

4. ผลการคำนวณ

ผลจากการพัฒนาแบบจำลองในบทที่ 3 ทำให้ได้สมการคำนวณศักย์ไฟฟ้า สนามไฟฟ้า ค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเซลล์(ค่าไดอิเล็กทริกโดยรวมของทั้งเซลล์) และค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ ในบทนี้จะทำการพลอตกราฟระหว่างค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ เทียบกับความถี่ของสนามไฟฟ้า เพื่อนำเสปกตรัมไดอิเล็กทริกโพเรซิสที่ได้ไปพิจารณาการเกิดดิสเพอซันของเซลล์ที่ความถี่สนามไฟฟ้าต่างๆ และนำไปสู่กระบวนการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เป็นลำดับต่อไป ทั้งหมดที่กล่าว ได้นำเสนอผลการคำนวณในรูปแบบตัวเลขและกราฟต่างๆดังนี้

4.1 ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่แต่ละบริเวณภายในเซลล์ (กราฟที่ 1 ถึง 6)

สรุปสมการที่ใช้คำนวณศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ ณ บริเวณต่างๆ อีกครั้งดังนี้

บริเวณไซโทพลาสซึม
$$\psi_{ic} = A_{ic} r \cos \theta \quad (29)$$

บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน
$$\psi_{im} = \left(A_{im} r + \frac{B_{im}}{r^2} \right) \cos \theta \quad (30)$$

บริเวณไซโทพลาสซึมชั้นนอก
$$\psi_{oc} = \left(A_{oc} r + \frac{B_{oc}}{r^2} \right) \cos \theta \quad (31)$$

บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก
$$\psi_{om} = \left(A_{om} r + \frac{B_{om}}{r^2} \right) \cos \theta \quad (32)$$

กำหนดเงื่อนไขสมการก่อนคำนวณ

ค่าคงที่ต่างๆที่ปรากฏในสมการข้างต้นเป็นไปตามสมการที่ 6 7 8 และ 9 ในบทที่ 3 มีค่าขึ้นกับ ค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเซลล์ (ϵ_j^*) และรัศมีเซลล์ (R_j) ซึ่งแปรตามความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการดิสเพอซัน ค่าเชิงซ้อนดังกล่าวจึงไม่คงที่ แต่อาจถือเป็นค่าคงที่ได้ถ้าคำนวณที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง สำหรับกรณีของรัศมีเซลล์ถือเป็นค่าคงที่แบบถาวร เพราะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าและไม่ขึ้นกับปัจจัยที่กล่าวข้างต้น ด้วยเหตุนี้ ศักย์ไฟฟ้าทั้งภายในและภายนอกเซลล์จึงมีค่าแปรตามระยะทาง r ซึ่งวัดจากจุดศูนย์กลางของเซลล์ไปยังจุดที่ต้องการคำนวณค่า และมีค่าแปรตามมุมกวาด θ

กำหนดค่าตัวแปร

พลอตศักย์ไฟฟ้าในแต่ละบริเวณภายในเซลล์ (ψ_i) คำนวณจากสมการที่ 29 –32 ในหน่วยโวลต์ เทียบกับระยะทาง(distance)ในหน่วยไมครอน อิงตามรัศมีแต่ละชั้นของเซลล์(R_i) และมุม θ (angle) วัดในหน่วยองศา มีขีดจำกัดจาก 0° ถึง $\pm 90^\circ$ (ดูรูปประกอบ 2) โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ในเบื้องต้นดังนี้

สนามไฟฟ้าภายนอกเซลล์

ความเข้มสนามไฟฟ้าภายนอกเซลล์ $E_0 = 40 \text{ kV/m}$

หมายเหตุ: คำนวณสนามไฟฟ้าที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าแบบทรงกระบอกคู่ขนานตามสมการของ Mahaworasilpa et al. (1994)

ไดอิเล็กทริกของเซลล์

ค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของไซโทพลาสซึม $\epsilon_{ic}^* = 5.31 \times 10^{-10} \text{ F/m}$

ค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน $\epsilon_{im}^* = 8.85 \times 10^{-11} \text{ F/m}$

ค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของไซโทพลาสซึมชั้นนอก $\epsilon_{oc}^* = 5.31 \times 10^{-10} \text{ F/m}$

ค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก $\epsilon_{om}^* = 8.85 \times 10^{-11} \text{ F/m}$

ลักษณะทางกายภาพของเซลล์

รัศมีทั้งเซลล์ $R = 20 \mu\text{m}$

รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางเซลล์ถึงขอบในของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน $R_{ic} = 1997 \mu\text{m}$

รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางเซลล์ถึงขอบนอกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน $R_c = 1998 \mu\text{m}$

รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางเซลล์ถึงขอบในของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก $R_{oc} = 1999 \mu\text{m}$

ตัวแปรอื่นเป็นไปตามการคำนวณในสมการที่ 6 7 8 และ 9

หมายเหตุ : ค่าเหล่านี้อิงตาม Asami and Irimajiri(1984)

ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าภายในและภายนอกไซโทพลาสซึมชั้นใน ภายในเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน และชั้นนอก เป็นไปตามกราฟที่ 1 ถึง 6 ตามลำดับ

4.2 ผลการคำนวณสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิสตามแบบจำลอง SDM (กราฟที่ 7 ถึง 24)

กำหนดค่าตัวแปร

ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ ตามสมการ 28 เป็นฟังก์ชันขึ้นกับ ค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเซลล์ (ϵ_i^*) สารละลายที่ใช้แขวนลอย และลักษณะทางกายภาพของเซลล์ รวมทั้งความถี่ของสนามไฟฟ้า (หน่วยเฮิรตซ์) ดังนั้น ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ จึงมีค่าเฉพาะที่แต่ละความถี่ และเมื่อนำมาพลอตกราฟบนแกนความถี่สเกลล็อกกาลิซิมในช่วงเบต้าดีสเพอชัน ระหว่าง 10Hz – 100 MHz จะได้เส้นกราฟรูปโค้งคว่ำที่มีเอกลักษณ์เฉพาะ ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการเกิดดีสเพอชัน และแสดงถึงสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิส ดังที่ปรากฏในกราฟที่ 13 และ 14

ไดอิเล็กโทรฟอเรซิสเป็นปรากฏการณ์ที่สัมพันธ์กับสมบัติไดอิเล็กทริกของเซลล์ ดังนั้น พฤติกรรมการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของเซลล์จึงสังเกตได้จากลักษณะรูปทรงของเส้นสเปกตรัมเมื่อทดลองปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องทุกตัวในสมการที่ 28 ผลปรากฏดังกราฟที่ 7 ถึง 24 ตามลำดับ

กำหนดค่าตัวแปร

พลอตกราฟจากสมการที่ 28 โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ในเบื้องต้นดังนี้

ไดอิเล็กทริกของเซลล์

ค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึม $\epsilon_{ic} = 60\epsilon_0$ F/m

ค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน $\epsilon_{im} = 8\epsilon_0$ F/m

ค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึมชั้นนอก $\epsilon_{oc} = 60\epsilon_0$ F/m

