปตามมะม่วงสองพันธุ์แรก จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงที่สวนทางกันระหว่าง  $\sigma$  กับ Fructose อย่างไรก็ตามในวันที่สามซึ่งมีรสชาติที่ดีที่สุด จะเป็นวันที่มี  $\sigma$  ต่ำที่สุด ในขณะที่  $\epsilon_r$  ในรูปที่ 5.4 ข) จะมีค่าสูงสุด

สรุป

ข้อมูลที่ได้จากการวัดมะม่วงสามพันธุ์ที่มีธรรมชาติการรับประทานที่แตกต่างกันจะมีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเราสามารถเห็นได้ว่าแต่ละพันธุ์มีรสชาติอร่อยเมื่อ  $\epsilon_r$  และ  $\sigma$  มีค่าที่เหมาะสม ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ โดยไม่ต้องปอกเปลือก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุป

จากความต้องการเครื่องมือที่สามารถบ่งบอกคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ได้แก่ผลไม้ ฯลฯ ได้ อย่างแม่นยำโดยไม่ต้องปอกเปลือก ทำให้ผู้วิจัยนำเสนอการคำนวณร่วมระหว่างวิธีโมเมนต์และทฤษฎีเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต เพื่อปรับปรุงการวัดการกระเจิงย้อนกลับให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น วิธีดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาระบบการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทดสอบมะม่วงพันธุ์ต่างๆ ได้พัฒนาทั้ง ส่วนซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์เพื่อกวาดโพรบไปวัดสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ แล้วเก็บค่าที่วัดได้ไว้ในแฟ้มข้อมูลในคอมพิวเตอร์ จากนั้นคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อหาค่าสภาพยอมสัมพัทธ์และความนำไฟฟ้า จากผลการ ศึกษาพบว่าควรจัดระบบการวัดให้วัดมุมขนาดประมาณหนึ่งความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน และจากการ วัดขนาดของมะม่วงต่างๆ พบว่าความถี่ที่เหมาะสมจะอยู่ในย่าน ISM band คือความถี่ 2.45 GHz ผลการ ทดสอบพบว่าส่วนใหญ่สภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าแปรผันกลับกับค่า pH และความนำไฟฟ้ามีค่าแปรผันกลับกับ ค่า Fructose ทำให้ทราบรสชาติและความสุกของมะม่วงได้จากการวัดด้วยวิธีนี้ ซึ่งไม่ต้องปอกเปลือก

ในกรณีที่ต้องการวัดผลไม้ชนิดอื่นที่มีขนาดแตกต่างกันไป จะต้องเลือกความถี่ที่เหมาะสม ตลอดจนหา วิธีชดเชยรูปร่างที่ไม่เป็นสี่เหลี่ยมเพื่อให้เกิดความแม่นยำ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการที่มีราคาแพงเนื่องจากใช้ได้ในพื้นที่กว้าง งานชิ้น ต่อไปจะพัฒนาเครื่องมือที่ทำงานในย่านความถี่แคบซึ่งมีต้นทุนต่ำได้

## ภาคผนวก ก

### โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมเครื่องกวาดโทรบและการอินเตอร์เฟสกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเพื่อ ส่งข้อมูลที่วัดได้มาเก็บไว้ในแฟ้มข้อมูล

#### ภาษาที่ใช้ในการกวาดโทรบ

ในการควบคุมเครื่องกวาดโทรบ จะเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมให้สามารถทำงานตามคำสั่งได้ เนื่องจากพื้นฐานการสร้างเครื่องกวาดโทรบมาจากพล็อตเตอร์ ดังนั้นในการเขียนโปรแกรมควบคุมเครื่องกวาดโทรบจึงต้องเขียนให้อยู่ในรูปของภาษาพล็อตเตอร์ด้วยเช่นกัน เพื่อจะได้สื่อสารกันได้อย่างถูกต้อง รับ - ส่งข้อมูลโดยนำไปสั่งให้เครื่องกวาดโทรบเคลื่อนไม่ผิดตำแหน่ง ซึ่งภาษาที่ใช้คือ HPGL7475A (Hewlett Packard Graphics Language)

HPGL เป็นกระบวนคำสั่งต่อเนื่อง มีอักษรนำหน้าและปิดท้ายด้วย “;” ต่อหนึ่งคำสั่ง คำสั่งที่ใช้ในเครื่องกวาดโทรบนี้ใช้เพียงไม่กี่คำสั่ง เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการกวาดสนามระยะใกล้ แบบระนาบที่มีการกวาดโทรบเป็นแบบเส้นตรง ดังนั้นคำสั่งที่นำมาใช้งานจึงมีสองคำสั่งคือ

PA (Plot Absolute) มีรูปแบบคือ PA; หรือ PA x,y; เป็นคำสั่งบอกให้เครื่องกวาดโทรบอยู่ในรูปแบบของการกำหนดจุด x, y ถ้ามี x, y ต่อท้ายก็ให้เคลื่อนที่ไปยังจุดนั้น

PR (Plot Relative) มี 2 รูปแบบคือ PR; หรือ PR x,y; เป็นคำสั่งให้เครื่องกวาดโทรบอยู่ในรูปแบบของค่าต่อเนื่อง (Relative) ถ้ามี dx,dy ต่อท้ายก็หมายถึงให้เคลื่อนที่ไปยังจุดที่เป็นค่าต่อเนื่องนั้น

```

/* HP 8719C,8720C,8722A QuickC IPG */
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <print.h>
#include "cfunc.h"
#include "chpib.h"

#define isc 7L /*type of interface card(hpib)(long7)*/
#define instr 716L /*address of network analyzer(long16)*/

void error_handle (int, char * );
void output (char *);
void select_freq(void);
void select_power(void);
void initialize (void);
void opc(void);
void disp_promt(char *);
void meas_setup(void);
void marker_freq(void);
void calibrate(void);
void read(void);
void save(void);
void saves(void);
void normal_phas(void);
void medium(void);
void scanner(void);
void medium2(void);
void abb(void);

int mkr; /*use in marker_freq() and read()*****/
int mk; /*use in read() and save()*****/
int i,ii; /*use in read() and scanner()*****/
int point; /*use in save() and scanner()*****/
int phas; /*use in meas_setup(),scanner() and normal_phas()*/
int CntX,orgX,CntY,orgY; /*use in scanner() and medium*****/
int nnor; /*use in main() and medium()*****/
/** if you want more point of scanning please add here **/
float buf1[11][1020]; /*use in read() and save()*****/
float buf2[11][1020]; /*use in read() and save()*****/
float buf3[11][1020]; /*use in read() and save()*****/
float buf4[11][1020]; /*use in read() and save()*****/
float buf5[11][1020]; /*use in read() and save()*****/
float buf6[11][1020]; /*use in read() and save()*****/
float buf7[11][1020]; /*use in read() and save()*****/
float buf8[11][1020]; /*use in read() and save()*****/
float buf9[11][1020]; /*use in read() and save()*****/
float buf10[11][1020]; /*use in read() and save()*****/
/*****/
float medy; /*use in medium() and normal_phase()*****/

```

void error\_handle (int error,char \*routine) เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    if (error != NOERR)
    {
        printf("HPIB error in call to %s: %d, %s\n",routine,error,errstr(error));
        exit(1);
    }
    return;
}

void output (char *sendstr)
{
    error_handle (IOOUTPUTS (instr,sendstr,strlen(sendstr)),"IOOUTPUTS");
}

void opc()
{
    int one =1;
    char reply;
    error_handle(IOENTERS (instr,&reply,&one),"IOENTERS");
}

void initialize ()
{
    error_handle (IOTIMEOUT (isc,200.0),"IOTIMEOUT");
    error_handle (IOABORT (isc),"IOABORT");
    error_handle (IOCLEAR (isc),"IOCLEAR");
    //output ("USERPRES;CLES;");
    //output ("PRES;CLES;");
}

void disp_promt( char *promt)
{
    printf("%s",promt);
    printf(", then press [RETURN] \n");
    getche();
    printf("\n");
}

void select_freq()
{
    char ansf,cmd[80];
    float f_start,f_stop;
    printf("CHOOSE THE FORMAT OF FREQUENCY\n");
    printf(" s : start and stop frequency\n");
    printf(" c : center and span frequency\n");
    printf("Enter character : ");
    ansf = getche();
    printf("\n");
    switch(ansf) {
        case 's' : printf("Enter start frequency (MHz);");
                    scanf("%f",&f_start);
                    printf("Enter stop frequency (MHz);");
                    scanf("%f",&f_stop);
                    sprintf(cmd,"STAR%fHZ;STOP%fHZ;",f_start,f_stop);
                    output(cmd);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        break;
    case 'c' : printf("Enter center frequency (MHz);");
               scanf("%f",&f_start);
               printf("Enter span frequency (MHz);");
               scanf("%f",&f_stop);
               sprintf(cmd,"CENT%fMHZ;SPAN%fMHZ;",f_start,f_stop);
               output(cmd);
               break;
    default : printf("out of menu,do again..\n");
              select_freq();
              }
}

```

