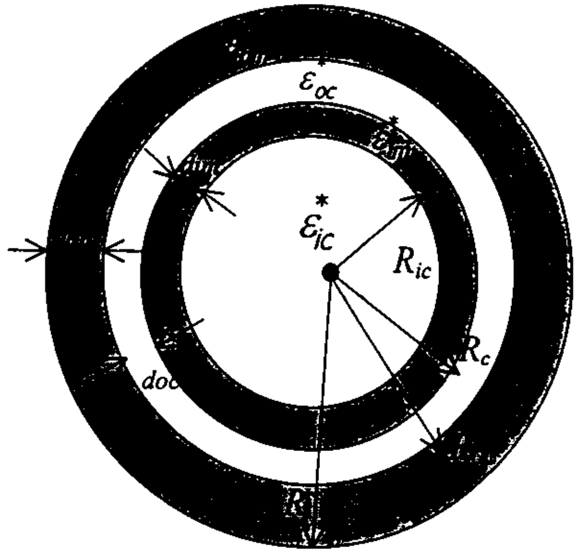
3.ผลการพัฒนาแบบจำลอง

แบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกสองชั้น

(Spherical Double Shell Model, SDM)

สร้างแบบจำลองเซลล์ที่มีลักษณะทรงกลมและมีเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) 2 ชั้น ด้วยวิธีเดียวกับแบบจำลองเซลล์ทรงกลมผนังเซลล์หนึ่งชั้น(สรวุฒิและคณะ,2543) โดยเพิ่มชั้นเยื่อหุ้มเซลล์เข้าไปอีกหนึ่งชั้น ห่อหุ้มเซลล์ทั้งหมดอยู่ภายนอก ระหว่างชั้นเยื่อหุ้มเซลล์ภายในและภายนอกคั่นกลางด้วยชั้นไซโทพลาสซึมอีกชั้น(ไซโทพลาสซึมชั้นนอก) กำหนดให้องค์ประกอบเซลล์แต่ละส่วนมีค่าไดอิเล็กทริกแตกต่างกัน และแขวนลอยเซลล์ในสารละลายที่มีค่าไดอิเล็กทริก (สารละลายภายนอก) ตามรูป



รูปที่ 1.แบบจำลอง SDM

เมื่อ ε^*_{ic} คือค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของไซโทพลาสซึม(complex permittivity of inner cytoplasm)

ε^*_{im} คือค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน(complex permittivity of inner membrane)

ε^*_{oc} คือค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของไซโทพลาสซึมชั้นนอก(complex permittivity of outer cytoplasm)

ε_{om}^{*} คือค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก(complex permittivity of outer membrane)

ε_{s}^{*} คือค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของสารละลายภายนอก(complex permittivity of solution)

R คือรัศมีเซลล์ทั้งหมด และ R_i คือรัศมีเซลล์วัดถึงจุดต่างๆตามรูป มีค่าต่างๆดังนี้

R_{ic} คือรัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางเซลล์ถึงขอบในของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน

R_{c} คือรัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางเซลล์ถึงขอบนอกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน

R_{oc} คือรัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางเซลล์ถึงขอบในของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก

และ

d_i คือความหนาแต่ละชั้นองค์ประกอบตามรูป มีค่าต่างๆดังนี้

d_{im} คือความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน

d_{om} คือความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก

d_{oc} คือความหนาของไซโทพลาสซึมชั้นนอก

เมื่อ $\varepsilon_i^* = \varepsilon_i - j\,\dfrac{\sigma_i}{\omega}$

ε_i คือ ค่าไดอิเล็กทริกที่ชั้น i มีหน่วยเป็น ฟารัด/เมตร

σ_i คือ สภาพนำไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกที่ชั้น i มีหน่วยเป็น ซีเมนส์/เมตร

และ $j = \sqrt{-1}$ เรียกจำนวนจินตภาพ (imaginary number)

เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่เซลล์ผ่านทางตัวกลางสารละลายที่อยู่ภายนอกเซลล์ ตามทฤษฎีแล้ว สนามไฟฟ้าเหล่านี้สามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อไดอิเล็กทริกแต่ละชั้นของเซลล์ตามแบบจำลอง โดยมีเงื่อนไขต่างๆดังนี้

1. องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสกับผิวสัมผัสที่แต่ละชั้นไดอิเล็กทริก ($\boldsymbol{E_t}$) จะมีค่าต่อเนื่องและเท่ากัน ดังสมการ $\boldsymbol{E_{ti} = E_{tj}}$

2. ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส ($\boldsymbol{D_n}$) จะมีค่าต่อเนื่องและเท่ากัน ดังสมการ $\boldsymbol{D_{ni} = D_{nj}}$

3. ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อผิวสัมผัสไดอิเล็กทริกมีค่าเท่ากัน $\Psi_i = \Psi_j$

เมื่อ $E = -\nabla\Psi$ และ $\boldsymbol{D} = \varepsilon E$

คณิตศาสตร์ของแบบจำลองและวิธีพิสูจน์

แนวคิด

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์หาศักย์ไฟฟ้าที่แต่ละบริเวณ จากชั้นภายในสู่ภายนอกเซลล์ แล้วจึงคำนวณสนามไฟฟ้า โดยอาศัยสมการลาปลาซพิกัดทรงกลมและเงื่อนไขขอบ(boundary conditions) และคำนวณค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเซลล์ เทอมไดโพลโมเมนต์ และแรงไดอิเล็กโทรฟอดิก ตามลำดับดังนี้

สมการคำนวณศักย์ไฟฟ้าแต่ละบริเวณภายในเซลล์

กำหนดให้เซลล์แขวนลอยอยู่ในสารละลายไดอิเล็กทริกและอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอกแบบกระแสสลับทิศแนวแกน Z ระบุตำแหน่งต่าง ๆภายในเซลล์ด้วยพิกัดทรงกลม (เพราะเซลล์เป็นทรงกลม) ให้จุดกำเนิดพิกัดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของเซลล์ โดยมีทิศรัศมีเซลล์ชี้ออกตามแนวเวกเตอร์หนึ่งหน่วย $\hat{r}$ มุมกวาด θ วัดเทียบแกน Z และมุมกวาด ϕ วัดเทียบกับแกน x ตามรูปประกอบที่ 2

