

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยว ทรงกลมเปลือกสองชั้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สรุทธิ บุญถวิล¹ และ มณีรัตน์ บุญล้ำ²

Abstract

Bunthawin, S. and Boonlamp, M.

Development of a single cell spherical shell model for an investigation of electrical properties with a computing program

Songklanakar J. Sci. Technol., 2005, 27(2) : 393-416

A spherical double shell model (SDM) for a single cell has been developed, using Laplace's equation in spherical coordinates and boundary conditions. Electric field intensities and dielectric constants of each region inside and outside of the cell have been estimated. The dielectrophoretic spectrum of the real part of a complex function ($\text{Re}[f(\omega)]$) were computed using *Visual Foxpro Version 6*, which gave calculated values pertaining to electrical properties of the cell model as compared with experimental values. The process was repeated until the error percentile was in an acceptable range. The calculated parameters were the dielectric constants and the conductivities of the inner cytoplasm ($\epsilon_{ic}, \sigma_{ic}$), the outer cytoplasm ($\epsilon_{oc}, \sigma_{oc}$), the inner membrane ($\epsilon_{im}, \sigma_{im}$), the outer membrane ($\epsilon_{om}, \sigma_{om}$), the suspending solution (ϵ_s, σ_s) and the thickness of each layer (d_{om}, d_{oc}, d_{im}), respectively. This computer program provides estimated values of cell electrical properties with high accuracy and required minimal computational time.

Key words : dielectric dispersion, double-shell model, dielectrophoresis, computer program, dielectric constant, conductivity

Phuket Community College, Prince of Songkla University, Phuket Campus, Kathu, Phuket 83120, Thailand.

¹วท.ม.(ฟิสิกส์), ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ²วท.ม.(วิทยาการคอมพิวเตอร์), วิทยาลัยชุมชนภูเก็ต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เขตการศึกษาภูเก็ต อำเภอกะทู้ จังหวัด ภูเก็ต 83120

Corresponding e-mail: bsorawut@ratree.psu.ac.th

รับต้นฉบับ 28 พฤษภาคม 2547 รับลงพิมพ์ 23 สิงหาคม 2547

บทคัดย่อ

สรุติ บุญถวิล และ มณีรัตน์ บุญล้ำ
 การพัฒนารูปแบบจำลองเพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยว
 ทรงกลมเปลือกสองชั้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
 ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2548 27(2) : 393-416

ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกสองชั้น (Spherical Double Shell Model, SDM) โดยอาศัยสมการลาปลาซ (Laplace's equation) ตามระบบพิกัดทรงกลมและใช้เงื่อนไขขอบ (boundary conditions) คำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าและค่าไดอิเล็กทริกที่แต่ละบริเวณทั้งภายในและภายนอกเซลล์เพื่อคำนวณค่าส่วนจริงของฟังก์ชันความถี่ $[Re\{f(\omega)\}]$ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนบน *Visual Foxpro Version 6* แล้วคำนวณค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ด้วยวิธีเปรียบเทียบค่า $[Re\{f(\omega)\}]$ ที่คำนวณจากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการทดลอง โปรแกรมจะทำซ้ำจนกระทั่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่เหมาะสม ค่าที่คำนวณได้แก่ ค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึม (ϵ_{ic}) ของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน (ϵ_{im}) ของไซโทพลาสซึมชั้นนอก (ϵ_{oc}) ของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก (ϵ_{om}) สารละลายภายนอกเซลล์ (ϵ) ค่าสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม (σ_{ic}) ของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน (σ_{im}) ของไซโทพลาสซึมชั้นนอก (σ_{oc}) ของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก (σ_{om}) ของสารละลายภายนอกเซลล์ (σ) และความหนาแต่ละชั้น องค์ประกอบของเซลล์ (d_{om} , d_{oc} , d_{im}) ตามลำดับ เมื่อทดลองใช้โปรแกรมคำนวณดังกล่าว พบว่ามีความสะดวก รวดเร็วและแม่นยำ

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เป็นงานวิจัยที่มุ่งเน้นการตรวจสอบค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์บนพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนใหญ่เลือกใช้วิธีการกลศาสตร์ไฟฟ้า (electro-mechanics) (Marzalek *et al.*, 1991 Gimsa *et al.*, 1991 และ Radu *et al.*, 1996) ควบคู่กับวิธีไดอิเล็กทริกสเปกโทรสโคปี (dielectric spectroscopy) (Gheorghiu, 1996; Asami *et al.*, 1996 และ Asami, 2002) ทั้งสองวิธีมีข้อดีและข้อด้อย กล่าวคือ วิธีแรกใช้ศึกษากับเซลล์เดี่ยวและจำเป็นต้องใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง (กิโลโวลต์ต่อเมตร) เพื่อเหนี่ยวนำให้เซลล์เคลื่อนที่หรือหมุนตัว จึงมักเกิดปัญหาความร้อนขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าโดยเฉพาะที่ความถี่สนามไฟฟ้าย่านต่ำ มีวิธีหลีกเลี่ยงโดยการลดสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์แต่อาจส่งผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ (Schwan, 1988) ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลอง อาทิ ความเร็วเชิงเส้นการเคลื่อนที่และความเร็วเชิงมุมในการหมุนจะถูกนำไปคำนวณหาสมบัติทางไฟฟ้า (Mahaworasilpa *et al.*, 1994, 1996) สำหรับวิธีหลังใช้ศึกษากับกลุ่มเซลล์แขวนลอยและไม่จำเป็นต้องใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงแต่ต้องวัดค่าอิมพีแดนซ์เพื่อ

คำนวณค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์ จึงประสบปัญหาเรื่องการไหลไรซ์ของขั้วไฟฟ้าที่ความถี่สนามไฟฟ้าย่านต่ำ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม กระบวนการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีหลังมักใช้เวลาน้อยกว่าวิธีแรก ต่อมา Asami และคณะ (1996) ได้พัฒนาชุดอุปกรณ์ “สแกนนิ่งไดอิเล็กทริกไมโครสโคป” (scanning dielectric microscope) ที่มีหัววัดโดยตรงกับกลุ่มเซลล์เป้าหมาย ประกอบด้วย หัววัดไดอิเล็กทริก อิมพีแดนซ์มิเตอร์ และชุดไมโครคอมพิวเตอร์พร้อมซอฟต์แวร์ สามารถต่อพ่วงกับระบบประมวลผลคอมพิวเตอร์ ค่าต่างๆ ที่ได้จากการวัดจะถูกนำไปคำนวณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ทำขายในเชิงพาณิชย์ใช้เทคโนโลยีสูง ราคาค่อนข้างแพง เฉพาะชุดอิมพีแดนซ์มิเตอร์มีราคาสูงถึงเก้าแสนบาท (รุ่น HP 4285A Precision LCR Meter) จึงอาจไม่เหมาะกับการศึกษาเริ่มต้น

งานวิจัยนี้ จึงเสนออีกทางเลือกหนึ่งที่ประหยัดค่าใช้จ่ายกว่า เพราะเป็นวิธีการกลศาสตร์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ไม่จำเป็นต้องใช้หัววัดไดอิเล็กทริก แต่ต้องอาศัยข้อมูลบางส่วนเพื่อคำนวณค่าส่วนจริงของฟังก์ชันความถี่ ($Re\{f(\omega)\}$) ตามที่ Wanichapichart และคณะ (2002) ได้เสนอไว้ เท่า

ที่ผ่านมา แบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกหนึ่งชั้น (Spherical Single Shell Model, SSM) เหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพของเซลล์เซลล์สัตว์และโพรโทพลาสต์พืช (Gimsa *et al.*, 1991 และ Kaler and Jones, 1990) ขณะที่แบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกสองชั้น (Spherical Double Shell Model, SDM) เหมาะสมกับเซลล์สัตว์บางชนิดและเซลล์พืชที่มีผนังเซลล์ (Asami and Irimajiri, 1984) แบบจำลองทั้งสองที่กล่าวถือเป็นแบบจำลองพื้นฐาน มีจำนวนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายค่าขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง เช่น รูปทรงของเซลล์ และค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเซลล์ (ϵ_{eff}^*) รวมทั้งความเข้มสนามไฟฟ้าภายนอกเซลล์ (E_0) และภายในเซลล์ (E_1) แต่ยังไม่ได้นิพจน์ในรูปสมการที่ขึ้นกับค่า $Re[f(\omega)]$ ยังผลให้เกิดความลำบากต่อการคำนวณ แบบจำลองแรกจึงถูกนำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดย Bunthawin และคณะ (2003) เพื่อลดภาระการคำนวณค่า $Re[f(\omega)]$ ด้วยมือ อย่างไรก็ตาม โปรแกรมดังกล่าวใช้ได้กับเซลล์ที่มีลักษณะเข้ากับแบบจำลองที่เหมาะสมเท่านั้น อาทิ โพรโทพลาสต์จากใบสับปะรดจึงอาจไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเซลล์ที่มีเปลือกหุ้มมากกว่าหนึ่งชั้นได้

ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลอง SDM ให้มีพจน์ในรูปสมการ $Re[f(\omega)]$ แล้วเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณสมบัติทางไฟฟ้าจากสมการดังกล่าว เริ่มต้นทดลองใช้โปรแกรมนี้กับค่าสมมติ ต่อมาได้ทดลองกับเซลล์แพลงก์ตอนพืช *Chlorella sp.* (Wanichapichart *et al.*, 2002) ค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม ได้แก่ ค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมและของเยื่อหุ้มเซลล์ รวมถึงคำนวณความหนาแต่ละชั้นองค์ประกอบของเซลล์ตามลำดับ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์ถูกกำหนดด้วยปัจจัยทางกายภาพ (Asami *et al.*, 1996) เนื่องจากองค์ประกอบหลักภายในเซลล์ส่วนใหญ่ไม่เป็นรูปทรงเรขาคณิต จึงเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาแบบจำลองในระยะเริ่มต้น งานวิจัยนี้จึงจะรายละเอียดภายในและถือ

อนุโลมว่าไซโทพลาสซึมและนิวเคลียสที่อยู่ในแควคคิวโอลเป็นของเหลวเนื้อเดียวกันเช่นเดียวกับ Asami และ Irimajiri (1984) โดยกำหนดให้ไซโทพลาสซึมชั้นใน (inner cytoplasm, ic) เป็นศูนย์กลางของเซลล์ทรงกลมรัศมี R ที่ถูกห่อหุ้มด้วยเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน (inner membrane, im) ไซโทพลาสซึมชั้นนอก (outer cytoplasm, oc) และเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก (outer membrane, om) ตามลำดับใช้ระยะทางในแนวรัศมี r เป็นตัวกำหนดความหนาของแต่ละชั้น (Figure 1a) และให้ทุกองค์ประกอบเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อน (ϵ^*) ที่ต่างกัน แขนงลอยเซลล์ในสารละลายไดอิเล็กทริกที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าต่ำภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าแบบกระแสสลับคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้า (E) และศักย์ไฟฟ้า (Ψ) ภายในเซลล์จากผลเฉลยของสมการลาปลาซ (Laplace) พิกัดทรงกลมจากสมการของ Pohl (1978) ซึ่งมีค่าขึ้นกับระยะ r มุม θ และ ϕ (Figure 1b) ตามสมการบริเวณไซโทพลาสซึมชั้นใน:

$$\Psi_{ic} = A_{ic} r \cos\theta \tag{1}$$

บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน

$$\Psi_{im} = \left(A_{im} r + \frac{B_{im}}{r^2} \right) \cos\theta \tag{2}$$

บริเวณไซโทพลาสซึมชั้นนอก

$$\Psi_{oc} = \left(A_{oc} r + \frac{B_{oc}}{r^2} \right) \cos\theta \tag{3}$$

บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก

$$\Psi_{om} = \left(A_{om} r + \frac{B_{om}}{r^2} \right) \cos\theta \tag{4}$$

เมื่อค่า A_{ij} และ B_{ij} เป็นค่าที่หาจากเงื่อนไขขอบ (boundary conditons) (สมการ ๓1 - ๓13) แทนค่าเหล่านี้กลับในสมการข้างต้นเพื่อคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้า E_1 จากความสัมพันธ์ $E = -\nabla\Psi$ แล้วแทนลงในสมการ ϵ_{eff}^* จะได้

$$\epsilon_{eff}^* = \epsilon_{om}^* \left[\frac{2(1-V_1) + (1+2V_1)E_1}{(2+V_1) + (1-V_1)E_1} \right] \tag{5}$$

