

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การตรวจจับอาการเนื้อแก้วในมังคุดเพื่อการส่งออกด้วย

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า

Quality Checking in Mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) for Export by using Electrical Impedance Measurement.

โดย

นายอิทธิพล พจนัสัจ

นายกิติพล ชิตสกุล

นางสาวพรรณนิภา ยั่วยอด

RCH

OK

495

687

07271

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 86115

วัน,เดือน,ปี..... 29 พ.ย. 2551

ที่ปรึกษาโครงการวิจัย

นายสุรพล เศรษฐบุตร

b. 12017164

i.

ได้รับทุนอุดหนุนโครงการวิจัย ประจำปี 2547

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

มังคุดเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคทั้งประเทศและต่างประเทศ ในปัจจุบันนอกจากบริโภคภายในประเทศแล้วยังส่งตลาดต่างประเทศในลักษณะแช่แข็ง เช่น ญี่ปุ่น ฮองกง สิงคโปร์ ได้ทุกวัน และในรูปผลสดส่งออกไปประเทศ ยุโรป อเมริกา แคนาดา ตะวันออกกลาง ซึ่งมีแนวโน้มของการส่งออกเพิ่มขึ้นทุกปี สำหรับการส่งออกตลาดต่างประเทศผู้ส่งออกมังคุดมีเกณฑ์ในการรับซื้อเฉพาะมังคุดที่มีคุณภาพตามที่ตลาดต้องการ เกษตรกรผู้ผลิตสามารถคัดเลือกคุณภาพได้ ยกเว้นอาการเนื้อแก้วไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากต้องมีการผ่าผลเปิดดูไม่สามารถมองเห็นได้จากภายนอก ทำให้เป็นปัญหาสำคัญในการส่งออกมังคุด

ทางคณะวิจัยจึงได้มีการเสนอแนวทางการตรวจสอบอาการเนื้อแก้วของมังคุด ด้วยวิธีการวัดความต้านทานไฟฟ้าภายในมังคุด เพื่อหาแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพในการตรวจสอบอาการเนื้อแก้ว โดยนำเสนอการออกแบบสร้างระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าแบบ 32 อีเล็กโทรด โดยใช้วงจรมัลติเพล็กซ์ขนาด 32X4 แชนแนลในการจัดรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าและวัดค่าแรงดันไฟฟ้าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดจะถูกนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในผลมังคุด โดยอัลกอริทึมที่ใช้วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) และวิธีการนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) ค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในผลมังคุด ที่คำนวณได้จะแสดงผลโดยใช้ระดับความเข้มของจอแสดงผลของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ จากการทดลองโดยใช้กระแสไฟฟ้าระหว่าง 1-10 มิลลิแอมป์ที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตกับถังน้ำเกลือที่บรรจุผลมังคุด

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSTRACT

Mangosteen is a favourite fruit in Thailand and foreign countries. Now to be freezed for exportation to Japan Hongkong Singapore Taiwan and a fresh fruit in Europe America Canada etc.,increasingly every year. For the exportation has standard of quality control. Agriculture can select it as requirement. Exception of translucent pulp in Mangosteen can not checking it but has to cut for checking. That is the problem for the exportation and the checking.

This research presents the Quality Checking in Mangosteen by using Electrical Impedance Measurement for adjust the Quality Checking in Mangosteen efficiency. The system designs by using Electrical Impedance Tomographic Image of inner Mangosteen object, uses the 32X4 multiplexer to define the patterns of current injection and voltage measurement around the object. Data from voltage measurement are sent to a microcomputer for reconstruction of the image by improved algorithm based on Finite Element and Newton-Raphson Method. Then the impedance of inner Mangosteen image in gray scale is displayed on monitor. In some experiments using current 1-10 mA. at 100 Khz with saline tank containing the objects.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ง
สารบัญภาพ.....	จ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
ทฤษฎีหรือกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2. ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า.....	6
การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว.....	8
รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูล.....	10
อัลกอริทึมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าโดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ร่วมกับวิธี นิวตัน-ราฟสัน.....	12
3. ระบบเก็บข้อมูลการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า แบบ 32 อีเล็กโทรด.....	26
วงจรถ่ายสัญญาณไซน์ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต.....	26
วงจรถ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน.....	27
วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ขนาด 32X4 ช่องสัญญาณ.....	27
การ์ดอินเตอร์เฟซ.....	29
วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์เป็นสัญญาณดิจิทัล.....	30
4. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	31
5. บรรณานุกรม.....	35
6. ภาคผนวก..(ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่).....	36
7. ประวัติผู้วิจัย.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET – 8255.....	29
3.2 คุณสมบัติของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลรุ่น ET-AD12.....	30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1	การวัดหาค่าความต้านทาน.....3
1.2	ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ.....3
1.3	การวางของไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....4
1.4	รูปแบบการจ่ายกระแสและการวัดค่าศักดา ก)แบบขั้วข้างเคียง ข)แบบขั้วตรงข้าม.....4
2.1	การวัดหาค่าความต้านทานโดยการจ่ายค่ากระแสคงที่แล้ววัดค่าแรงดัน.....6
2.2	ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ [1].....7
2.3	ตัวอย่างภาพที่ได้จากระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ [1].....8
2.4	การไหลของกระแสและเส้นอิควิโพเทนเชียล (Equipotential line) เมื่อจ่ายกระแสเข้าที่ อิเล็กโทรด C และ D บนวัตถุที่เป็นตัวนำแบบไอโซทรอปิก (Isotropic conductor) แล้วทำการวัดแรงดันที่อิเล็กโทรด E และ F.....8
2.5	การวัดค่าความต้านทานในการใช้งานจริง.....10
2.6	รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง.....11
2.7	รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูลแบบขั้วตรงข้าม.....11
2.8	อิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม การจัดลำดับของโหนดจะเรียงตามทิศทวนเข็มนาฬิกา.....13
2.9	ลักษณะของ shape function N_1 และ N_2 ของอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม (Triangular).....15
2.10	อิลิเมนต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (triangular prism).....16
2.11	อิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม (2 มิติ).....11
2.12	อิลิเมนต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (3 มิติ).....20
2.13	แบบการวางอิลิเมนต์สำหรับไฟไนต์อิลิเมนต์ขนาด 32 อิเล็กโทรด 141 โหนด 248 อิลิเมนต์.....22
2.14	ไฟล์ชาร์ตแสดงการทำงานของอัลกอริธึม.....23
3.1	ระบบเก็บข้อมูลสำหรับการสร้างภาพตัดขวางแบบ 32 อิเล็กโทรด.....26
3.2	วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์.....26
3.3	วงจรถ่ายกระแสที่ใช้ในระบบเก็บข้อมูล.....27
3.4	วงจรถ่ายกระแสที่ใช้ในระบบเก็บข้อมูล.....27
3.5	วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ ขนาด 32x4 ช่องสัญญาณ.....28
3.6	ลักษณะของการ์ดอินเตอร์เฟสรุ่น ET – 8255.....29
3.7	วงจรรภายในของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลรุ่น ET-AD12.....30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.1	ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้างเคียง ในรูปแบบการแสดงผลแบบสีของผลม้งคุดที่มีเนื้อแก้ว.....	31
4.2	ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วข้างเคียง ในรูปแบบการแสดงผลแบบขาวดำของผลม้งคุดที่มีเนื้อแก้ว.....	31
4.3	ถังบรรจุน้ำเกลือ 32 อิลีกโทรอด.....	32
4.4	ผลม้งคุดในถังบรรจุน้ำเกลือ 32 อิลีกโทรอด.....	32
4.5	ทำการวัดผลม้งคุดในถังบรรจุน้ำเกลือ 32 อิลีกโทรอด.....	32
4.6	เครื่องเก็บข้อมูลแบบ 32 อิลีกโทรอด.....	33
4.7	ระบบเก็บข้อมูลแบบ 32 อิลีกโทรอด.....	33
4.8	ผลม้งคุดที่ผ่าออกซึ่งด้านในเป็นเนื้อแก้วเปรียบเทียบกับภาพที่สร้างขึ้นภาพที่ 4.1 และ 4.2.....	33



บทที่ 1

บทนำ

มังคุดเป็นไม้ผลเมืองร้อนมีชื่อวิทยาศาสตร์ *Garcinia mangostana* L. อยู่ในตระกูล *Garcinia* (วิจิตร วังนและคณะ 2537) มังคุดเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคทั้งประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากมังคุดเป็นผลไม้ที่มีรสชาติอร่อย มีรสหวานอมเปรี้ยว มีกลิ่นหอมชวนรับประทาน รูปทรงและสีของผลสวยงาม จนทำให้มังคุดได้รับสมญานามว่าเป็น “ราชินีแห่งไม้ผลเมืองร้อน หรือ “Queen of fruits” (สมเกียรติ 2543) การผลิตมังคุดในปัจจุบันนอกจากบริโภคภายในประเทศแล้วยังส่งตลาดต่างประเทศในลักษณะแช่แข็ง เช่น ญี่ปุ่น ฮองกง สิงคโปร์ ไต้หวัน และในรูปผลสดส่งออกไปต่างประเทศแถบยุโรป อเมริกา แคนาดา ตะวันออกกลาง ซึ่งมีแนวโน้มของการส่งออกเพิ่มขึ้นทุกปี สำหรับการส่งออกตลาดต่างประเทศผู้ส่งออกมังคุดจะมีกฎเกณฑ์การรับซื้อที่ต่างไปจากตลาดในประเทศ จะเลือกซื้อเฉพาะมังคุดที่มีคุณภาพตามตลาดต้องการเท่านั้น เช่น ขนาดผลละ 70-100 กรัม ผิวผลสะอาด และต้องเป็นมังคุดที่ใช้รับประทานเนื้อได้ทั้งหมดไม่มีอาการเปลือกแข็งยางไหล (สมศักดิ์ 2541) ซึ่งลักษณะดังกล่าวเกษตรกรผู้ผลิตสามารถสามารถคัดเลือกคุณภาพได้ ยกเว้นอาการเนื้อแก้วไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากต้องมีการผ่าผลเปิดดูไม่สามารถมองเห็นได้จากภายนอก ทำให้เป็นปัญหาสำคัญในการส่งออกมังคุด

ธงชัย (2542) ได้ทำการประเมินคุณภาพมังคุดโดยการผ่าครึ่งผลเพื่อประเมินลักษณะอาการของเนื้อผลภายใน ซึ่งแบ่งลักษณะภายในผล เป็น 6 กลุ่ม คือผลปกติ ผลที่เป็นเนื้อแก้วเล็กน้อย เนื้อแก้วปานกลาง เนื้อแก้วรุนแรง ยางไหล และผลที่เป็นเนื้อแก้วร่วมกับยางไหล พบว่า ผลมังคุดที่ตัดด้วยเครื่องตัดๆ โดยใช้ น้ำเกลือพบว่า เครื่องสามารถปรับค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำเกลือจาก 0.98-1.02 ที่อัตราการไหลของน้ำ 23400 ลิตร/ชั่วโมงและอากาศ 11786-19134 ลิตร/ชั่วโมง ความเร็วในการป้อนผลเข้าเครื่องตัดๆอยู่ที่ 5400 และ 8836 ผล/ชั่วโมง ผลการทดสอบการคัดแยกจริงกับผลมังคุดด้วยเครื่องตัดๆ ผลไม้ พบว่า ที่ความเร็วในการป้อนผล 5400 ผล/ชั่วโมง ค่าความถ่วงจำเพาะ 0.98 อัตราการไหลของน้ำและอากาศ 23400 และ 11786 ลิตร/ ชั่วโมง ตามลำดับ เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการคัดแยกผิดปกติ ซึ่งตรงกับการคัดแยกทางทฤษฎีโดยมีความถูกต้องในกลุ่มผลที่คัดจำหน่าย 61 % และมีความผิดพลาดในกลุ่มที่คัดทิ้ง 35 % เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของเครื่องตัดผลไม้กับการคัดแยกทางทฤษฎี พบว่า เครื่องตัดๆ มีสัมประสิทธิ์ของประสิทธิภาพในการคัดแยก 0.70

- การคัดแยกทางทฤษฎี = หาค่าถ่วงจำเพาะ แบ่งเป็นสอง กลุ่ม คือกลุ่มที่คัดจำหน่ายและกลุ่มที่คัดทิ้ง
- เครื่องตัดๆ = เครื่องตัดๆ โดยปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องจนได้ค่าความถ่วงจำเพาะที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำและอากาศและความเร็วในการป้อนผลเข้าเครื่องตัดๆ การทดสอบแบ่งเป็น 2 กลุ่ม เช่นเดียวกับคัดแยกทางทฤษฎี

ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล และคณะ (2543) รายงานการศึกษาการตรวจจับอากาศเนื้อแก้วและยางไหลในผลมังคุด โดยวิธีการวัดทางไฟฟ้า พบว่า วิธีการวัดสัญญาณอุลตราซาวด์ ไม่สามารถนำมาใช้ในการคัดแยกได้ ในขณะที่วิธีการวัดสัญญาณเสียงที่ได้จากการเคาะ ให้ผลการคัดแยกที่ดีกว่า ซึ่งต้องนำเทคนิคของการวิเคราะห์สัญญาณมาช่วย ซึ่งวิธีการวิเคราะห์สัญญาณที่เหมาะสมคือ การวิเคราะห์กำลังเชิงสเปกตรัม มีความถูกต้องในการคัดแยกผลดีได้ใกล้เคียงกับวิธีการลอยน้ำ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องประมาณ 70 %

จากงานวิจัยที่ผ่านมาประสิทธิภาพในการตรวจสอบอากาศเนื้อแก้วยังไม่สูงนัก ทางคณะวิจัยจึงได้มีการเสนอแนวคิดการตรวจสอบอากาศเนื้อแก้วของมังคุด ด้วยวิธีการวัดความต้านทานไฟฟ้าภายในมังคุด เพื่อหาแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพในการตรวจสอบอากาศเนื้อแก้ว

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- เพื่อสร้างเครื่องตรวจสอบอากาศเนื้อแก้วของมังคุด
- เพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบอากาศเนื้อแก้วของมังคุด
- เพื่อรักษาหรือเพิ่มมาตรฐานและคุณภาพของมังคุดในการส่งออก

ขอบเขตของการวิจัย

ทำการศึกษาและออกแบบระบบการตรวจสอบอากาศเนื้อแก้วในมังคุด โดยใช้วิธีวัดความต้านทานไฟฟ้า

ระเบียบวิธีวิจัย

- โดยการศึกษาข้อมูลและทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นของมังคุด เพื่อทำการออกแบบเครื่องตรวจฯ ให้เหมาะสมกับการทดลอง แล้วทำการจัดสร้าง
- พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- ทำการทดลองหาค่าความต้านทานที่บ่งชี้ถึงอากาศเนื้อแก้วของมังคุด
- สรุปผลการทดลอง จัดทำรายงาน และตีพิมพ์ผลงานวิจัย

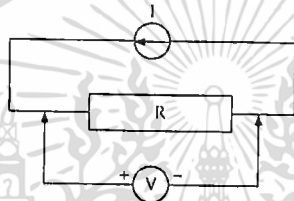
ทฤษฎีหรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