วิเคราะห์หาศักย์ที่แต่ละองค์ประกอบของเซลล์จากเงื่อนไขขอบเหล่านี้ ดังนี้

กำหนดให้องค์ประกอบแต่ละชั้นเป็นชั้นที่ i และ j

จากสมการ $\boldsymbol{D}_{ni} = \boldsymbol{D}_{nj}$

ใช้ความสัมพันธ์ $\boldsymbol{D} = \varepsilon \mathrm{E}$

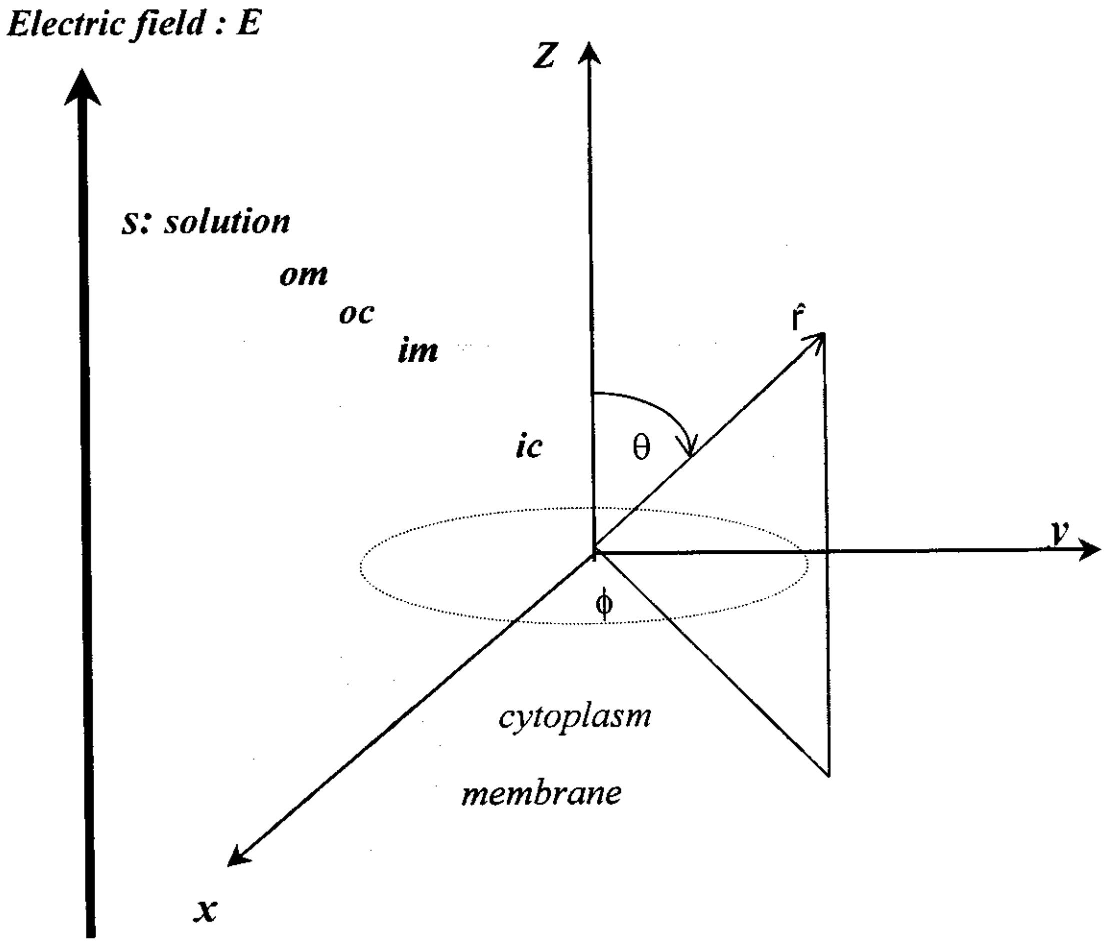
จะได้ $\varepsilon_i^* . \boldsymbol{E}_{ni} = \varepsilon_j^* . \boldsymbol{E}_{nj}$

$$\varepsilon_i^* (\hat{n}_i . \nabla \psi_i) = \varepsilon_j^* (\hat{n}_j . \nabla \psi_j) \qquad (1)$$

เมื่อ $\mathrm{E} = -\vec{\nabla}\Psi$

และ $\Psi_i = \Psi_j \qquad (2)$

($\hat{n}$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส)



รูปประกอบ 2 . พิกัดทรงกลมระบุตำแหน่งองค์ประกอบต่างๆภายในเซลล์ตามแบบจำลองเซลล์ทรงกลมเปลือกสองชั้นที่แขวนลอยในสารละลายภายนอกที่มีค่าไดอิเล็กทริก ε_s^* และอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอก $\boldsymbol{E}$

ศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์พิจารณาจากสมการลาปลาซ(Laplace) พิกัดทรงกลม คือ

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial\psi}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\psi}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial^2\psi}{\partial\phi^2}=0 \quad (3)$$

และศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกเซลล์มีค่า

$$\psi_0 = -E_0 r\cos\theta \quad (4)$$

เมื่ออนุพันธ์และอินทริเกรตสมการที่ 3 พบว่า มีผลเฉลย(คำตอบ) หลายค่า สามารถหาได้จากฟังก์ชั่นเลอจองด์ (Legendre function) ตามสมการ

$$\psi_i = \sum_{n=0}^{\infty}(A_{in}r^n + B_{in}r^{-(n+1)})P_n\cos\theta \quad (5)$$

เมื่อ $i = ic, im, oc, om$ แสดงถึงองค์ประกอบแต่ละชั้นของเซลล์
และ n คือลำดับของผลเฉลย มีค่าตั้งแต่ $0,1,2,\ldots,\infty$
แทนตัวแปรต่างๆตามแบบจำลองลงในสมการที่ 5 โดยกำหนดให้ $n = 1$ และ $P_n\cos\theta = \cos\theta$
จะได้สมการศักย์ไฟฟ้าที่แต่ละองค์ประกอบของเซลล์ดังนี้

ที่ $i = ic$ และ $r < R_{ic}$: $\psi_{ic} = \sum_{n=0}^{\infty}(A_{ic}r^n + B_{ic}r^{-(n+1)})P_n\cos\theta = A_{ic}r\cos\theta$ (6)