ตัวแปร V_1 และ E_1 เป็นไปตามสมการ ๓19 ในภาคผนวก เมื่อฟังก์ชันความถี่มีค่าขึ้นกับ ϵ_{eff}^* ตามสมการ

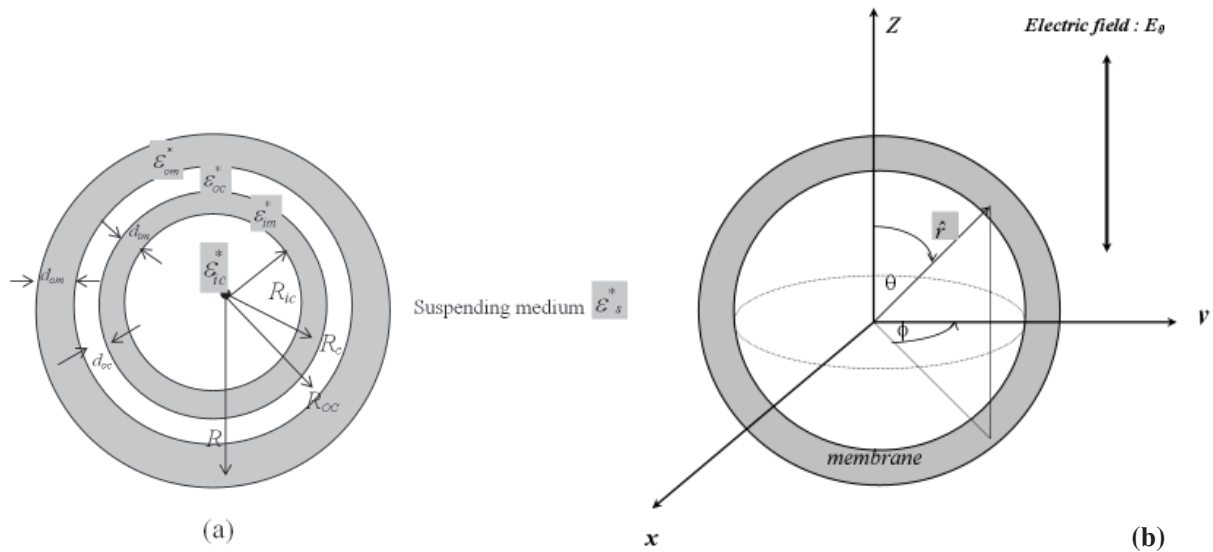


Figure 1. Spherical dielectric double shell model(SDM): (a) complex permittivity (ϵ_{ij}^*) for each phase. Subscripts (*ij*'s) have the following meanings: s, suspending medium; c, cytoplasm; m, membrane; i, internal compartment; and o, outer compartment. ϵ_{ic}^* , ϵ_{im}^* , ϵ_{oc}^* , ϵ_{om}^* and ϵ_s^* are the complex permittivities of the inner cytoplasm, the inner membrane, the outer cytoplasm, the outer membrane and the suspending medium, respectively. R and R_{ij} are the outer and the inner radius of the shell, d_{ij} is the thickness of the shell. when $\epsilon_{ij}^* = \epsilon_{ij} - j \frac{\sigma_{ij}}{\omega}$, where ϵ is the permittivity ($F m^{-1}$), σ is the conductivity ($S m^{-1}$), ω is the angular frequency of the electric field ($rad s^{-1}$), and j is the imaginary number equal $\sqrt{-1}$, (b) spherical-coordinate, where \hat{r} is the unit vector of the radius, θ and ϕ are the angles which measured respect to z -axis and x -y plane, respectively.

$$f(\omega) = \phi \left(\frac{\epsilon_{eff}^* - \epsilon_s^*}{\epsilon_{eff}^* + 2\epsilon_s^*} \right) \tag{6}$$

แทนสมการ (5) ลงในสมการ (6) และใช้ความสัมพันธ์ $\epsilon_{eff}^* = \epsilon_{eff} - j \frac{\sigma_{eff}}{\omega}$ (เมื่อ j คือจำนวนจินตภาพ และ ω คือความถี่เชิงมุมของสนามไฟฟ้า) แล้วแยกเขียนเฉพาะส่วนจริงจะได้

$$Re[f(\omega)] = Re\left[\phi \left(\frac{Z_1 Z_3 + Z_2 Z_4}{Z_3^2 + Z_4^2} \right)\right] \tag{7}$$

เมื่อ ϕ คือเศษส่วนปริมาตรเซลล์ (*volume fraction*) มีค่า 0.3 (สมการ ๓26) และตัวแปร Z มีค่าขึ้นกับค่าคงที่ใด-

อิเล็กทริก (ϵ) สภาพนำไฟฟ้า (σ) และความถี่ของสนามไฟฟ้า (สมการ ๓27)

$Re[f(\omega)]$ ตามสมการ (7) เป็นค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในขณะที่เดียวกันสามารถหาค่าได้ด้วยวิธีทางการทดลอง (Bunthawin *et al.*, 2003) หากพลอตค่าทั้งสองร่วมกันบนแกนกราฟเทียบกับความถี่ของสนามไฟฟ้า แล้วเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมการคำนวณค่า $Re[f(\omega)]$ จากแบบจำลองให้ลู่อเข้าสู่ค่าที่ได้จากการทดลองจนกระทั่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่ต่ำสุด ด้วยวิธีดังกล่าวจะหาค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมและของเยื่อหุ้มเซลล์ได้ในที่สุด

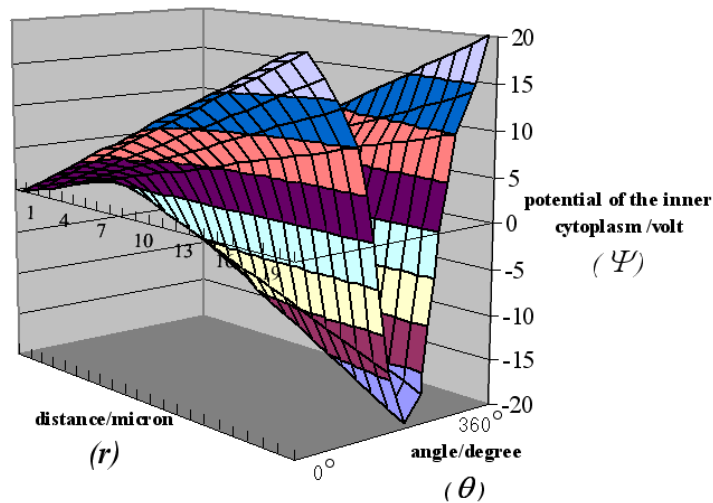


Figure 2. Three-dimensional field pattern of a potential in the inner cytoplasm. Calculations employ the parameters shown in Table 1.

วิธีทดลองและการคำนวณ

1. ศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์

พลอตศักย์ไฟฟ้าในแต่ละบริเวณภายในเซลล์จากสมการ (1) - (4) ในหน่วยโวลต์ เทียบกับระยะรัศมี r (distance) ในหน่วยไมครอน และมุม θ (angle) มีขีดจำกัดจาก 0 ถึง ± 90 องศา คำนวณเทอม A_{ij} และ B_{ij} จากสมการ ภา 13ก (ดูภาคผนวก) โดยอิงค่าตัวแปรต่างๆ ตาม Table 1 ได้ผลการคำนวณดังตัวอย่างศักย์ไฟฟ้าภายในไซโทพลาสซึมชั้นใน (Figure 2)

2. สเปกตรัมไดโพลีโทรโพเรซิส

คำนวณค่า $Re[f(\omega)]$ (สมการ 7) จากข้อมูลใน Table 1 แล้วพลอตสเปกตรัมไดโพลีโทรโพเรซิสของ $Re[f(\omega)]$ (Bunthawin *et al.*, 2003) บนแกนกราฟสเกลล็อกกาลีรีมในช่วงความถี่ระหว่าง 10 เฮิรตซ์ - 100 เมกะเฮิรตซ์ ย่านเบต้าดิสเพอซัน (β -dispersion) (Schwan, 1988) ทดลองปรับเปลี่ยนค่าไดโพลีทริกและสภาพนำไฟฟ้า (Figure 3) ความหนาขององค์ประกอบแต่ละชั้นและรัศมีเซลล์ (Figure 4) เพื่อศึกษาผลกระทบจากอิทธิพลของตัวแปร และเปรียบเทียบเส้นสเปกตรัมกับแบบจำลอง SSM (Figure 5a) แล้วพลอตเปรียบเทียบค่า $Re[f(\omega)]$ ที่ได้

จากการทดลองกับเซลล์ *Chlorella sp.* (Wanichapichart *et al.*, 2002) (Figure 5b)

3. ไดโพลีทริกดิสเพอซัน

เขียนสมการ (5) ในรูปปริมาณเชิงซ้อน เพื่อแยกส่วนจริง (ϵ_{eff}) ออกจากส่วนจินตภาพ ($\frac{\sigma_{eff}}{\omega}$) ส่วนจริงแสดงถึงค่าไดโพลีทริก มีค่าแปรผกผันกับความถี่ ส่วนจินตภาพแสดงถึงสภาพนำไฟฟ้า มีค่าแปรตามความถี่ของสนามไฟฟ้าแบบไม่เชิงเส้น คำนวณค่าทั้งสอง (สมการ ภา 19 - ภา 25) จากข้อมูลใน Table 1 แล้วพลอตบนแกนกราฟสเกลล็อกกาลีรีมร่วมกัน ในช่วงความถี่ย่านเบต้าดิสเพอซัน (Figure 6)

วัสดุและอุปกรณ์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณค่าคงที่ทางไฟฟ้าและสมบัติไดโพลีทริก

เขียนโปรแกรมคำนวณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ "DSM" (double shell model) ตามแบบจำลอง SDM (สมการ 7) ลงบนไมโครคอมพิวเตอร์ (Microchip, RAM 128 MB, CPU Pentium 800 MHz, HDD 20 GB,

Table 1. Summary of the permittivities and conductivities of the cytoplasm, the membrane and the suspending medium for SDM and SSM models.