อากาศเนื้อแก้วมีลักษณะของเนื้อมังคุดที่มีสีขาวใสในบางกลีบ โดยมากจะเป็นกับกลีบที่มีขนาดใหญ่ ในบางครั้งก็เป็นเนื้อแก้วเนื้อแก้วทั้งผล (สมเกียรติ 2543) สันนิษฐานว่าเกิดจากผลมังคุดได้รับน้ำไม่สม่ำเสมอ มังคุดที่พบอากาศเนื้อแก้วมากจะเป็นมังคุดที่ไม่ได้รับการดูแลรักษาที่ดี ขาดการให้น้ำที่สม่ำเสมอหรือขาดการให้น้ำเป็นระยะเวลานานๆ เมื่อมังคุดได้รับน้ำจากฝนที่ตกชุกในช่วงที่ผลใกล้แก่ก็อาจจะดูดน้ำเข้าไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เปลือกขยายตัวไม่ทัน จึงเกิดอาการร้าวและเนื้อของผลมีน้ำเข้าไป

แทรกอยู่ทำให้มีลักษณะใส (ชาญชัย 2537) แต่ในบางครั้งลักษณะภายนอกเป็นปกติเมื่อผ่าดูก็อาจพบอาการเนื้อแก้วได้เช่นกัน ซึ่งอาการนี้ไม่เป็นที่ต้องการของตลาด

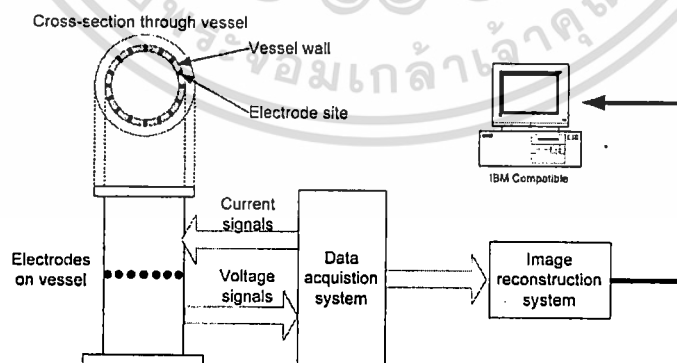
จากรายงานผลการทดลองของ วรภัทร (2539) และธีรวุฒิ (2544) ยืนยันว่าอาการเนื้อแก้วเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะน้ำภายในผลเป็นสาเหตุหลัก อาการของเนื้อแก้วนั้นเนื้อมังคุดมีลักษณะใสและแข็ง ซึ่งทางคณะวิจัยได้ตั้งสมมติฐานว่าจากความแตกต่างของสภาวะน้ำภายในมังคุดที่ดี และมังคุดที่มีอาการเนื้อแก้วจะทำให้มีคุณสมบัติทางความต้านทานไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

แนวคิดในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าภายในนั้นอาศัยหลักการพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดัน และความต้านทานตามกฎของโอห์ม โดยทำการจ่ายค่ากระแสคงที่ให้กับวัตถุที่ต้องการวัด แล้วทำการวัดค่าแรงดันเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 การวัดหาค่าความต้านทาน

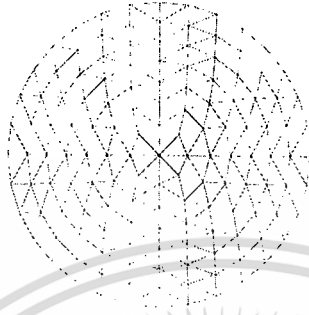
จากหลักการดังกล่าวได้มีการนำไปประยุกต์เพื่อตรวจสอบลักษณะภายในของวัตถุต่าง ๆ เช่น Webster J.G. (1990) ได้มีการออกแบบระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุดังภาพที่ 1.2 โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ วงจรจ่ายกระแส วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ในการคำนวณและแสดงผล



ภาพที่ 1.2 ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ

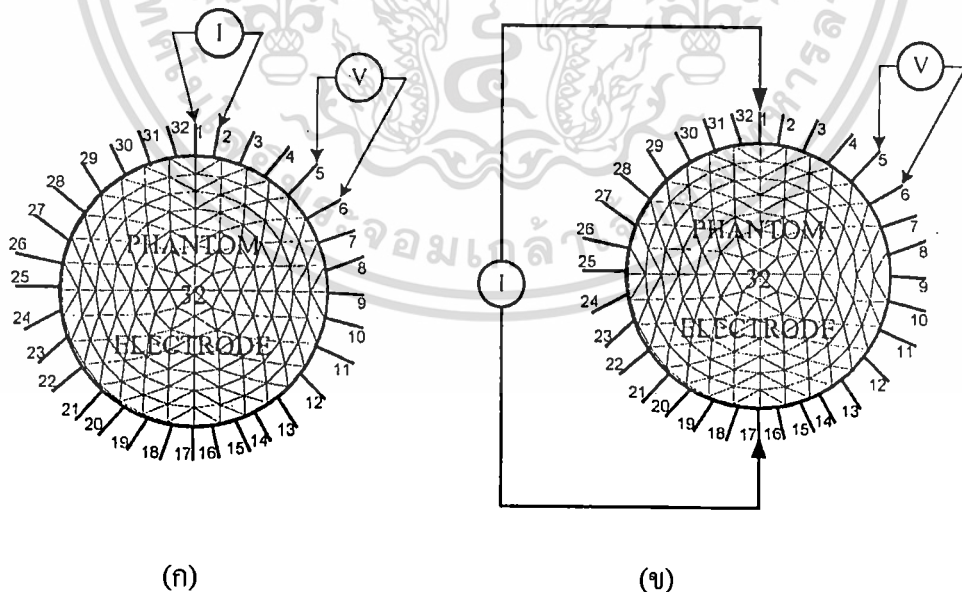
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบระบบที่จะใช้ตรวจสอบอาการเนื้อแก้วในมัจจุคนี้ จะสร้างเครื่องวัดความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุชนิด 32 อิเล็กโทรด(Electrode) โดยในการคำนวณค่าความต้านทานภายในมัจจุคนี้ จะใช้ไฟไนต์อิลิเมนต์มาคำนวณ ซึ่งจะเป็นไฟไนต์อิลิเมนต์ขนาด 32 อิเล็กโทรด 141 โหนดและมี 248 อิลิเมนต์ดังภาพที่ 1.3



ภาพที่ 1.3 การวางของไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ในการวัดค่าแรงดันนั้นจะใช้วิธี 4 อิเล็กโทรด โดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าอีกคู่หนึ่งจากคู่ที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยลดปัญหาในเรื่องศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณรอยต่อของผิวมัจจุคกับแผ่นอิเล็กโทรด ทำให้มีความแม่นยำสูง โดยจะแบ่งการวัดออกเป็น 2 ชนิด คือ แบบขั้วข้างเคียง และแบบขั้วตรงข้าม ดังภาพที่ 1.4



ภาพที่ 1.4 รูปแบบการจ่ายกระแสและการวัดค่าศักดา ก)แบบขั้วข้างเคียง ข)แบบขั้วตรงข้าม

ซึ่งจากภาพที่ 1.4 จะต้องทำการเปลี่ยนขั้วจ่ายกระแสไฟไปจนครบรอบ ก็จะได้ข้อมูลทั้งหมด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าในการคำนวณ ไม่วากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- สามารถตรวจหา มังคุด ที่มีเนื้อแก้วได้
- เพิ่มมาตรฐานและคุณภาพของ มังคุด ที่เกษตรกรจำหน่าย และการส่งออก
- ใช้เทคโนโลยีที่มีอยู่ในการพัฒนาทางด้านการเกษตรของประเทศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Impedance Tomography)

ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุนั้นอาศัยหลักการพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดัน และความต้านทาน ตามกฎของโอห์มดังสมการที่ (2.1)

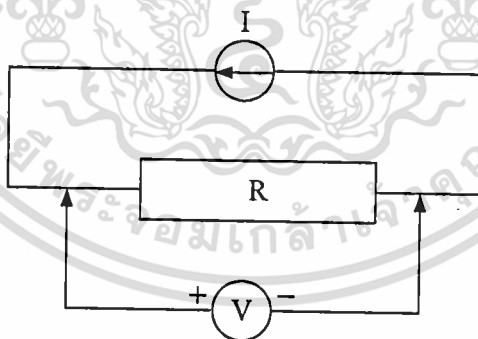
$$V = I.R \quad (2.1)$$

เมื่อ V = แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)

I = กระแสไฟฟ้า (แอมป์)

R = ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม)

จากสมการหากรู้ค่ากระแสและค่าแรงดันก็สามารถที่จะคำนวณหาค่าความต้านทานได้ ดังนั้นจึงมีแนวความคิดในการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งแสดงไว้ดังภาพที่ 2.1 คือ การจ่ายค่ากระแสคงที่แล้ววัดค่าแรงดัน



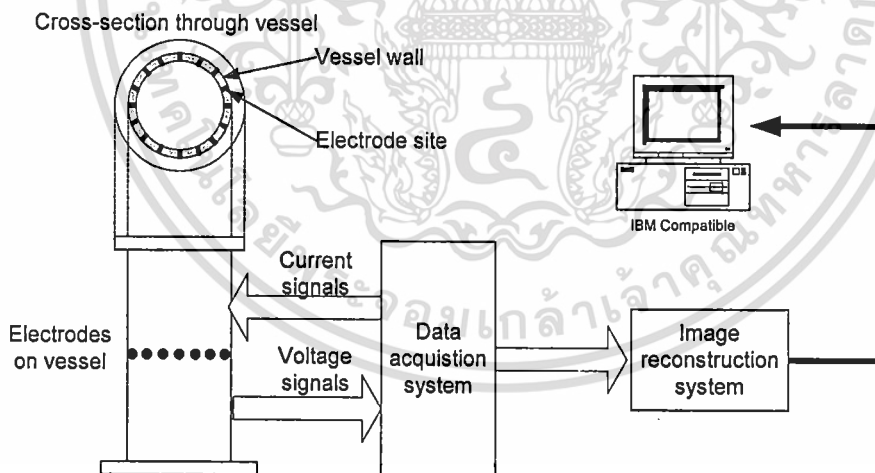
ภาพที่ 2.1 การวัดหาค่าความต้านทานโดยการจ่ายค่ากระแสคงที่แล้ววัดค่าแรงดัน

จากการวัดดังภาพที่ 2.1 เราสามารถนำค่าของกระแสและแรงดันที่วัดได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุนั้นจากกฎของโอห์ม แต่เนื่องจากผลของค่าความต้านทานระหว่างผิววัตถุกับแผ่นอิเล็กโทรดซึ่งไม่ทราบค่าที่แน่นอนนั้นมีผลอย่างมาก โดยจะเห็นว่าในกรณีที่วัตถุมีขนาดเล็กและมีลักษณะเป็นแท่งยาวๆ เราจะอนุมานได้ว่ากระแสไฟฟ้าจะไหลในทิศทางเดียวจากจุดที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าไปจุดอ้างอิง และยังอนุมานได้ว่าวัตถุมีโครงสร้างเป็นแบบเอกพันธ์ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Homogeneous) ทำให้สามารถคำนวณค่าความต้านทานของวัตถุนั้นได้จากกฎของโอห์ม แต่อย่างไรก็ดีในกรณีที่วัตถุมีขนาดใหญ่และมักจะมีโครงสร้างแบบไม่เป็นเอกพันธ์ (Non Homogeneous) ในการวัดค่าแรงดันในแต่ละจุด โดยรอบวัตถุจะให้ค่าแรงดันที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่วัดและโครงสร้างภายในที่ไม่เป็นแบบเอกพันธ์ จากเหตุผลดังกล่าวนี้จึงถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพตัดขวาง โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าบนผิววัตถุที่จะสร้างภาพตัดขวาง โดยรอบเมื่อป้อนกระแสที่ตำแหน่งต่างๆ กัน ความแตกต่างของแรงดันที่วัดได้แสดงถึงความแตกต่างของค่าสภาพความต้านทานภายในวัตถุนั้น ดังนั้นจากการที่สารหรือเนื้อเยื่อต่างชนิดกันมีค่าสภาพความต้านทานที่แตกต่างกัน เพราะฉะนั้นเมื่อนำค่าการกระจายของค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่คำนวณได้ไปสร้างเป็นภาพตัดขวางแสดงระดับของค่าสภาพความต้านทานโดยใช้ระดับความเข้มของสีในจอภาพคอมพิวเตอร์ก็จะสามารถสร้างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างภายในวัตถุได้

สำหรับระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุนั้นจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ดังภาพที่ 2.2 คือ

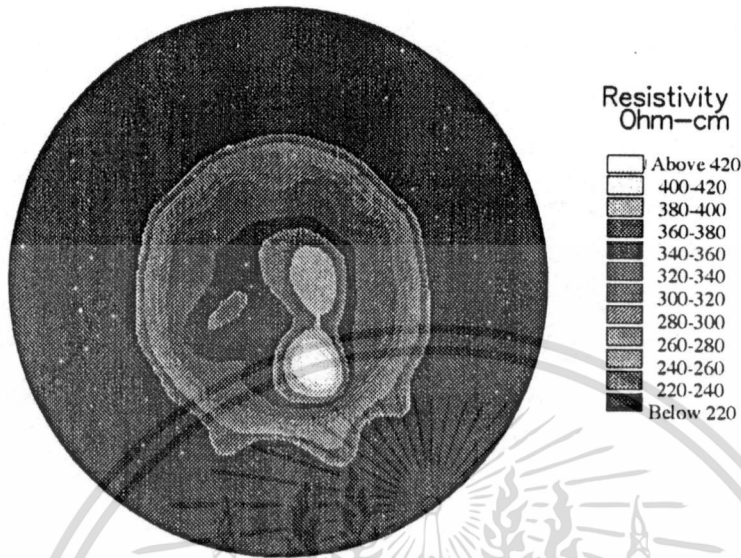
- วงจรจ่ายกระแส วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า และวงจรควบคุมการจ่ายกระแสและวัดค่าแรงดันไฟฟ้า
- เครื่องคอมพิวเตอร์ในการคำนวณและแสดงผล
- วัตถุที่จะทำการสร้างภาพตัดขวาง



ภาพที่ 2.2 ระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ [1]

จากภาพที่ 2.2 วงจรจ่ายกระแสและวงจรวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจะเชื่อมต่อโดยตรงกับวัตถุที่จะสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า โดยผ่านการควบคุมจากวงจรควบคุม (Control Circuit) เพื่อทำการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูลของแรงดันที่วัดได้ในแต่ละอิเล็กโทรดแล้วส่งไปยังเครื่องเอกซเรย์เป็นเอกซเรย์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

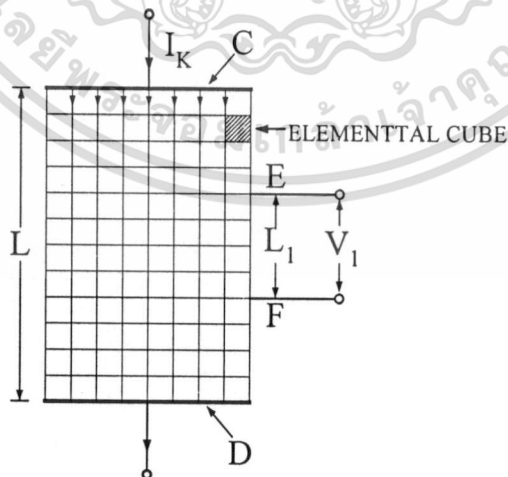
คอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลและแสดงเป็นภาพตัดขวางแสดงความต้านทานไฟฟ้าภายใน
วัตถุซึ่งแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างภาพที่ได้จากระบบสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุ [1]

การวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุที่อยู่ในรูปแบบสี่เหลี่ยมแบบสี่ขั้ว (Rectangular conductivity) [2] ดังแสดงในรูปแบบ 2 มิติ ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การไหลของกระแสและเส้นอิกวิโพเทนเชียล (Equipotential line) เมื่อจ่าย