```

void marker_freq()
{
float mkf;
char cmd[80];
printf("HOW MANY MARKER (1-5)?");
scanf("%d",&mkr);
printf("\n");
switch(mkr)
{ case 5 : printf("<Enter marker5 frequency (MHz);>");
            scanf("%f",&mkf);
            sprintf(cmd,"MARK5%fMHZ;",mkf);
            output (cmd);
        case 4 : printf("<Enter marker4 frequency (MHz);>");
            scanf("%f",&mkf);
            sprintf(cmd,"MARK4%fMHZ;",mkf);
            output (cmd);
        case 3 : printf("<Enter marker3 frequency (MHz);>");
            scanf("%f",&mkf);
            sprintf(cmd,"MARK3%fMHZ;",mkf);
            output (cmd);
        case 2 : printf("<Enter marker2 frequency (MHz);>");
            scanf("%f",&mkf);
            sprintf(cmd,"MARK2%fMHZ;",mkf);
            output (cmd);
        case 1 : printf("<Enter marker1 frequency (MHz);>");
            scanf("%f",&mkf);
            sprintf(cmd,"MARK1%fMHZ;",mkf);
            output (cmd);
            break;
        default : printf("<out of menu ,choose again!!>\n");
                  marker_freq();
            }
}

```

```

void read(void)
{

```

```

int length;
char cmd[80];
float val1[3],val2[3],val3[3],val4[3],val5[3];
float val6[3],val7[3],val8[3],val9[3],val10[3];
float val11[3],val12[3],val13[3],val14[3],val15[3];
float val16[3],val17[3],val18[3],val19[3],val20[3];

```

ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/* prepare for get data from NA 10 times edit at 28/01/2003 */
length = 3;
mk = mkr;
do
{
output("HOLD;");
sprintf(cmd,"MARK%d",mkr);
output ("CHAN1;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val1,&length),"IOENTERA");
printf("[point_%3d]<.CH1 mkr%d: %5.2f.mV.>_",i,mkr,val1[0]*1000.0);
output ("CHAN2;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val2,&length),"IOENTERA");
printf("__<.CH2 mkr%d: %5.2f.deg.> 1st \n",mkr,val2[0]);
output("CONT;");
delay(100);

output("HOLD;");
output ("CHAN1;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val1,&length),"IOENTERA");
printf("[point_%3d]<.CH1 mkr%d: %5.2f.mV.>_",i,mkr,val3[0]*1000.0);
output ("CHAN2;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val2,&length),"IOENTERA");
printf("__<.CH2 mkr%d: %5.2f.deg.> 2nd \n",mkr,val4[0]);
output("CONT;");
delay(100);

output("HOLD;");
output ("CHAN1;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val1,&length),"IOENTERA");
printf("[point_%3d]<.CH1 mkr%d: %5.2f.mV.>_",i,mkr,val5[0]*1000.0);
output ("CHAN2;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val2,&length),"IOENTERA");
printf("__<.CH2 mkr%d: %5.2f.deg.> 3rd \n",mkr,val6[0]);
output("CONT;");
delay(100);

output("HOLD;");
output ("CHAN1;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val1,&length),"IOENTERA");
printf("[point_%3d]<.CH1 mkr%d: %5.2f.mV.>_",i,mkr,val7[0]*1000.0);
output ("CHAN2;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val2,&length),"IOENTERA");
printf("__<.CH2 mkr%d: %5.2f.deg.> 4th \n",mkr,val8[0]);
output("CONT;");
delay(100);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารราชการสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

output ("CHAN1;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val1,&length),"IOENTERA");
printf("[point_%3d]_<.CH1 mkr%d: %5.2f.mV>_",i,mkr,val9[0]*1000.0);
output ("CHAN2;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val2,&length),"IOENTERA");
printf("__<..CH2 mkr%d: %5.2f.deg> 5th \n",mkr,val10[0]);
output("CONT;");
delay(100);

output("HOLD;");
output ("CHAN1;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val1,&length),"IOENTERA");
printf("[point_%3d]_<.CH1 mkr%d: %5.2f.mV>_",i,mkr,val11[0]*1000.0);
output ("CHAN2;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val2,&length),"IOENTERA");
printf("__<..CH2 mkr%d: %5.2f.deg> 6th \n",mkr,val12[0]);
output("CONT;");
delay(100);

output("HOLD;");
output ("CHAN1;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val1,&length),"IOENTERA");
printf("[point_%3d]_<.CH1 mkr%d: %5.2f.mV>_",i,mkr,val13[0]*1000.0);
output ("CHAN2;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val2,&length),"IOENTERA");
printf("__<..CH2 mkr%d: %5.2f.deg> 7th \n",mkr,val14[0]);
output("CONT;");
delay(100);

output("HOLD;");
output ("CHAN1;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val1,&length),"IOENTERA");
printf("[point_%3d]_<.CH1 mkr%d: %5.2f.mV>_",i,mkr,val15[0]*1000.0);
output ("CHAN2;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val2,&length),"IOENTERA");
printf("__<..CH2 mkr%d: %5.2f.deg> 8th \n",mkr,val16[0]);
output("CONT;");
delay(100);

output("HOLD;");
output ("CHAN1;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val1,&length),"IOENTERA");
printf("[point_%3d]_<.CH1 mkr%d: %5.2f.mV>_",i,mkr,val17[0]*1000.0);
output ("CHAN2;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val2,&length),"IOENTERA");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

printf("__<..CH2 mkr%d: %5.2f.deg.> 9th \n",mkr,val18[0]);
output("CONT;");
delay(100);

output("HOLD;");
output ("CHAN1;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val1,&length),"IOENTERA");
printf("[point %3d]<..CH1 mkr%d: %5.2f.mV.> ",i,mkr,val19[0]*1000.0);
output ("CHAN2;MARKDISC;FORM5;OUTPMARK;");
output(cmd);
error_handle (IOENTERA(instr,val2,&length),"IOENTERA");
printf("__<..CH2 mkr%d: %5.2f.deg.> 10th \n",mkr,val20[0]);

/* buf[5][i](channel1) and buf[10][i](channel2) are buffer of fifth marker */
/* buf[4][i](channel1) and buf [9][i](channel2) are buffer of fourth marker */
/* buf[3][i](channel1) and buf [8][i](channel2) are buffer of third marker */
/* buf[2][i](channel1) and buf [7][i](channel2) are buffer of second marker */
/* buf[1][i](channel1) and buf [6][i](channel2) are buffer of first marker */

buf1[mkr][0] = 0;
buf1[mkr][i] = val1[0];
buf1[mkr+5][i]= val2[0];
buf2[mkr][0] = 0;
buf2[mkr][i] = val3[0];
buf2[mkr+5][i]= val4[0];
buf3[mkr][0] = 0;
buf3[mkr][i] = val5[0];
buf3[mkr+5][i]= val6[0];
buf4[mkr][0] = 0;
buf4[mkr][i] = val7[0];
buf4[mkr+5][i]= val8[0];
buf5[mkr][0] = 0;
buf5[mkr][i] = val9[0];
buf5[mkr+5][i]= val10[0];
buf6[mkr][0] = 0;
buf6[mkr][i] = val11[0];
buf6[mkr+5][i]= val12[0];
buf7[mkr][0] = 0;
buf7[mkr][i] = val13[0];
buf7[mkr+5][i]= val14[0];
buf8[mkr][0] = 0;
buf8[mkr][i] = val15[0];
buf8[mkr+5][i]= val16[0];
buf9[mkr][0] = 0;
buf9[mkr][i] = val17[0];
buf9[mkr+5][i]= val18[0];
buf10[mkr][0] = 0;
buf10[mkr][i] = val19[0];
buf10[mkr+5][i]= val20[0];
mkr = mkr - 1;
output("CONT;");
delay(1000);
/* getch() */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

while ( mkr > 0);
if (mkr==0) mkr=mk;
}

void medium()
{ float p1,p2,evod,odev;
  int pp1,pp2;
  pp1 = (CntX-orgX+1);
  pp2 = (CntY-orgY+1);
  p1=fmod(pp1,2);
  p2=fmod(pp2,2);
  /***** find medium (x = no.of column,y= no.of row) *****/
  /** x = odd and y = odd **/
  if( (p1==1) && (p2==1) )
  { medy = ceil(i/2.0);
  }
  /*****/
  /** x = even and y = even **/
  else if( (p1==0) && (p2==0) )
  { medy = (i/2.0)+(pp1)/2.0;
  }
  /*****/
  /** x = odd and y = even **/
  else if( (p1==1) && (p2==0) )
  { evod = ceil((pp1)/2.0);
    medy = (i/2.0)+evod;
    /* in case of x=1*/
    if ((pp1)==1)
      medy = i/2.0;
    /*****/
  }
  /*****/
  /** x = even and y = odd **/
  else if( (p1==0) && (p2==1) )
  { medy = i/2;
  }
  /*****/
  /**** in case of error programming ***/
  else { printf("error programming(medium)\n");
        exit(0);
  }
  printf("\007");
}

void medium2()
{ float p2;
  int pp1,pp2;
  pp1 = (CntX-orgX+1);
  pp2 = (CntY-orgY+1);
  p2=fmod(pp2,2);
  switch(nnor)
  {
  case 2 : printf("normalize by up left\n");
           medy=pp1;
           break;
  case 3 : printf("normalize by up right\n");