Parameters / units	Model		Figures
	SDM	SSM	
$\left. \begin{matrix} \epsilon_{ic} \\ \epsilon_{im} \\ \epsilon_{oc} \\ \epsilon_{om} \\ \epsilon_s \end{matrix} \right\} / \text{F m}^{-1}$	$60\epsilon_0$	$60\epsilon_0$	Fig. 3, 4, 5, 6 and 9
	$8\epsilon_0$	$10\epsilon_0$	Fig. 3, 4, 5, 6 and 9
	$60\epsilon_0$	-	Fig. 3, 4, 5, 6 and 9
	$8\epsilon_0$	-	Fig. 3, 4, 5, 6 and 9
	$80\epsilon_0$	$80\epsilon_0$	Fig. 3, 4, 5, 6 and 9
$\left. \begin{matrix} \sigma_{ic} \\ \sigma_{im} \\ \sigma_{oc} \\ \sigma_{om} \\ \sigma_s \end{matrix} \right\} / \text{S m}^{-1}$	0.1	0.1	Fig. 3, 4, 5, 6 and 9
	0.1μ	0.1μ	Fig. 3, 4, 5, 6 and 9
	0.1	-	Fig. 3, 4, 5, 6 and 9
	0.5μ	-	Fig. 3, 4, 5, 6 and 9
	0.05	0.05	Fig. 3, 4, 5, 6 and 9
$\left. \begin{matrix} R \\ R_{ic} \\ d_{im} \\ d_{oc} \\ d_{om} \\ \delta \end{matrix} \right\} / \mu\text{m}$ $\left. \begin{matrix} d_{oc} \\ d_{om} \end{matrix} \right\} / \text{nm}$	20	20	Fig. 2, 3, 4, 5, 6 and 9
	19.97	-	Fig. 2, 3, 4, 5, 6 and 9
	10	-	Fig. 2, 3, 4, 5, 6 and 9
	15	-	Fig. 2, 3, 4, 5, 6 and 9
	10	-	Fig. 2, 3, 4, 5, 6 and 9
δ	-	10	Fig. 5 and 9*
$\left. \begin{matrix} \epsilon_{ic}^* \\ \epsilon_{im}^* \\ \epsilon_{oc}^* \\ \epsilon_{om}^* \end{matrix} \right\} / \text{F m}^{-1}$	5.31×10^{-10}	-	Fig. 2
	8.85×10^{-11}	-	Fig. 2
	5.31×10^{-10}	-	Fig. 2
	8.85×10^{-11}	-	Fig. 2
E_0 / kV m^{-1}	40	40	Fig. 2*

* for details see Mahaworasilpa *et al.*, 1994

Note: ϵ_0 is the permittivity of the free space = 8.85×10^{-12} F m⁻¹

Taiwan) ตามแผนภาพ (Figure 7) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Visual Foxpro Version 6 โดยแบ่งโปรแกรมเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วน Application: dsm.exe ใช้เนื้อที่หน่วยความจำ 138 KB ส่วน Application extension: Vfp6r.dll ใช้เนื้อที่หน่วยความจำ 855 KB และ Vfp6renu.dll ใช้เนื้อที่หน่วยความจำ 3.21 MB รวมเนื้อที่หน่วยความจำทั้งหมด ประมาณ 3.21 MB สำหรับส่วน Application จะต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นเพื่อเริ่มกระบวนการทำซ้ำและคำนวณค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่แต่ละความถี่สนามไฟฟ้า

จนครบทุกค่าที่กำหนด (Figure 8) แล้วทำซ้ำจนกระทั่งได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนตามที่กำหนดและเหมาะสม (Bunthawin *et al.*, 2003) ในแต่ละรอบการทำซ้ำ โปรแกรมจะปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวอย่างต่อเนื่องแบบอัตโนมัติด้วยค่าพิสัย (Range) เพื่อใช้ในการคำนวณรอบถัดไป อาศัยหลักผลกระทบจากอิทธิพลของตัวแปรต่อสเปกตรัมไดอิเล็กโทรโพเรซิส (Figure 3, 4) เพื่อกำหนดลำดับขั้นในการปรับเปลี่ยนค่า งานวิจัยนี้เรียงลำดับก่อนหลังดังนี้ d_{om} d_{im} d_{oc} σ_{om} σ_{oc} σ_{im} σ_{ic} ϵ_{om}

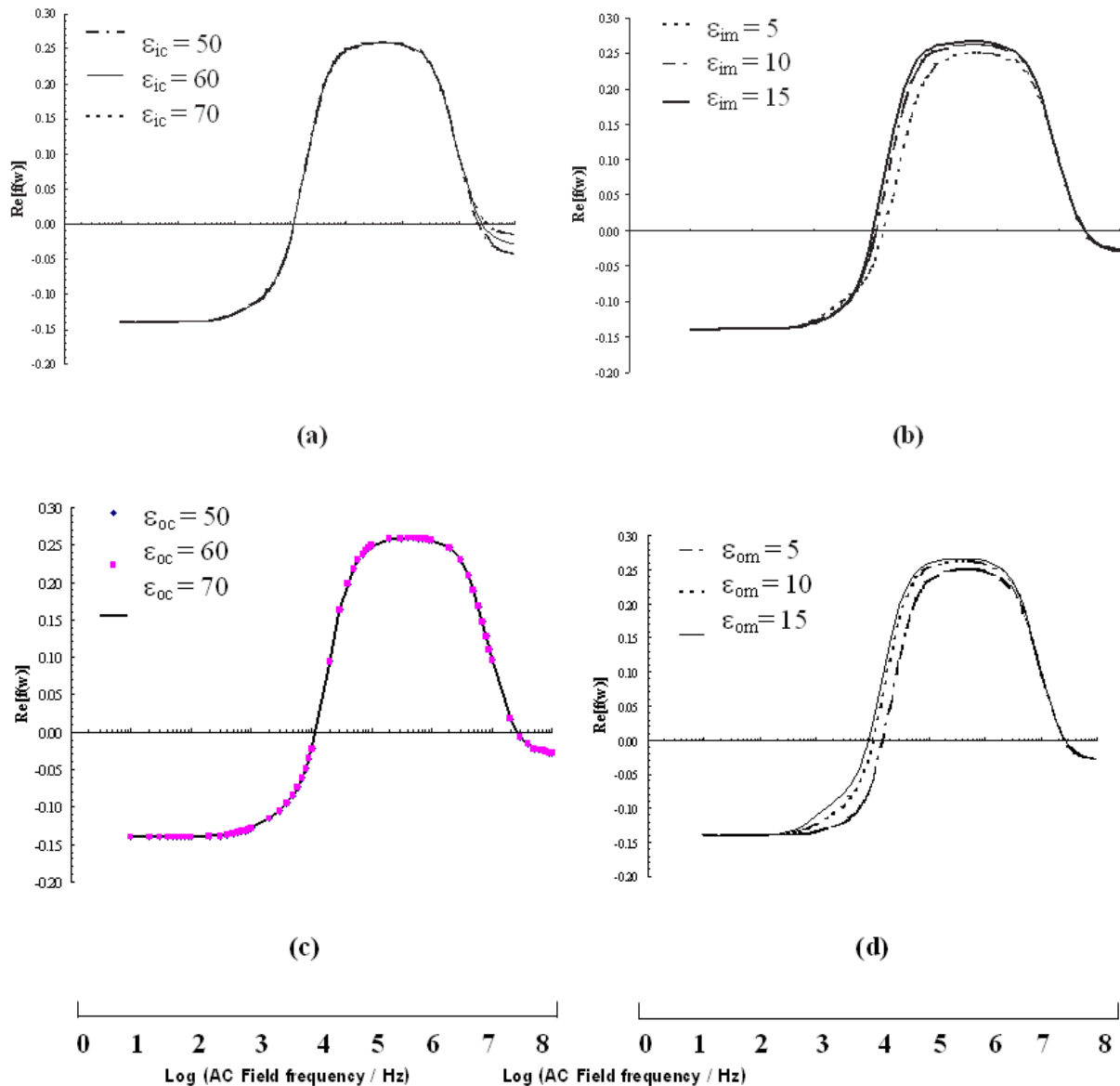


Figure 3. Theoretical plots of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the permittivities (a, b, c and d) and conductivities (e, f, g and h) of the inner cytoplasm, the inner membrane, the outer cytoplasm and the outer membrane, respectively. The solid lines were plotted using the parameters shown in Table 1.

ϵ_{oc} , ϵ_{im} และ σ_{ic} ตามลำดับ นอกจากนี้โปรแกรมจะแสดงเวลาในการคำนวณทั้งหมดตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการคำนวณ (ค่าละเอียดสุดในหน่วยวินาที) และแสดงจำนวนผลเฉลยทั้งหมด (ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์) ที่อยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่กำหนด

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. แบบจำลอง SDM

จากลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองที่เป็นทรงกลม พบว่าศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์มีค่าขึ้นกับระยะรัศมี r

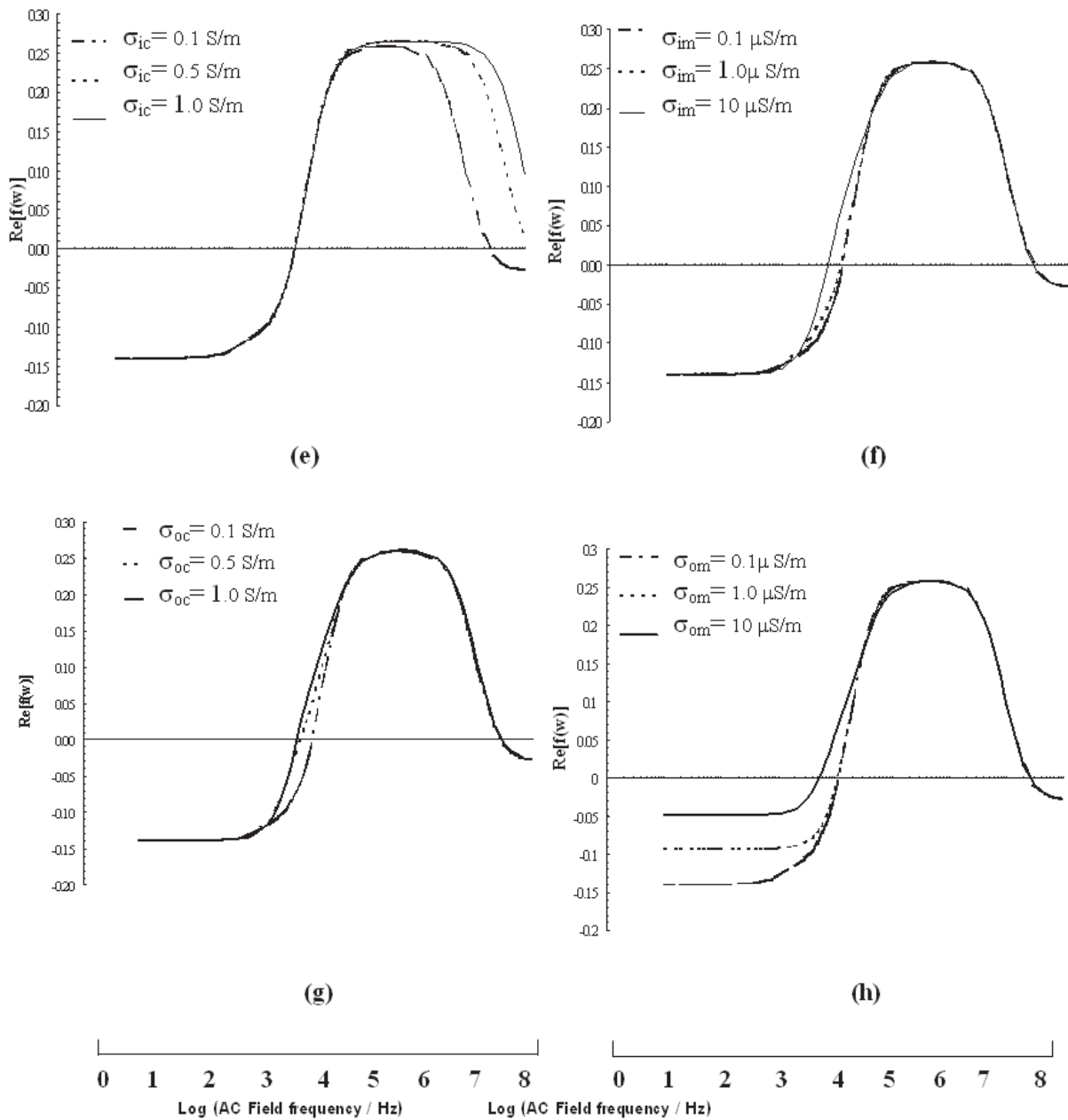


Figure 3. (Continued)

และมุม θ (Figure 1a, 1) กล่าวคือ ที่จุดศูนย์กลางเซลล์ จะมีศักย์เป็นศูนย์และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะค่านวณ มีค่าสูงสุดบริเวณใกล้เยื่อหุ้มเซลล์แนวมุม $\theta = 0$ องศา และจะน้อยลงถ้ามุมมากขึ้นตามลำดับ โดยเฉพาะที่มุม 180 องศา ค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าติดลบสูงสุด (Figure 2) เมื่อ

พลอตกราฟในลักษณะเดียวกันกับที่บริเวณอื่นของเซลล์ พบว่าคล้ายคลึงกัน แตกต่างเพียงแอมพลิจูดของศักย์ไฟฟ้า ที่มีค่าสูงกว่าบริเวณภายในไซโทพลาสซึม

เมื่อคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าจากความชันกราฟของศักย์ไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง (Figure 2) พบว่า