ค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก $\epsilon_{om} = 8\epsilon_0$ F/m

ค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายภายนอกเซลล์ $\epsilon_s = 80\epsilon_0$ F/m

สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม $\sigma_{ic} = 0.1$ S/m

สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน $\sigma_{im} = 0.1$ μ S/m

สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมชั้นนอก $\sigma_{oc} = 0.1$ S/m

สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก $\sigma_{om} = 0.5$ μ S/m

สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายภายนอกเซลล์ $\sigma_s = 0.05$ S/m

ลักษณะทางกายภาพของเซลล์

รัศมีทั้งเซลล์ $R = 20\mu m$

รัศมีวัดจากจุดศูนย์กลางเซลล์ถึงขอบในของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน $R_{ic} = 1997\mu m$

ความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน $d_{im} = 10 nm$

ความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก $d_{om} = 10 nm$

ความหนาของไซโทพลาสซึมชั้นนอก $d_{oc} = 15 nm$

ตัวแปรอื่นเป็นไปตามการคำนวณในสมการที่ 6 7 8 และ 9

หมายเหตุ : การพลอตกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลของตัวแปรต่อสเปกตรัม จะอิงค่าเบื้องต้นดังกล่าวเป็นหลัก ค่าเหล่านี้อิงตาม Asami and Irimajiri(1984)

4.3 สเปกตรัมไดอิเล็กทริกโทรฟอเรซิสระหว่างแบบจำลอง SDM กับ SSM (กราฟที่ 11 และ 20)

แบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกหนึ่งชั้น (SSM) แตกต่างจากเปลือกสองชั้น (SDM) ตรงที่มีจำนวนผนังเซลล์และชั้นไซโทพลาสซึมเพิ่มขึ้นมาอีกชั้น ส่งผลต่อการเกิดไดอิเล็กทริกโทรฟอเรซิส การเกิดดิสเพอซันของเซลล์ และสเปกตรัมไดอิเล็กทริกโทรฟอเรซิส ด้วยเหตุนี้ จึงเปรียบเทียบความแตกต่างของแบบจำลอง SSM กับ SDM ได้จากเส้นสเปกตรัมไดอิเล็กทริกโทรฟอเรซิส และไดอิเล็กทริกดิสเพอซัน เพื่อสังเกตลักษณะรูปทรง ขนาดและจุดตัดของกราฟ ความแตกต่างที่ปรากฏในเบื้องต้นเป็นดังกราฟที่ 11 และ 20 ตามลำดับ

กำหนดค่าตัวแปร

แบบจำลอง SDM

ไดอิเล็กทริกของเซลล์

ค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึม $\epsilon_{ic} = 60\epsilon_0$ F/m

ค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน $\epsilon_{im} = 8\epsilon_0$ F/m

ค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึมชั้นนอก $\epsilon_{oc} = 60\epsilon_0$ F/m

ค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก $\epsilon_{om} = 8\epsilon_0$ F/m

ค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายภายนอกเซลล์ $\epsilon_s = 80\epsilon_0$ F/m

สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม $\sigma_{ic} = 0.1 \text{ S/m}$

สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน $\sigma_{im} = 0.1 \text{ }\mu\text{S/m}$

สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมชั้นนอก $\sigma_{oc} = 0.1 \text{ S/m}$

สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก $\sigma_{om} = 0.5 \text{ }\mu\text{S/m}$

สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายภายนอกเซลล์ $\sigma_s = 0.05 \text{ S/m}$

ลักษณะทางกายภาพของเซลล์

รัศมีทั้งเซลล์ $R = 20\mu\text{m}$

แบบจำลอง SSM

ใช้ข้อมูลตามแบบจำลองในวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท เรื่องการประมาณตัวแปรไดโพลีทริกสำหรับเซลล์เดี่ยวพืชด้วยวิธีไดโพลีทริกฟอเรนซิส ของ สรรวุฒิ บุญถวิล (2541) โดยอิงค่าตัวแปรบางตัวที่ซ้ำกับแบบจำลอง SDM ได้แก่

ค่าไดโพลีทริกของไซโทพลาสซึม ใช้ค่า $\epsilon_{ic} = 60\epsilon_0 \text{ F/m}$

ค่าไดโพลีทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ ใช้ค่า $\epsilon_{im}^* = 8.85 \times 10^{-11} \text{ F/m}$

สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม ใช้ค่า $\sigma_{ic} = 0.1 \text{ S/m}$

สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ ใช้ค่า $\sigma_{im} = 0.1 \text{ }\mu\text{S/m}$

สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายภายนอกเซลล์ $\sigma_s = 0.05 \text{ S/m}$

รัศมีทั้งเซลล์ $R = 20\mu\text{m}$

4.4 ดิสเพอชันของไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์ (กราฟที่ 25)

โดยปกติมักนิยมระบุสมบัติไดอิเล็กทริกของเซลล์ ด้วยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก(ไม่มีหน่วย) และสภาพนำไฟฟ้า(หน่วยซีเมนส์/เมตร) ถ้าเขียนค่าเหล่านี้ในรูปปริมาณเชิงซ้อน จะมีทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ (ดูบทที่ 3 หัวข้อแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกสองชั้น) กล่าวคือส่วนจริงแสดงถึงไดอิเล็กทริก มีค่าแปรผกผันกับความถี่ ส่วนจินตภาพแสดงถึงสภาพนำไฟฟ้า มีค่าแปรตามความถี่ของสนามไฟฟ้าแบบไม่เชิงเส้นตามสมการที่ 19 เรียกว่า การกระเจิง หรือ ดิสเพอชัน(dispersion) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละแบบจำลอง ส่งผลต่อการเกิดไดโพลโมเมนต์ภายในเซลล์(พิจารณาจากค่า $Re[f(\omega)]$) และสเปกตรัมไดอิเล็กทริกฟอเรซิสของเซลล์ ดังตัวอย่างกราฟในหัวข้อที่แล้ว

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอลักษณะการเกิดดิสเพอชันของเซลล์ตามแบบจำลอง SDM ในรูปค่าโดยรวมของทั้งเซลล์ โดยแบ่งเป็น การดิสเพอชันของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและการดิสเพอชันของสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์ ผลิตกราฟโดยใช้แกนความถี่แบบสเกลล็อกกาลีซีมร่วมกัน และใช้แกนตั้งแยกเป็นสองแกน เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบ ดังกราฟที่ 25

การกำหนดค่าตัวแปร

ใช้สมการที่ 19 ผลิตกราฟ

ความถี่สนามไฟฟ้า 10 Hz –100MHz (ย่านเบต้าดิสเพอชัน)

ไดอิเล็กทริกของเซลล์

ค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึม $\epsilon_{ic} = 60\epsilon_0$ F/m

ค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน $\epsilon_{im} = 8\epsilon_0$ F/m

ค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึมชั้นนอก $\epsilon_{oc} = 60\epsilon_0$ F/m

ค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก $\epsilon_{om} = 8\epsilon_0$ F/m

ค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายภายนอกเซลล์ $\epsilon_s = 80\epsilon_0$ F/m

สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม $\sigma_{ic} = 0.1$ S/m

สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน $\sigma_{im} = 0.1$ μ S/m

สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมชั้นนอก $\sigma_{oc} = 0.1$ S/m

สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก $\sigma_{om} = 0.5$ μ S/m

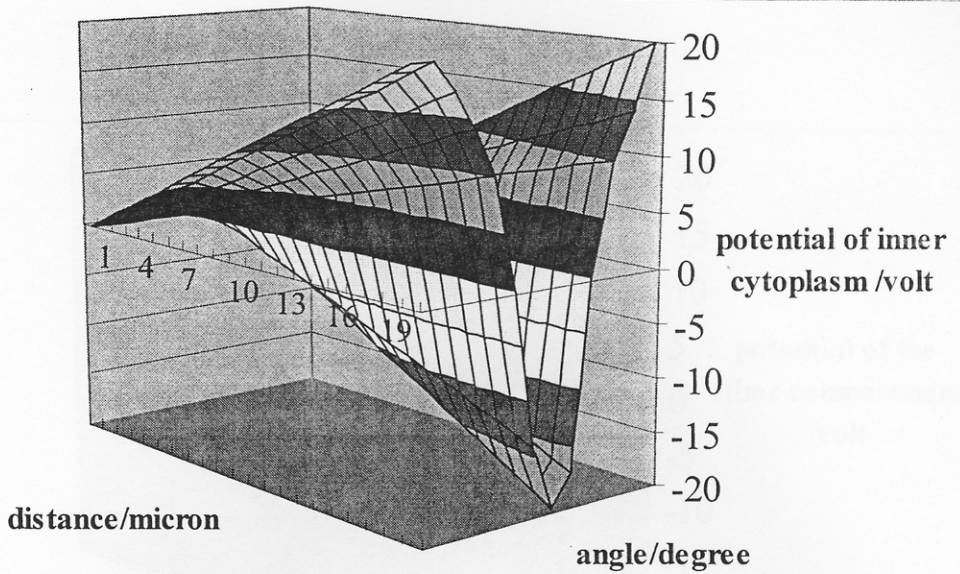
สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายภายนอกเซลล์ $\sigma_s = 0.05$ S/m

รัศมีเซลล์ $R = 20\mu m$

กราฟประกอบผลการคำนวณ

ทั้งหมด 25 กราฟ

หมายเหตุ กราฟที่ 1- 24 พล็อตด้วยโปรแกรม Microsoft Excel
กราฟที่ 25 พล็อตด้วยโปรแกรม Grapher (*GRAF4 Win*) version 1.2.3

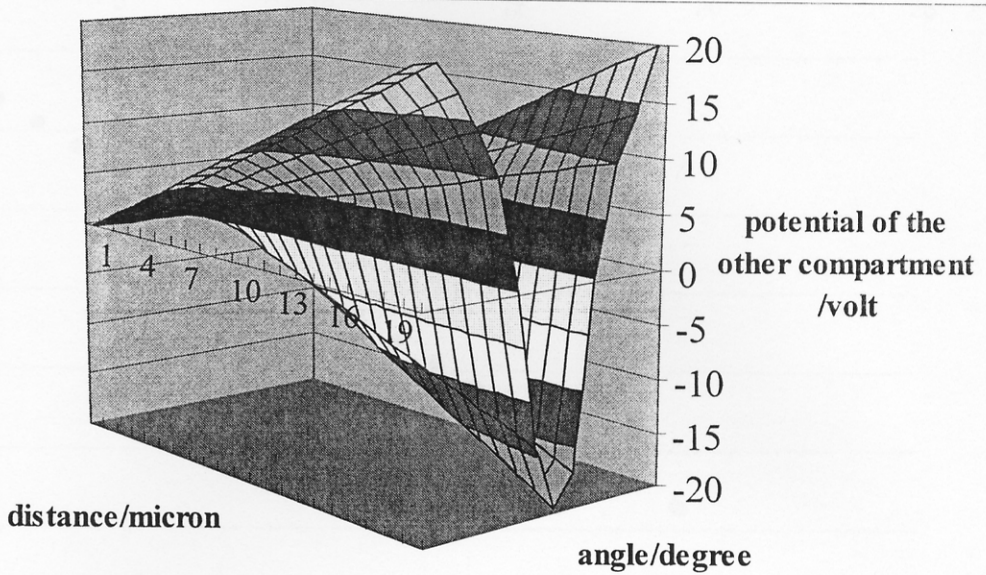


กราฟที่ 1

ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าภายในไซโทพลาสซึมชั้นใน

คำอธิบายกราฟ

พื้นระนาบมี 2 แกน คือ ระยะทาง (distance) วัดเทียบจากจุดศูนย์กลางเซลล์ไปยังจุดที่ต้องการคำนวณ(ในหน่วยไมครอน) มีขีดจำกัดไม่เกินบริเวณไซโทพลาสซึมชั้นใน(ไม่เกินค่า R_{ic}) และมุม θ (angle)วัดในหน่วยองศา มีขีดจำกัดจากมุม 0° ถึงมุม $\pm 90^\circ$ (ดูรูปประกอบ 2) ผลอดเทียบกับศักย์ไฟฟ้าภายในไซโทพลาสซึมชั้นใน (potential of inner cytoplasm, ψ_{ic}) (แกนตั้ง) ในหน่วยโวลต์ มีค่าได้ทั้งบวกและลบขึ้นกับระยะทางและมุมคำนวณ