กระแสเข้าที่ อิเล็กโทรด C และ D บนวัตถุที่เป็นตัวนำแบบไอโซทรอปิก

(Isotropic conductor) แล้วทำการวัดแรงดันที่อิเล็กโทรด E และ F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.4 วัตถุตัวนำแบบไอโซทรอปิกถูกจ่ายกระแสโดยอิเล็กโทรด C, D (C, D เป็นคอนดักเตอร์ในอุดมคติ (Perfect conductor)) กระแสคงที่ I_k (Constant current : I_k) จะไหลผ่านแท่งวัตถุในปริมาณที่เท่ากันทุกส่วนและความหนาแน่นกระแส (Current density) จะมีค่าเท่ากันทุกที่ โดยในรูปแบบนี้เราสามารถหาค่าความต้านทานของวัตถุสามารถหาได้จากสมการที่ (2.2)

$$R = V/I_k = \rho L/A \quad (2.2)$$

- เมื่อ R = ค่าความต้านทานของวัตถุ
 V = ค่าแรงดันระหว่างอิเล็กโทรด C และ D
 I_k = ค่ากระแสที่ไหลผ่านวัตถุ
 ρ = ค่าสภาพความต้านทานของวัตถุ
 L = ขนาดความยาวของวัตถุ
 A = พื้นที่ตัดขวางของวัตถุ

จะเห็นว่าเมื่อค่าสภาพความต้านทานภายในวัตถุภายในวัตถุมีค่าเท่ากันทั้งหมดทุกส่วน (Homogeneous object) ค่าความหนาแน่นของกระแสในแต่ละพื้นที่ทั่วทั้งวัตถุจะมีค่าเท่ากันและเส้นอิควิโพเทนเชียล (Equipotential line) จะตั้งฉากกับเส้นกระแสและจะขนานกันทุกเส้น

การวัดค่าความต้านทานของวัตถุโดยการใช้อิเล็กโทรด E และ F (อิเล็กโทรดมีขนาดเล็กมาก) เข้าไปวัดแรงดันบนพื้นผิวของวัตถุ ในแนวระนาบเดียวกับกับเส้น อิควิโพเทนเชียล ซึ่งในทางอุดมคติแล้วอิเล็กโทรดจะต้องไม่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่กระจายอยู่ภายในวัตถุ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดแรงดันจะต้องมีความต้านทานที่สูงมาก (ในอุดมคติจะต้องมีความต้านทานเป็นอนันต์) ซึ่งสภาพเช่นนี้ V_1 ที่ทำการวัดจะไม่ได้รับผลกระทบจากอิเล็กโทรด นั่นคือเราสามารถหาค่า R_1 ได้จากสมการที่ (2.3)

$$R_1 = V_1/I_k \quad (2.3)$$

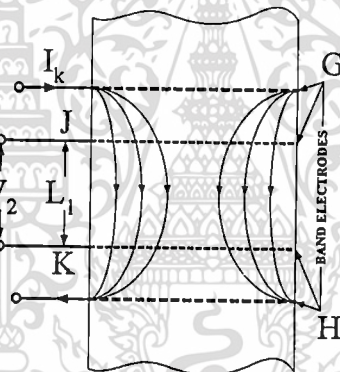
และสามารถหาค่าสภาพความต้านทานของวัตถุและค่าความต้านทานของวัตถุได้ดังสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.5)

$$\rho = R_1 \cdot A/L_1 \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ $R = \rho L/A$ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 (2.5)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิธีการวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีนี้จะไม่มีความกระทบอันเนื่องมาจากค่าความผิดพลาดของการวัดแรงดันจากผลของความต้านทานของผิวที่วัด (Skin contact impedance)

จากการย้ายกระแสและวัดแรงดันพื้นผิวที่เป็นผลให้ค่าแรงดันที่วัดได้แตกต่างกันตามลักษณะการวางของวัตถุและคุณสมบัติสภาพความต้านทานของวัตถุ ทำให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายในของวัตถุโดยการย้ายกระแสเข้าไปที่ผิวของวัตถุและทำการวัดแรงดันที่ผิวรอบๆ วัตถุ โดยลักษณะการย้ายกระแสในการใช้งานจริงจะใช้การย้ายกระแสที่ผิวซึ่งเป็นไปได้ที่จะใช้วิธีการย้ายกระแสดังในภาพที่ 2.4 แต่จะใช้วิธีการย้ายกระแสแบบดังภาพที่ 2.5 แทน โดยจะทำการย้ายกระแสที่อิเล็กโทรด G และ H และทำการวัดแรงดันที่อิเล็กโทรด J และ K แทน ซึ่งวิธีการนี้จะให้ค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าถูกต้องมากกว่าการวัดค่าศักดาไฟฟ้าและการย้ายกระแสที่อิเล็กโทรดคู่เดียวกัน เนื่องจากไม่มีความกระทบอันเนื่องมาจากค่าความผิดพลาดของการวัดแรงดันจากผลของความต้านทานของผิวที่วัด (Skin contact impedance)



ภาพที่ 2.5 การวัดค่าความต้านทานในการใช้งานจริง

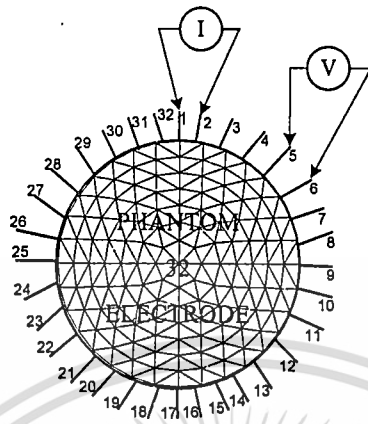
รูปแบบการย้ายกระแสและเก็บข้อมูล (Data collection method)

แบบ 4 อิเล็กโทรด

วิธีนี้มีการวัดค่าศักดาไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดอีกคู่หนึ่งแยกจากคู่ที่ใช้ย้ายกระแส และจะไม่วัดค่าศักดาที่ขั้วที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งวิธีนี้ช่วยลดปัญหาที่เกิดจากค่าศักดาไฟฟ้าตกรอบบริเวณรอยต่อระหว่างผิววัตถุกับแผ่นอิเล็กโทรด ทำให้ค่าศักดาไฟฟ้าที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนสูงได้ การวัดแบบนี้ยังแบ่งตามลักษณะการย้ายกระแสและวัดแรงดันเป็นสองแบบ ได้แก่

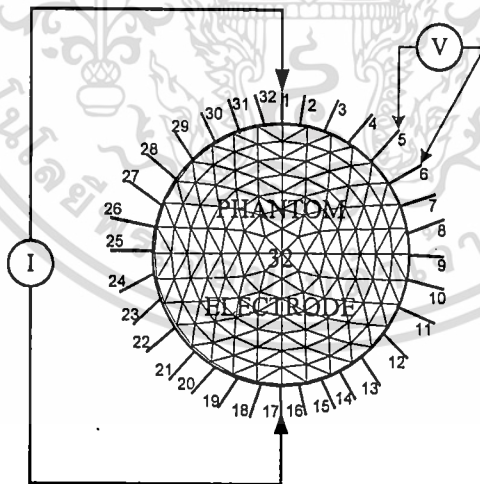
-แบบข้างเคียง (Neighboring Method) โดยการย้ายกระแสที่ขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ติดกันคู่หนึ่ง แล้ววัดค่าศักดาที่ขั้วต่างๆ ก็จะได้ข้อมูล 1 โปรเจกชัน (projection) (โปรเจกชัน หมายถึงหนึ่งรูปแบบหรือหนึ่งครั้งของการย้ายกระแสการเปลี่ยนโหนดที่ใช้ย้ายกระแสถือเป็นอีกโปรเจกชัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นหนึ่ง) เมื่อทำการหมุนขั้วที่ใช้จ่ายกระแสไปจนครบทั้งหมดก็จะได้ข้อมูลทั้งหมดสำหรับการคำนวณ ถ้าระบบมี M อิเล็กโทรด จะมี M โปรเจกชัน



ภาพที่ 2.6 รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูลแบบขั้วข้างเคียง

-แบบขั้วตรงข้าม (Opposite Method) โดยการจ่ายกระแสที่ขั้วอิเล็กโทรดที่อยู่ตรงข้ามกันคู่หนึ่ง แล้ววัดค่าศักดาที่ขั้วต่างๆ เมื่อทำการหมุนขั้วที่ใช้จ่ายกระแสไปจนครบทั้งหมด ก็จะได้ข้อมูลทั้งหมดสำหรับการคำนวณ ถ้าระบบมี M อิเล็กโทรด จะมี $M/2$ โปรเจกชัน



ภาพที่ 2.7 รูปแบบการจ่ายกระแสและเก็บข้อมูลแบบขั้วตรงข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลกอริธึมในการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้าโดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ร่วมกับวิธีนิวตัน-ราฟสัน

1. แบบจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าในตัวกลาง

สมการของ Maxwell [3] ใช้อธิบายการกระจายของสนามไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟตรงภายในตัวกลางที่เป็นตัวนำและไม่มีแหล่งกำเนิดภายในสามารถลดรูปได้เป็นสมการของ Poisson

$$\nabla(\rho^{-1}\nabla\phi) = \nabla(\sigma\nabla\phi) = 0 \quad (2.6)$$

โดยที่ ∇ คือ $i\partial/\partial x + j\partial/\partial y$ หรือตัวดำเนินการ Poisson

ρ คือ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของวัตถุ B

σ คือ ค่าสภาพความนำไฟฟ้า

ϕ คือ ศักดาไฟฟ้า

ถ้า σ มีค่าขอบเขตต่ำสุดเป็น c ($0 < c \leq \sigma(x)$ ทุกค่าของ x ในโดเมน B) แล้วสมการ(2.6) จะเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเอกพันธ์แบบอิลลิปติก (Homogeneous Elliptic Partial Differential Equation) [3] ที่สามารถใช้คำนวณศักดาไฟฟ้าภายในวัตถุจากค่าความนำ σ และศักดา ϕ ที่ขอบเขต ∂B ของ B หรือคำนวณจากค่ากระแส $J = \sigma\nabla\phi \cdot n$ ที่ขอบเขต ∂B (n คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตั้งฉากกับ ∂B) ทั้งสองกรณีรู้จักกันในชื่อว่าปัญหาเงื่อนไขค่าขอบเขต Dirichlet และ Neumann ของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (2.6) ตามลำดับ

จากสมการที่ (2.6) ไม่สามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์โดยเฉพาะเมื่อโดเมน B มีรูปร่างไม่แน่นอนและตัวกลางใน B เป็นแบบไม่เอกพันธ์ อย่างไรก็ตามก็ยังสามารถหาผลเฉลยเชิงเลขโดยใช้ไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ใช้หลักการ Variational Method [3] โดยผลเฉลยของสมการ (2.6) จะสมนัยกับการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันต่อไปนี้

$$F(\phi) = \frac{1}{2} \int_B \rho^{-1} |\nabla\phi|^2 dB - \int_{\partial B} J\phi dB = \sum_{n=1}^N F_n \quad (2.7)$$

เมื่อ F_n คือ พลังงานศักย์ในอิลิเมนต์ที่ n โดย

$$F_n = \frac{1}{2} \int_{B_n} \rho^{-1} |\nabla\phi|^2 dB - \int_{\partial B_n} J\phi dB \quad (2.8)$$

ที่ตำแหน่งใดๆ ศักดาในอิลิเมนต์นั้น จะประมาณได้จากฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงวันเวลาหรือมีการแก้ไขในภายหลังโดยไม่มีการอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi = \sum \phi_i f_i \quad (2.9)$$

เมื่อ f_i คือฟังก์ชันประมาณค่าในช่วง 0 ถึง 1 และ ϕ_i คือฟังก์ชันที่โหนดของอิลิเมนต์นั้นๆ โดยสมการที่ (2.9) เขียนในรูปแบบเมตริกซ์ได้ดังนี้

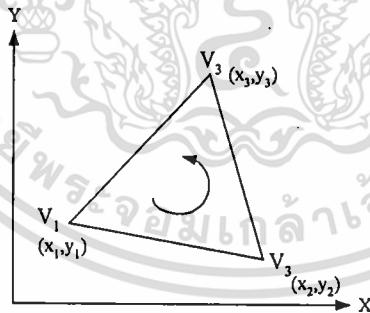
$$F_n = \frac{1}{2} \phi_n^T y_n \phi_n - \phi_n^T c_n \quad (2.10)$$

โดย ϕ_n คือเวกเตอร์ของฟังก์ชันที่โหนด ϕ_i ที่สัมพันธ์กัน และ y_n คือเมตริกซ์ของอิลิเมนต์ ซึ่งคำนวณได้จากสูตร (2.11) หรือ (2.12)

$$[y_{ij}]_n = \rho_n^{-1} \int_{B_n} \left(\frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial x \partial x} + \frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial y \partial y} \right) dB \quad (2 \text{ มิติ}) \quad (2.11)$$

$$[y_{ij}]_n = \rho_n^{-1} \int_{B_n} \left(\frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial x \partial x} + \frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial y \partial y} + \frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial z \partial z} \right) dB \quad (3 \text{ มิติ}) \quad (2.12)$$

2. วิธีการหาสูตรเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม (2 มิติ)



ภาพที่ 2.8 อิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม การจัดลำดับของโหนดจะเรียงตามทิศทวนเข็มนาฬิกา

การกระจายของสนามไฟฟ้าในตัวกลางสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Poisson

$$\nabla \cdot \rho^{-1} \nabla V = 0 \quad (2.13)$$

จากฟังก์ชันพื้นฐาน (Basis function) ของอิลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม [1] เมื่อ N คือ Shape-function จะได้เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V(x, y) = a + bx + cy \quad (2.14)$$

$$V(x, y) = \sum_{i=1}^3 V_i N_i(x, y) \quad (2.15)$$

จากฟังก์ชันพื้นฐานเมื่อเขียนในรูปของเมทริกซ์จะได้ค่าศึกดาตกคร่อมที่แต่ละโหนดดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

เมื่อคูณด้วย $[1 \ x \ y]$ ทั้ง 2 ข้างจะได้

$$[1 \ x \ y] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = [1 \ x \ y] \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

ซึ่งก็คือ $V(x, y)$ จากสมการ (2.14) และ (2.15) นั่นเอง ดังนั้นจะได้ Shape-function มีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$[N_1 \ N_2 \ N_3] = [1 \ x \ y] \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.19)$$

$$N_1 = \frac{1}{2A} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + b_1 x + c_1 y] \quad (2.20)$$

$$N_2 = \frac{1}{2A} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + b_2 x + c_2 y] \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_3 = \frac{1}{2A} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + b_3 x + c_3 y] \quad (2.22)$$

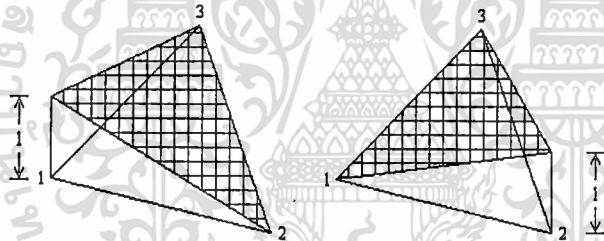
เมื่อ $b_1 = x_2 - x_3, b_2 = x_3 - x_1, b_3 = x_1 - x_2$
 $c_1 = y_2 - y_3, c_2 = y_3 - y_1, c_3 = y_1 - y_2$

N_i เป็น Linear interpolation function เรียกว่า Element shape function ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังนี้

$$N_i(x_j, y_j) = 1 \quad \text{เมื่อ } i = j \quad (2.23)$$

$$N_i(x_j, y_j) = 0 \quad \text{เมื่อ } i \neq j \quad (2.24)$$

$$\sum_{i=1}^3 N_i(x, y) = 1 \quad (2.25)$$



ภาพที่ 2.9 ลักษณะของ shape function N_1 และ N_2 ของอิเลเมนต์รูปสามเหลี่ยม (Triangular)