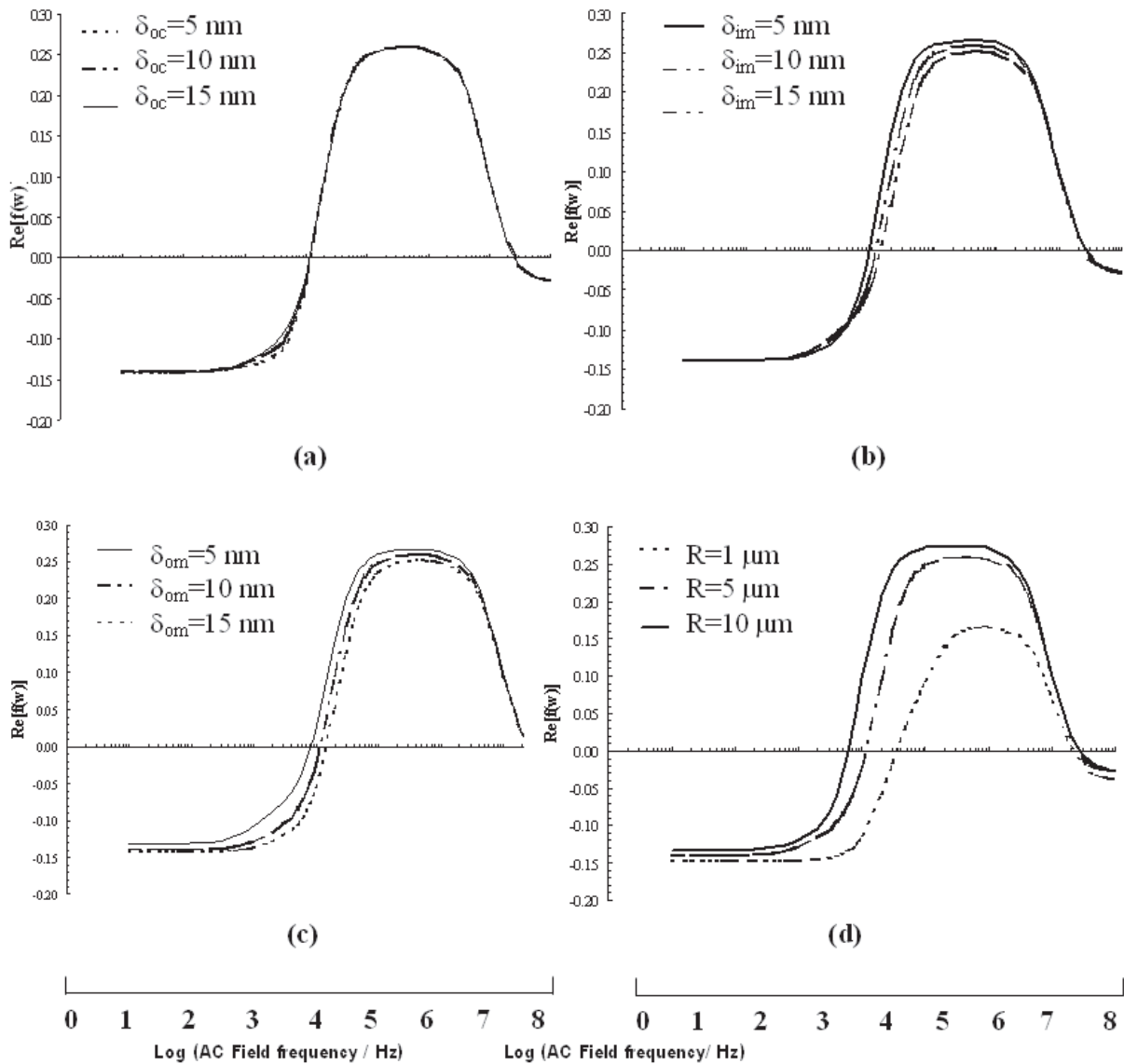
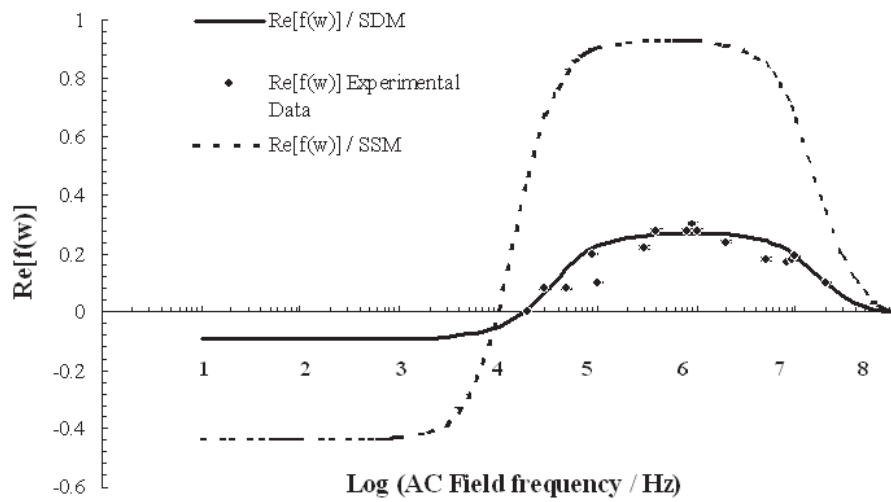


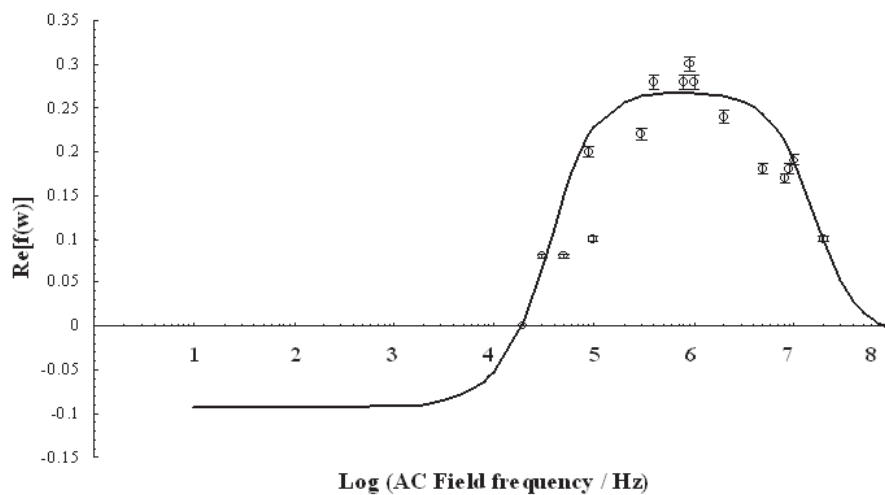
Figure 4. Theoretical plots of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the thickness of the shells (a, b and c) and the outer radius (d). The solid lines were plotted using the parameters shown in Table 1.

ที่บริเวณไซโทพลาสซึมชั้นในมีค่า 12.5 กิโลโวลต์ เมตร⁻¹ ที่เยื่อหุ้มเซลล์ชั้นในมีค่า 70 กิโลโวลต์ เมตร⁻¹ และที่ไซโทพลาสซึมชั้นนอกมีค่า 25 กิโลโวลต์ เมตร⁻¹ ตามลำดับ ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงเช่นนี้ น่าจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะเด่นของสมบัติไดอิเล็กทริกโดยเฉพาะภายในเยื่อหุ้มเซลล์

ลักษณะโดยรวมของสเปกตรัมไดอิเล็กโตรโพเรซิสที่พลอตในช่วงความถี่ 10 เฮิรตซ์ ถึง 100 เมกะเฮิรตซ์ มีความคล้ายคลึงกับสเปกตรัมที่พลอตจากแบบจำลอง SSM กล่าวคือ เหมือนกันในเรื่องของรูปทรงกราฟ เพราะมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ มีฐานกราฟ 2 บริเวณ บริเวณหนึ่งอยู่ที่ความถี่ย่านต่ำมักมีค่าติดลบ (ฐานกราฟความถี่



(a)



(b)

Figure 5. Comparing $Re[f(\omega)]$, which is obtained from the (a) theoretical SDM, SSM (interrupted line) and experimental values(o) for *Chlorella* sp. (b) The solid - line was plotted using the following parameters:

$$\begin{aligned} \epsilon_{ic} &= 75, \epsilon_0, \epsilon_{im} = 30, \epsilon_0, \epsilon_{oc} = 40, \epsilon_0, \epsilon_{om} = 30, \epsilon_0, \epsilon_s = 80 \text{ (F m}^{-1}\text{)} \\ \sigma_{ic} &= 0.2, \sigma_{im} = 1\mu, \sigma_{oc} = 0.1, \sigma_{om} = 15\mu, \sigma_s = 0.003 \text{ (S m}^{-1}\text{)} \\ R &= 1 \mu\text{m and } d_{im} = 8, d_{oc} = 10, d_{om} = 10 \text{ (nm)}. \end{aligned}$$

ต่ำ) และอีกบริเวณอยู่ที่ความถี่ย่านสูง (ฐานกราฟความถี่สูง) จุดสูงสุดของกราฟ (ยอดกราฟ) มีจุดวกกลับอยู่ที่บริเวณความถี่สนามไฟฟ้าย่านกลาง เป็นที่สังเกตว่าภายใต้

เงื่อนไขเดียวกัน แอมพลิจูดของสเปกตรัมไดโอดเล็กโทรโพเรซิสของแบบจำลอง SSM จะมีค่าสูงกว่าของแบบจำลอง SDM อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (Figure 5a) ทำให้แบบ

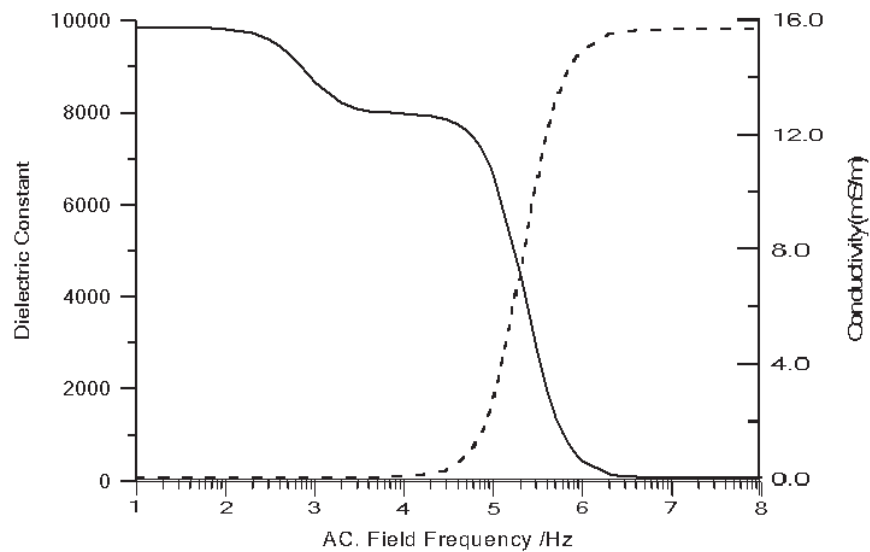


Figure 6. Theoretical plots between of relative permittivity, ϵ , (solid line) and conductivity, σ , (interrupted line) predictable from the SDM. (see also Figure 9)

จำลอง SDM มีลักษณะสอดคล้องกับสเปกตรัมไดโพลิก ไทรฟอเรซิสของเซลล์ *Chlorella* sp. มากกว่าแบบจำลอง SSM (Figure 5b) ซึ่งสมเหตุสมผลเพราะเซลล์ดังกล่าวมีผนังเซลล์มากกว่าหนึ่งชั้น (Hills and Nakamura, 1978) การพลอตกราฟเพื่อเปรียบเทียบขนาดของ $\text{Re}[f(\omega)]$ จากทั้งสองแบบจำลองเช่นนี้ เท่าที่ผู้วิจัยทราบในขณะนี้ยังไม่มีงานวิจัยอื่นรายงานผลไว้ ส่วนใหญ่จะเปรียบเทียบเฉพาะขนาดของไดโพลิกทริกดิสเพชัน (Asami *et al.*, 1996) จึงอนุมานได้ว่าขนาดของไดโพลโมเมนต์ที่ถูกเหนี่ยวนำภายในเซลล์ตามแบบจำลอง SSM จะมีค่ามากกว่าของ SDM เสมอภายใต้เงื่อนไขที่คล้ายคลึงกัน (Table 1)