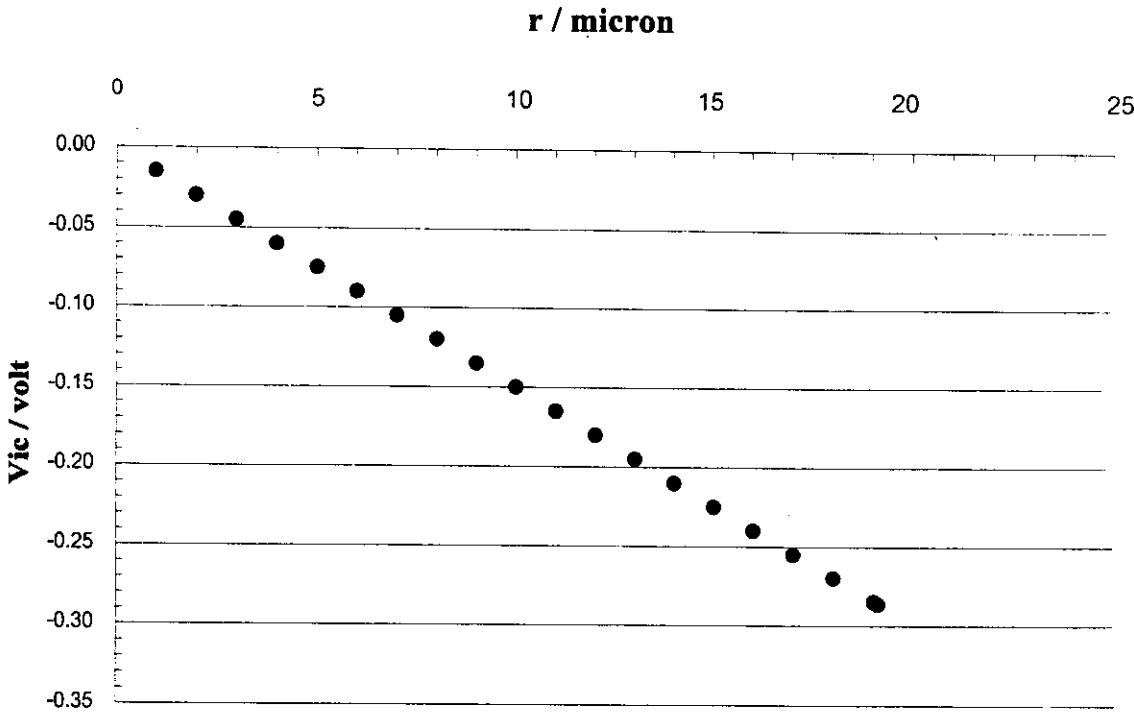


กราฟที่ 2

ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่ชั้นอื่น ภายนอกไซโทพลาสซึมชั้นใน

คำอธิบายกราฟ

พื้นระนาบมี 2 แกน คือ ระยะทาง (distance) วัดตั้งแต่ไซโทพลาสซึมชั้นในเป็นต้นไป(มากกว่าค่า R_{ic}) ในหน่วยไมครอน และมุม θ (angle) วัดในหน่วยองศา มีขีดจำกัดจากมุม 0° ถึงมุม $\pm 90^\circ$ (ดูรูปประกอบ 2) พล็อตเทียบกับศักย์ไฟฟ้าภายในไซโทพลาสซึมชั้นใน (potential of inner cytoplasm, ψ_{ic}) (แกนตั้ง) ในหน่วยโวลต์ มีค่าได้ทั้งบวกและลบขึ้นกับระยะทางและมุมคำนวณ

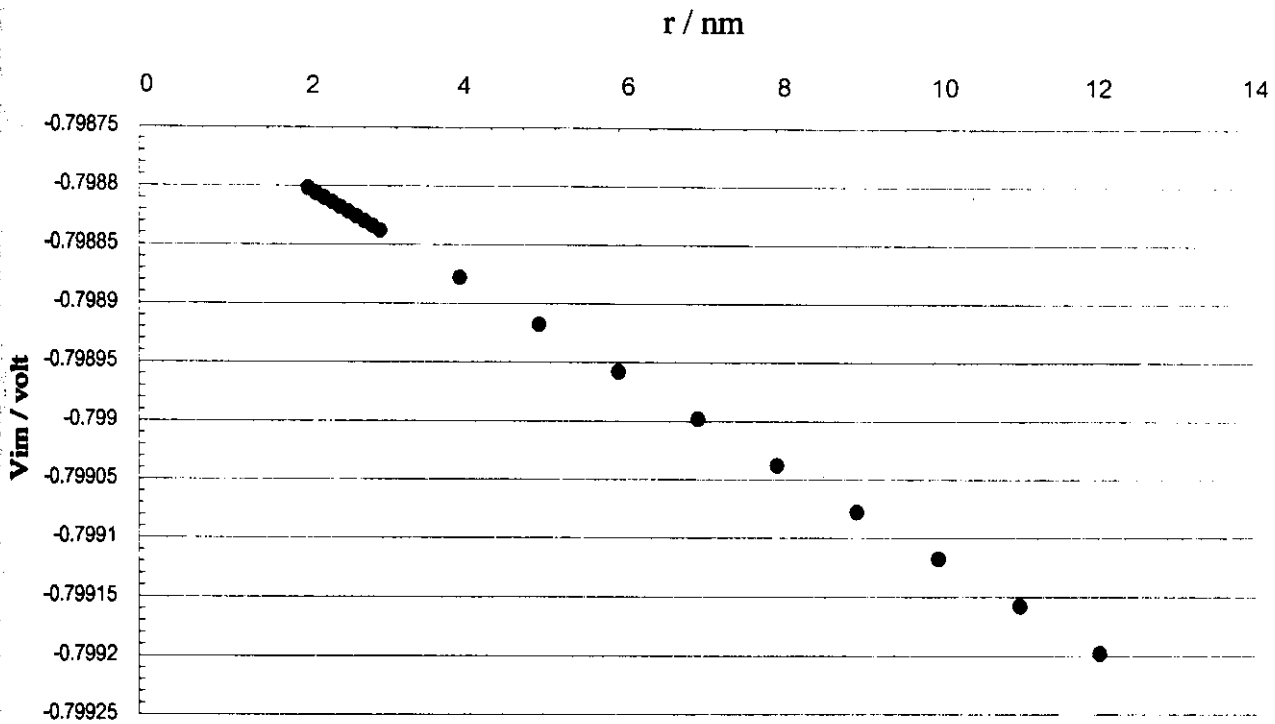


กราฟที่ 3

ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าภายในไซโทพลาสซึมชั้นใน 1 มิติ เทียบกับระยะทาง r

คำอธิบายกราฟ

สัญลักษณ์ศักย์ไฟฟ้าที่ปรากฏในแกนกราฟ Vic หมายถึงศักย์ไฟฟ้าภายในไซโทพลาสซึมชั้นใน (ψ_{ic}) คำนวณเทียบกับระยะทาง r วัดจากจุดศูนย์กลางเซลล์ไปยังผิวเยื่อเซลล์ชั้นใน ระยะ 25 ไมครอน (เริ่มคำนวณที่ค่า $r = 0$ ถึง 25 ไมครอน) ที่มุม $\theta = 0^\circ$ ตามสมการที่ 29 พลอตในหน่วยโวลต์ ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้มีลักษณะ 1 มิติ มีค่าแปรผันตรงกับค่า r (ดูรูปประกอบ 2)