นำ Shape-function ที่ได้ไปหาเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ด้วยวิธีของ Ritz ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธี

Variation

$$y_{ij} = \frac{1}{\rho} \iint_A \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dA \quad (2.26)$$

ดังนั้นจะได้เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิเลเมนต์

$$y = \frac{1}{4\rho A} \begin{bmatrix} b_1^2 + c_1^2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_2^2 + c_2^2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_1 b_3 + c_1 c_3 & b_2 b_3 + c_2 c_3 & b_3^2 + c_3^2 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\rho =$ ค่าสภาพความต้านทานของอิเลิเมนต์, $A =$ พื้นที่ของอิเลิเมนต์

$$A = \frac{1}{2}[(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)]$$

$$b_1 = x_2 - x_3, \quad b_2 = x_3 - x_1, \quad b_3 = x_1 - x_2$$

$$c_1 = y_2 - y_3, \quad c_2 = y_3 - y_1, \quad c_3 = y_1 - y_2$$

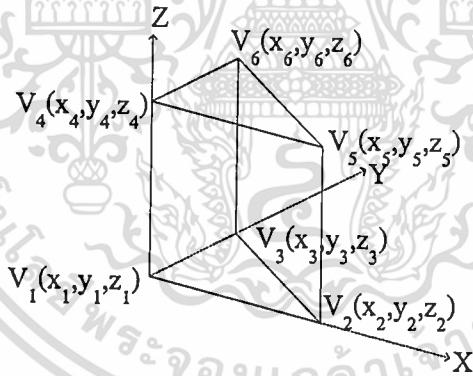
3. วิธีการหาสูตรเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิเลิเมนต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (3 มิติ)

จากเมตริกซ์อิเลิเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์อิเลิเมนต์แบบสองมิติ เราสามารถหาเมตริกซ์อิเลิเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์อิเลิเมนต์แบบสามมิติได้โดยคำนวณหาได้จากสูตร

$$[y_{ij}]_n = \rho_n^{-1} \int_{B_n} \left(\frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial x \partial x} + \frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial y \partial y} + \frac{\partial f_i \partial f_j}{\partial z \partial z} \right) dB \quad (3 \text{ มิติ}) \quad (2.28)$$

โดยวิธีการหาสูตรเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอิเลิเมนต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (3 มิติ)จะมีดังนี้

[5]



ภาพที่ 2.10 อิเลิเมนต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (triangular prism)

จากฟังก์ชันพื้นฐาน (basis function) ของอิเลิเมนต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (Triangular prism) หรือ Six-node pentahedron

$$V(x, y, z) = a + bx + cy + dz + exz + fyz \quad (2.29)$$

$$V(x, y, z) = V_i N_i(x, y, z) \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ N คือ Shape-function จากฟังก์ชันพื้นฐานเมื่อเขียนในรูปของเมตริกซ์จะได้ค่าศักดา
 ตกคร่อมที่แต่ละ โหนดดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & x_1 z_1 & y_1 z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_1 & x_2 z_1 & y_2 z_1 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_1 & x_3 z_1 & y_3 z_1 \\ 1 & x_1 & y_1 & z_4 & x_1 z_4 & y_1 z_4 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_4 & x_2 z_4 & y_2 z_4 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_4 & x_3 z_4 & y_3 z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

เมื่อคูณด้วย [1 x y z xz yz] ทั้งสองข้างจะได้

$$[1 \ x \ y \ z \ xz \ yz] \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = [1 \ x \ y \ z \ xz \ yz] \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & x_1 z_1 & y_1 z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_1 & x_2 z_1 & y_2 z_1 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_1 & x_3 z_1 & y_3 z_1 \\ 1 & x_1 & y_1 & z_4 & x_1 z_4 & y_1 z_4 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_4 & x_2 z_4 & y_2 z_4 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_4 & x_3 z_4 & y_3 z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

ทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$[1 \ x \ y \ z \ xz \ yz] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} = [1 \ x \ y \ z \ xz \ yz] \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & x_1 z_1 & y_1 z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_1 & x_2 z_1 & y_2 z_1 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_1 & x_3 z_1 & y_3 z_1 \\ 1 & x_1 & y_1 & z_4 & x_1 z_4 & y_1 z_4 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_4 & x_2 z_4 & y_2 z_4 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_4 & x_3 z_4 & y_3 z_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

ซึ่งก็คือ $V(x,y,z)$ จากสมการที่ (2.29) และ (2.30) ดังนั้นจะได้ Shape-function ค่าดังสม
 การต่อไปนี้

$$[N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4 \ N_5 \ N_6] = [1 \ x \ y \ z \ xz \ yz] \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & x_1z_1 & y_1z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_1 & x_2z_1 & y_2z_1 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_1 & x_3z_1 & y_3z_1 \\ 1 & x_1 & y_1 & z_4 & x_1z_4 & y_1z_4 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_4 & x_2z_4 & y_2z_4 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_4 & x_3z_4 & y_3z_4 \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.34)$$

นำ Shape-function ที่ได้ไปหาเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ด้วยวิธีของ Ritz ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีแปรผัน (Variation method)

$$y_{ij} = \frac{1}{\rho} \iiint_V \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dV \quad (2.35)$$

โดยอาจแทนค่าขอบเขตของการอินทิเกรตได้ดังนี้

$$y_{ij} = \frac{1}{\rho} \int_{z_1}^{z_4} \int_{x_1}^{x_3} \int_{(x-x_3)(y_3-y_1)/(x_3-x_1)+y_3}^{(x-x_1)(y_2-y_1)/(x_2-x_1)+y_1} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dy dx dz \quad (2.36)$$

ก็จะได้เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของอีลิเมนต์

$$y = \frac{A}{12\rho h} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & -2 & -1 & -1 \\ 1 & 2 & 1 & -1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 2 & -1 & -1 & -2 \\ -2 & -1 & -1 & 2 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & -1 & 1 & 2 & 1 \\ -1 & -1 & -2 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} + \frac{h}{24\rho A} \begin{bmatrix} 2(b_1^2+c_1^2) & 2(b_1b_2+c_1c_2) & 2(b_1b_3+c_1c_3) & b_1^2+c_1^2 & b_1b_2+c_1c_2 & b_1b_3+c_1c_3 \\ 2(b_1b_2+c_1c_2) & 2(b_2^2+c_2^2) & 2(b_2b_3+c_2c_3) & b_1b_2+c_1c_2 & b_2^2+c_2^2 & b_2b_3+c_2c_3 \\ 2(b_1b_3+c_1c_3) & 2(b_2b_3+c_2c_3) & 2(b_3^2+c_3^2) & b_1b_3+c_1c_3 & b_2b_3+c_2c_3 & b_3^2+c_3^2 \\ b_1^2+c_1^2 & b_1b_2+c_1c_2 & b_1b_3+c_1c_3 & 2(b_1^2+c_1^2) & 2(b_1b_2+c_1c_2) & 2(b_1b_3+c_1c_3) \\ b_1b_2+c_1c_2 & b_2^2+c_2^2 & b_2b_3+c_2c_3 & 2(b_1b_2+c_1c_2) & 2(b_2^2+c_2^2) & 2(b_2b_3+c_2c_3) \\ b_1b_3+c_1c_3 & b_2b_3+c_2c_3 & b_3^2+c_3^2 & 2(b_1b_3+c_1c_3) & 2(b_2b_3+c_2c_3) & 2(b_3^2+c_3^2) \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } b_1 &= x_2 - x_3, b_2 = x_3 - x_1, b_3 = x_1 - x_2 \\ c_1 &= y_2 - y_3, c_2 = y_3 - y_1, c_3 = y_1 - y_2 \\ h &= z_4 - z_1 \end{aligned}$$

หรือเขียนสมการที่ (2.37) ได้ใหม่ดังสมการที่ (2.38)

$$y = \frac{1}{\rho} \left(\frac{A}{12h} \begin{bmatrix} \alpha & -\alpha \\ -\alpha & \alpha \end{bmatrix} + \frac{h}{24A} \begin{bmatrix} 2\beta & \beta \\ \beta & 2\beta \end{bmatrix} \right) \quad (2.38)$$

เมื่อ ρ = ค่าสภาพความต้านทานของอิติเมนต์, A = พื้นที่ของอิติเมนต์

$$A = \frac{1}{2}[(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)]$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} b_1^2 + c_1^2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_2^2 + c_2^2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_1 b_3 + c_1 c_3 & b_2 b_3 + c_2 c_3 & b_3^2 + c_3^2 \end{bmatrix}$$

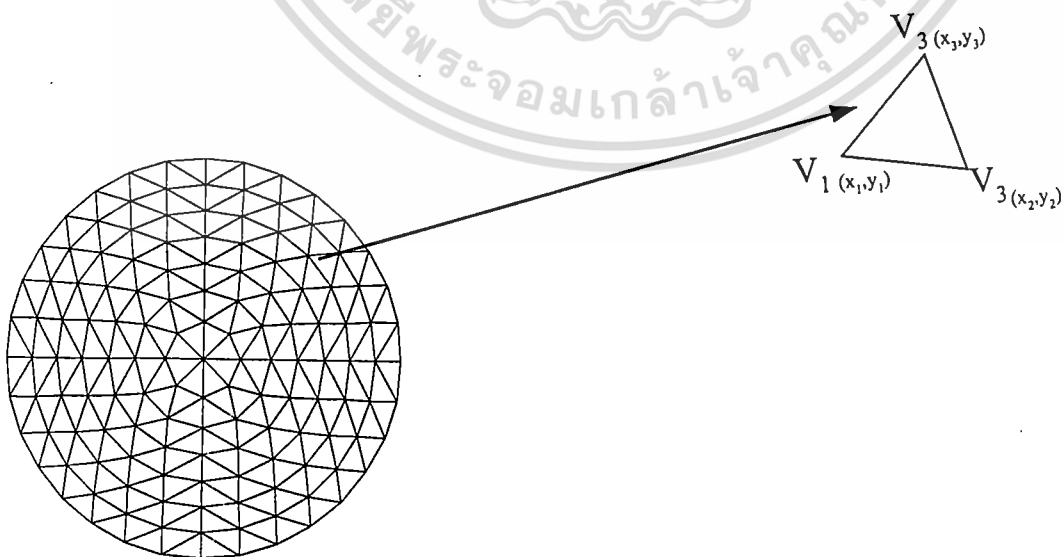
$$b_1 = x_2 - x_3, b_2 = x_3 - x_1, b_3 = x_1 - x_2, h = z_4 - z_1$$

$$c_1 = y_2 - y_3, c_2 = y_3 - y_1, c_3 = y_1 - y_2$$

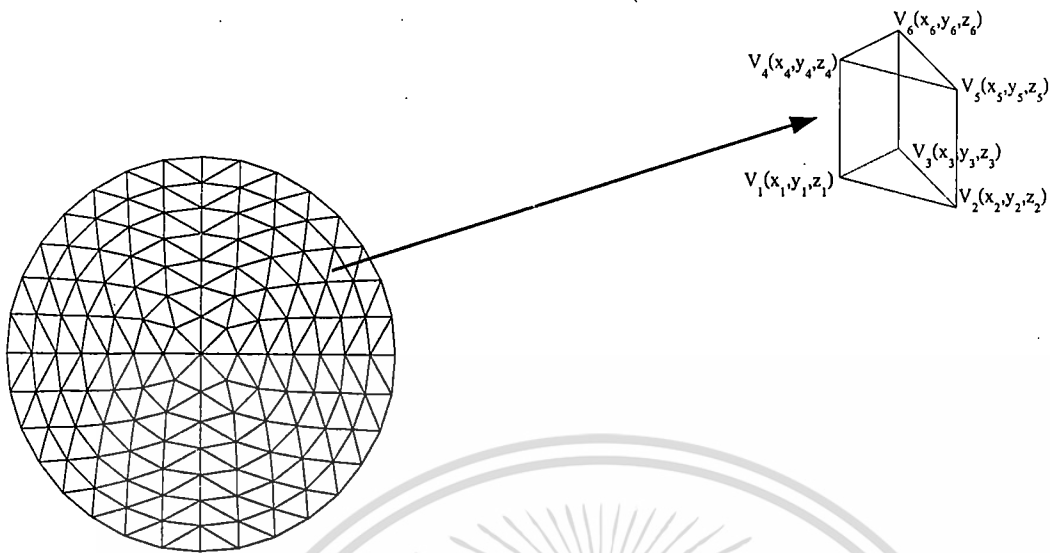
$$h = z_4 - z_1$$

สำหรับการวางอิติเมนต์ในไฟไนต์อิติเมนต์แต่ละแบบมีลักษณะดังภาพที่ 2.11 และภาพที่

2.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ภาพที่ 2.11 อิติเมนต์รูปสามเหลี่ยม (2 มิติ)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 อติเม้นต์รูปแท่งสามเหลี่ยม (3 มิติ)

จากเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ของแต่ละอติเม้นต์ สามารถเขียนเมตริกซ์ของระบบได้ตั้งสมการ
ที่ (2.39)

$$[Y]_{NXN}[V]_{NX1} = [C]_{NX1} \quad (2.39)$$

เมื่อ $[Y]$ คือ เมตริกซ์ของระบบ, $[V]$ คือ โหนดโวลต์เตจเวกเตอร์, $[C]$ คือ โหนดเคอร์
เรนทเวกเตอร์ และ N คือ จำนวนโหนด จากสมการที่ (4.36) จะหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมแต่ละโหนด
ได้ตั้งสมการที่ (2.40)

$$[V]_{NX1} = [Y]_{NXN}^{-1} [C]_{NX1} \quad (2.40)$$

จากสมการที่ (2.40) เราจะได้ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมแต่ละโหนด แต่เราจะนำค่าศักย์ไฟฟ้า
เฉพาะโหนดที่เราวัดเท่านั้นไปทำการคำนวณเพื่อปรับค่าสภาพความต้านทานแต่ละอติเม้นต์ ด้วยวิธี
นิวตัน-ราฟสัน โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

$$\Phi = \frac{1}{2} [V - V_0]^T [V - V_0] \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน $\Delta p = -[f'(p)]^{-1} [f'(p)]^T [V - V_0]$ ก่อนญาติให้นำไปใช้ปร (2.42) ด้านการคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.42) เทอมของ $[f'(\rho)^T f'(\rho)]$ เป็นเมตริกซ์ในรูป III-condition ซึ่งมีความใกล้เคียงกับ Singular matrix มีผลให้การหาค่าอินเวอร์สมีความคลาดเคลื่อนสูง เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ต้องทำให้เมตริกซ์เป็น Non-singular โดยทำการปรับค่าเพียงเล็กน้อยก่อนที่จะหาค่าอินเวอร์ส โดยเปลี่ยนเป็น $f'(\rho)^T f'(\rho) + 2\lambda\Sigma$ จึงมีการเปลี่ยนแปลงสมการที่ (2.41) และ (2.42) เป็นสมการที่ (2.43) และ (2.44) ตามลำดับ

$$\Phi = \frac{1}{2}[V - V_0]^T [V - V_0] + \frac{1}{2}[\lambda\rho^T \Sigma\rho] \quad (2.43)$$

$$\Delta\rho = -[f'(\rho)^T f'(\rho) + 2\lambda\Sigma]^{-1} [f'(\rho)^T] [V - V_0] \quad (2.44)$$

เมื่อ λ คือ จำนวนจริงบวก และ Σ คือ positive-definite

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} & \cdot & \Sigma_{1R} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} & \cdot & \Sigma_{2R} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Sigma_{R1} & \Sigma_{R2} & \cdot & \Sigma_{RR} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