เมื่อทดลองปรับเปลี่ยนค่าไดโพลิกทริกของไซโทพลาสซึมชั้นนอก (ϵ_{oc}) (Figure 3) ในช่วง 50-70 เท่าของไดโพลิกทริกของสัณฐานอากาศ พบว่าไม่ปรากฏผลกระทบเด่นชัด แสดงว่า ϵ_{oc} เป็นพารามิเตอร์ที่มีความไวต่ำและมีผลต่อการเกิดไดโพลโมเมนต์น้อยมาก หากปรับค่าสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมชั้นใน (σ_{ic}) ในช่วง 0.1-1 ซีเมนส์ เมตร⁻¹ พบว่าจะส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมในช่วงความถี่สูง (บริเวณไหล่กราฟ) กล่าวคือ ถ้า σ_{ic} มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้สเปกตรัมขยับตัวเลื่อนไปที่ความถี่สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น ทำให้ขอบเขตความถี่สนามไฟฟ้าสูง $f(EDS)$ (Bunthawin *et al.*, 2003) ขยับตามเลื่อนไปที่

ความถี่สูงด้วยเช่นกัน และในทำนองคล้ายกัน เมื่อทดลองปรับเปลี่ยนค่าสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมชั้นนอก (σ_{om}) ในช่วง 0.1-10 ไมโครซีเมนส์ เมตร⁻¹ พบว่าส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมในช่วงความถี่ต่ำ (บริเวณฐานกราฟ) กล่าวคือ ถ้า σ_{om} มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ฐานของสเปกตรัมขยับตัวเลื่อนไปที่ความถี่สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น รวมทั้งทำให้ขนาดของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ขยับตัวให้ค่าบวกสูงขึ้น ส่งผลให้ขอบเขตความถี่สนามไฟฟ้าต่ำ $f_0(EDS)$ ขยับตามเลื่อนไปที่ความถี่สูงด้วยเช่นกัน สำหรับผลกระทบของค่าไดโพลิกทริกของไซโทพลาสซึมชั้นใน (ϵ_{ic}) จะส่งผลเฉพาะที่บริเวณฐานสเปกตรัมความถี่สูง กล่าวคือถ้า ϵ_{ic} มีค่ามากขึ้น จะทำให้ฐานสเปกตรัมขยับตัวเพิ่มแอมพลิจูดเป็นบวกเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อ $f_0(EDS)$ เพียงเล็กน้อย

หากปรับเปลี่ยนค่ารีซีเชลล์ พบว่าส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมในช่วงความถี่ต่ำ (บริเวณฐานกราฟและไหล่กราฟ) กล่าวคือ รีซีเชลล์มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ไหล่ของสเปกตรัมที่ความถี่ต่ำขยับตัวเลื่อนไปที่ความถี่สนามไฟฟ้าที่ต่ำลง ทำให้ขนาดของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ขยับตัวให้ค่าบวกสูงขึ้น ส่งผลให้ขอบเขตความถี่สนามไฟฟ้าต่ำ ขยับตามเลื่อนไปที่ความถี่ต่ำลงด้วยเช่นกัน เป็นที่สังเกตว่ารีซีเชลล์ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมบริเวณฐานกราฟความถี่ต่ำเช่นกันแต่มีนัยสำคัญน้อย ซึ่งเป็นไป

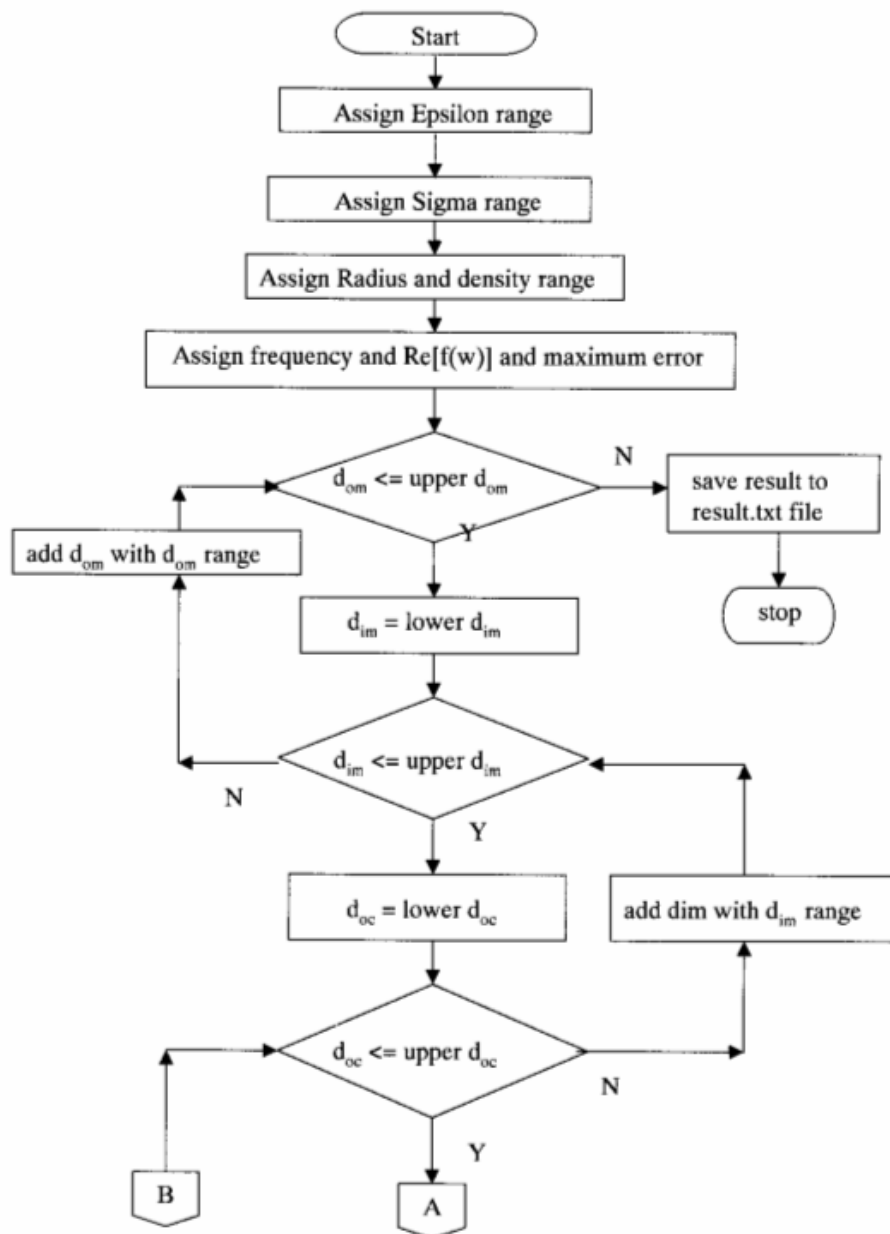


Figure 7. The calculation of the values of d_{om} , d_{im} , d_{oc} , σ_{om} , σ_{oc} , σ_{im} , σ_{ic} , ϵ_{om} , ϵ_{oc} , ϵ_{im} , and ϵ_{ic} on the Visual Foxpro Version 6

ในลักษณะเดียวกับการปรับเปลี่ยนความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ภายนอก ค่าไดโพลีกริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก (ϵ_{oc}) และสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ภายนอก (σ_{im}) ตามลำดับ แต่กรณีของรัศมีเซลล์มีผลกระทบที่เด่นชัดกว่าสามกรณีหลัง (Figure 3, 4)

Figure 4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อทดลองเปลี่ยนค่าความหนาของไซโทพลาสซึมชั้นนอก (d_{oc}) พบว่ามีผลกระทบต่อสเปกตรัมเฉพาะที่จุดวงกลับของฐานกราฟความถี่ต่ำเท่านั้น กล่าวคือ ถ้าความหนามีค่ามากจะส่งผลให้สเปกตรัมขยับเลื่อนไปที่ความถี่สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น

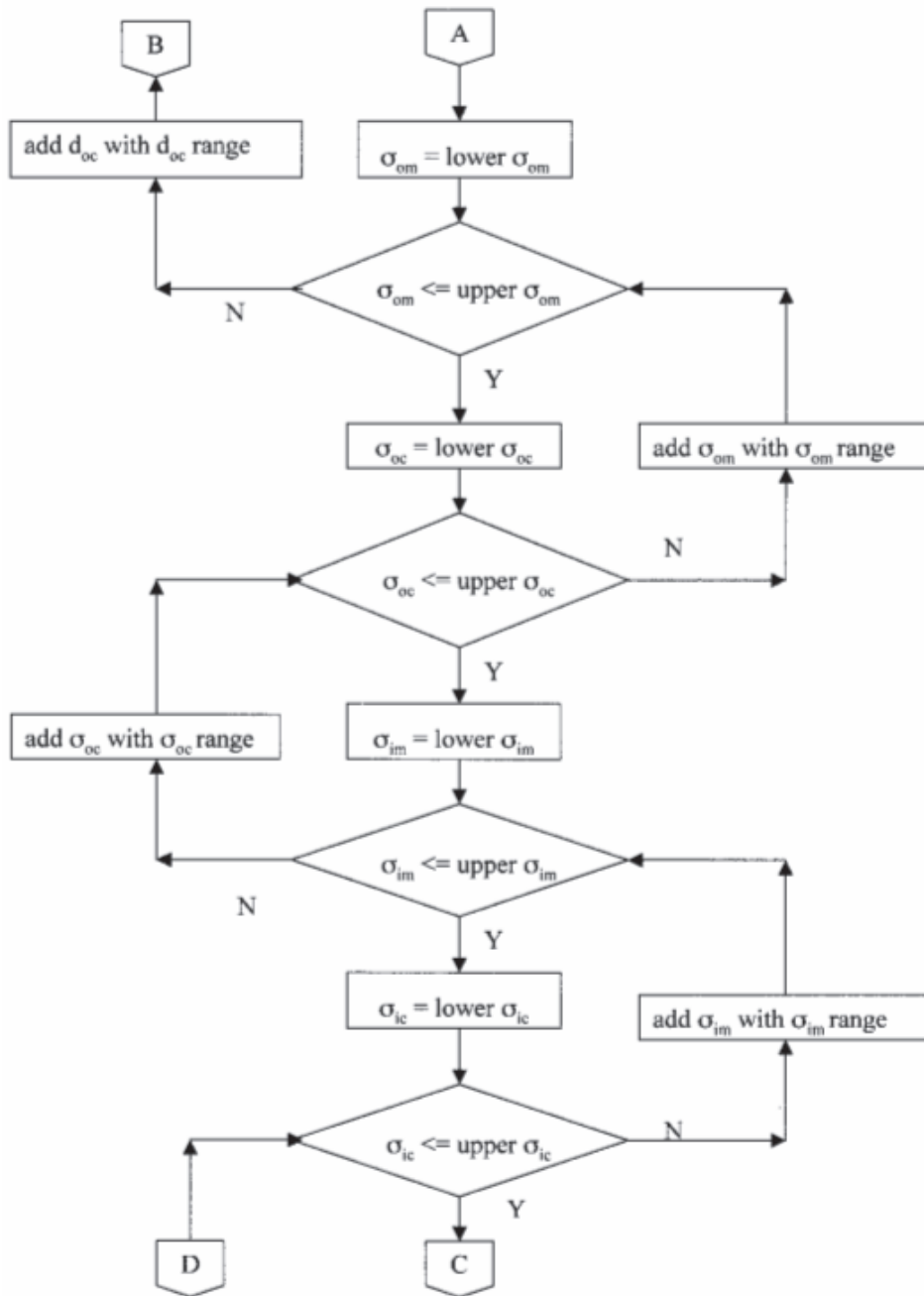


Figure 7. (Continued)

(เล็กน้อย) สำหรับความหนาเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน (d_{im}) พบว่าส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมในช่วงความถี่ย่านต่ำ (บริเวณฐานกราฟ) กล่าวคือ ถ้า d_{im} มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ไหล่ของสเปกตรัมที่ความถี่ย่านต่ำขยับตัวเลื่อนไปที่ความถี่

สนามไฟฟ้าที่ต่ำลง ทำให้ขนาดของ $Re[f(\omega)]$ ขยับตัวให้ค่าบวกสูงขึ้น ส่งผลให้ขอบเขตความถี่สนามไฟฟ้าย่านต่ำขยับตามเลื่อนไปที่ความถี่ย่านต่ำลงด้วยเช่นกัน