```

เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        medy=1;
        break;
case 4 : printf("normalize by down left\n");
        if (p2==0) medy=i-pp1+1;
        if (p2==1) medy=i;
        break;
case 5 : printf("normalize by down right\n");
        if (p2==0) medy=i;
        if (p2==1) medy=i-pp1+1;
        break;
default: printf("error in programming(medium2)\n");
        exit(0);
}
}
void normal_phas()
{ int yy,xx,yy1,xx1;
  float norm;
  if (phas==1)
  { printf("/*(ch.1) normalize loop *\n");
    /* (ch.1) normalize loop */
    for(xx=mk;xx>0;xx--)
    {
      for(yy=i;yy>0;yy--)
      { norm = buf[xx][medy];
        buf[xx][yy] = (buf[xx][yy]-buf[xx][medy]);
        if (buf[xx][yy]==0) buf[xx][medy]=norm;
      }
      buf[xx][medy] = 0;
    }
    /*******/
  }
  else if (phas==2)
  { printf("/*(ch.2) normalize loop *\n");
    /* (ch.2) normalize loop */
    for(xx1=mk+5;xx1>5;xx1--)
    {
      for(yy1=i;yy1>0;yy1--)
      { norm = buf[xx1][medy];
        buf[xx1][yy1] = (buf[xx1][yy1]-buf[xx1][medy]);
        if (buf[xx1][yy1]==0) buf[xx1][medy]=norm;
      }
      buf[xx1][medy] = 0;
    }
    /*******/
  }
  else if (phas==3)
  { printf("/*(ch.1 and ch.2) normalize loop *\n");
    /* (ch.1 and ch.2) normalize loop */
    for(xx=mk;xx>0;xx--)
    {
      for(yy=i;yy>0;yy--)
      { norm = buf[xx][medy];
        buf[xx][yy] = (buf[xx][yy]-buf[xx][medy]);
        if (buf[xx][yy]==0) buf[xx][medy]=norm;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        buf[xx][medy] = 0;
    }
    for(xx1=mk+5;xx1>5;xx1--)
    {
        for(yy1=i;yy1>0;yy1--)
        { norm = buf[xx1][medy];
          buf[xx1][yy1]= (buf[xx1][yy1]-buf[xx1][medy]);
          if (buf[xx1][yy1]==0) buf[xx1][medy]=norm;
        }
        buf[xx1][medy] = 0;
    }
    /*****
}
/*****in case of error programming *****/
else
{ printf("error in programming(normal_phase)\n");
  exit(0);
}
}

void save()
{ FILE *data;
  FILE *data1;
  int k,h;
  char finame[21][30];
  printf("****packing data****\n\n");
  /* only 1 marker selected
  file1 for ch1 marker1 , file6 for ch2 marker1
  file2 for ch1 marker2 , file7 for ch2 marker2
  file3 for ch1 marker3 , file8 for ch2 marker3
  file4 for ch1 marker4 , file9 for ch2 marker4
  file5 for ch1 marker5 , file10 for ch2 marker5*/
  /* printf("file1 for ch1 marker1 , file6 for ch2 marker1\n");
  printf("file2 for ch1 marker2 , file7 for ch2 marker2\n");
  printf("file3 for ch1 marker3 , file8 for ch2 marker3\n");
  printf("file4 for ch1 marker4 , file9 for ch2 marker4\n");
  printf("file5 for ch1 marker5 , file10 for ch2 marker5\n"); */
  printf("file1 for ch1 1st , file11 for ch2 1st \n");
  printf("file2 for ch1 2nd , file12 for ch2 2nd \n");
  printf("file3 for ch1 3rd , file13 for ch2 3rd \n");
  printf("file4 for ch1 4th , file14 for ch2 4th \n");
  printf("file5 for ch1 5th , file15 for ch2 5th \n");
  printf("file6 for ch1 6th , file16 for ch2 6th \n");
  printf("file7 for ch1 7th , file17 for ch2 7th \n");
  printf("file8 for ch1 8th , file18 for ch2 8th \n");
  printf("file9 for ch1 9th , file19 for ch2 9th \n");
  printf("file10 for ch1 10th , file20 for ch2 10th \n");

  printf("Enter saved file1 name=> ");
  scanf("%s",&finame[0]);
  printf("Enter saved file11 name=> ");
  scanf("%s",&finame[10]);
  printf("Enter saved file2 name=> ");
  scanf("%s",&finame[1]);
  printf("Enter saved file12 name=> ");

```

```

scanf("%s",&fname[11]);
rintf("Enter saved file3 name:=> ");
scanf("%s",&fname[2]);
printf("Enter saved file13 name:=> ");
scanf("%s",&fname[12]);
rintf("Enter saved file4 name:=> ");
scanf("%s",&fname[3]);
printf("Enter saved file14 name:=> ");
scanf("%s",&fname[13]);
printf("Enter saved file5 name:=> ");
scanf("%s",&fname[4]);
printf("Enter saved file15 name:=> ");
scanf("%s",&fname[14]);
printf("Enter saved file6 name:=> ");
scanf("%s",&fname[5]);
printf("Enter saved file16 name:=> ");
scanf("%s",&fname[15]);
printf("Enter saved file7 name:=> ");
scanf("%s",&fname[6]);
printf("Enter saved file17 name:=> ");
scanf("%s",&fname[16]);
printf("Enter saved file8 name:=> ");
scanf("%s",&fname[7]);
printf("Enter saved file18 name:=> ");
scanf("%s",&fname[17]);
printf("Enter saved file9 name:=> ");
scanf("%s",&fname[8]);
printf("Enter saved file19 name:=> ");
scanf("%s",&fname[18]);
printf("Enter saved file10 name:=> ");
scanf("%s",&fname[9]);
printf("Enter saved file20 name:=> ");
scanf("%s",&fname[19]);

/*****channel 1*****/
printf("start saving file of 1st ,ch1.....:\n");
if ((data = fopen(fname[0],"wb")) == NULL)
{ printf("Error in open file\n");
  exit(0);
}
fwrite(&buf1[1][1],sizeof(float),point,data);
fclose(data);

printf("start saving file of 2nd ,ch1.....:\n");
if ((data = fopen(fname[1],"wb")) == NULL)
{ printf("Error in open file\n");
  exit(0);
}
fwrite(&buf2[1][1],sizeof(float),point,data);
fclose(data);

printf("start saving file of 3rd ,ch1.....:\n");
if ((data = fopen(fname[2],"wb")) == NULL)
{ printf("Error in open file\n");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

    { printf("Error in open file\n");
      exit(0);
    }
  fwrite(&buf10[1][1],sizeof(float),point,data);
  fclose(data);

  /*****channel 2*****/
  printf("start saving file of 1st ,ch2....:\n");
  if ((data1 = fopen(finame[10],"wb")) == NULL)
    { printf("Error in open file\n");
      exit(0);
    }
  fwrite(&buf1[6][1],sizeof(float),point,data1);
  fclose(data1);

  printf("start saving file of 2nd ,ch2....:\n");
  if ((data1 = fopen(finame[11],"wb")) == NULL)
    { printf("Error in open file\n");
      exit(0);
    }
  fwrite(&buf2[6][1],sizeof(float),point,data1);
  fclose(data1);

  printf("start saving file of 3rd ,ch2....:\n");
  if ((data1 = fopen(finame[12],"wb")) == NULL)
    { printf("Error in open file\n");
      exit(0);
    }
  fwrite(&buf3[6][1],sizeof(float),point,data1);
  fclose(data1);

  printf("start saving file of 4th ,ch2....:\n");
  if ((data1 = fopen(finame[13],"wb")) == NULL)
    { printf("Error in open file\n");
      exit(0);
    }
  fwrite(&buf4[6][1],sizeof(float),point,data1);
  fclose(data1);

  printf("start saving file of 5th ,ch2....:\n");
  if ((data1 = fopen(finame[14],"wb")) == NULL)
    { printf("Error in open file\n");
      exit(0);
    }
  fwrite(&buf5[6][1],sizeof(float),point,data1);
  fclose(data1);

  printf("start saving file of 6th ,ch2....:\n");
  if ((data1 = fopen(finame[15],"wb")) == NULL)
    { printf("Error in open file\n");
      exit(0);
    }
  fwrite(&buf6[6][1],sizeof(float),point,data1);
  fclose(data1);

```