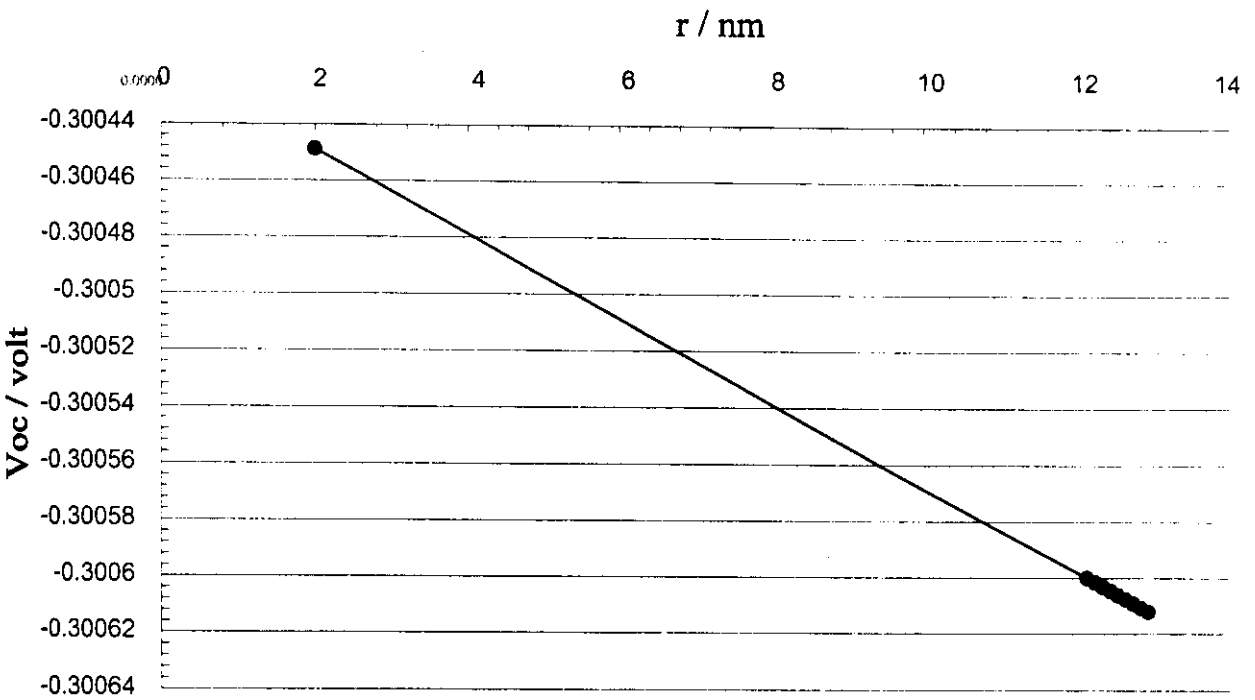


กราฟที่ 4

ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าภายในเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน 1 มิติ เทียบกับระยะทาง r

คำอธิบายกราฟ

สัญลักษณ์ศักย์ไฟฟ้าที่ปรากฏในแกนกราฟ V_{im} หมายถึงศักย์ไฟฟ้าภายในเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน (ψ_{im}) จำนวนเทียบกับระยะทาง r ในช่วงความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นในระยะ 14 นาโนเมตร (เริ่มคำนวณที่ค่า $r = 19.968$ ถึง 19.982 ไมครอน) ที่มุม $\theta = 0^\circ$ ตามสมการที่ 30 พลอตในหน่วยโวลต์ ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้มีลักษณะ 1 มิติ มีค่าแปรผันตรงกับค่า r (ดูรูปประกอบ 2)

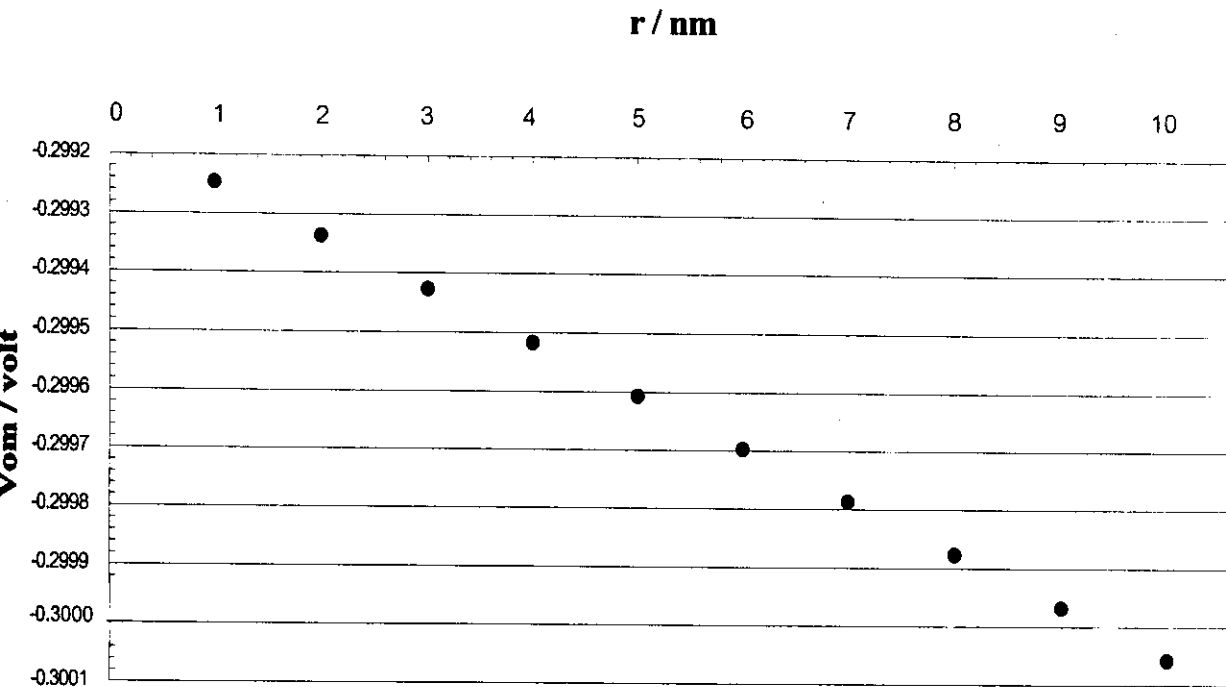


กราฟที่ 5

ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าภายในไซโทพลาสซึมชั้นนอก 1 มิติ เทียบกับระยะทาง r

คำอธิบายกราฟ

สัญลักษณ์ศักย์ไฟฟ้าที่ปรากฏในแกนกราฟ Voc หมายถึงศักย์ไฟฟ้าภายในไซโทพลาสซึมชั้นนอก (ψ_{oc}) คำนวณเทียบกับระยะทาง r ในช่วงความหนาของไซโทพลาสซึมชั้นนอกระยะ 14 นาโนเมตร (เริ่มคำนวณที่ค่า $r = 19.978$ ถึง 19.992 ไมครอน) ที่มุม $\theta = 0^\circ$ ตามสมการที่ 31 พล็อตในหน่วยโวลต์ ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้มีลักษณะ 1 มิติ มีค่าแปรผันตรงกับค่า r (ดูรูปประกอบ 2)