Figure 6 แสดงการดิสเพนชันของค่าไดโพลีกริก



Figure 7. (Continued)

ของเซลล์เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า เมื่อพิจารณารูปทรงของกราฟพบว่า มีลักษณะลดหลั่นเป็น 2 ระดับตามความถี่สนามไฟฟ้า กล่าวคือ ค่าไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดน้อยลงถ้าความถี่สนามไฟฟ้าสูงขึ้น ระดับแรกเกิดขึ้นที่ความถี่สนามไฟฟ้าย่านต่ำ และระดับสองเกิดขึ้นที่ความถี่สนามไฟฟ้า

ย่านสูง จำนวนระดับขึ้นดังกล่าวน่าจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับจำนวนชั้นเยื่อหุ้มเซลล์ (Schwan, 1988) ซึ่งแตกต่างจากกรณีของแบบจำลอง SSM (Figure 9) ข้อมูลจากผลกระทบต่างๆ เหล่านี้มีประโยชน์เพราะสามารถนำไปกำหนดลำดับชั้นเพื่อเขียนโปรแกรมคำนวณคอมพิวเตอร์

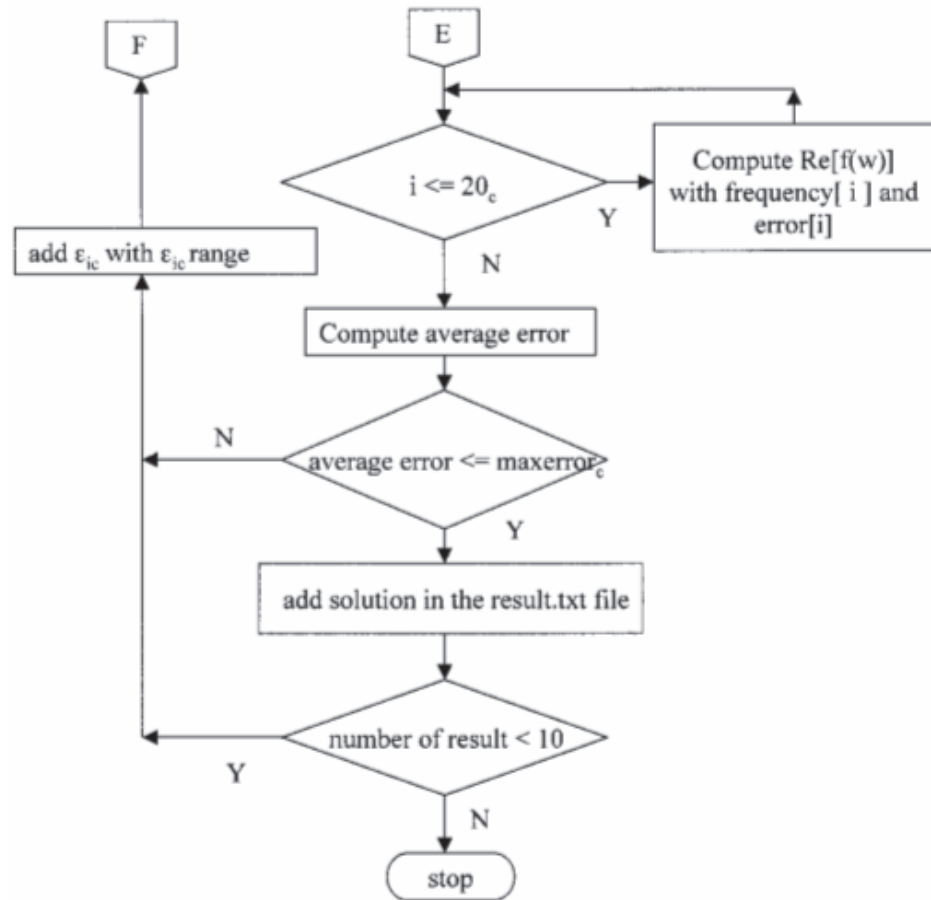


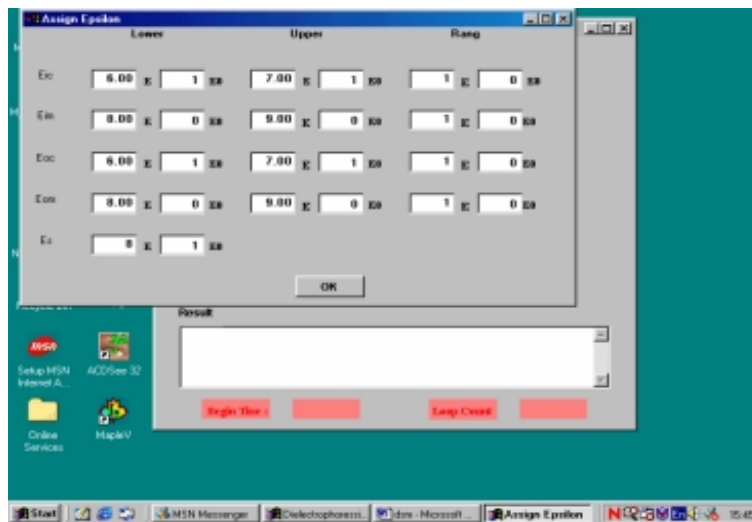
Figure 7. (Continued)

2. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ DSM

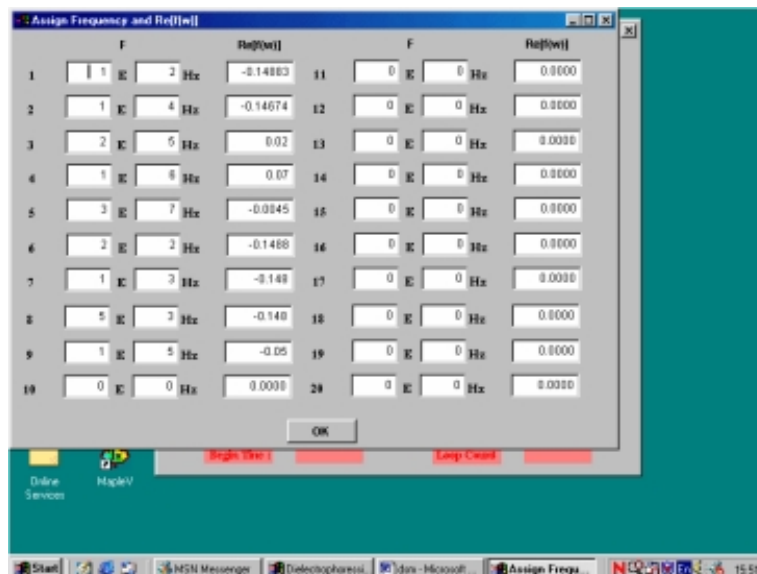
ผลจากการทดลองใช้โปรแกรมพบว่าหน่วยประมวลผลของคอมพิวเตอร์ใช้เวลาในการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้าน้อยมาก เฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 2-300 วินาที (นับจากเวลาที่โปรแกรมเริ่มทำซ้ำ) ทั้งนี้ขึ้นกับคุณสมบัติด้านความเร็วของหน่วยประมวลผลคอมพิวเตอร์ ค่าพิสัย รวมถึงการกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เริ่มต้น กล่าวเป็นลำดับดังนี้คือ ถ้ากำหนดค่าพิสัยให้มีค่าน้อยจะใช้เวลาคำนวณนาน ทั้งนี้เพราะในแต่ละรอบการทำซ้ำ ค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปทีละน้อยจะส่งผลให้โปรแกรมต้องทำซ้ำด้วยจำนวนรอบมากขึ้น ซึ่งเป็นผลต่อการคำนวณเพราะค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จะมีแนวโน้มให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยมากยิ่งขึ้น และในทางกลับกันจะเป็นไปในทางตรงกันข้าม ใน

กรณีที่กำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อย จะใช้เวลาคำนวณนานเช่นกัน เพราะโดยปกติค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเริ่มต้นก่อนที่การทำซ้ำจะเกิดขึ้นมักมีค่าสูงอยู่ก่อนแล้ว หากจะทำให้ค่าดังกล่าวลดน้อยลงต้องใช้เวลา เพราะโปรแกรมต้องทำซ้ำด้วยจำนวนรอบมากขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่น้อยเป็นผลดีเพราะผลการคำนวณจะมีความแม่นยำสูง นอกจากนี้หากกำหนดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เริ่มต้นที่มีค่าห่างจากความเป็นจริงมาก จะใช้เวลาคำนวณนานขึ้นเช่นกัน

โดยปกติการกำหนดค่าพิสัยของพารามิเตอร์แต่ละตัวมีค่าต่างกันและมีขีดจำกัด ค่านิ่งตามความเหมาะสม อาทิ ของค่าไดโอดเล็กทริกควรจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของค่าไดโอดเล็กทริกของสุญญากาศ และของสภาพนำไฟฟ้าควรจะมีค่าที่เป็นจำนวนจุดทศนิยมน้อยจุดเป็นเลขของตัว และเป็น



(a)



(b)

Figure 8. An example of simulation of the calculating process by *Visual Foxpro Version 6* on microcomputer to compile each electrical parameter: (a) dielectric constants and (b) field frequency.

ไปในทำนองเดียวกันกับการกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดและค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เริ่มต้น ซึ่งควรกำหนดให้มีค่าน้อยไว้ก่อน หากผลการคำนวณไม่สอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์ที่กำหนด จึงค่อยเพิ่มค่าขึ้น ซึ่งในงาน

วิจัยนี้ได้ สามารถปรับเปลี่ยนค่าพิสัยและค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดได้เป็นช่วงเปิดขึ้นกับผู้ใช้ นอกจากนี้การป้อนค่า $Re[f(\omega)]$ ให้แก่โปรแกรมควรคำนึงถึงการกระจายของข้อมูลให้ครอบคลุมทุกย่านความถี่ที่ทดลองตั้งแต่อยาน

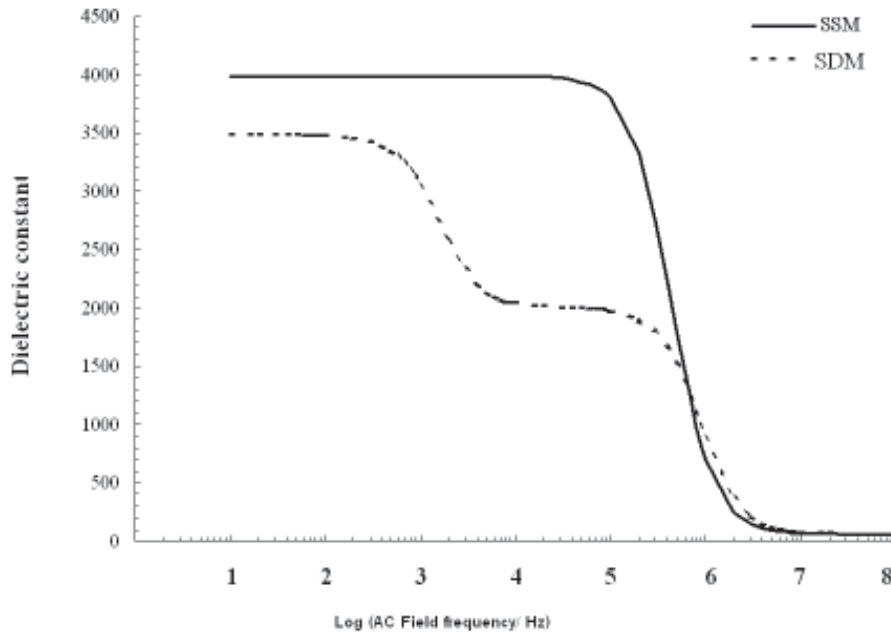


Figure 9. Theoretical plots between of dielectric constant predictable from the SSM (solid line) and the SDM (interrupted line).