การที่สมการที่ 2.45 จะเป็น Positive-definite matrix ได้เมื่อมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้ [1]

$$|\Sigma_{11}| > 0, \begin{vmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{vmatrix} > 0, \dots, \begin{vmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} & \cdot & \Sigma_{1R} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} & \cdot & \Sigma_{2R} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \Sigma_{R1} & \Sigma_{R2} & \cdot & \Sigma_{RR} \end{vmatrix} > 0 \quad (2.46)$$

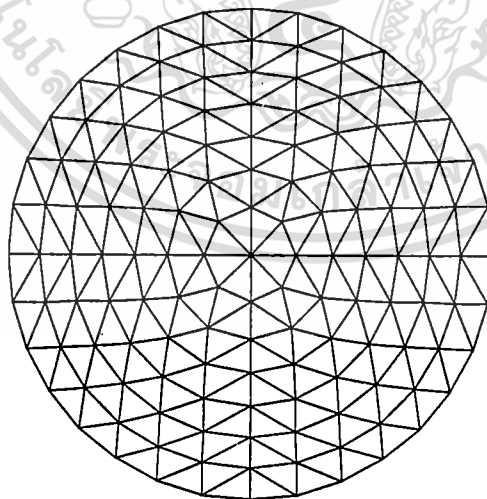
Positive-definite matrix ที่รู้จักกันดี ก็คือ เมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix) โดยการกำหนดค่า λ ที่เหมาะสมก็มีความสำคัญ เพราะ ถ้าค่า λ น้อยเกินไปก็จะให้ผลน้อย แต่ถ้ามากเกินไปก็จะทำให้ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง หลังจากคำนวณค่า $\Delta\rho$ จากสมการที่ 2.44 แล้วจะนำค่า $\Delta\rho$ ไปปรับค่า ρ ในแต่ละอติเมนต์โดยสมการที่ 2.47

$$\rho_{i+1} = \rho_i + \Delta\rho \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

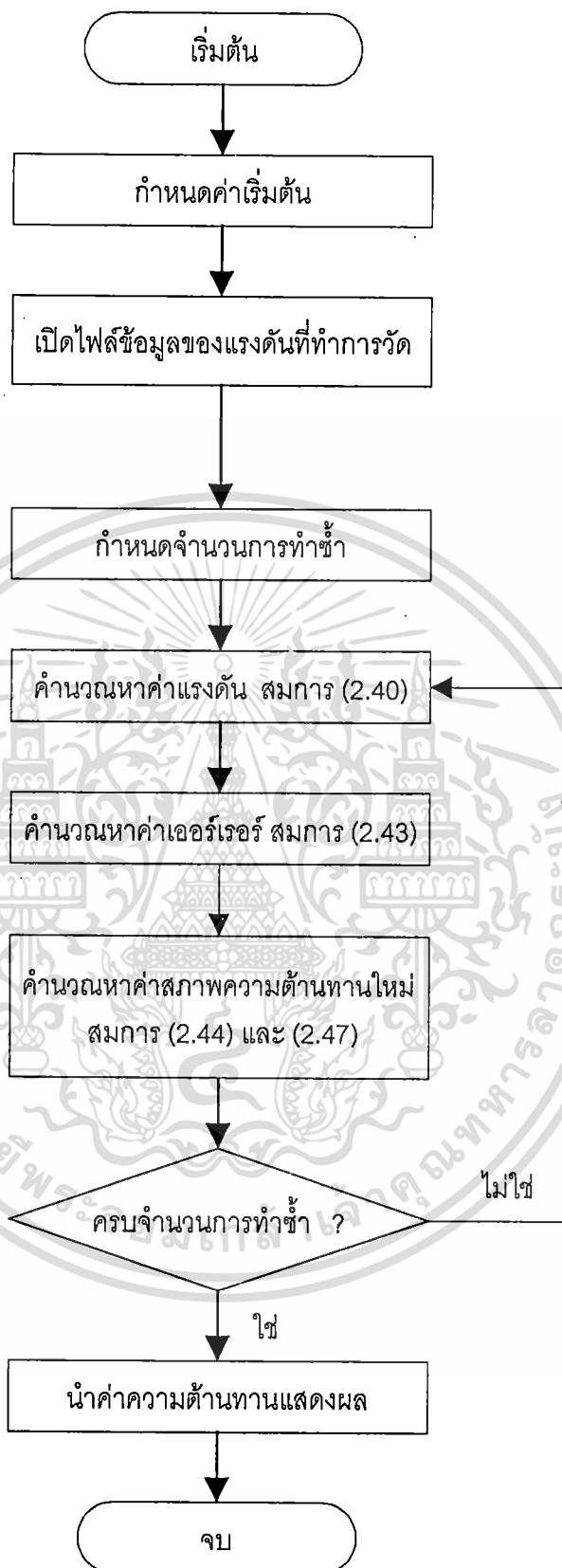
- เมื่อ Φ = ค่าความผิดพลาดยกกำลังสองเฉลี่ย (mean square error) ระหว่างค่าแรงดันที่ได้จากการวัดกับการคำนวณ
- $f'(p)$ = ค่าการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าที่จุดวัดเทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่า p ของแต่ละอติเมนต์มีขนาด [MXR]
- V_0 = ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการวัดมีขนาด [MX1]
- ρ = ค่าการกระจายของสภาพความต้านทานของระบบมีขนาด [RX1]
- V = ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณมีขนาด [MX1]
- λ = จำนวนจริงบวก
- Σ = เมตริกซ์เอกลักษณ์
- R = จำนวนอติเมนต์
- M = จำนวนอติเล็กโทรด

จากค่าสภาพความต้านทานของแต่ละอติเมนต์ภายในวัตถุที่คำนวณได้นำมาสร้างเป็นภาพตัดขวางแสดงการแจกแจงของค่าสภาพความต้านทานภายในของวัตถุนั้น โดยใช้ระดับเทาหรือระดับสีของจอแสดงผลของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์สำหรับการทดลองนี้ใช้ไฟไนต์อติเมนต์ขนาด 32 อติเล็กโทรด 248 อติเมนต์ 141 โหนด โดยมีรูปแบบการวางอติเมนต์ดังภาพที่ 2.13 ซึ่งการวางอติเมนต์ (Grid generation) ใช้การคำนวณตามหลักเรขาคณิต โดยเราสามารถเขียนโปรแกรมแสดงการทำงานของอัลกอริทึมในการคำนวณได้ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.13 แบบการวางอติเมนต์สำหรับไฟไนต์อติเมนต์ ขนาด 32 อติเล็กโทรด 141 โหนด 248 อติเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.14 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานของอัลกอริทึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การกำหนดค่าสภาพความต้านทานเริ่มต้น

การประมาณค่าสภาพความต้านทานจากการจ่ายกระแสและวัดแรงดัน [3] เป็นลักษณะของปัญหาผกผัน (inverse problem) ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการประมาณค่าแบบ Newton-Raphson ซึ่งต้องกำหนดค่าสภาพความต้านทานเริ่มต้นในการคำนวณ จากการทดลองใช้ข้อมูลที่วัดได้จากถังน้ำเกลือพบว่า การกำหนดค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมนั้นมีความสำคัญมากต่อการลู่เข้าของคำตอบในบางจุดซึ่งอาจทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนหรืออาจไม่สามารถหาผลลัพธ์ที่ต้องการได้ จึงได้เสนอวิธีการกำหนดค่าเริ่มต้นของค่าสภาพความต้านทานขึ้นมาใช้ โดยใช้หลักความจริงที่ว่าศักดาที่วัดได้แปรผันโดยตรงกับค่าสภาพความต้านทานของวัตถุดังนี้

เมื่อกำหนดค่าสภาพความต้านทานเริ่มต้น ρ ขึ้นแล้วปรับด้วยค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของศักดาที่วัดได้กับค่าที่ได้จากการคำนวณของทุกโปรเจกชันเขียนเป็นสมการสำเร็จรูปดังสมการที่ (2.48)

$$\rho_0 = \rho \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \frac{V_{cs}^p}{f_{cs}^p(\rho)} \quad (2.48)$$

หรือเมื่อกำหนดให้ ρ เป็น 1 สมการ (2.48) ก็จะเป็นดังสมการที่ (2.49)

$$\rho_0 = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \frac{V_{cs}^p}{f_{cs}^p(1)} \quad (2.49)$$

ถ้าหากขอบเขตของระบบที่ใช้เป็นรูปร่างกลมหรือทรงกระบอก $f_{cs}(1)$ จะมีค่าเท่ากันทุกโปรเจกชัน ดังนั้นจึงลดรูปสมการที่ (2.49) ได้เป็นสมการที่ (2.50)

$$\rho_0 = \frac{1}{P \cdot f_{cs}(1)} \sum_{p=1}^P V_{cs}^p \quad (2.50)$$

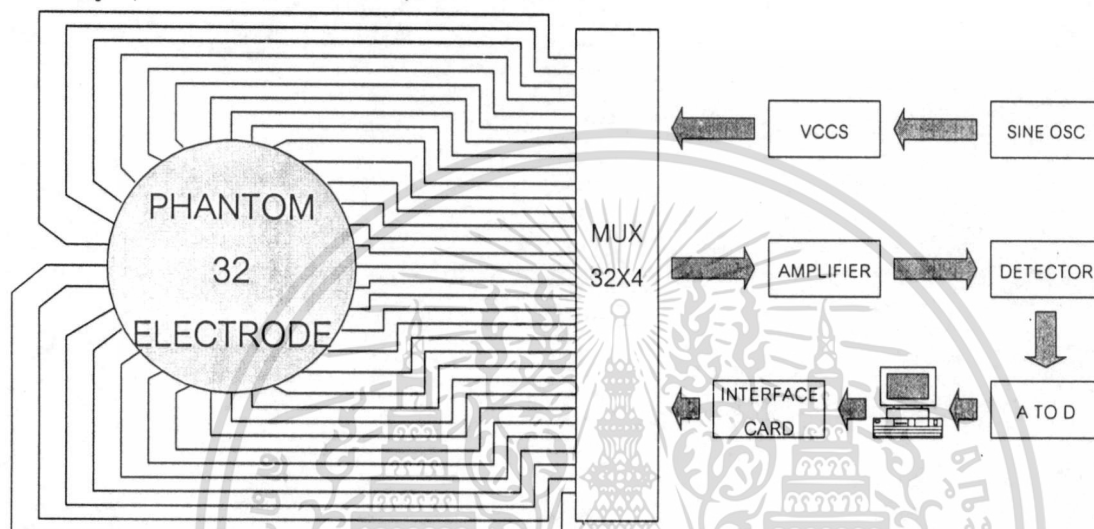
- เมื่อ ρ_0 = ค่าสภาพความต้านทานเริ่มต้นที่คำนวณได้สำหรับใช้ในการปรับค่าด้วยวิธีนิว-ราฟสันซึ่งเป็นเสมือนค่าสภาพความต้านทานเฉลี่ยของระบบ
- V_{cs}^p = ค่าศักดาไฟฟ้าที่วัดได้ที่ขั้วที่เป็นแหล่งจ่ายกระแส (current source) ของโปรเจกชันที่ p
- $f_{cs}^p(1)$ = ค่าศักดาไฟฟ้าที่คำนวณได้ที่แหล่งจ่ายกระแสของโปรเจกชันที่ p เมื่อกำหนดค่า ρ เป็น 1 ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ระบบเก็บข้อมูลการสร้างภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า แบบ 32 อิเล็กโทรด

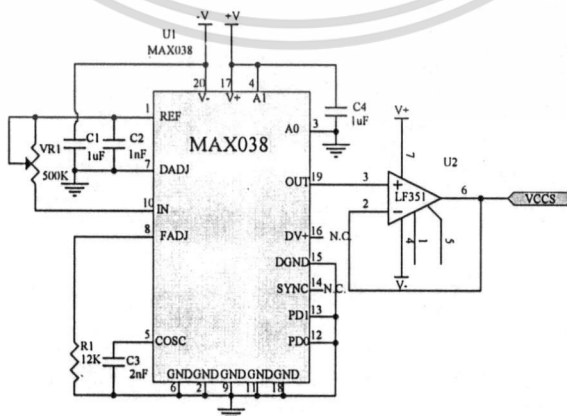
ระบบเก็บข้อมูลเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการจัดรูปแบบของการจ่ายกระแสและวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดทั้ง 32 อิเล็กโทรดตลอดจนบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เก็บลงไฟล์โดยระบบเก็บข้อมูลจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ระบบเก็บข้อมูลสำหรับการสร้างภาพตัดขวางแบบ 32 อิเล็กโทรด

วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต

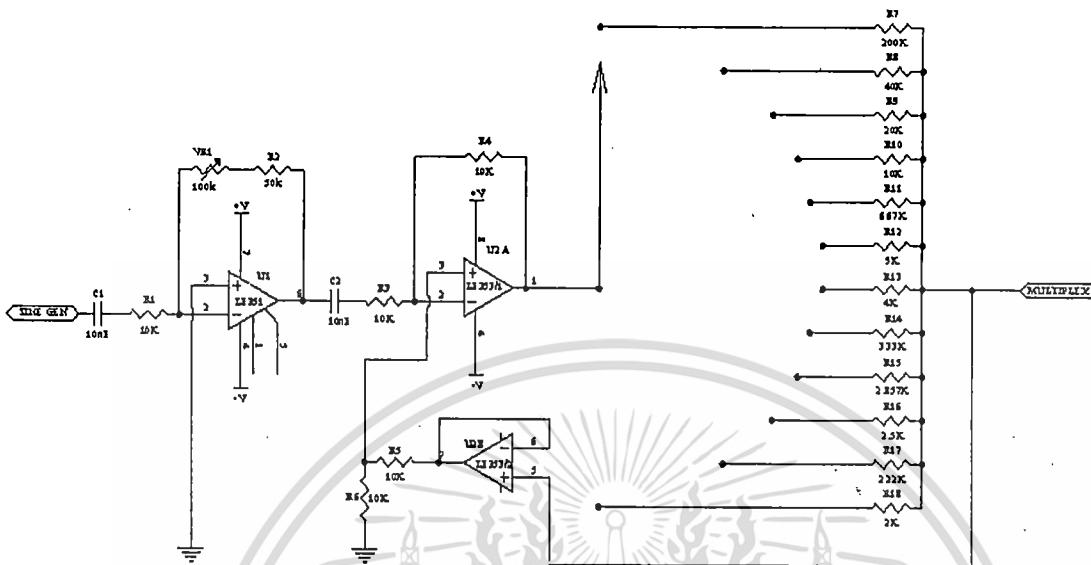
วงจรนี้เป็นวงจรสร้างสัญญาณไซน์ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตเพื่อป้อนให้กับวงจรจ่ายกระแสคงที่ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Control Current Source) โดยลักษณะของวงจรสร้างสัญญาณไซน์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.2



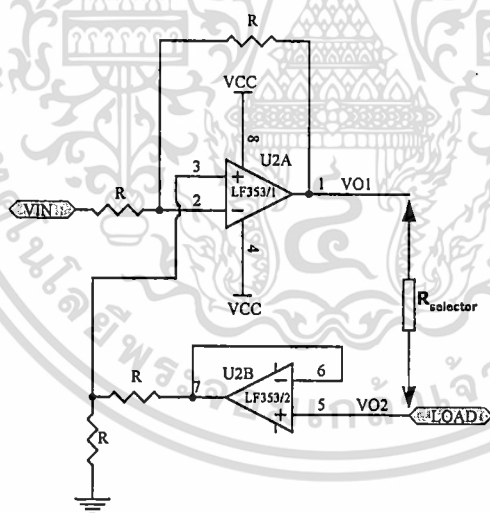
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาพที่ 3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage Control Current Source)