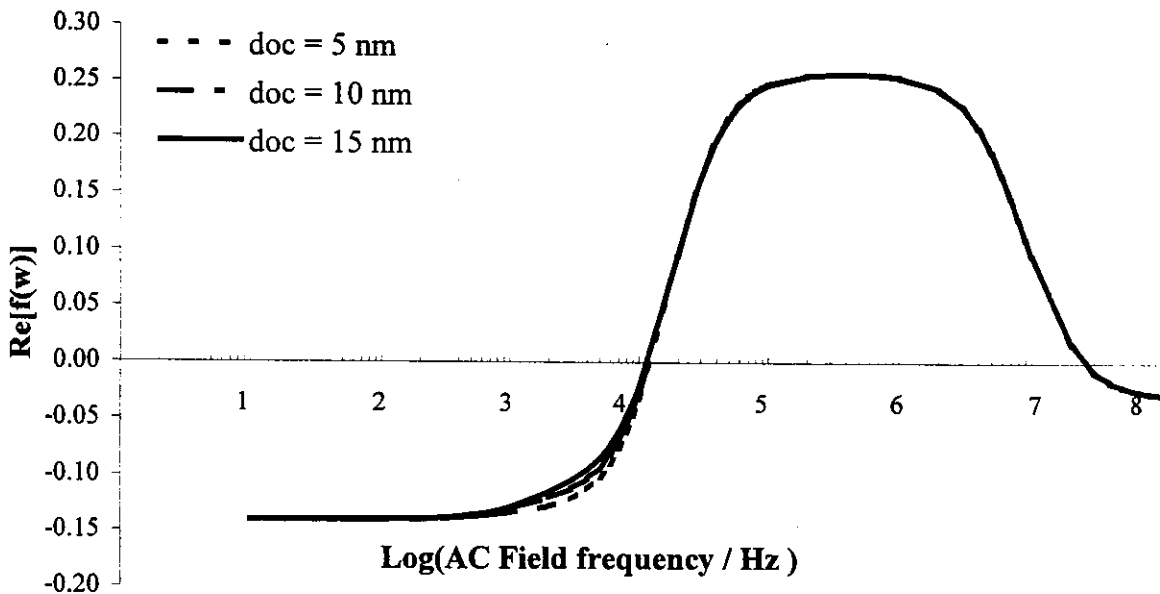


กราฟที่ 6

ผลการคำนวณศักย์ไฟฟ้าภายในเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก 1 มิติ เทียบกับระยะทาง r

คำอธิบายกราฟ

สัญลักษณ์ศักย์ไฟฟ้าที่ปรากฏในแกนกราฟ V_{om} หมายถึงศักย์ไฟฟ้าภายในเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก (ψ_{om}) ค่าวนเทียบกับระยะทาง r ในช่วงความหนาของไซโทพลาสซึมชั้นนอกกระยะ 10 นาโนเมตร (เริ่มคำนวณที่ค่า $r = 19.99$ ถึง 20.00 ไมครอน) ที่มุม $\theta = 0^\circ$ ตามสมการที่ 32 พลอตในหน่วยโวลต์ ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้มีลักษณะ 1 มิติ มีค่าแปรผันตรงกับค่า r (ดูรูปประกอบ 2)



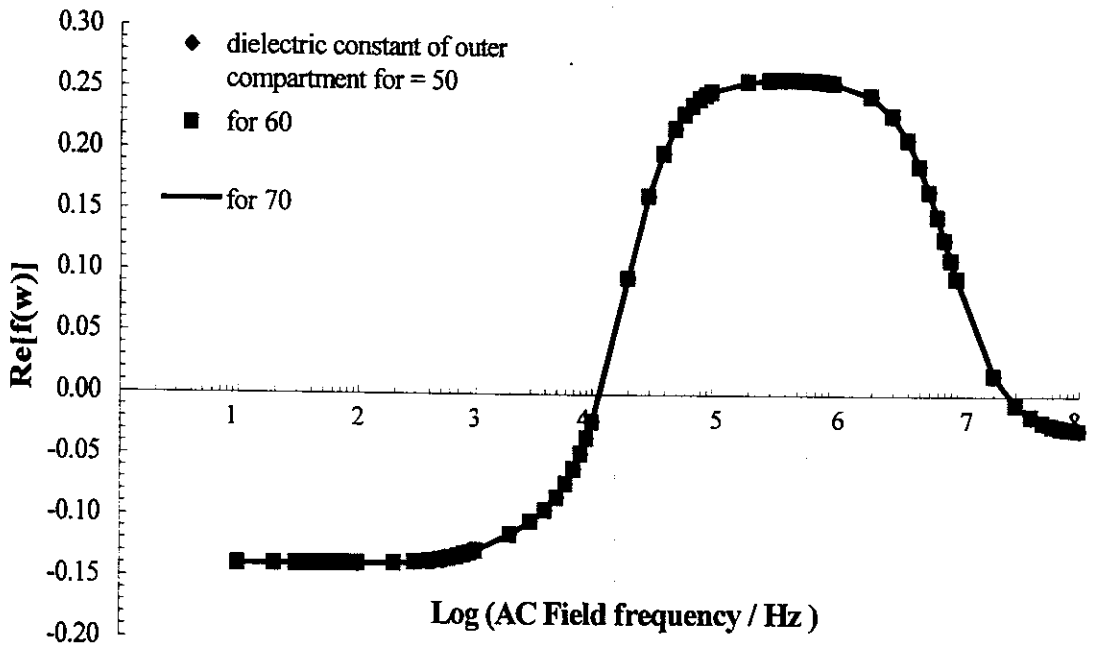
Theoretical plots of $\text{Re}[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the thickness of outer compartment predictable from the double-shell model.

กราฟที่ 7

สเปกตรัมไดอิเล็กโตรฟอเรซิสที่พลอตจากหลายค่าความหนาของชั้นไฮโทพลาสซึมชั้นนอก เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า (หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลีซึม ตามสมการ 28 ที่หลายค่าความหนาของชั้นไฮโทพลาสซึมชั้นนอก (d_{oc} หน่วยนาโนเมตร) ในช่วงความถี่ 10Hz – 100 MHz



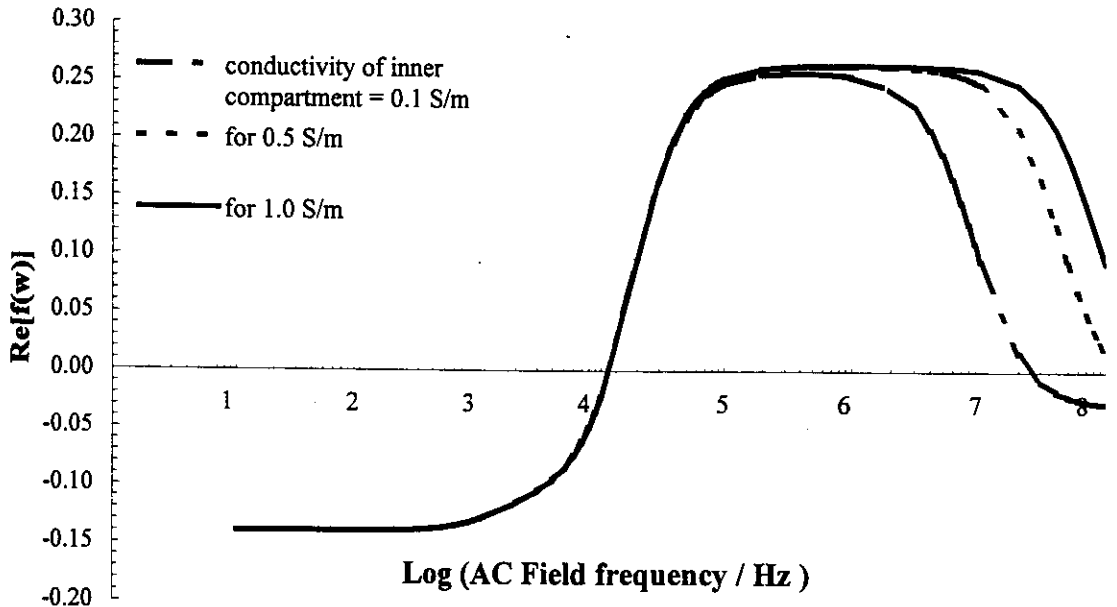
Theoretical plots of $\text{Re}[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the dielectric constant of outer cytoplasm predictable from the double-shell model.