```

printf("start saving file of 7th ,ch2.....:\n");
if ((data1 = fopen(fname[16],"wb")) == NULL)
    { printf("Error in open file\n");
      exit(0);
    }
fwrite(&buf7[6][1],sizeof(float),point,data1);
fclose(data1);

printf("start saving file of 8th ,ch2.....:\n");
if ((data1 = fopen(fname[17],"wb")) == NULL)
    { printf("Error in open file\n");
      exit(0);
    }
fwrite(&buf8[6][1],sizeof(float),point,data1);
fclose(data1);

printf("start saving file of 9th ,ch2.....:\n");
if ((data1 = fopen(fname[18],"wb")) == NULL)
    { printf("Error in open file\n");
      exit(0);
    }
fwrite(&buf9[6][1],sizeof(float),point,data1);
fclose(data1);

printf("start saving file of 10th ,ch2.....:\n");
if ((data1 = fopen(fname[19],"wb")) == NULL)
    { printf("Error in open file\n");
      exit(0);
    }
fwrite(&buf10[6][1],sizeof(float),point,data1);
fclose(data1);
}

void saves()
{ FILE *data;
  FILE *data1;
  int k,h;
  char fname[10][30];
  printf("****packing data****\n\n");
  /*file1 for ch1 marker1 , file6 for ch2 marker1
   file2 for ch1 marker2 , file7 for ch2 marker2
   file3 for ch1 marker3 , file8 for ch2 marker3
   file4 for ch1 marker4 , file9 for ch2 marker4
   file5 for ch1 marker5 , file10 for ch2 marker5*/
  printf("file1 for ch1 marker1 , file6 for ch2 marker1\n");
  printf("file2 for ch1 marker2 , file7 for ch2 marker2\n");
  printf("file3 for ch1 marker3 , file8 for ch2 marker3\n");
  printf("file4 for ch1 marker4 , file9 for ch2 marker4\n");
  printf("file5 for ch1 marker5 , file10 for ch2 marker5\n");
  for(h=0;h<mk;h++)
  {
    if (phas==1)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

printf("Enter saved file%d name:=>",h+1);
scanf("%s",&fname[h]);
}
else if (phas==2)
{
printf("Enter saved file%d name:=>",h+6);
scanf("%s",&fname[h+5]);
}
else if (phas==3)
{
printf("Enter saved file%d name:=>",h+1);
scanf("%s",&fname[h]);
printf("Enter saved file%d name:=>",h+6);
scanf("%s",&fname[h+5]);
}
else
{
printf("error in saves\n");
printf("\007");
exit(0);
}
}
k=0;
while(k<mk)
{
if (phas==1)
{
/*****channel 1*****/
printf("start saving file of marker%d ,channel 1.....)\n",mk);
if ((data = fopen(fname[k], "wb")) == NULL)
{ printf("Error in open file\n");
exit(0);
}
fwrite(&buf[k+1][1],sizeof(float),point,data);
fclose(data);
k++;
}

else if (phas==2)
{
/*****channel 2*****/
printf("start saving file of marker%d ,channel 2.....)\n",mk);
if ((data1 = fopen(fname[k+5], "wb")) == NULL)
{ printf("Error in open file\n");
exit(0);
}
fwrite(&buf[k+6][1],sizeof(float),point,data1);
fclose(data1);
k++;
}

else if (phas==3)
{
/*****channel 1*****/
printf("start saving file of marker%d ,channel 1.....)\n",mk);
if ((data = fopen(fname[k], "wb")) == NULL)

```

```

        { printf("Error in open file\n");
          exit(0);
        }
        fwrite(&buf[k+1][1],sizeof(float),point,data);
        fclose(data);
        /******channel 2******/
        printf("start saving file of marker%d ,channel 2.....)\n",mk);
        if ((data1 = fopen(finame[k+5],"wb")) == NULL)
        { printf("Error in open file\n");
          exit(0);
        }
        fwrite(&buf[k+6][1],sizeof(float),point,data1);
        fclose(data1);
        k++;
    }
    else
    {
        printf("error in saves\n");
        printf("\007");
        exit(0);
    }
}

void meas_setup()
{
    int ans,ans3;
    char ans1,ans2,form1[30],form2[30],head1[70],head2[70],cmd[80],cmd1[80];
    phas = 0;
    printf("MEASUREMENT SETUP");
    getch();
    clrscr(); gotoxy(30,8);
    printf("  SETUP CHANNEL 1 (11 or 21) \n");
    printf("  11: FOR REFLECTION \n");
    printf("  21: FOR TRANSMISSION \n");
    scanf("%d",&ans);
    clrscr();
    if(ans==11)
    {
        gotoxy(30,8);
        printf("  SETUP CHANNEL 1 FOR REFLECTION \n");
        strcpy(head1,"SETUP CHANNEL 1 FOR REFLECTION");
    }
    else if(ans==21)
    {
        gotoxy(30,8);
        printf("  SETUP CHANNEL 1 FOR TRANSMISSION \n");
        strcpy(head1,"SETUP CHANNEL 1 FOR TRANSMISSION");
    }
    else
    {
        printf("out of menu,do again\n");
        meas_setup();
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

clrscr();
printf(" SELECT FORMAT \n");
printf(" l : LOG MAGNITUDE\n");
printf(" p : PHASE\n");
printf("if you choose PHASE ,we will normalize phase automatically \n");
printf(" d : DELAY\n");
printf(" m : SMITH CHART\n");
printf(" o : POLAR\n");
printf(" n : LIN MAGNITUDE\n");
printf(" r : REAL\n");
printf(" s : SWR\n");

ans1=getch();
switch(ans1)
{
case 'l' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;LOGM;",ans);
            output (cmd);strcpy(form1,"LOG MAGNITUDE");
            break;
case 'p' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;PHAS;",ans);
            output (cmd);strcpy(form1,"PHASE");
            /* normalize phase */
            phas=phas+1;
            break;
case 'd' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;DELA;",ans);
            output (cmd);strcpy(form1,"DELAY");
            break;
case 'm' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;SMIC;",ans);
            output (cmd);strcpy(form1,"SMITH CHART");
            break;
case 'o' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;LINP;",ans);
            output (cmd);strcpy(form1,"LINEAR ON POLAR
FORMAT");
            break;
case 'n' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;LINM;",ans);
            output (cmd);strcpy(form1,"LIN MAGNITUDE");
            break;
case 'r' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;REAL;",ans);
            output (cmd);strcpy(form1,"REAL");
            break;
case 's' : sprintf(cmd,"CHAN1;S%d;SWR;",ans);
            output (cmd);strcpy(form1,"SWR");
            break;
}
clrscr();
gotoxy(30,8);
printf(head1);printf("\n"); gotoxy(35,9);
printf(form1);printf("\n");
printf(" PRESS ANY KEY TO CONTINUE\n");
getch();
clrscr();

printf("SETUP CHANNEL 2 ? (Y or N)\n");
ans2=getch();
clrscr();
if (ans2=='y')

```

```

{
    clrscr(); gotoxy(30,8);
    printf(" SETUP CHANNEL 2 (11 or 21) \n");
    printf(" 11: FOR REFLECTION \n");
    printf(" 21: FOR TRANSMISSION \n");
    scanf("%d",&ans3);
    clrscr();
    if(ans==11)
    {
        gotoxy(30,8);
        printf(" SETUP CHANNEL 2 FOR REFLECTION \n");
        strcpy(head2,"SETUP CHANNEL 2 FOR REFLECTION");
    }
    else if (ans==21)
    {
        gotoxy(30,8);
        printf(" SETUP CHANNEL 2 FOR TRANSMISSION
\n");
        strcpy(head2,"SETUP CHANNEL 2 FOR
TRANMISSION");
    }
    else
    {
        printf("out of menu,do again..");
        meas_setup();
    }
    clrscr();
    printf(" SELECT FORMAT \n");
    printf(" l : LOG MAGNITUDE\n");
    printf(" p : PHASE\n");
    printf("if you choose PHASE,we will nomalize phase automatically
\n");
    printf(" d : DELAY\n");
    printf(" m : SMITH CHART\n");
    printf(" o : POLAR\n");
    printf(" n : LIN MAGNITUDE\n");
    printf(" r : REAL\n");
    printf(" s : SWR\n");

    ans1=getch();
    switch(ans1)
    {
        case 'l' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;LOGM;",ans);
                    output (cmd);strcpy
(form2,"LOG MAGNITUDE");
                    break;
        case 'p' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;PHAS;",ans);
                    output (cmd);strcpy
(form2,"PHASE");
                    /* normalize phase */
                    phas = phas+2;
                    break;
        case 'd' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;DELA;",ans);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

                                                                    output (cmd);strcpy
(form2,"DELAY");
                                                                    break;
                                                                    case 'm' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;SMIC;",ans);
                                                                    output (cmd);strcpy
(form2,"SMITH CHART");
                                                                    break;
                                                                    case 'o' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;LINP;",ans);
                                                                    output (cmd);strcpy
(form2,"LINEAR ON POLAR FORMAT");
                                                                    break;
                                                                    case 'n' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;LINM;",ans);
                                                                    output (cmd);strcpy
(form2,"LIN MAGNITUDE");
                                                                    break;
                                                                    case 'r' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;REAL;",ans);
                                                                    output (cmd);strcpy
(form2,"REAL");
                                                                    break;
                                                                    case 's' : sprintf(cmd,"CHAN2;S%d;SWR;",ans);
                                                                    output (cmd);strcpy
(form2,"SWR");
                                                                    break;
                                                                    }
                                                                    clrscr();
                                                                    gotoxy(30,8);
                                                                    printf(head2);printf("\n"); gotoxy(35,9);
                                                                    printf(form2);printf("\n");
                                                                    printf(" PRESS ANY KEY TO CONTINUE\n");
                                                                    }
                                                                    clrscr();
                                                                    gotoxy(30,6);
                                                                    printf(head1);gotoxy(35,7);
                                                                    printf(form1);gotoxy(30,8);
                                                                    if(ans2=='y')
                                                                    {
                                                                    printf(head2);gotoxy(35,9);
                                                                    printf(form2);gotoxy(30,20);
                                                                    }