วงจรรจ่ายกระแสควบคุมด้วยแรงดันทำหน้าที่ในการกำหนดกระแสคงที่ที่จะจ่ายให้กับอิล็กโทรด์ทั้ง 32 อิล็กโทรด์ โดยวงจรรจ่ายกระแสที่ใช้ในระบบเก็บข้อมูลนี้สามารถแสดงดังภาพที่ 3.3



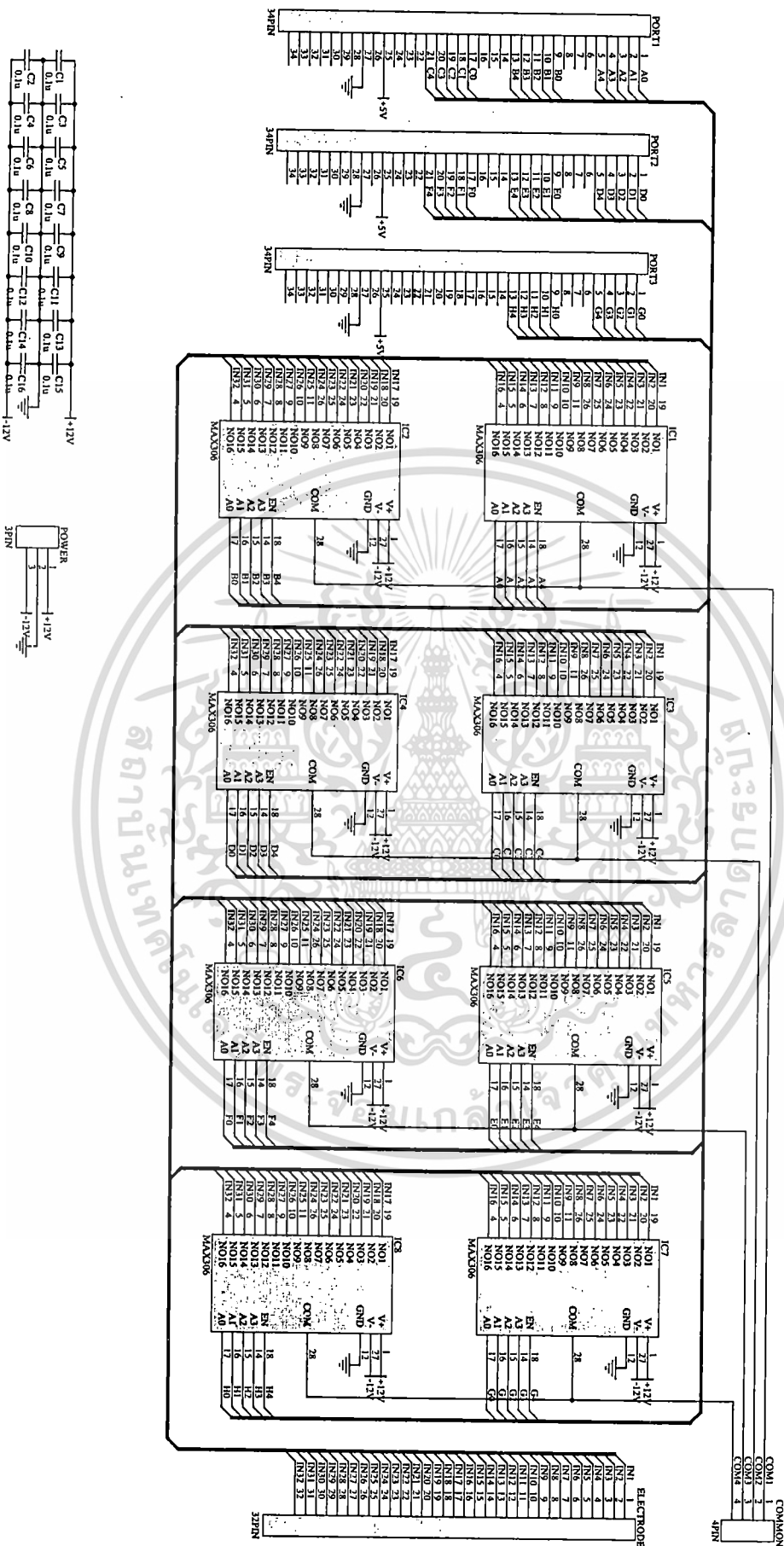
ภาพที่ 3.3 วงจรรจ่ายกระแสที่ใช้ในระบบเก็บข้อมูล



ภาพที่ 3.4 วงจรรจ่ายกระแสที่ใช้ในระบบเก็บข้อมูล

วงจรมัลติเพล็กซ์ขนาด 32x4 ช่องสัญญาณ

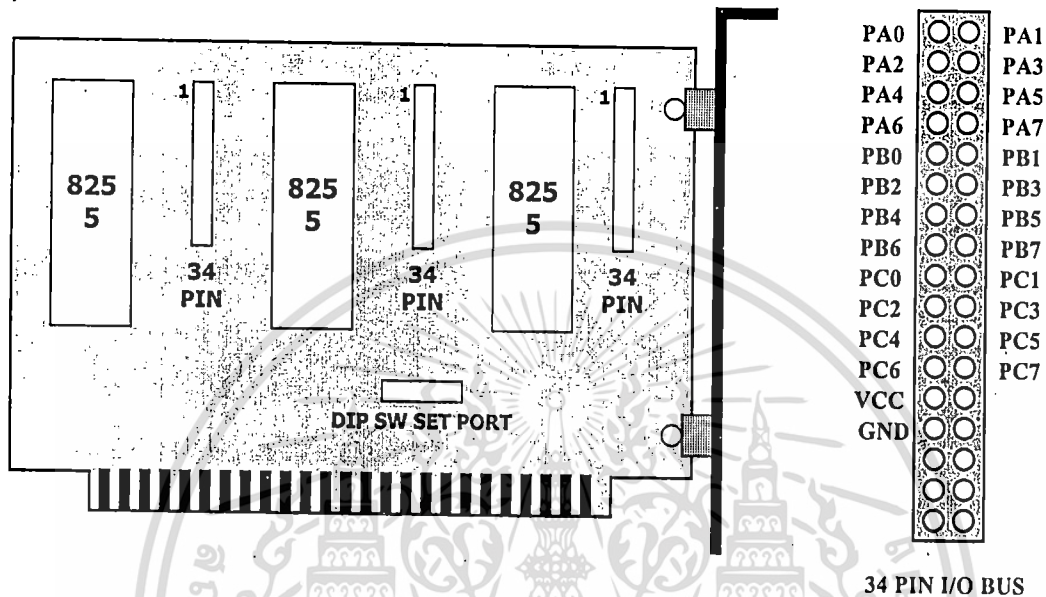
วงจรมัลติเพล็กซ์ขนาด 32x4 ช่องสัญญาณทำหน้าที่ในการจัดรูปแบบของการจ่ายกระแสและการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าให้แก่อิล็กโทรด์ทั้ง 32 อิล็กโทรด์รอบวัตถุ โดยการควบคุมจากคอมพิวเตอร์ผ่านคาร์ดิอินเตอร์เฟสโดยใช้ไอซี MAX306 ซึ่งเป็นไอซีมัลติเพล็กซ์ขนาด 16x1 ช่องสัญญาณ จำนวน 8 ตัว เพื่อใช้ในการสร้างมัลติเพล็กซ์ ขนาด 32x4 ช่องสัญญาณ ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สง ภาพที่ 3.5 วงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ ขนาด 32x4 ช่องสัญญาณนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ์ดอินเตอร์เฟซ (Interface Card)

การ์ดอินเตอร์เฟซทำหน้าที่ส่งสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ไปควบคุมวงจรมัลติเพล็กซ์เซอร์ โดยการ์ดอินเตอร์เฟซที่ใช้เป็นของบริษัท ETT รุ่น ET-8255 ซึ่งเป็นการติดต่อขยายระบบเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ให้มีส่วนของอินพุทพอร์ตและเอาต์พุทพอร์ตเพิ่มมากขึ้น โดยในส่วนของการ์ดอินเตอร์เฟซนี้จะมีพอร์ตให้ใช้งานจำนวน 9 พอร์ต หรือ 72 บิต (1 พอร์ตมี 8 บิต)



ภาพที่ 3.6 ลักษณะของการ์ดอินเตอร์เฟซรุ่น ET-8255

ในส่วนของการเลือกแอดเดรสในการใช้งานของการ์ด ET-8255 นี้จะใช้แอดเดรส 300H ถึง 30BH ซึ่งรายละเอียดในการใช้งานแอดเดรสสามารถแสดงดังตารางที่ 3.1

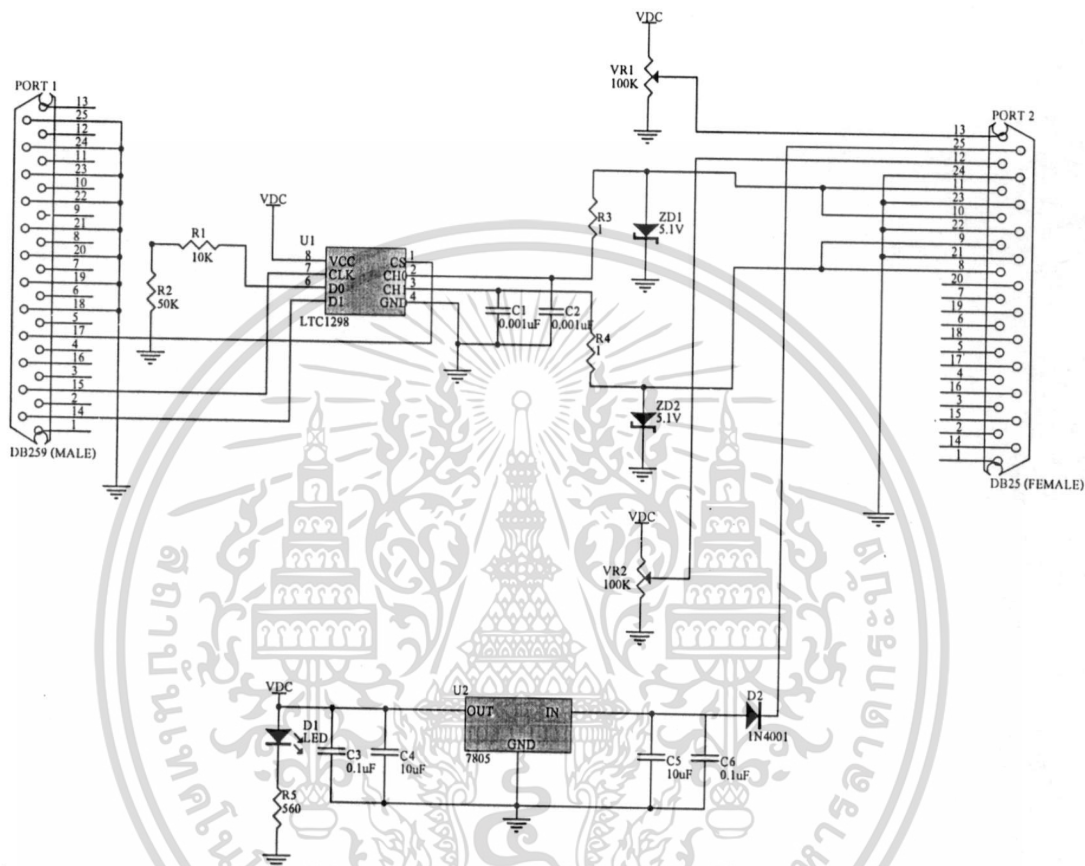
ตารางที่ 3.1 การใช้งานแอดเดรสของการ์ด ET-8255

ตารางการใช้พอร์ตในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ของการ์ด ET-8255	
หมายเลขพอร์ตในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์	การใช้งานพอร์ตของการ์ด ET-8255
300H	PORT A 8255#1
301H	PORT B 8255#1
302H	PORT C 8255#1
303H	CONTROL PORT 8255#1
304H	PORT A 8255#2
305H	PORT B 8255#2
306H	PORT C 8255#2
307H	CONTROL PORT 8255#2
308H	PORT A 8255#3
309H	PORT B 8255#3
30AH	PORT C 8255#3
30BH	CONTROL PORT 8255#3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A TO D Converter)

สำหรับวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลจะใช้บอร์ดของบริษัท ETT รุ่น ET-AD12 ซึ่งเป็นบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 12 บิต ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตเครื่องพิมพ์ (Printer Port) โดยมีลักษณะและคุณสมบัติของวงจรดังภาพที่ 3.7 และตารางที่ 3.2



ภาพที่ 3.7 วงจรภายในของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของบอร์ดแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลรุ่น ET-AD12

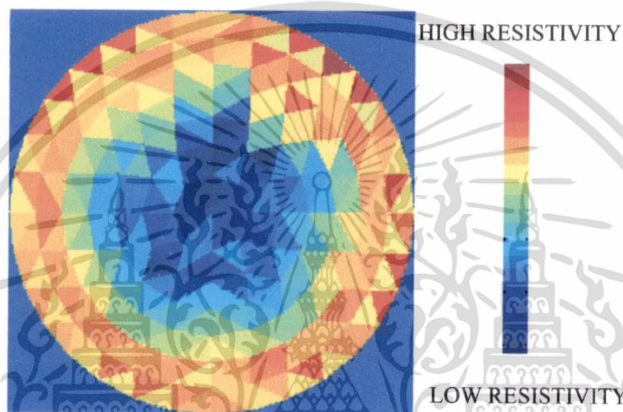
คุณสมบัติของของบอร์ด ET-AD12	
CONVERSION TIME	60µS
SAMPLING RATE	11.1 KHz
INPUT CHANNEL	2 CHANNEL
GAIN ERROR	+/- 2 LSB
ANALOG INPUT RANGE	-0.05 V TO +5.05 V
+VCC SUPPLY	+9 VDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

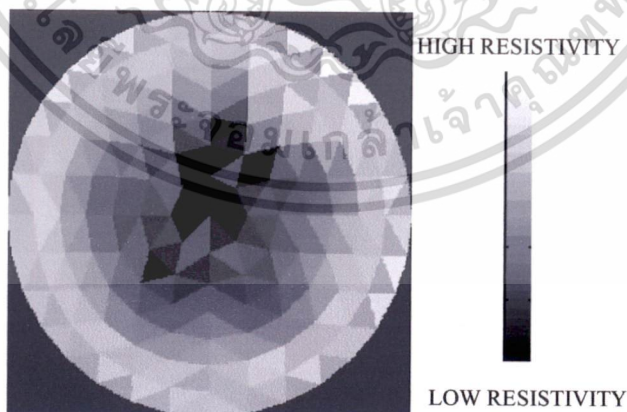
บทที่ 4

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

การทดสอบระบบสร้างภาพตัดขวางของผลมังคุดที่มีเนื้อแก้ว ระบบเก็บข้อมูลจะเก็บข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุด 1024 ครั้ง/วินาที หรือ 32 โปรเจกชัน/ 1 วินาที โดยจ่ายกระแส 1 มิลลิแอมป์ ที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ต จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณโดยอัลกอริทึมแบบ 3 มิติ ด้วยโปรแกรม MATLAB 5.3 โดยไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้ซีพียู Pentium 4 1.4 กิกะเฮิร์ตแรม 128 เมกกะไบต์ โดยในการทดลองจะใช้ค่าการทำซ้ำเป็น 5 ครั้ง โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วคราวเพียงครั้งเดียว จากนั้นจึงนำภาพที่สร้างขึ้นมาแสดงในรูปแบบสีและขาวดำดังแสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2