กราฟที่ 8

สเปกตรัมไดอิเล็กทริกโพเรซิสที่พลอตจากหลายค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึมชั้นนอกเทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า (หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลีซิมตามสมการ 28 ที่หลายค่าไดอิเล็กทริกของชั้นไซโทพลาสซึมชั้นนอก (ϵ_{oc}) เป็นจำนวนเท่าของไดอิเล็กทริกสุญญากาศ (ϵ_0) ในช่วงความถี่ 10Hz – 100 MHz



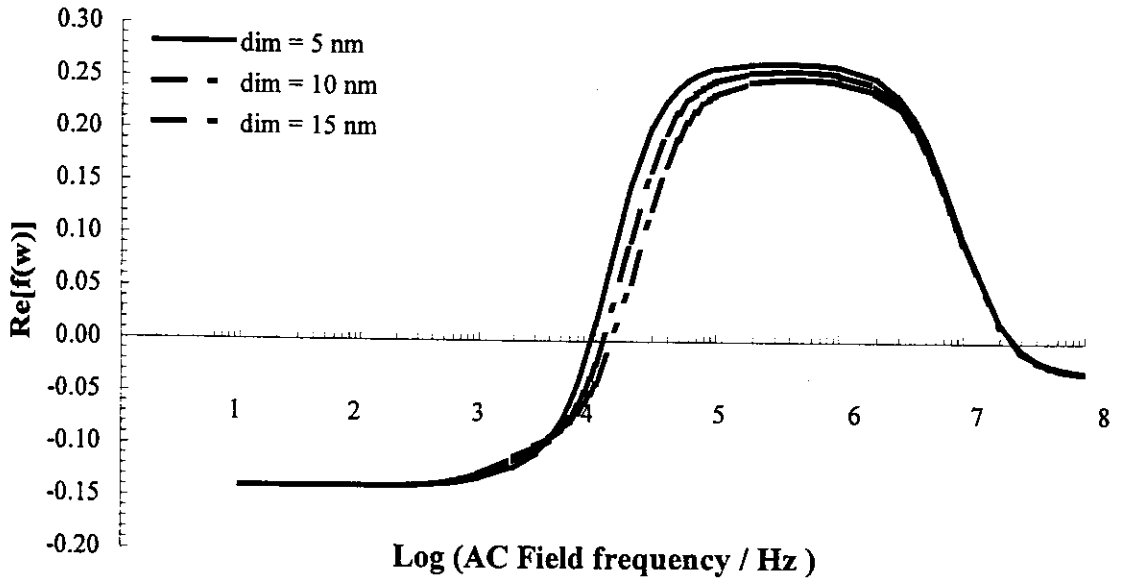
Theretical plots of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the conductivity of the inner compartment predictable from the double-shell model.

กราฟที่ 9

สเปกตรัมไดโพลาร์ไอโซเทอริสที่พลอตจากหลายค่าสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมชั้นใน
 เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่า $Re[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า (หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลีซึม
 ตามสมการ 28 ที่หลายค่าสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมชั้นใน (σ_{ic} , หน่วยซีเมนส์/เมตร)
 ในช่วงความถี่ 10Hz - 100 MHz



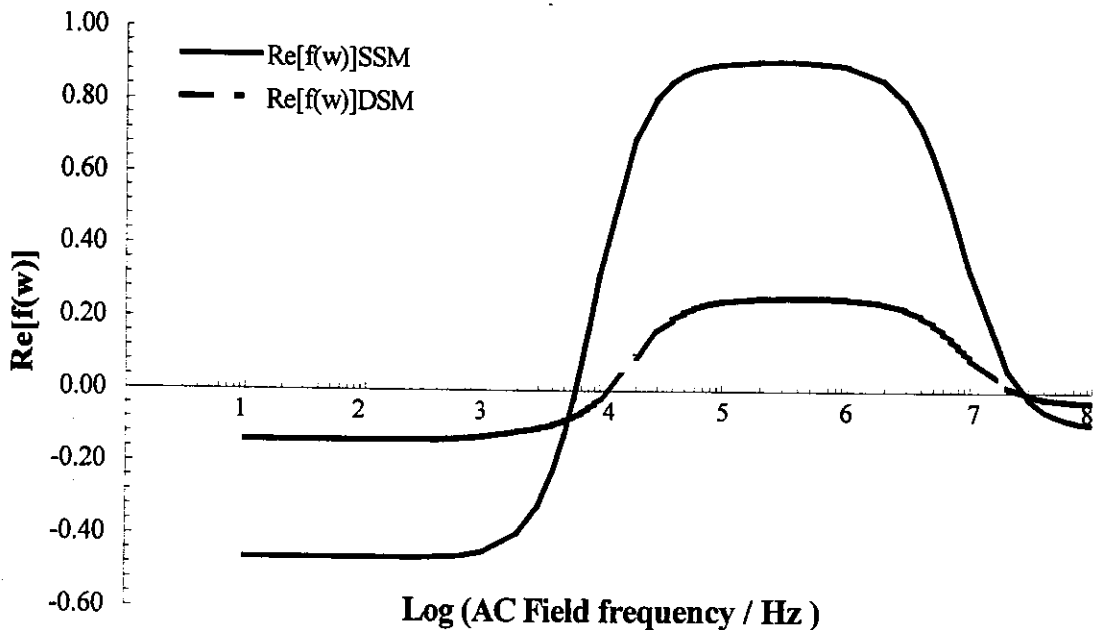
Theoretical plots of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the thickness of inner membrane predictable from the double-shell model.

กราฟที่ 10

สเปกตรัมไดโพลีกรโพรเซสที่พลอตจากหลายค่าสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก
เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

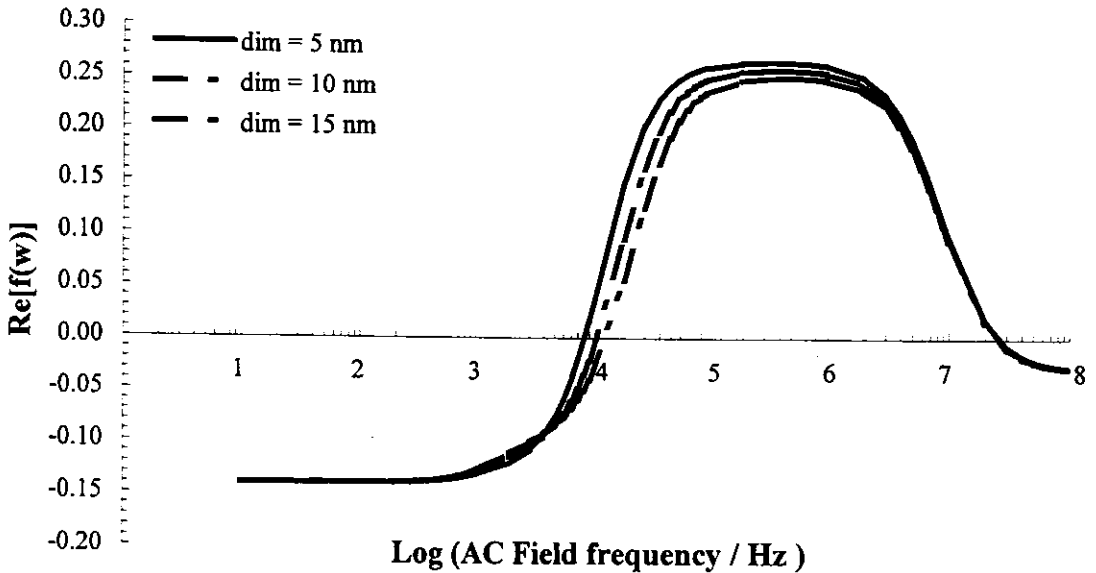
พลอตค่า $Re[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า (หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลีซีมตามสมการ 28 ที่หลายค่าสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก (σ_{om} , หน่วยซีเมนส์/เมตร) ในช่วงความถี่ $10 \text{ Hz} - 100 \text{ MHz}$



Theoretical frequency dependence of $\text{Re}[f(\omega)]$ predictable from the SSM model (solid line) and the DSM model (interrupted line).