ความถี่ต่ำสุด ย่านกลางจนถึงย่านสูงสุด โดยเฉพาะที่ $f_0(EDS)$ และ $f(EDS)$ เพราะเป็นความถี่ที่กำหนดช่วงการเกิดไดอิเล็กทริกโพเรซิสแบบบวก แต่อย่างไรก็ดี ไม่ว่าผู้ทดลองใช้โปรแกรมจะคำนึงถึงหลักการดังกล่าวข้างต้นหรือไม่ จะไม่ส่งผลต่อความเที่ยงตรงของผลการคำนวณ

สรุป

ผลจากการพัฒนาแบบจำลองพบว่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทุกตัวมีอิทธิพลต่อศักย์ไฟฟ้าและสเปกตรัมไดอิเล็กทริกโพเรซิสแตกต่างกันตามลำดับความสำคัญ ส่งผลให้การเกิดดิสเพนชันมีลักษณะต่างจากแบบจำลอง SSM อย่างเห็นได้ชัด ยังผลให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ แต่ข้อมูลที่รับจากพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเหล่านี้กลับน่าสนใจกว่า เพราะสามารถนำไปกำหนดลำดับชั้นเพื่อเขียนโปรแกรมคำนวณให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โปรแกรมคำนวณที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จึงมีความสะดวก รวดเร็วและแม่นยำ ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับแบบจำลองของเซลล์ สามารถติดตั้งโปรแกรมดังกล่าวได้กับไมโครคอมพิวเตอร์ที่มี CPU ตั้งแต่ 486 ขึ้นไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากเงินรายได้ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครอบคลุมไป ประจำปี 2546 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้อำนวยการวิทยาลัยชุมชนภูเก็ต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อนุญาตให้ใช้เวลา สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.พิกุล วนิชชาติภาชาติ หน่วยวิจัยชีวฟิสิกส์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เป็นอย่างสูงสำหรับคำชี้แนะที่มีค่ายิ่ง ขอขอบคุณอาจารย์ชุตติมา ต่อเจริญ วิทยาลัยชุมชนภูเก็ต สำหรับความช่วยเหลือเรื่องคณิตศาสตร์ในงานวิจัย Mr.Nathan Phillips สำหรับการจัดเตรียมต้นฉบับ คุณชาญชัย บำรุงศรี สำหรับความชำนาญด้านการซ่อมบำรุงและติดตั้งคอมพิวเตอร์ คุณนิภา รักษาราช สำหรับงานด้านเอกสาร และขอขอบคุณศาสตราจารย์ Herbert Pohl และศาสตราจารย์ Koji Asami สำหรับองค์ความรู้แบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์ที่ท่านได้ให้ไว้ เป็นวิทยาทาน

เอกสารอ้างอิง

- Asami, K. and Irimajiri, A. 1984. Dielectric analysis of mitochondria isolated from rat liver II. Intact mitochondria as simulated by a double - shell model. *Biochim. Biophys. Acta*, 778: 570-578.
- Asami, K., Yonezawa, T., Wakamatsu, H. and Koyanagi, N. 1996. Dielectric spectroscopy of biological cell. *J. Bioelectrochem. Bioenerg.*, 40: 141-145.
- Asami, K. 2002. Characterization of biological cells by dielectric spectroscopy. *J. Non-Crystal Solids*, 305: 268-277.
- Balanis, C.A. 1989. *Advanced engineering electromagnetics*. New York : John Wiley & Son.
- Bunthawin, S., Butrat, P. and Boonlamp, M. 2003. Development of a computer program to investigate electrical properties of Phuket pineapple leaf single cells by using dielectrophoresis. *Songklanakarín J. Sci. Technol*, 25(2): 227-237.
- Hills, C. and Nakamura, H. 1978. *Food from Sunlight*. California: University of Trees press.
- Jan Gimsa, Piotr Marszalek, Ulrike Loewe and Tian Tsong. 1991. Dielectrophoresis and electro-rotation of neurospora slime and murine myeloma cells. *Biophys. J.*, 60: 749-760.
- Kaler, K.V.I.S. and Jones, T.B. 1990. Dielectrophoretic spectra of single cells determined by feedback-controlled levitation. *Biophys. J.*, 57: 173-182.
- Marszalek, P., Zienlinsky, J.J., Fikus, M. and Tian, Y.T. 1991. Determination of electric parameters of cell membranes by a dielectrophoresis method. *Biophys. J.*, 59: 982-987
- Mahaworasilpa, T., Coster, H.G.L. and George, E.P. 1994. Force on biological cells due to applied (AC) electric fields. I. Dielectrophoresis. *Biochim. Biophys. Acta*, 1193: 118-126.
- Mahaworasilpa, T., Coster, H.G.L. and George, E.P. 1996. Force on biological cells due to applied (AC) electric fields. II. Electro-rotation. *Biochim. Biophys. Acta*, 1281: 5-14.
- Pohl, H.A. 1978. *Dielectrophoresis*. London: Cambridge University.
- Radu, M., Petcu, I., Sommer, A. and Avram, D. 1996. Change in membrane electrical parameters of yeast following chemical treatment for protoplast isolation. *J. Bioelectrochem. Bioenerg.*, 40, 159-166.
- Schwan, H.P. 1988. Dielectric spectroscopy and electro-rotation of biological cells. *J. Ferroelectrics*, 86: 205-223.
- Wanichapichart, P., Bunthawin, S., Kaewpaiboon, A. and Kanchanapoom, K. 2002. Determination of cell dielec properties using dielectrophoretic Technique. *J. Sci. Asia*, 28: 113-119.

ภาคผนวก

วิธีพิสูจน์สมการคำนวณศักย์และสนามไฟฟ้าในงานวิจัยนี้

กำหนดให้เซลล์แขวนลอยอยู่ในสารละลายไดอิเล็กทริกและอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอกแบบกระแสสลับทิศแนวแกน Z ระบุตำแหน่งต่างๆ ภายในเซลล์ด้วยพิกัดทรงกลม ตามระยะรัศมี r มุมกวาด θ วัดเทียบกับแกน Z และมุมกวาด ϕ วัดเทียบกับระนาบ xy (Figure 1b) ให้องค์ประกอบทุกส่วนในเซลล์เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก และใช้สัญลักษณ์ i และ j ระบุชั้นขององค์ประกอบ

จากสมการความต่อเนื่องของความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าที่ชั้น i และ j พบว่าความหนาแน่นฟลักซ์ในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสไดอิเล็กทริกมีค่าเท่ากันตามสมการ $D_{ni} = D_{nj}$ นำความสัมพันธ์ $D = \epsilon^* E$ แทนลงในสมการดังกล่าวจะได้ว่า $\epsilon_i^* E_{ni} = \epsilon_j^* E_{nj}$ เมื่อ ϵ^* คือค่าไดอิเล็กทริก E คือความเข้มสนามไฟฟ้า และ E_n คือองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส ตามลำดับ

แปลงค่า E ให้อยู่ในรูปศักย์ไฟฟ้า Ψ โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ $E = -\nabla\Psi$ จะได้ว่า

$$\epsilon_i^*(\hat{n}_i \cdot \nabla\Psi_i) = \epsilon_j^*(\hat{n}_j \cdot \nabla\Psi_j) \quad (ก1)$$

เมื่อ \hat{n} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส

ตามสมการความต่อเนื่องดังกล่าวข้างต้น บริเวณผิวสัมผัสจะปลดปล่อยประจุอิสระ (free-charge) แต่ปริมาณประจุผูกพัน (bound-charge) ที่ด้านทั้งสอง i และ j เท่ากัน ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมที่บริเวณผิวสัมผัสไดอิเล็กทริกจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วยเหตุนี้ จะได้ว่า

$$\Psi_i = \Psi_j \quad (ก2)$$

จากสมการลาปลาซ (Laplace) พิกัดทรงกลมตามสมการ

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \phi^2} = 0 \quad (ก3)$$

พบว่าศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกเซลล์มีค่า

$$\Psi_0 = -E_0 r \cos \theta \quad (ก4)$$

อนุพันธ์และอินทิเกรตสมการที่ ก3 พบว่ามีผลเฉลย (คำตอบ) หลายค่า และสามารถหาได้จากฟังก์ชันเลอจองด์ (Legendre function) $P_n(x)$ ตามสมการ

$$\Psi_i = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n r^n + B_n r^{-(n+1)}) P_n \cos \theta \quad (ก5)$$

เมื่อ n คือลำดับของผลเฉลย มีค่าตั้งแต่ $0, 1, 2, \dots, \infty$

จากสูตรของโรดริเกซ (Rodrigues' formula) พบว่า ถ้า $x = \cos \theta$ แล้ว $P_n \cos \theta = \cos \theta$ (Balanis, 1938) แต่หาก n มีค่าเท่ากับศูนย์ พบว่า $P_n \cos \theta = 1$ ซึ่งขัดแย้งกับศักย์ไฟฟ้าตามสมการ ก5 และหากว่า n มีค่ามากกว่า 1 ฟังก์ชันเลอจองด์จะมีค่าน้อยจนตัดทิ้งได้ ด้วยเหตุนี้จึงกำหนดให้ $n = 1$ และแทนตัวแปรต่างๆ ตามแบบจำลองลงในสมการ ก5 จะได้สมการศักย์ไฟฟ้าที่แต่ละองค์ประกอบของเซลล์ดังนี้

ที่ $i = ic$ และ $r < R_{ic}$: $\Psi_{ic} = \sum_{n=0}^{\infty} (A_{ic} r^n + B_{ic} r^{-(n+1)}) P_n \cos \theta = A_{ic} r \cos \theta$ (ก6)

ที่ $i = im$ และ $R_{ic} < r < R_c$:

$$\Psi_{im} = \sum_{n=0}^{\infty} (A_{im} r^n + B_{im} r^{-(n+1)}) P_n \cos \theta = \left(A_{im} r + \frac{B_{im}}{r^2} \right) \cos \theta$$
 (ก7)

ที่ $i = oc$ และ $R_c < r < R_{oc}$:

$$\Psi_{oc} = \sum_{n=0}^{\infty} (A_{oc} r^n + B_{oc} r^{-(n+1)}) P_n \cos \theta = \left(A_{oc} r + \frac{B_{oc}}{r^2} \right) \cos \theta$$
 (ก8)

ที่ $i = om$ และ $R_{oc} < r < R$:

$$\Psi_{om} = \sum_{n=0}^{\infty} (A_{om} r^n + B_{om} r^{-(n+1)}) P_n \cos \theta = \left(A_{om} r + \frac{B_{om}}{r^2} \right) \cos \theta$$
 (ก9)

ย้อนกลับไปพิจารณาสมการที่ ก1 พบว่า \hat{n} คือแนวรัศมีของเซลล์ (r) จึงสามารถแปลงจากรูปสมการเวกเตอร์ให้เป็นสเกลลาร์ได้คือ

$$\epsilon_i^* \left(\frac{\partial \Psi_i}{\partial r} \right) = \epsilon_j^* \left(\frac{\partial \Psi_j}{\partial r} \right)$$
 (ก10)

และจากสมการที่ (ก2) พบว่า

เมื่อ $\Psi_{ic} = \Psi_{im}$ จะได้ว่า $\epsilon_{ic}^* \left(\frac{\partial \Psi_{ic}}{\partial r} \right) = \epsilon_{im}^* \left(\frac{\partial \Psi_{im}}{\partial r} \right)$ (ก11)

ทำนองเดียวกัน

เมื่อ $\Psi_{im} = \Psi_{oc}$ จะได้ว่า $\epsilon_{im}^* \left(\frac{\partial \Psi_{im}}{\partial r} \right) = \epsilon_{oc}^* \left(\frac{\partial \Psi_{oc}}{\partial r} \right)$ (ก12)

เมื่อ $\Psi_{oc} = \Psi_{om}$ จะได้ว่า $\epsilon_{oc}^* \left(\frac{\partial \Psi_{oc}}{\partial r} \right) = \epsilon_{om}^* \left(\frac{\partial \Psi_{om}}{\partial r} \right)$ (ก13)