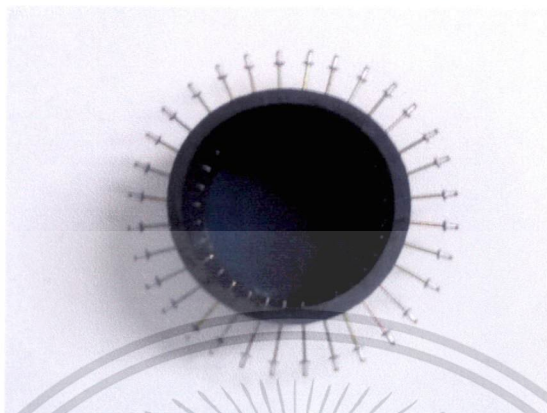
ภาพที่ 4.1 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วคราวเพียงครั้งเดียว ในรูปแบบการแสดงผลแบบสีของผลมังคุดที่มีเนื้อแก้ว



ภาพที่ 4.2 ลักษณะของภาพตัดขวางที่สร้างได้โดยวิธีการเก็บข้อมูลแบบชั่วคราวเพียงครั้งเดียว ในรูปแบบการแสดงผลแบบขาวดำของผลมังคุดที่มีเนื้อแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบประกอบด้วย ถังบรรจุน้ำเกลือ 32 อิเล็กโทรด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว ดังภาพที่ 4.3 ใส่ผลมังคุดลงในถังบรรจุน้ำเกลือ 32 อิเล็กโทรด ดังภาพที่ 4.4 และ 4.5 ทำการเก็บข้อมูลดังภาพที่ 4.6 และ 4.7 จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้นำมาสร้างภาพตัดขวางของผลมังคุดที่มีเนื้อแก้ว ภาพที่ 4.8 แสดงผลของมังคุดที่ผ่าออกซึ่งด้านในเป็นเนื้อแก้วเปรียบเทียบกับภาพที่สร้างขึ้น ภาพที่ 4.1 และ 4.2



ภาพที่ 4.3 ถังบรรจุน้ำเกลือ 32 อิเล็กโทรด



ภาพที่ 4.4 ผลมังคุดในถังบรรจุน้ำเกลือ 32 อิเล็กโทรด

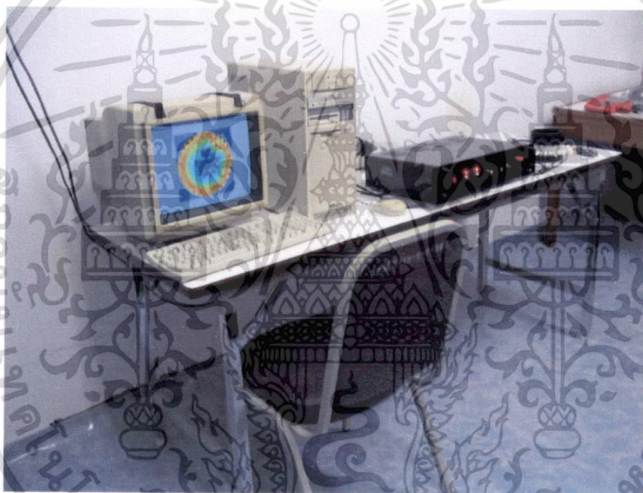


ภาพที่ 4.5 ทำการวัดผลมังคุดในถังบรรจุน้ำเกลือ 32 อิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.6 เครื่องเก็บข้อมูลแบบ 32 บิตเล็ก โทรอด



ภาพที่ 4.7 ระบบเก็บข้อมูลแบบ 32 บิตเล็ก โทรอด



ภาพที่ 4.8 ผลมั่งคุดที่ผ่าออกซึ่งด้านในเป็นเนื้อแก้วเปรียบเทียบกับภาพที่สร้างขึ้น ภาพที่ 4.1 และ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบวัดผลมั่งคุดที่มีเนื้อแก้ว ด้วยระบบเก็บข้อมูลแบบ 32 อิเล็กโทรดและนำผลที่ได้มาสร้างภาพ ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2 นั้น ภาพที่ได้ยังมีความสามารถในการแยกแยะเปลือกนอก เปลือกใน เนื้อมั่งคุด และเนื้อแก้วของภาพได้ไม่ดีนัก

ค่าความผิดพลาดของภาพตัดขวางยังมีค่าสูงอยู่ อันเนื่องมาจากสมมุติฐานดังนี้

- ความต้านทานเปลือกมั่งคุดด้านในมีความแตกต่างกับเนื้อมั่งคุดน้อยทำให้การแยกแยะวัตถุของภาพไม่ดี
- เปลือกด้านนอกของมั่งคุดในระบบการวัด กระแสไหลผ่านได้น้อยทำให้การสร้างภาพซึ่งเกิดจากการเก็บข้อมูลจากการจ่ายกระแสและวัดแรงดันทำให้การสร้างภาพไม่ดี

สำหรับแนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้ซึ่งอาศัยแนวทางจากสมมุติฐานข้างบน คือ ระบบการวัดต้องจ่ายกระแสได้มากกว่านี้เพื่อทำให้เกิดความแตกต่างของสัญญาณที่วัดได้ ภาพที่ได้จึงจะมีความสามารถในการแยกแยะวัตถุของภาพได้ดี นอกจากนี้อาจเปลี่ยนเทคนิคของการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัตถุเป็นการสร้างภาพตัดขวางคาปาซิแตนซ์ไฟฟ้า (Electrical Capacitance Tomography)

บรรณานุกรม

- [1] R.A.Williams and M.S.Beck. **Process Tomography**. Butterworth-Heinemann : Oxford. 1995.
- [2] Lee E. Baker. “Principle of the Impedance Technique.” IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine., March 1989. pp. 11-15.
- [3] เทอดชัย ธเนศวโรดม. “การสร้างภาพตัดขวางของความต้านทานไฟฟ้าภายในวัตถุตัวนำ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [4] Barber DC, Brow BH and Freeston IL. “Imaging Spatial Distributions of Resistivity Using Applied Potential Tomography.” Electronics Letters, Vol. 19, No 22, 27th October 1983. pp. 933-935.
- ชาญชัย บุญยงค์. 2537. โรคและอาการผิดปกติของมังคุด. กสิกร 67(3):218-225
- ชูศักดิ์ สีมัสกุล สายัณห์ สดุติ พรชัย พฤษภัทธานนท์ และคณิติก เกษภูพันธ์านนท์. 2543. การพัฒนาและการตรวจสอบจับอาการเนื้อแก้วและยางไหลในผลมังคุด. สารแม่ผล. 5(4):8-9
- สมเกียรติ เสริมภักดี. 2543. การปลูกมังคุด. อักษรสยามการพิมพ์. กรุงเทพฯ. 71 น.
- สมศักดิ์ วรรณศิริ. 2541. มังคุด. โรงพิมพ์เอเชียแปซิฟิกพริ้นติ้ง. กรุงเทพฯ. 63 น.
- ธงชัย ยันตรศรี. 2542. การคัดผลไม้เขตร้อนโดยใช้ความหนาแน่นของน้ำ. สารแม่ผล 4(6):10-11

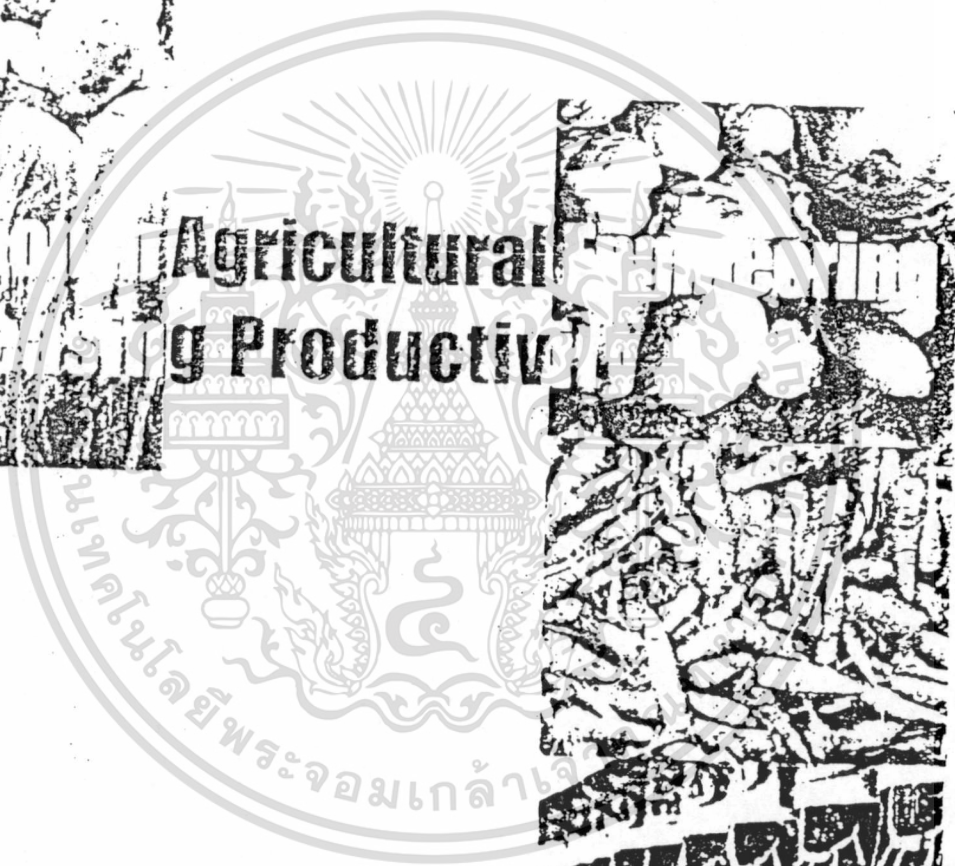
ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นวัตกรรมทางวิศวกรรมเกษตร
เพื่อการเพิ่มผลผลิต



การประชุมวิชาการครั้งที่ 5 ประจำปี 2547
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง 26-27 พฤษภาคม 2547 การศึกษาวิจัยนั้น ไปลงตลาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การวิจัยวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

นวัตกรรมกรรมทางวิศวกรรมเกษตร
เพื่อเพิ่มผลผลิต

**Innovation in
Agricultural Engineering
for Increasing Productivity**

การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 5 ประจำปี 2547

สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

26-27 เมษายน 2547

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาถึงการสร้างภาพตัดขวางของวัสดุการเกษตรด้วยวิธีวัดความต้านทานไฟฟ้า
 A STUDY OF IMPEDANCE TOMOGRAPHIC IMAGE RECONSTRUCTION FOR
 AGRICULTURAL MATERIALS

อิทธิพล พจนสัง¹ อภินัย ฤกษ์รัตน์² กิติพล ชิตสกุล³ และ มนัส สัจจวิมล³

¹สาขาอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาเขตสารสนเทศชุมพร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

ชุมพร 86000

²ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

กรุงเทพฯ 10520

³ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง

กรุงเทพฯ 10520

บทคัดย่อ

จากผลสำเร็จในการจำลองการสร้างภาพตัดขวางด้วยวิธีวัดความต้านทานไฟฟ้ากับวัสดุสังเคราะห์ที่เป็นฉนวนหรือตัวนำ ทำให้สนใจนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุการเกษตร โดยหลักการที่ว่าเมื่อปล่อยกระแสผ่านเข้าไปในวัตถุผ่านทางอิเล็กโทรดคู่หนึ่ง ก่อให้เกิดสนามไฟฟ้ากระจายผ่านเนื้อวัตถุตัวนำและทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานเนื้อวัตถุภายใน สามารถวัดได้โดยใช้อิเล็กโทรดคู่อื่นวัดโดยรอบวัตถุนั้น หากเนื้อของวัตถุภายในมีลักษณะที่ไม่เอกพันธ์ จะปรากฏที่ความแตกต่างของค่าความต่างศักย์ เมื่อวัดโดยรอบวัตถุนั้น ข้อมูลความต่างศักย์นี้ นำมาเป็นข้อมูลในการคำนวณศักดาไฟฟ้าที่โหนดภายในวัตถุ ตามหลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ และคำนวณกลับมาเป็นค่าต้านทานไฟฟ้าของเอลิเมนต์ภายในเนื้อวัตถุและแสดงเป็นภาพตัดขวางของวัตถุนั้นที่มีความเข้มแสงแปรตามค่าอิมพีแดนซ์ของเนื้อวัตถุ การทดลองใช้การจำลองวัตถุเป็นทรงกลมซ้อนกัน วางอยู่ในเซ็นเซอร์แบบ 32 อิเล็กโทรด สมมุติค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วงของวัสดุชีวภาพ ปรากฏว่าสามารถจำแนกบริเวณที่มีค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานไฟฟ้าได้โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บริเวณที่อยู่ด้านนอกมีความต้านทานต่ำกว่าด้านใน ในการนำเสนอจะแสดงผลการจำลองกับวัสดุที่มีโครงสร้างที่หลากหลายให้ใกล้เคียงกับวัสดุการเกษตรเช่น ผลไม้บางชนิดเป็นต้น

ABSTRACT

The successes in applying the reconstructing impedance tomographic image to non-biomaterials lead to interesting its application with some biomaterials. In principle, a small alternating current, medium frequency is injected into an object via a pair of electrodes, the other pairs, attached around the object, detect the potential drop on the internal impedance. These boundary potentials are used to determine internal node voltages of finite elements constructed as a cross section model of the object. Impedance of the elements are then determined from the node voltages and adjusted by an iterative algorithm. An impedance image is shown as the distribution of different impedance grids.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The results of experiments with the models of some agricultural products such as fruits showed the possibility in applying of the method to the products.