ที่ $i = im$ และ $R_{ic} < r < R_c$:

$$\psi_{im} = \sum_{n=0}^{\infty}(A_{im}r^n + B_{im}r^{-(n+1)})P_n\cos\theta = \left(A_{im}r + \frac{B_{im}}{r^2}\right)\cos\theta \quad (7)$$

ที่ $i = oc$ และ $R_c < r < R_{oc}$:

$$\psi_{oc} = \sum_{n=0}^{\infty}(A_{oc}r^n + B_{oc}r^{-(n+1)})P_n\cos\theta = \left(A_{oc}r + \frac{B_{oc}}{r^2}\right)\cos\theta \quad (8)$$

ที่ $i = om$ และ $R_{oc} < r < R$:

$$\psi_{om} = \sum_{n=0}^{\infty}(A_{om}r^n + B_{om}r^{-(n+1)})P_n\cos\theta = \left(A_{om}r + \frac{B_{om}}{r^2}\right)\cos\theta \quad (9)$$

ย้อนกลับไปพิจารณาสมการที่ 1   พบว่า $\hat{r}$ ก็คือแนวรัศมีของเซลล์ (r) จึงสามารถแปลงจากรูปสมการเวกเตอร์ให้เป็นสเกลลาร์ได้คือ

$$\varepsilon_i^*\left(\frac{\partial \psi_i}{\partial r}\right) = \varepsilon_j^*\left(\frac{\partial \psi_j}{\partial r}\right) \qquad (10)$$

และจากสมการที่ 2 พบว่า

เมื่อ $\psi_{ic} = \psi_{im}$ จะได้ว่า $\varepsilon_{ic}^*\left(\frac{\partial \psi_{ic}}{\partial r}\right) = \varepsilon_{im}^*\left(\frac{\partial \psi_{im}}{\partial r}\right)$ (11)

ทำนองเดียวกัน

เมื่อ $\psi_{im} = \psi_{oc}$ จะได้ว่า $\varepsilon_{im}^*\left(\frac{\partial \psi_{im}}{\partial r}\right) = \varepsilon_{oc}^*\left(\frac{\partial \psi_{oc}}{\partial r}\right)$ (12)

เมื่อ $\psi_{oc} = \psi_{om}$ จะได้ว่า $\varepsilon_{oc}^*\left(\frac{\partial \psi_{oc}}{\partial r}\right) = \varepsilon_{om}^*\left(\frac{\partial \psi_{om}}{\partial r}\right)$ (13)

แทนค่าสมการที่ 6 7 8 และ 9 ลงในสมการที่ 11 12 และ 13 ตามลำดับ (แทนตัวแปร Ψ_i) แล้วแก้สมการเพื่อหาค่าคงที่ 8 ตัวที่ปรากฏในสมการดังกล่าว ได้ค่าดังนี้

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

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

$$A_{oc} = \frac{A_{ic}}{9\varepsilon_{im}^*.\varepsilon_{oc}^*R_c^3}\left[(\varepsilon_{ic}^* + 2\varepsilon_{im}^*)(\varepsilon_{im}^* + 2\varepsilon_{oc}^*)R_c^3 + 2(\varepsilon_{im}^* - \varepsilon_{ic}^*)(\varepsilon_{oc}^* - \varepsilon_{im}^*)R_{ic}^3\right]$$

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

$$A_{om} = -E_0$$

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

$$A_{ic} = \frac{-27\varepsilon_{im}^*\varepsilon_{oc}^*\varepsilon_{om}^*R_{oc}^3E_0}{L_1 + L_2}$$

และ $B_{ic} = 0$

เมื่อ

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

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

แทนค่าคงที่เหล่านี้กลับลงในสมการที่ 6 7 8 และ 9 จะได้สมการสำหรับคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบ ซึ่งจะสาธิตผลการคำนวณเป็นตัวเลขและกราฟในบทถัดไป

สมการคำนวณสนามไฟฟ้าแต่ละบริเวณภายในเซลล์

ใช้ตัวดำเนินการเดล $\bar{\nabla}$ (del operator) พิกัดทรงกลม ดำเนินการกับศักย์ไฟฟ้าสมการที่ 6 7 8 และ 9 ด้วยวิธีการอนุพันธ์ที่ละเทอม กล่าวคือ

$$\bar{\nabla} = \hat{r}\frac{\partial}{\partial r} + \hat{\theta}\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial\theta} + \hat{\phi}\frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\phi} \tag{14}$$