                                                                    printf("PRESS ANY KEY TO CONTINUE\n");
                                                                    getch();
                                                                    //output("DUACON;");
                                                                    output("SPLI;");
                                                                    }

                                                                    void select_power()
                                                                    {
                                                                    int ansp;
                                                                    clrscr();
                                                                    printf("SELECT POWER LEVEL \n");

```

```

printf(" 1 : range (-10 to +10 dBm)\n");
printf(" 2 : range (-15 to +5 dBm)\n");
printf(" 3 : range (-20 to 0 dBm)\n");
printf(" 4 : range (-25 to -5 dBm)\n");
printf(" 5 : range (-30 to -10 dBm)\n");
printf(" 6 : range (-35 to -15 dBm)\n");
printf(" 7 : range (-40 to -20 dBm)\n");
printf(" 8 : range (-45 to -25 dBm)\n");
printf(" 9 : range (-50 to -30 dBm)\n");
printf(" 10 : range (-55 to -35 dBm)\n");
printf(" 11 : range (-60 to -40 dBm)\n");
printf(" 12 : range (-65 to -45 dBm)\n");
printf("WHICH RANGE ??: ");
scanf("%d",&ansp);
switch(ansp)
{
    case '1' : output ("POWE10;"); break;
    case '2' : output ("POWE5;"); break;
    case '3' : output ("POWE0;"); break;
    case '4' : output ("POWE-5;"); break;
    case '5' : output ("POWE-10;"); break;
    case '6' : output ("POWE-15;"); break;
    case '7' : output ("POWE-20;"); break;
    case '8' : output ("POWE-25;"); break;
    case '9' : output ("POWE-30;"); break;
    case '10' : output ("POWE-35;"); break;
    case '11' : output ("POWE-40;"); break;
    case '12' : output ("POWE-45;"); break;
    default : printf("out of menu,choose again..\n");
              select_power();
}
return;
}

void calibrate()
{
output ("CAL1;CLES;CALIFUL2;REFL;"); //FOR 3.5 MM
disp_promt("Connect OPEN at port 1 ");
output ("CLASS11A;");
//opc();
//output ("CAL2;CLES;CALIFUL2;REFL;"); //FOR 2.4 MM
//disp_promt("Connect OPEN at port 1 ");
//output ("OPC?;CLASS11A;");
//opc();
disp_promt("Connect SHORT at port 1 ");
output ("CLASS11B;");
//opc();
disp_promt("Connect BROADBAND LOAD at port 1 ");
output ("CLASS11C;STANA;DONE;");
//opc();
disp_promt("Connect OPEN at port 2");
output ("CLASS22A;");
//opc();
disp_promt ("Connect SHORT at port 2 ");
output ("CLASS22B;");
}

```

```

//opc();
disp_promt("Connect BROADBAND LOAD at port 2 ");
output ("CLASS22C;STANA;DONE;");
//opc();
output ("REFD;");
printf ("Computing reflection calibration coefficients :(\n");
output ("TRAN;");
disp_promt("Connect THRU [port1 to port 2]");
printf ("Measuring forward transmission\n");
output ("FWDT;");
//opc();
output ("FWDM;");
//opc ();
printf ("Measuring reverse transmission :(\n");
output ("REVT;");
//opc();
output ("REVM;");
//opc();
output ("TRAD;");
disp_promt("Isolate test ports");
//output ("AVERON16;ISOL;");
//output ("AVERFACT16;AVERON;ISOL;");
printf ("Measuring reverse isolation\n");
output ("REVI;");
//opc();
printf ("Measuring forward isolation\n");
output ("FWDI;");
//opc();
//output ("ISOD;AVEROFF;");
output ("ISOD;");
printf ("computing calibration coefficients :(\n");
output ("SAVE3;");
//opc();
printf("DONE :)\n");
}
void scanner()
{
int endp;
int x,y;
int argv[4];
char com[10];
clrscr();
endp = 0;
printf("CntX=");
scanf("%d",&argv[1]);
printf("CntY=");
scanf("%d",&argv[2]);
printf("step=");
scanf("%d",&argv[3]);
    CntX = argv[1];
    CntY = argv[2];
point = (CntX+1)*(CntY+1);
    sprintf(com,"PA0,0;");
    fprintf(stdprn,"%s",com);
    for (y = 0; y <= CntY; y++)

```

```

{
    /*first point*/
    if (y < 1)
    {
        delay(2000);
        i=1;
        read();/*access*/
        printf("\007");
    }
    /*******/
    /*if y is not equal to last point of scanning and not in the first row*/
    if (y != 0)
    if ((CntY != 0) || (y != CntY))
    {
        sprintf(com, "PR0,%d;", argv[3]);
        fprintf(stdprn, "%s", com);
    }
    /*******/
    /*if y is in other row*/
    if (y >= 1)
    {
        delay(2000);
        i++;
        read();/*access*/
        printf("\007");
    }
    /*******/
    /*scanning in x axis (right direction)*/
    if (endp)
    {
        for (x = CntX-1; x >= 0; x--)
        {
            sprintf(com, "PR-%d,0;", argv[3]);
            fprintf(stdprn, "%s", com);
        }
        delay(2000);
        i++;
        read();/*access*/
        printf("\007");
    }
    }
    endp = 0;
}
/*******/
/*scanning in x axis(left direction)*/
else
{
    for (x = 0; x <= CntX-1; x++)
    {
        sprintf(com, "PR%d,0;", argv[3]);
        fprintf(stdprn, "%s", com);
    }
    delay(2000);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        printf("\007");
    }
}
    endp = 1;
}
/*****/
}
}

void abb()
{
/*****normalize phase*****/
if (phas != 0)
{
printf("[choose one choice...]\n");
printf("1.normalize by the value of medium point\n");
printf("2.normalize by the value of up-left point\n");
printf("3.normalize by the value of up-right point\n");
printf("4.normalize by the value of down-left point\n");
printf("5.normalize by the value of down-right point\n");
scanf("%d",&nnor);
if (nnor==1)
{
medium();
normal_phas();
}
else if (nnor>1)
{
if (nnor>5) { printf("<out of menu>(..abb(..))\n");
printf("\007");
abb();
}
medium2();
normal_phas();
}
}
/*****/
}
}

void main()
{
char cali,both;
initialize();
meas_setup();
//select_power(); /* (cannot use)*/
//select_freq();
/**** select to calibrate or not ****/
printf("do you want to calibrate??(y=yes!/any key=no!)\n");
cali = getch();
if (cali=='y')
{ calibrate();
}
/*****/
marker_freq();
for (ii=1;ii<200;ii++)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

scanner();

printf("\n\n");
/** if you choose phase you must *****/
/** saving before normalize phase.***/
if ( phas!=0 )
{ printf("[ save before normalize ]\n");
  printf("\007");
  printf("press [ENTER] to cont..\n");
  getch();
  printf("Do you want to save both of channel?..(y/n)..n");
  printf("y= save ch1 and ch2\n");
  printf("n= save only ch. that use phase measurement\n");
  both = getch();
  if (both=='y') save();
  else saves();
  abb();
}
/** save after normalize and root2 ( if you choose phase) ***/
/** or save if you're not choose of phase) *****/
printf("\n\n");
printf("!! save data++ !!\n");
printf("\007");
printf("press [ENTER] to cont..\n");
getch();
save();
/*****/
printf("end of program :} ");
sound(100);
delay(300);
nosound();
getch();
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

โปรแกรมประมวลผลหาค่าความเป็นฉนวนจากสนามที่วัดได้  
เนื่องจากการกระเจิงและเลี้ยวเบนจากวัตถุ

โปรแกรมจะนำค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้ไปคำนวณความเป็นฉนวนด้วยเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยขั้นตอนการคำนวณสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. อ่านค่าของสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ สนามไฟฟ้าที่กระเจิง และสนามไฟฟ้าที่เลี้ยวเบนที่วัดได้ทั้งขนาดและเฟส จากเพิ่มข้อมูลที่บันทึกไว้
2. คำนวณค่าฟังก์ชันกรีน โดยเทียบแต่ละจุดภายในวัสดุกับจุดที่ใช้วัด
3. คำนวณค่าฟังก์ชันกรีน โดยเทียบแต่ละจุดภายในวัสดุกับจุดในวัสดุ
4. คำนวณสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ
5. นำค่าสนามไฟฟ้ากระเจิงมาลบกับสนามไฟฟ้าเลี้ยวเบน
6. คำนวณค่าความเป็นฉนวนของวัสดุ
7. ผลที่ได้เป็นการประมาณขั้นแรก ซึ่งต้องนำผลที่ได้ไปตรวจสอบเงื่อนไข
 
$$\| [E^T E^d] - [G^T][E][T] \|^2 \text{ น้อยที่สุด}$$

$$\| [T] \|^2 \text{ น้อยที่สุด}$$
8. เมื่อผลที่ได้ยังไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าว จะนำผลที่ได้ไปคำนวณในขั้นตอนที่ 3 อีกครั้ง โดยทั่วไปทำซ้ำไปเป็นจำนวนครั้งเท่ากับจำนวนจุดที่กวาดเพื่อวัดสนามไฟฟ้าหารด้วยสี่