แทนค่าสมการที่ (ก6) (ก7) (ก8) และ (ก9) ลงในสมการที่ (ก11) (ก12) และ (ก13) ตามลำดับ (แทนตัวแปร Ψ_i) แล้วแก้สมการเพื่อหาค่าคงที่จำนวน 8 ค่าที่ปรากฏในสมการดังกล่าว ได้ค่าดังนี้

$$A_{im} = \frac{A_{ic} (\epsilon_{ic}^* + 2\epsilon_{im}^*)}{3\epsilon_{im}^*}$$

$$B_{im} = \frac{A_{ic} (\epsilon_{im}^* - \epsilon_{ic}^*) R_{ic}^3}{3\epsilon_{im}^*}$$

$$A_{oc} = \frac{A_{ic}}{9\epsilon_{im}^* \cdot \epsilon_{oc}^* R_c^3} [(\epsilon_{ic}^* + 2\epsilon_{im}^*)(\epsilon_{im}^* + 2\epsilon_{oc}^*) R_c^3 + 2(\epsilon_{im}^* - \epsilon_{ic}^*)(\epsilon_{oc}^* - \epsilon_{im}^*) R_{ic}^3]$$

$$B_{oc} = \frac{A_{ic}}{9\epsilon_{im}^* \cdot \epsilon_{oc}^* R_c^3} [(\epsilon_{ic}^* + 2\epsilon_{im}^*)(\epsilon_{oc}^* - \epsilon_{im}^*) R_c^3 + (\epsilon_{oc}^* + 2\epsilon_{im}^*)(\epsilon_{im}^* - \epsilon_{ic}^*) R_{ic}^3]$$

$$A_{om} = -E_0$$

$$B_{om} = \frac{A_{oc}(\epsilon_{om}^* - \epsilon_{oc}^*)R_{oc}^3}{3\epsilon_{om}^*} + \frac{B_{oc}(2\epsilon_{om}^* + \epsilon_{oc}^*)}{3\epsilon_{om}^*}$$

$$A_{ic} = \frac{-27\epsilon_{im}^* \epsilon_{oc}^* R_{oc}^3 E_0}{L_1 + L_2} \quad (ก13ก)$$

และ $B_{ic} = 0$ เมื่อ

$$L_1 = R_{oc}^3(2\epsilon_{om}^* + \epsilon_{oc}^*) \left[(\epsilon_{ic}^* + 2\epsilon_{im}^*)(\epsilon_{im}^* + 2\epsilon_{oc}^*) + 2(\epsilon_{im}^* - \epsilon_{ic}^*) \left(\frac{R_{ic}}{R_c} \right)^3 (\epsilon_{oc}^* - \epsilon_{im}^*) \right]$$

$$L_2 = 2(\epsilon_{om}^* - \epsilon_{oc}^*) \left[(\epsilon_{ic}^* + 2\epsilon_{im}^*)(\epsilon_{oc}^* - \epsilon_{im}^*)R_c^3 + (\epsilon_{oc}^* + 2\epsilon_{im}^*)(\epsilon_{im}^* - \epsilon_{ic}^*)R_{ic}^3 \right] \quad (ก13ข)$$

แทนค่าคงที่เหล่านี้กลับลงในสมการ (ก6) (ก7) (ก8) และ (ก9) ตามลำดับ จะได้สมการสำหรับคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละบริเวณภายในเซลล์

สมการคำนวณสนามไฟฟ้าแต่ละบริเวณภายในเซลล์

ใช้ตัวดำเนินการเดล $\vec{\nabla}$ (del operator) พิกัดทรงกลมดำเนินการกับศักย์ไฟฟ้าสมการ (ก6) (ก7) (ก8) และ (ก9) ด้วยวิธีการอนุพันธ์ที่ละเทอม กล่าวคือ

$$\vec{\nabla} = \hat{r} \frac{\partial}{\partial r} + \hat{\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} + \hat{\phi} \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \quad (ก14)$$

ตัดเทอมสุดท้ายทิ้งไปเพราะศักย์ไฟฟ้าตามแบบจำลองนี้ไม่ได้มีค่าขึ้นกับมุมกวาด ϕ และใช้ความสัมพันธ์ $E = -\vec{\nabla}\Psi$ เพื่อคำนวณหาสนามไฟฟ้าในแต่ละองค์ประกอบของเซลล์ ได้ค่าดังนี้

$$\vec{E}_o = E_o(\hat{r} \cos \theta - \hat{\theta} \sin \theta) \quad (ก15)$$

$$\vec{E}_{ic} = E_o \left[\hat{r} \left(A_{im} - \frac{2B_{im}}{r^3} \right) \cos \theta - \hat{\theta} \left(A_{im} + \frac{B_{im}}{r^3} \right) \sin \theta \right] \quad (ก16)$$

$$\vec{E}_c = E_o \left[\hat{r} \left(A_{oc} - \frac{2B_{oc}}{r^3} \right) \cos \theta - \hat{\theta} \left(A_{oc} + \frac{B_{oc}}{r^3} \right) \sin \theta \right] \quad (ก17)$$

และ $\vec{E}_{om} = E_o \left[\hat{r} \left(1 - \frac{2B_{om}}{r^3} \right) \cos \theta - \hat{\theta} \left(1 + \frac{B_{om}}{r^3} \right) \sin \theta \right] \quad (ก18)$

แทนค่าคงที่ต่างๆ กลับลงในสมการ (ก15) (ก16) (ก17) และ (ก18) เพื่อใช้คำนวณสนามไฟฟ้าต่อไป

สมการคำนวณค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเซลล์

ค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเซลล์ทรงกลมตันที่มีเปลือกสองชั้น (Figure 1a) มีค่าดังสมการ

$$\epsilon_{eff}^* = \epsilon_{om}^* \left[\frac{2(1 - V_1) + (1 + 2V_1)E_1}{(2 + V_1) + (1 - V_1)E_1} \right] \quad (ก19)$$

ตัวแปรที่ปรากฏในสมการที่ (ก19) มีค่าดังนี้

$$V_1 = \left(1 - \frac{d_{om}}{R}\right)^3 \tag{ก20}$$

และ $E_1 = \left(\frac{\epsilon_{oc}^*}{\epsilon_{om}^*}\right) \cdot \left(\frac{2(1-V_2) + (1+2V_2)E_2}{(2+V_2) + (1-V_2)E_2}\right)$ (ก21)

เมื่อ $V_2 = \left(1 + \frac{d_{oc}}{R_c}\right)^{-3}$ (ก22)

และ $E_2 = \left(\frac{\epsilon_{im}^*}{\epsilon_{oc}^*}\right) \cdot \left(\frac{2(1-V_3) + (1+2V_3)E_3}{(2+V_3) + (1-V_3)E_3}\right)$ (ก23)

เมื่อ $V_3 = \left(1 - \frac{d_{im}}{R_c}\right)^3$ (ก24)

และ $E_3 = \frac{\epsilon_{ic}^*}{\epsilon_{im}^*}$ (ก25)

ประมาณค่าเทอม

$$V_1 = \left(1 - \frac{d_{om}}{R}\right)^3 \approx \left(1 - \frac{3d_{om}}{R}\right)$$

เทอม $V_2 = \left(1 + \frac{d_{oc}}{R_c}\right)^{-3} \approx \left(\frac{R_c}{R_c + 3d_{oc}}\right)$

และเทอม $V_3 = \left(1 - 3\frac{d_{im}}{R_c}\right)$

แล้วแทนค่าเหล่านี้กลับในสมการ (ก19) - (ก24) เพื่อคำนวณส่วนจริงของฟังก์ชันความถี่ $f(\omega)$ ตามสมการ

$$\text{Re}[f(\omega)] = \text{Re}\left[\phi \left(\frac{\epsilon_{eff}^* - \epsilon_s^*}{\epsilon_{eff}^* + 2\epsilon_s^*}\right)\right] \tag{ก26}$$

เมื่อ ϕ คือ volume fraction เป็นเทอมที่ขึ้นกับรูปทรง ปริมาตรเซลล์ รวมทั้งค่า ϵ_{eff}' และ ϵ_s' หาค่าได้จากสมการของ Asami (2002) กล่าวคือ

$$\epsilon^* = \epsilon_s^* \left[\frac{2\epsilon_{eff}^* + \epsilon_s^* - 2\phi(\epsilon_s^* - \epsilon_{eff}^*)}{2\epsilon_{eff}^* + \epsilon_s^* + \phi(\epsilon_s^* - \epsilon_{eff}^*)} \right]$$

แทนความสัมพันธ์ $\epsilon^* = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega}$ ลงในสมการข้างต้น และจัดรูปสมการข้างต้นใหม่

พบว่า $\phi = \frac{2(1 - \sigma_{eff} / \sigma_s)}{2 + \sigma_{eff} / \sigma_s}$ ถ้า $\sigma_s \approx \sigma_{eff}$ หรือ $\sigma_s \gg \sigma_{eff}$

สามารถลดรูปสมการได้เป็น $\phi = 1 - \left(\frac{\sigma_{eff}}{\sigma_s}\right)^{2/3}$

แทนค่า $\sigma_{eff} = 0.03$ S/m และ $\sigma_s = 0.05$ S/m (สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยนี้)

ได้ค่า $\phi = 0.3$ (ค่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตาม σ_s)

แทนสมการที่ (ภ19) ลงในสมการที่ (ภ26) จะได้

$$\text{Re}[f(\omega)] = \text{Re}\left[\phi \left(\frac{Z_1 Z_3 + Z_2 Z_4}{Z_3^2 + Z_4^2}\right)\right] \quad (\text{ภ27})$$

ตัวแปรที่ปรากฏในสมการมีค่าขึ้นกับฟังก์ชันต่างๆ เป็นลำดับขั้นดังนี้

$$Z_1 = \omega(V - \epsilon_s X)$$

$$Z_2 = \omega W + \sigma_s X$$

$$Z_3 = \omega(V + 2\epsilon_s X)$$

$$Z_4 = \omega W - 2\sigma_s X$$

เมื่อ $W = ST - RU$

$$V = RT + SU$$

$$X = T^2 + U^2$$

และ $R = \omega \epsilon_{om} N + \sigma_{om} \omega O$

$$S = \omega^2 \epsilon_{om} O - \sigma_{om} N$$

$$T = \omega P$$

$$U = \omega^2 Q$$

และ $N = 2c_1 L + c_2 J$

$$O = 2c_1 M + c_2 K$$

$$P = c_3 L + c_1 J$$

$$Q = c_3 M + c_1 K$$

และ $c_1 = 1 - v_1$

$$c_2 = 1 + 2v_1$$

$$c_3 = 2 + v_1$$

เมื่อ v_1 เป็นไปตามสมการที่ (ภ20)

และ $J = \sigma_{oc} F + \omega^2 \epsilon_{oc} G$

$$K = \epsilon_{oc} F - \sigma_{oc} G$$

$$L = \sigma_{om} H + \omega^2 \epsilon_{om} I$$

$$M = \epsilon_{om} H - \sigma_{om} I$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } F &= 2b_1c + b_2A \\ G &= 2b_1D + b_2B \\ H &= b_3C + b_1A \\ I &= b_3D + b_1B \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และ } b_1 &= 1 - \nu_2 \\ b_2 &= 1 + 2\nu_2 \\ b_3 &= 2 + \nu_2 \end{aligned}$$

เมื่อ ν_2 มีค่าตามสมการที่ (ภ22)

$$\begin{aligned} \text{และ } A &= 2a_1(\omega^2 \epsilon_{im}^2 - \sigma_{im}^2) + a_2(\omega^2 \epsilon_{ic} \epsilon_{im} - \sigma_{im} \sigma_{ic}) \\ B &= 2a_1(2\epsilon_{im} \sigma_{im}) + a_2(\epsilon_{im} \sigma_{ic} + \epsilon_{ic} \sigma_{im}) \\ C &= a_3(\omega^2 \epsilon_{im} \epsilon_{oc} - \sigma_{im} \sigma_{oc}) + a_1(\omega^2 \epsilon_{ic} \epsilon_{oc} - \sigma_{ic} \sigma_{oc}) \\ D &= a_3(\epsilon_{im} \sigma_{oc} + \epsilon_{oc} \sigma_{im}) + a_1(\epsilon_{ic} \sigma_{oc} + \epsilon_{oc} \sigma_{ic}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{และ } a_1 &= 1 - \nu_3 \\ a_2 &= 1 + 2\nu_3 \\ a_3 &= 2 + \nu_3 \end{aligned}$$

เมื่อ ν_3 มีค่าตามสมการที่ (ภ24)