ตัดเทอมสุดท้ายทิ้งไปเพราะศักย์ไฟฟ้าตามแบบจำลองนี้ไม่ได้มีค่าขึ้นกับมุมกวาด ϕ และใช้ความสัมพันธ์ $E = -\bar{\nabla}\Psi$ เพื่อคำนวณหาสนามไฟฟ้าที่แต่ละองค์ประกอบของเซลล์ ได้ค่าดังนี้

$$\vec{E}_o = E_o(\hat{r}\cos\theta - \hat{\theta}\sin\theta) \tag{15}$$

$$\vec{E}_{ic} = E_o\left[\hat{r}(A_{im} - \frac{2B_{im}}{r^3})\cos\theta - \hat{\theta}(A_{im} + \frac{B_{im}}{r^3})\sin\theta\right] \tag{16}$$

$$\vec{E_c} = E_o\left[\hat{r}\,(A_{oc} - \frac{2B_{oc}}{r^3})\cos\theta - \hat{\theta}(A_{oc} + \frac{B_{oc}}{r^3})\sin\theta\right] \quad (17)$$

และ $$\vec{E_{oc}} = E_o\left[\hat{r}\,(1 - \frac{2B_{om}}{r^3})\cos\theta - \hat{\theta}(1 + \frac{B_{om}}{r^3})\sin\theta\right] \quad (18)$$

แทนค่าคงที่ต่าง ๆกลับลงในสมการที่ 15 16 17 และ 18 จะได้สมการสำหรับคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบ ซึ่งจะสาธิตผลการคำนวณเป็นตัวเลขและกราฟในบทถัดไป

สมการคำนวณค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเซลล์

ค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเซลล์ทรงกลมตันที่มีเปลือกสองชั้นตามรูปที่ 1 มีค่าดังสมการ

$$\varepsilon_{eff}^* = \varepsilon_{om}^*\left[\frac{2(1-v_1)+(1+2v_1)E_1}{(2+v_1)+(1-v_1)E_1}\right] \quad (19)$$

ตัวแปรที่ปรากฏในสมการที่ 19 มีค่าดังนี้

$$v_1 = \left(1 - \frac{d_{om}}{R}\right)^3 \quad (20)$$

และ

$$E_1 = \left(\frac{\varepsilon_{oc}^*}{\varepsilon_{om}^*}\right)\cdot\left(\frac{2(1-v_2)+(1+2v_2)E_2}{(2+v_2)+(1-v_2)E_2}\right) \quad (22)$$

เมื่อ $$v_2 = \left(1 + \frac{d_{oc}}{R_i}\right)^{-3} \quad (23)$$

และ

$$E_2 = \left(\frac{\varepsilon_{im}^*}{\varepsilon_{oc}^*}\right)\cdot\left(\frac{2(1-v_3)+(1+2v_3)E_3}{(2+v_3)+(1-v_3)E_3}\right) \quad (24)$$

เมื่อ $$v_3 = \left(1 - \frac{d_{im}}{R_i}\right)^3 \quad (25)$$

และ

$$E_3 = \frac{\varepsilon_{ic}^*}{\varepsilon_{im}^*} \quad (26)$$

งานวิจัยนี้ได้ประมาณค่าเทอม $v_1 = \left(1 - \frac{d_{om}}{R}\right)^3 \approx \left(1 - \frac{3d_{om}}{R}\right)$

เทอม $v_2 = \left(1 + \frac{d_{oc}}{R_i}\right)^{-3} \approx \left(\frac{R_i}{R_i + 3d_{oc}}\right)$

และเทอม $v_3 = \left(1 - 3\frac{d_{im}}{R_i}\right)$

ส่วนจริงของฟังก์ชั่น $f(\omega)$ มีค่าเป็น

$$\mathrm{Re}[f(\omega)] = \mathrm{Re}[\phi(\frac{\varepsilon^*_{eff} - \varepsilon^*_s}{\varepsilon^*_{eff} + 2\varepsilon^*_s})] \quad (27)$$