C23456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

```

C *****
C * This program is used to calculate e-fields distribution *
C * in dielectrics *
C *****
C
PROGRAM GREEN_MN_PQ
IMPLICIT NONE

C
INTEGER PMAX,QMAX
PARAMETER(PMAX=3,QMAX=3)
INTEGER MMAX,NMAX
PARAMETER(MMAX=36,NMAX=36)
INTEGER ROWMAX,COLMAX
PARAMETER(ROWMAX=108,COLMAX=108)
INTEGER DATROWMAX,DATCOLMAX
PARAMETER(DATROWMAX=108,DATCOLMAX=6)
! For load data file

C
INTEGER I,J,K,P,Q,M,N,IX,NE,LOOP
INTEGER IDROW,IDCOL
REAL MU0,E0,SIGMA,FREQ,PI,EP,CLIGHT,LAMDA
REAL OMEGA,K0,ER,QUADLAM,VOLM,AN,LPS,LPE
REAL MX,MY,NX,NY,X1M,X2M,X3M,X1N,X2N,X3N,DHS
REAL RMN,RMND,ALPMN,CSMNP,CSMNQ,X,Y,Z,TMRMN
REAL EIL,ESL,EDL,EIP,ESP,EDP,ML,EVLPE,EVLPS
COMPLEX EI,ES,ED,ESD,PHS

C
COMPLEX JAY,TOR,TM1EQ,TM2EQ,TM3EQ,TM1NE,TM2NE,TM3NE
COMPLEX TMD,T,GMNPQ,GINV !,GDXGESQ2
COMPLEX GDXGESQ,GDMNPQ,GD,TMP1,TMP2,GESQ,GE

C
DIMENSION GMNPQ(1:NMAX,1:MMAX,1:PMAX,1:QMAX)
DIMENSION GINV(1:ROWMAX,1:COLMAX)
DIMENSION GDMNPQ(1:NMAX,1:MMAX,1:PMAX,1:QMAX)
DIMENSION GD(1:ROWMAX,1:COLMAX)
DIMENSION GDXGESQ(1:ROWMAX,1:COLMAX)
C
DIMENSION GDXGESQ2(1:ROWMAX,1:COLMAX)
DIMENSION GE(1:DATROWMAX)
DIMENSION ML(1:DATROWMAX,1:DATCOLMAX)
DIMENSION NE(1:DATROWMAX,1:DATCOLMAX)
DIMENSION EIL(1:DATROWMAX)
DIMENSION EIP(1:DATROWMAX)
DIMENSION ESL(1:DATROWMAX)
DIMENSION ESP(1:DATROWMAX)
DIMENSION EDL(1:DATROWMAX)
DIMENSION EDP(1:DATROWMAX)
DIMENSION EI(1:DATROWMAX)
DIMENSION GESQ(1:ROWMAX,1:COLMAX)
DIMENSION ES(1:DATROWMAX)
DIMENSION ED(1:DATROWMAX)
DIMENSION ESD(1:DATROWMAX)
DIMENSION T(1:DATROWMAX)
DIMENSION LPS(1:36,1:20) ! (I,LOOP)
DIMENSION LPE(1:36,1:20) ! (I,LOOP)
DIMENSION EVLPE(1:20)
DIMENSION EVLPS(1:20)

C /* openfile */
CHARACTER FILENAME2*25 ! Raw packed data file
CHARACTER FILENAME3*25 ! T data

PRINT*,'THIS CALCULATE WITH Lamda/8'
PRINT*,' INPUT Raw packed data :<*pk.txt>:'
READ*,'(A)'FILENAME2
OPEN(2,FILE=FILENAME2,ERR=900,STATUS='UNKNOWN')
GOTO 910
900 PRINT*,'!!@ Can not Open Ei&Et&Ed file @!!'

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

STOP
910 PRINT*, ' OUTPUT T = S & Er file :<*t8.txt>: '
    READ(*,'(A)')FILENAME3
    OPEN(3,FILE=FILENAME3, ERR=960, STATUS='NEW')
    GOTO 970
960 PRINT*, '!@ Can not Open output T file @!'
    STOP
970 PRINT*, ' Yea! open file done # '
    PRINT*, '

    PI = 4.0*ATAN(1.0)
    CLIGHT = 2.99792458E+8
    MU0 = 1.25663706144E-6
    E0 = 8.85418781761E-12
    SIGMA = 0.0
EP = 1.0
    FREQ = 2.45E+9
    LAMDA = CLIGHT/FREQ
    QUADLAM = LAMDA/8.0 ! #####
    JAY = CMPLX(0.0,1.0)

C
    VOLM = QUADLAM**3
    AN = 3.0/(4.0*PI)*VOLM**(1.0/3.0)
    OMEGA = 2.0*PI*FREQ
    K0 = SQRT(OMEGA*OMEGA*MU0*E0)
    ER = EP*E0
    TOR = SIGMA+JAY*OMEGA*(ER-E0)

C
    ----- Initial T matrix -----
    DO 5 I=1, 2*NMAX ! 72
        T(I) = CMPLX(0.0,0.0)
5    CONTINUE
    DO 7 I=73, DATROWMAX ! 108
        T(I) = TOR
7    CONTINUE

C
C ===== MAIN =====
C
C start calculate electric field
C
C ----- LOADED RAW EI_ES_ED DATA -----

    DO 9 I=1, DATROWMAX ! 3M
        READ(2,11) ML(I,1),NE(I,1),ML(I,2),NE(I,2),ML(I,3),NE(I,3)
        & ,ML(I,4),NE(I,4),ML(I,5),NE(I,5),ML(I,6),NE(I,6)
11    FORMAT(F9.6,1X,I3,1X,F9.6,1X,I3,2(1X),F9.6,1X,I3,1X
        & ,F9.6,1X,I3,2(1X),F9.6,1X,I3,1X,F9.6,1X,I3,1X)
9    CONTINUE

c
c print*, ' Loaded data from file to variables '

    DO IX=1,DATROWMAX ! 3M
        EIL(IX) = ML(IX,1)*10.0**NE(IX,1) ! EIL
        EIP(IX) = ML(IX,2)*10.0**NE(IX,2) ! EIP
        EI(IX) = CMPLX(EIL(IX),EIP(IX))
        ESL(IX) = ML(IX,3)*10.0**NE(IX,3) ! ESL
        ESP(IX) = ML(IX,4)*10.0**NE(IX,4) ! ESP
        ES(IX) = CMPLX(ESL(IX),ESP(IX))
        EDL(IX) = ML(IX,5)*10.0**NE(IX,5) ! EDL
        EDP(IX) = ML(IX,6)*10.0**NE(IX,6) ! EDP
        ED(IX) = CMPLX(EDL(IX),EDP(IX))
    ENDDO

c
c print*, ' Compose to EI ES ED !! '

```

```

WRITE (3,257) FILENAME2
257 FORMAT(2X,A,' {T} = {S} & {Er} data file <# L/8 #>')

```

c Loop Iterative

```
DO 89 LOOP=1, 20 !# loop @@@@*****
```

```
PRINT*,'Start Calculate !! : loop#',LOOP
```

c PRINT\*,' Begin Cal G '

C

```

DO 50 Q=1, QMAX      ! 3
DO 40 P=1, PMAX      ! 3
DO 30 M=1, MMAX      ! 36
DO 20 N=1, NMAX      ! 36

```

```

NX = MOD(N,6)
IF (NX.EQ.0.0) NX=6.0
NY = ((N-MOD(N,6))/6.0)+1.0
IF (MOD(N,6).EQ.0.0) NY=NY-1.0
IF (NY.EQ.7.0) NY=6.0
IF (((N.GT.6).AND.(N.LT.13)).OR.(N.GT.18).AND.(N.LT.25)))
& .OR.(N.GT.30)) THEN
  X1N = -(2.0*NX-7.0)*LAMDA/8.0
ELSE
  X1N = (2.0*NX-7.0)*LAMDA/8.0
ENDIF
X2N = (7.0-2.0*NY)*LAMDA/8.0
X3N = LAMDA/8.0

MX = MOD(M,6)
IF (MX.EQ.0.0) MX=6.0
MY = ((M-MOD(M,6))/6.0)+1.0
IF (MOD(M,6).EQ.0.0) MY=MY-1.0
IF (MY.EQ.7.0) MY=6.0
IF (((M.GT.6).AND.(M.LT.13)).OR.(M.GT.18).AND.(M.LT.25)))
& .OR.(M.GT.30)) THEN
  X1M = -(2.0*MX-7.0)*LAMDA/8.0
ELSE
  X1M = (2.0*MX-7.0)*LAMDA/8.0
ENDIF
X2M = (7.0-2.0*MY)*LAMDA/8.0
X3M = LAMDA/8.0

RMN = SQRT((X1M-X1N)**2.0+(X2M-X2N)**2.0+(X3M-X3N)**2.0)
ALPMN = K0*RMN