คำสำคัญ ตรวจสอบโดยไม่ทำลาย, ภาพตัดขวางความต้านทานไฟฟ้า, วัสดุทางการแพทย์

บทนำ

เกือบ 20 ปีมาแล้วที่มีการศึกษาถึงสร้างภาพตัดขวางด้วยการวัดความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Impedance tomography; EIT) ของวัตถุ และได้นำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การวัดการไหลของของไหล [1] การวัดการผสมของสารละลายในถังกวน [2] ตลอดจนนำไปประยุกต์ทางการแพทย์ ในการสร้างภาพตัดขวางของร่างกายเช่นบริเวณทรวงอกเพื่อศึกษาถึงการหายใจ [3] และภาพของกระเพาะอาหาร ในขณะที่ย่อยอาหารในกระเพาะเป็นต้น [4] สำหรับในประเทศไทย ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับ EIT ในไม่กี่ปีที่ผ่านมา โดยการศึกษาพัฒนาทั้งอัลกอริทึม [5] และระบบการวัด [6] ตามหลักการของ EIT และประสบความสำเร็จในการสร้างภาพตัดขวางในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับวัสดุที่เป็นตัวนำและฉนวนที่มีรูปทรงแบบเรขาคณิต อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบว่ามีผู้นำหลักการของ EIT มาใช้กับวัสดุทางการแพทย์หลังการเก็บเกี่ยว ในเอกสารเผยแพร่ใด ๆ ทางกลุ่มผู้ศึกษาจึงขอยกขอบเขตของการศึกษามาถึงวัสดุทางการแพทย์เพื่อใช้ในการตรวจสอบวัสดุทางการแพทย์หลังการเก็บเกี่ยวแบบไม่ทำลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับผลไม้เปลือกแข็งตามข้อสมมุติฐานที่ว่า เปลือกและเนื้อผลไม้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่างกัน หากความแตกต่างนี้มากพอ น่าจะสามารถนำวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้ามาใช้ในการตรวจสอบความหนาของชั้นเปลือกและเนื้อหรือลักษณะสมบัติอื่น ๆ ได้

หลักการของ EIT คือปล่อยกระแสไฟฟ้าขนาดต่ำ ๆ ความถี่ในช่วง 10 KHz ถึง 1 MHz ผ่านเข้าไปในวัตถุตัวนำ ผ่านทางอิเล็กโทรดคู่หนึ่งที่ตั้งอยู่บนผิววัตถุ ซึ่งก่อให้เกิดสนามไฟฟ้ากระจายผ่านเนื้อวัตถุตัวนำ ทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานไฟฟ้าของเนื้อวัตถุภายใน เมื่อวัดได้โดยใช้อิเล็กโทรดคู่อื่นที่ตั้งโดยรอบวัตถุ นั้น หากเนื้อของวัตถุภายในมีลักษณะที่ไม่เอกพันธ์ จะปรากฏผลเป็นความแตกต่างของค่าความต่างศักย์เมื่อวัดโดยรอบวัตถุ ข้อมูลความต่างศักย์นี้นำมาเป็นข้อมูลในการคำนวณศักดาไฟฟ้าที่ไหลในวัตถุ ที่จำลองด้วยอิเลเมนต์เล็ก ๆ สองมิติ กระจายภายในภาคตัดขวางของวัตถุในระนาบของอิเล็กโทรด ต่อมาจะคำนวณความต้านทานภายในอิเลเมนต์จากค่ากระแสและศักดาไฟฟ้า และนำมาสร้างเป็นภาพตัดขวางตามแบบจำลอง โดยแสดงเป็นความเข้มตามค่าความต้านทานทางไฟฟ้า ตามหลักการนี้ความละเอียดของภาพที่ได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเลเมนต์ต่อขนาดของวัตถุ

อุปกรณ์และวิธีการ

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำหลักการของภาพตัดขวางอิมพีแดนซ์ทางไฟฟ้า มาใช้กับวัสดุทางการแพทย์ ซึ่งเป็นวัสดุชีวภาพประเภทหนึ่ง ในเบื้องต้นจะใช้การจำลองการวัดในวัตถุทรงกลม โดยให้วัตถุที่ถูกวัดมีสองชั้นที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่างกันแต่ละชั้นเป็นสารเนื้อเดียวกันตลอด เช่น เซอร์เบิร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบอก มีอิเล็กโตรดจำนวน 32 อิเล็กโตรดคิกโคโรบ(รูปที่ 1) โดยมีของเหลวที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าค่าหนึ่งคั่นระหว่างอิเล็กโตรดและวัตถุที่วัด(รูปที่ 2 หมายเลข 1) กำหนดกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 1 mA ความถี่ 100 KHz ภาคคักขวางในระนาบของอิเล็กโตรดจะแบ่งเป็นอิเล็กเมนต์แบบสามเหลี่ยมเต็มพื้นที่หน้าคักจำนวน 246 โหนด โดยที่อิเล็กโตรดที่ผิวให้เป็นโหนดหนึ่งของอิเล็กเมนต์ นอกจากนี้ใช้อิเล็กเมนต์ที่ใช้เป็นแบบสามมิติหรือรูปปริซึมจากข้อสันนิฐานที่ว่า สนามไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ในสามมิติระหว่างคู่อิเล็กโตรด ซึ่งจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณคักคาไฟฟ้าที่โหนดรวมถึงค่าอิมพีแดนซ์หรือค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วย ในการทดลองใช้การจำลองค่าความต้านทานของชั้นวัตถุทดลอง(รูปที่ 2 หมายเลข 2 และ 3) ให้มีค่าอัตราส่วนต่างกัน รวมทั้งทดลองเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุและรูปทรงเพื่อสังเกตผลความแยกแยะของภาพที่การกระจายของอิมพีแดนซ์ในวัตถุ ในเบื้องต้นการสังเกตผลจะใช้การดูด้วยตาเปรียบเทียบกับภาพที่สร้างได้บนจอไมโครคอมพิวเตอร์ที่โปรแกรมด้วยโปรแกรม MATLAB[®] กับแบบจำลองซึ่งความแตกต่างในเชิงปริมาณจะได้นำเสนอต่อไป

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองแสดงเป็นภาพคักขวางที่สร้างได้ แสดงเป็นระดับเทาแสดงการแยกแยะของส่วนที่เป็นสารของเหลวตัวกลางและชั้นของเนื้อวัตถุที่ต้องการดูภาพคักขวาง โดยกำหนดให้มีความต่างกันของความต้านทานไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนต่าง ๆ ตามรูปที่ 2 จะพบว่าวิธีการนี้จะให้ผลที่เป็นภาพวัตถุที่แยกแยะได้เมื่อใช้กับวัตถุที่มีลักษณะเป็นชั้นปึกหรือลักษณะเป็นเปลือก ภายใต้งื่อนไขว้ความต้านทานของชั้นนอก(อยู่ใกล้กับอิเล็กโตรดวัด)ควรจะต่ำกว่าภายในเป็นไปตามหลักที่ว่ากระแสจะต้องผ่านเข้าไปถึงบริเวณที่จะสังเกตและอัตราส่วนของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สามารถจะแยกแยะได้ก็จะจำกัดอยู่ในช่วงหนึ่ง โดยแสดงผลการทดลองตัวอย่างในรูปที่ 3 (ก) แสดงภาพคักขวางตามแบบจำลองของรูปที่ 2 (ก) วัตถุวางตรงกลางมีของเหลวความต้านทานเป็น 1 หน่วยเปลือกนอกของวัตถุมีความต้านทาน 4 เท่าของของเหลวและแกนกลางของวัตถุมีความต้านทานเป็น 2 เท่าของของเหลว รูปที่ 3 (ข) แสดงภาพคักขวางตามแบบจำลองของรูปที่ 2 (ข) วัตถุมีรูปทรงไม่สมมาตรและไม่อยู่ตรงกลางระหว่างอิเล็กโตรดอัตราส่วนความต้านทานไฟฟ้าของเปลือกและแกนเป็น 3 และ 1.5 เท่าของของของเหลวตัวกลางตามลำดับ รูปที่ 4 และ 5 เป็นตัวอย่างผลการทดลองในลักษณะเดียวกันเมื่อทดลองปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความต้านทานของวัตถุ

สรุปผล

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาความเป็นไปได้และเงื่อนไขที่จะนำหลักการการสร้างภาพคักขวางของค่าความต้านทานไฟฟ้ามาใช้ทดสอบแบบไม่ทำลายกับผลผลิตการเกษตรบางชนิดเช่น ผลไม้เปลือกแข็งว่าสามารถแยกแยะส่วนที่เป็นเปลือกและเนื้อได้หรือไม่ จากข้อสมมุติฐานว่าโครงสร้างของวัสดุชีวภาพเหล่านี้มีค่าความนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน การศึกษาใช้แบบจำลองไฟไนต์อิเล็กเมนต์สามมิติในการคำนวณการกระจายของคักคาภายในเนื้อวัตถุและคำนวณกลับเป็นค่าความต้านทานภายในอิเล็กเมนต์และนำมาแสดงเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพตัดขวาง ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า วิธีการนี้มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ทดสอบแบบไม่ทำลาย ผลผลิตทางการเกษตรประเภทผลไม้เปลือกแข็งภายใต้เงื่อนไขที่ว่าความความต้านทานไฟฟ้าของเปลือกชั้นด้านนอกควรจะต่ำกว่าชั้นใน โดยไม่ขึ้นกับขนาดความต้านทานไฟฟ้าสัมบูรณ์ของวัสดุนั้น

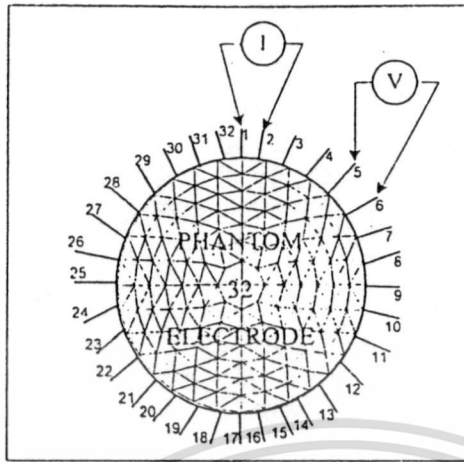
กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ส่วนหนึ่งได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณสนับสนุนการวิจัยประจำปีประมาณ 2547 จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตสารสนเทศสุพรรณบุรี

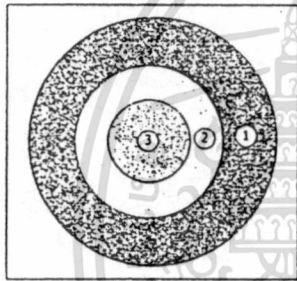
เอกสารอ้างอิง

1. Hervieu, E. and Selcghim P.J.(1999), Direct of Two-phase Flows By Electrical Impedance Measurements, *Proceeding of the 1st World Congress on Industrial Process Tomography*, Buxton, pp.62-70.
2. Stanley, S.J., Wabo, E., Mann and R., Primrose K. (2001), Dual-Validation of Miscible Liquid Mixing in Stirring Vessel Imaged by Electrical Resistance Tomography(ERT), *Proceeding of the 2nd World Congress on Industrial Process Tomography*, Mannover, pp.151-158.
3. Woo, E.J., Hua P., Webster, J.G. and Tompkins, W. J. (1992), Measuring Lung Resistivity Using Electrical Impedance Tomography, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 39, No. 7, pp. 756-760.
4. Avill, R., Mangnall, Y.F., Bird, N. C., Brown, B. H., Barber, D. C., Seagar, A. D., John, A. G. and Read, N. W. (1987), Applied Potential Tomography : A New Noninvasive Technique for Measuring Gastric Emptying, *Gastroenterology*, Vol. 92, No. 4, pp. 1019-1026.
5. เทอดชัย ชเนศวโรดม(2542), วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
6. อภินัย ฤกษ์รัตน์ (2545), วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

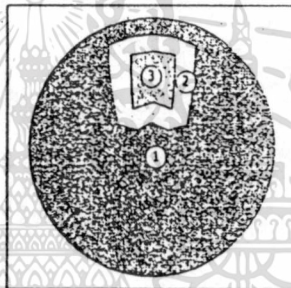
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 แบบจำลองไฟฟ้านคืออิเล็กเมนต์และการป้อนกระแสและวัดศักดาไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

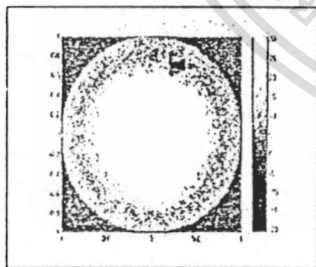


(ก)

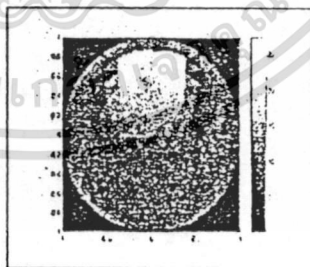


(ข)

รูปที่ 2 แบบจำลองแสดงวัตถุที่มีชั้นความต้านทานไฟฟ้าต่างกันแสดงด้วยตัวเลขกำกับชั้นที่ 1 เป็นของเหลวจึงกลางนำไฟฟ้าได้ วัตถุที่ต้องการคุณภาพตัดขวางมีความหนาสองชั้นแสดงด้วยเลข 2 และ 3



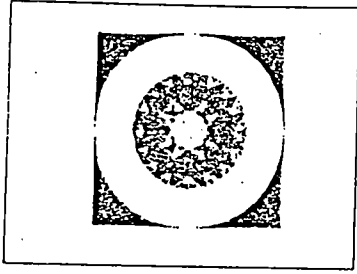
(ก)



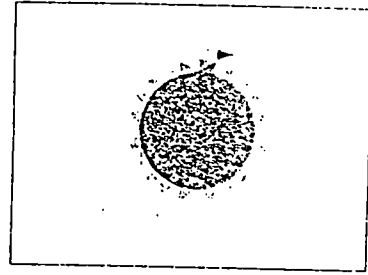
(ข)

รูปที่ 3 ตัวอย่างผลการสร้างภาพตัดขวางของแบบจำลองในรูปที่ 2 (ก) อัตราส่วนความต้านทานชั้นของเหลวจึงรอบ ๆ ชั้นที่ 1 ชั้นเปลือกนอกหมายเลข 2 และชั้นกลางหมายเลข 3 เป็น 1:4:2 ตามลำดับและ รูป(ข) อัตราส่วนความต้านทานในลักษณะเดียวกันเป็น 1:3:1.5 เป็นกรณีวัตถุทดลองมีรูปทรงไม่สมมาตรและไม่อยู่ตรงกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

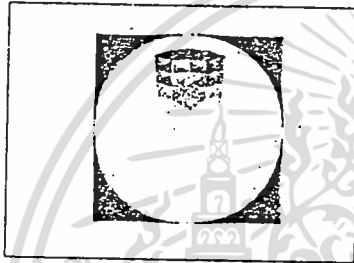


(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ตัวอย่างผลการสร้างภาพตัดขวางของแบบจำลองในรูปที่ 2 (ก) อัตราส่วนความต้านทานชั้นของเหลว
รอบ ๆ ชั้นที่ 1 ชั้นเปลือกนอกหมายเลข 2 และชั้นกลางหมายเลข 3 เป็น 1:2:1.5 ตามลำดับและ รูป(ข) อัตรา
ส่วนความต้านทานในลักษณะเดียวกันเป็น 1:3:2



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 ตัวอย่างผลการสร้างภาพตัดขวางของแบบจำลองในรูปที่ 2 (ข) อัตราส่วนความต้านทานชั้นของเหลว
รอบ ๆ ชั้นที่ 1 ชั้นเปลือกนอกหมายเลข 2 และชั้นกลางหมายเลข 3 เป็น 1:2:1.5 ตามลำดับและ รูป(ข) อัตรา
ส่วนความต้านทานในลักษณะเดียวกันเป็น 3:5:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อผู้วิจัย	นายอิทธิพล พจนสัง
สถานที่ทำงาน	สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร
โทรศัพท์	(077)506-422
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (วศม.ไฟฟ้า) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พศ. 2541 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ (วทบ.ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน พศ.2534

ประวัติการทำงาน

- อาจารย์พิเศษ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พศ.2534-2538
- อาจารย์พิเศษ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร พศ.2539
- หัวหน้าสาขาวิทยาศาสตร์พื้นฐาน คณะทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา พศ.2541-2544
- ปัจจุบัน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการยอมรับ

1. อิทธิพล พจนสัง ประภากร สุวรรณ และมนัส สังวรศิลป์, "เครื่องตรวจสอบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 7-8 พฤศจิกายน 2534, หน้า 2-119 ถึง 2-112.
2. อิทธิพล พจนสัง และประภากร สุวรรณ, "เครื่องชุมสายโทรศัพท์ปลายทางแบบไร้สายใช้เทคนิคเลือกช่องความถี่ที่ว่าง", วารสารวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 มิถุนายน 2539, หน้า 29-42.
3. อิทธิพล พจนสัง และประภากร สุวรรณ, "เครื่องชุมสายโทรศัพท์ปลายทางแบบไร้สายใช้เทคนิคเลือกช่องความถี่ที่ว่าง", การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 35, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน, 3-5 กุมภาพันธ์ 2540, หน้า 354-361.
4. อิทธิพล พจนสัง อภินัย ฤกษ์รัตน์ กิติพล ชิตสกุล และมนัส สังวรศิลป์, "การศึกษาถึงการสร้างสภาพตัดขวางของวัสดุการเกษตรด้วยวิธีวัดความต้านทานไฟฟ้า", การประชุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้คนอื่นใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิชาการครั้งที่ 5 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,26-27 เมษายน 2547,หน้า 295-300.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้