เมื่อ ϕ คือ *volume fraction* เป็นเทอมที่ขึ้นกับรูปทรง ปริมาตรเซลล์ รวมทั้งค่า ε'_{eff} และ ε'_s ตามสมการของ Wagner(1914) กล่าวคือ

$$\varepsilon^* = \varepsilon^*_s\left[\frac{2\varepsilon^*_s + \varepsilon^*_{eff} - 2\phi(\varepsilon^*_s - \varepsilon^*_{eff})}{2\varepsilon^*_s + \varepsilon^*_{eff} + \phi(\varepsilon^*_s - \varepsilon^*_{eff})}\right]$$

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

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

ถ้า $\sigma_s \approx \sigma_{eff}$ หรือ $\sigma_s >> \sigma_{eff}$

สามารถลดรูปสมการได้เป็น

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

แทนค่า σ_{eff} = 0.03 S/m และ σ_s = 0.05 S/m (ค่าประมาณในงานวิจัยนี้)

ได้ค่า ϕ = 0.3 (ค่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเงื่อนไขในสมการ)

แทนสมการที่ 19 ลงในสมการที่ 27 จะได้

$$\mathrm{Re}[f(\omega)] = \mathrm{Re}[\phi(\frac{Z_1Z_3 + Z_2Z_4}{Z_3^2 + Z_4^2})] \tag{28}$$

ตัวแปรที่ปรากฏในสมการที่ 28 มีค่าขึ้นกับฟังก์ชั่นต่าง ๆเป็นลำดับขั้นดังนี้

$$Z_1 = \omega(V - \varepsilon_5 X)$$
$$Z_2 = \omega W + \sigma_5 X$$
$$Z_3 = \omega(V + 2\varepsilon_5 X)$$
$$Z_4 = \omega W - 2\sigma_5 X$$

เมื่อ

$$W = ST - RU$$
$$V = RT + SU$$
$$X = T^2 + U^2$$

และ

$$R = \omega\varepsilon_{om} N + \sigma_{om}\omega O$$
$$S = \omega^2\varepsilon_{om} O - \sigma_{om} N$$
$$T = \omega P$$
$$U = \omega^2 Q$$

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 20

และ

$$J = \sigma_{oc} F + \omega^2\varepsilon_{oc} G$$
$$K = \varepsilon_{oc} F - \sigma_{oc} G$$
$$L = \sigma_{om} H + \omega^2\varepsilon_{om} I$$
$$M = \varepsilon_{om} H - \sigma_{om} I$$

$$F = 2b_1C + b_2A$$

เมื่อ

$$G = 2b_1D + b_2B$$

$$H = b_3C + b_1A$$

$$I = b_3D + b_1B$$

และ

$$b_1 = 1 - v_2$$

$$b_2 = 1 + 2v_2$$

$$b_3 = 2 + v_2$$

เมื่อ v_2 มีค่าตามสมการที่ 23

และ

$$A = 2a_1(\omega^2 \varepsilon_{im}{}^2 - \sigma_{im}{}^2) + a_2(\omega^2 \varepsilon_{ic}\varepsilon_{im} - \sigma_{im}\sigma_{ic})$$

$$B = 2a_1(2\varepsilon_{im}\sigma_{im}) + a_2(\varepsilon_{im}\sigma_{ic} + \varepsilon_{ic}\sigma_{im})$$

$$C = a_3(\omega^2 \varepsilon_{im}\varepsilon_{oc} - \sigma_{im}\sigma_{oc}) + a_1(\omega^2 \varepsilon_{ic}\varepsilon_{oc} - \sigma_{ic}\sigma_{oc})$$

$$D = a_3(\varepsilon_{im}\sigma_{oc} + \varepsilon_{oc}\sigma_{im}) + a_1(\varepsilon_{ic}\sigma_{oc} + \varepsilon_{oc}\sigma_{ic})$$

และ

$$a_1 = 1 - v_3$$

$$a_2 = 1 + 2v_3$$

$$a_3 = 2 + v_3$$

เมื่อ v_3 มีค่าตามสมการที่ 25

ใช้สมการทั้งหมดเหล่านี้คำนวณหาค่า $\mathrm{Re}[f(\omega)]$ และนำไปวิเคราะห์หาค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์ ซึ่งจะกล่าวเป็นลำดับในบทถัดไป