```

C This section calculat G' = GDMNPQ

C First patial differential

```
IF (LOOP.GT.1) GOTO 979
```

```
X = X1M-X1N
```

```
Y = X1M-X1N
```

```
Z = 0.112
```

```
TMRMN = X*X+Y*Y+Z*Z
```

```
RMND = SQRT(TMRMN)
```

```
PHS = CEXP(-JAY*K0*RMND)
```

```
DHS = 4.0*PI*RMND**5
```

```
IF (P.NE.Q) THEN
```

```
  TMP1 = CMPLX(0.0,0.0)
```

```
ELSE
```

```
  TMP1 = PHS/(4.0*PI*RMND)
```

```
ENDIF
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาหรือสิทธิบัตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

IF ((P.EQ.3).OR.(Q.EQ.3)) THEN
  TMP2 = CMPLX(0.0,0.0)
  GOTO 995 ! if diff with Z equal 0
ENDIF

IF (P.NE.Q) THEN
  TMP2 = -PHS*X*Y*(K0*K0*TMRMN-3.0-3.0*JAY*K0*RMND)/DHS
ELSE
  IF ((P.EQ.1).OR.(Q.EQ.1)) THEN
    TMP2 = (PHS/DHS)*JAY*K0*(2.0*X*X-Y*Y-Z*Z)*RMND-Y*Y-Z*Z
    & +X*X*(2.0-K0*K0*TMRMN)
  ELSE
    TMP2 = (PHS/DHS)*JAY*K0*(2.0*Y*Y-X*X-Z*Z)*RMND-X*X-Z*Z
    & +Y*Y*(2.0-K0*K0*TMRMN)
  ENDIF
ENDIF

995 GDMNPQ(N,M,P,Q) = -JAY*OMEGA*MU0*(TMP1+TMP2/(K0*K0))

```

C CALL GMNPQ(M,N,P,Q,RSGR) solve function

```

979 IF (M.EQ.N) THEN

  IF (P.NE.Q) THEN
    GMNPQ(N,M,P,Q) = CMPLX(0.0,0.0)
  ELSE
    IF (LOOP.EQ.1) THEN
      TM1EQ = -2.0*JAY*OMEGA*MU0/(3.0*K0*K0*K0)
      TM2EQ = ((1.0+JAY*K0*AN)*CEXP(-JAY*K0*AN))-1.0
      TM3EQ = 1.0/(3.0*JAY*OMEGA*E0)
      TMD = TM1EQ*TM2EQ-TM3EQ
    ENDIF
    GMNPQ(N,M,P,Q) = TMD*T(2*NMAX+N)-1.0

  ENDIF

  ELSE ! (M.NEQ.N)

  TM1NE = (-JAY*OMEGA*MU0*K0*VOLM*T(2*NMAX+N)/(4.0*PI*ALPMN**3.0))
  & *CEXP(-JAY*ALPMN)

C
  IF (P.NE.Q) THEN
    TM2NE = CMPLX(0.0,0.0)
  ELSE
    TM2NE = ALPMN-1.0-JAY*ALPMN
  ENDIF

```

```

IF (P.EQ.1) THEN
  CSMNP = (X1M-X1N)/RMN
ELSE
  IF (P.EQ.2) THEN
    CSMNP = (X2M-X2N)/RMN
  ELSE
    CSMNP = (X3M-X3M)/RMN
  ENDIF
ENDIF

```

```

IF (Q.EQ.1) THEN
  CSMNQ = (X1M-X1N)/RMN
ELSE
  IF (Q.EQ.2) THEN
    CSMNQ = (X2M-X2N)/RMN
  ELSE
    CSMNQ = (X3M-X3M)/RMN
  ENDIF

```

```

ENDIF

TM3NE = CSMNP*CSMNQ*(3.0-ALPMN*ALPMN+3.0*JAY*ALPMN)

GMNPQ(N,M,P,Q) = TM1NE*(TM2NE-TM3NE)

ENDIF

20 CONTINUE
C
30 CONTINUE
C
40 CONTINUE
C
50 CONTINUE

c PRINT*, ' End Cal '

C
C -----
C Transform G(M,N,P,Q) => G(IDROW,IDCOL)
C
c PRINT*, ' Converted from GX(m,n,p,q) => GX(idrow,idcol)'
IDCOL = 1

DO 140 Q = 1 ,QMAX ! 3
DO 130 M = 1 ,MMAX ! 36
IDROW = 1
DO 120 P = 1 ,PMAX ! 3
DO 110 N = 1 ,NMAX ! 36
GINV(IDROW,IDCOL) = GMNPQ(N,M,P,Q)
GD(IDROW,IDCOL) = GDMNPQ(N,M,P,Q)
GESQ(IDROW,IDCOL) = CMPLX(0.0,0.0)
IDROW = IDROW + 1
110 CONTINUE
120 CONTINUE
IDCOL = IDCOL + 1
130 CONTINUE
140 CONTINUE

C
c -----
c PRINT*, ' Inverse G(idrow,idcol)'
CALL INVERSE(GINV)

C Multiplication: GINV(3M X 3M) X EI(3M X 1) => GE(3M X 1)
c PRINT*, ' Multiply: GINV(3M X 3M) X EI(3M X 1) => GE(3M X 1)'
DO 21 I = 1, DATROWMAX
GE(I) = CMPLX(0.0,0.0)
DO 21 J = 1, DATROWMAX
GE(I) = GE(I) + GINV(I,J)*EI(J)
21 CONTINUE

C Transform GINVXEI(3M X 1) => GINVXEI(3M X 3M)
c PRINT*, ' Transform GINVXEI(3M X 1) => GINVXEI(3M X 3M)'
DO 26 P = 1 , 3
DO 26 Q = 1 , 3
DO 26 N = 1 , NMAX ! 36
DO 26 M = 1 , MMAX ! 36
GESQ((P-1)*NMAX+N,(Q-1)*MMAX+M) = GE(M+72)
26 CONTINUE

C Multiplication: Gprime(3M X 3M) X GINVXEI(3M X 3M)
c PRINT*, ' Multiply: Gprime(3M X 3M) X GINVXEI(3M X 3M)'
DO 23 I = 1, DATROWMAX ! 108
DO 23 J = 1, DATROWMAX ! 108
GDGXSQ(I,J) = CMPLX(0.0,0.0)
DO 23 K = 1, DATROWMAX
GDGXSQ(I,J) = GDGXSQ(I,J) + GD(I,K)*GESQ(K,J)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

23 CONTINUE
C
C -----
C subtraction: ES(3M X 1) - ED(3N X 1)
c PRINT*, ' subtraction: ES(3M X 1) - ED(3N X 1)'
DO 29 I = 1, DATROWMAX
  IF (I.LE.36) THEN
    ESD(I) = ES(I+72) - ED(I+72)
  ELSE
    ESD(I) = ES(I-36) - ED(I-36)
  ENDIF
29 CONTINUE
C
C -----
C Multiplication: GDXGINVXEI(3M X 3M) X ED(3M X 1) => T(3M X 1) => -T(3M X 1)
c PRINT*, ' Get T matrix'
DO 31 I = 1, DATROWMAX
  T(I) = CMPLX(0.0,0.0)
DO 31 J = 1, DATROWMAX
  T(I) = T(I) + GDXGESQ(I,J)*ESD(J)
  T(I) = -T(I)
31 CONTINUE

DO I=73,DATROWMAX
  LPS(I-72,LOOP) = REAL(T(I))
  LPE(I-72,LOOP) = (AIMAG(T(I))+OMEGA*E0)/(E0*OMEGA)
c WRITE(3,500) I-72,LPS(I-72,LOOP),LPE(I-72,LOOP)
c500 FORMAT(I3,10X,F15.9,20X,F15.8)
ENDDO

89 CONTINUE ! go to out loop for iteration

WRITE(3,52) LOOP-1
52 FORMAT(5X,#loop = ,I3)

DO LOOP=1,20 ! clear memory routine
  EVLPS(LLOOP) = 0.0
  EVLPE(LLOOP) = 0.0
ENDDO

DO 789 LOOP=1 ,20 ! Average routine
DO 789 I=1 ,36
  EVLPS(LLOOP) = EVLPS(LLOOP) + LPS(I,LOOP)
  EVLPE(LLOOP) = EVLPE(LLOOP) + LPE(I,LOOP)
789 CONTINUE

WRITE(3,(3X))
WRITE(3,(2X,11(I4,3X))) (LOOP,LOOP=10,20)
WRITE(3,444)
444 FORMAT(2X,' Average Sigma')
WRITE(3,(2X,11(F15.8,3X))) (EVLPS(LLOOP)/36.0,LOOP=10,20)
c WRITE(3,(3X))
WRITE(3,555)
555 FORMAT(2X,' Average Er')
WRITE(3,(2X,11(F15.8,3X))) (EVLPE(LLOOP)/36.0,LOOP=10,20)

CLOSE(2) ! EI-ES-ED packed file closed
CLOSE(3) ! T file closed

PRINT*,' '
PRINT*, '@ OK @ It is finished ### '

```

END

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่มีการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

C =====
C =====
SUBROUTINE INVERSE(NMBINV)
IMPLICIT NONE

INTEGER      I,J,K,DATROWMAX
COMPLEX NMBINV
PARAMETER(DATROWMAX=108)
C COMMON /CONSTANT1/ DATROWMAX
DIMENSION NMBINV(1:DATROWMAX,1:DATROWMAX)

C ##### Begin section to inverse GMNPQ matrix #####
C Calculate elements of Reduced Materix

DO 280 K=1,DATROWMAX

C Calculate new elements of Pivot row
DO 260 J=1,DATROWMAX
IF (J.EQ.K) GOTO 260
NMBINV(K,J) = NMBINV(K,J)/NMBINV(K,K)
260 CONTINUE

C Calculate element replacing Pivot element
NMBINV(K,K) = 1.0/NMBINV(K,K)

C Calculate new elements not in Pivot row or Pivot column
DO 270 I=1,DATROWMAX
IF (I.EQ.K) GOTO 267
DO 269 J=1,DATROWMAX
IF (J.EQ.K) GOTO 268
NMBINV(I,J) = NMBINV(I,J) - NMBINV(I,K)*NMBINV(K,J)
268 NMBINV(I,J) = NMBINV(I,J)
269 CONTINUE
267 NMBINV(I,J) = NMBINV(I,J)
270 CONTINUE

C Calculate replacement elements for pivot column except pivot element
DO 280 I=1,DATROWMAX
IF (I.EQ.K) GOTO 280
NMBINV(I,K) = -NMBINV(I,K)*NMBINV(K,K)
280 CONTINUE

C ##### End section inverse GMNPQ matrix #####
C -----
RETURN
END

```

## ภาคผนวก ค

### การวิเคราะห์หาปริมาณ Reducing Sugar

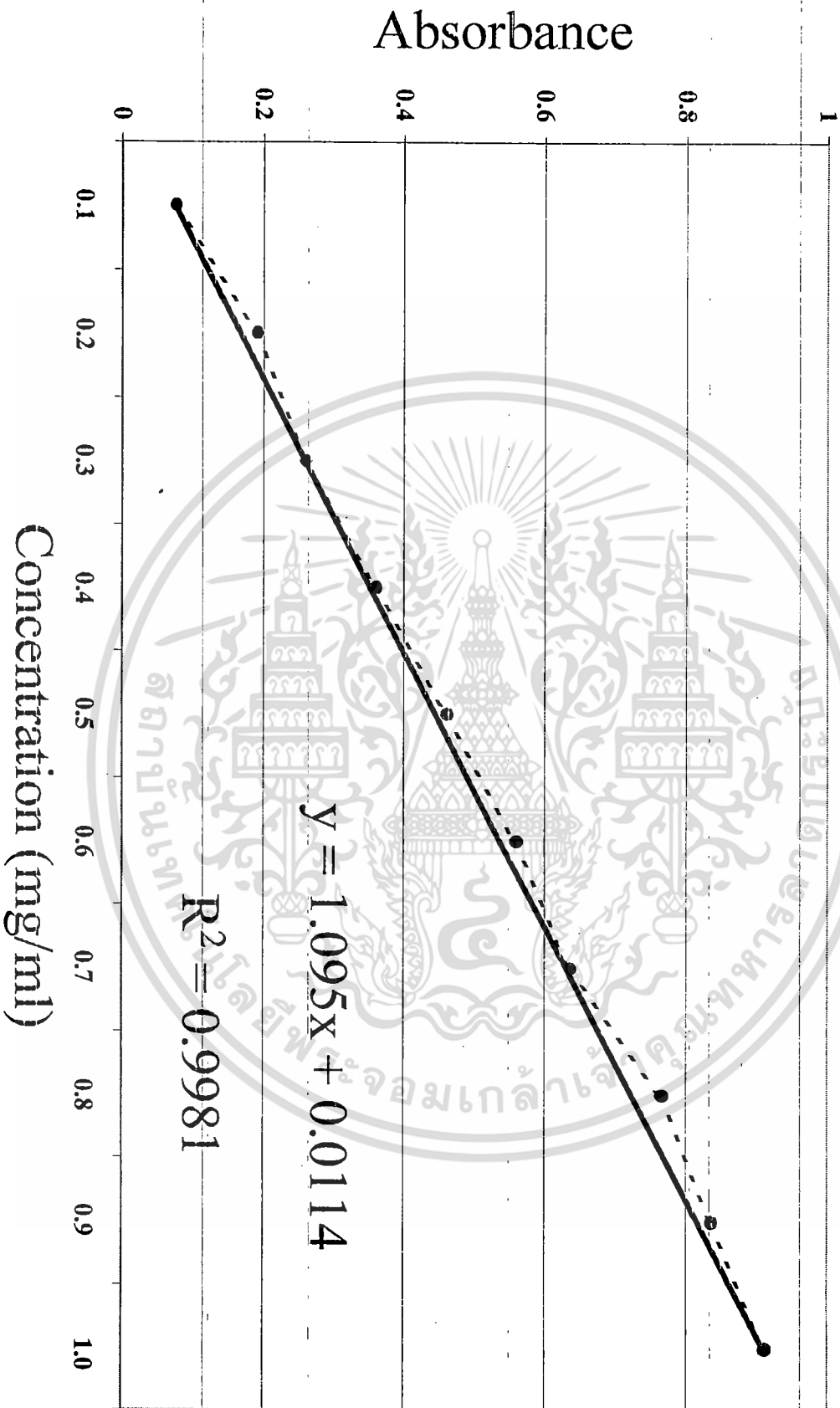
1. นำมะม่วงมาปั่นด้วยเครื่องปั่นผลไม้แล้วชั่งน้ำหนักประมาณ 1 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2. ละลายมะม่วงในน้ำ 50 หรือ 100 มิลลิลิตร (ถ้ามะม่วงดิบละลายน้ำ 50 มิลลิลิตร แต่มะม่วงสุกละลายน้ำ 100 มิลลิลิตร) แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 30 นาที
3. นำสารละลายที่ได้มากรองด้วยกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณ Reducing Sugar (ตามวิธีการในข้อ 4-8)
4. ดูดสารละลาย 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดแก้ว สำหรับหลอด Blank ใช้น้ำแทน
5. เติม DNS Solution 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน
6. ต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที ในระหว่างที่ต้มควรใช้ลูกแก้ววางบนปากหลอดแก้วเพื่อลดการระเหยของน้ำ
7. ทำให้เย็นโดยรวดเร็วโดยการนำหลอดแก้วมาแช่ในน้ำแข็งที่ละลายในน้ำ
8. เติมน้ำ 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน นำไปตรวจวัดค่า Absorbance ในเครื่อง Spectrophotometer ที่  $OD_{520}$  และนำค่า OD ที่วัดได้ไปเทียบกับ Standard Curve

### หมายเหตุ

#### การเตรียม DNS Solution

เตรียมโดยละลาย 3.5 Dinitrosalicylic acid (DNS) 2.5 กรัมลงใน 50 มิลลิลิตรของ 2N ( Normal หน่วยเข้มข้น) NaOH เติม Sodium potassium tartrate (Rochelle salt) 75 กรัม และคนจนละลายหมด เติมน้ำให้ได้ปริมาตรสุดท้าย 250 มิลลิลิตร เก็บในขวดสีน้ำตาลที่อุณหภูมิห้อง

### Standard Curve of Fructose



## เอกสารอ้างอิง

- [1] A.R.von Hippel, "Dielectric Materials and Applications," The Technology Press of the Massachusetts Institute of Technology, Boston, 1995.
- [2] J.Wang and T.Takagi, "A Noninvasive Method for Dielectric Property Measurement of Biological Tissues," IEICE Trans. Commun., Vol.E77, No.6, pp.738-742, June, 1994.
- [3] S.Caorsi, G.L.Graggani and M.Pastorino, "Numerical Electromagnetic Inverse Scattering Solutions for Two-Dimension Infinite Dielectric Cylinders Buried in Lossy Half-space," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.41, No.2, pp.352-360, Feb. 1993.
- [4] W.D.Burnside, C.L.Yu and R.J.Marhefka, "A Technique to Combine the Geometry Theory of Diffraction and the Moment Method," IEEE Trans. Antenna Propagat., pp.551-558, July, 1975.
- [5] ศราชัย แสงนิยม และ โมไนย ไกรฤกษ์, "การวัดค่าความเป็นฉนวนโดยวิธีการกระเจิงแบบย้อนกลับด้วยวิธีโมเมนต์ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต," การประชุมวิชาการท.งวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 822-827, พฤศจิกายน 2544
- [6] A. Strogryn, "Equation for calculating the dielectric constant of saline water," IEEE Trans. Microwave Theory and Technique, Vol.MTT-19, pp.733-736, Aug. 1971.
- [7] M.Krairiksh, Anat Mearnchu, Chuwong Phongcharoenpanich and Sarachai Sangniyom, "Inverse Scattering Measurement for Fruit Inspection toward Quality Control," Proc. The 2003 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, Korea, pp.1828-1831, July 2003.
- [8] C.A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics, John Wiley & Sons, New York, 1989.