กราฟที่ 11

เปรียบเทียบสเปกตรัมไดโพลีโทรฟอเรซิสที่พลอตจากแบบจำลอง SSM (เส้นทึบ) และ SDM(เส้นประ) ในช่วงความถี่ 10Hz – 100 MHz



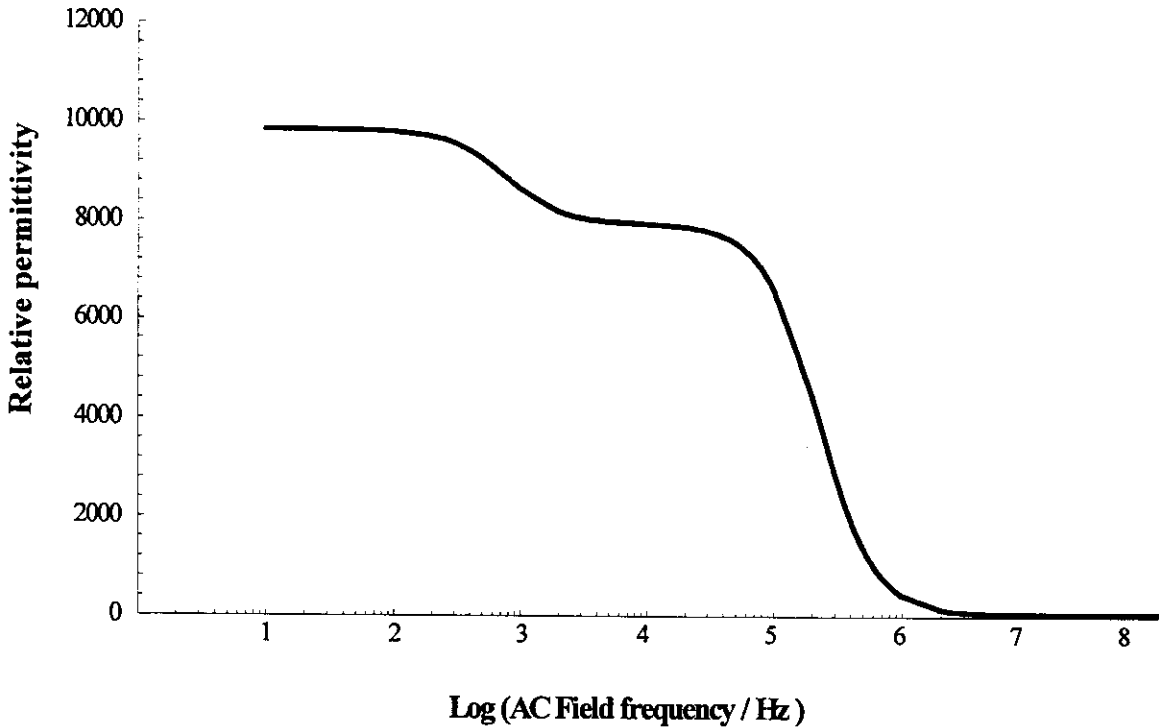
Theoretical plots of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the thickness of inner membrane predictable from the double-shell model.

กราฟที่ 12

สเปกตรัมไดโพลีกรโพรเพอริสที่พลอตจากหลายค่าความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นในเทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่า $Re[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า(หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลีซิม ตามสมการ 28 ที่หลายค่าความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน (d_{im} , หน่วยนาโนเมตร) ในช่วงความถี่ 10Hz – 100 MHz



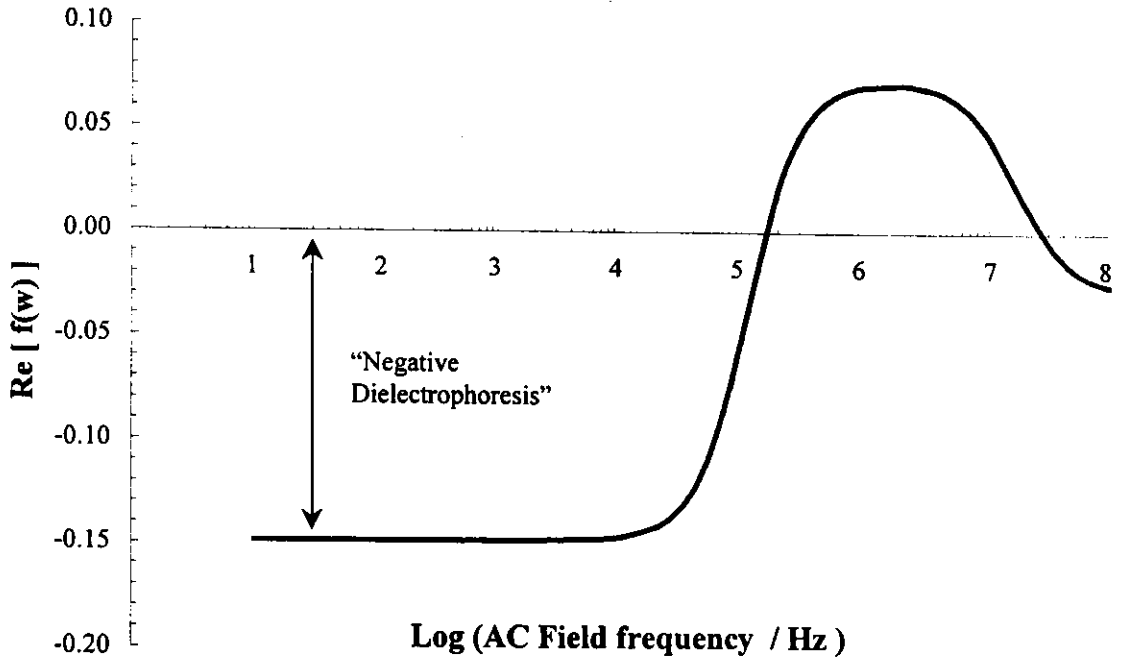
Theoretical frequency dependence of relative permittivity predictable from the double-shell model .

กราฟที่ 13

ไดอิเล็กทริกดิสเพอชันตามแบบจำลอง SDM

คำอธิบายกราฟ

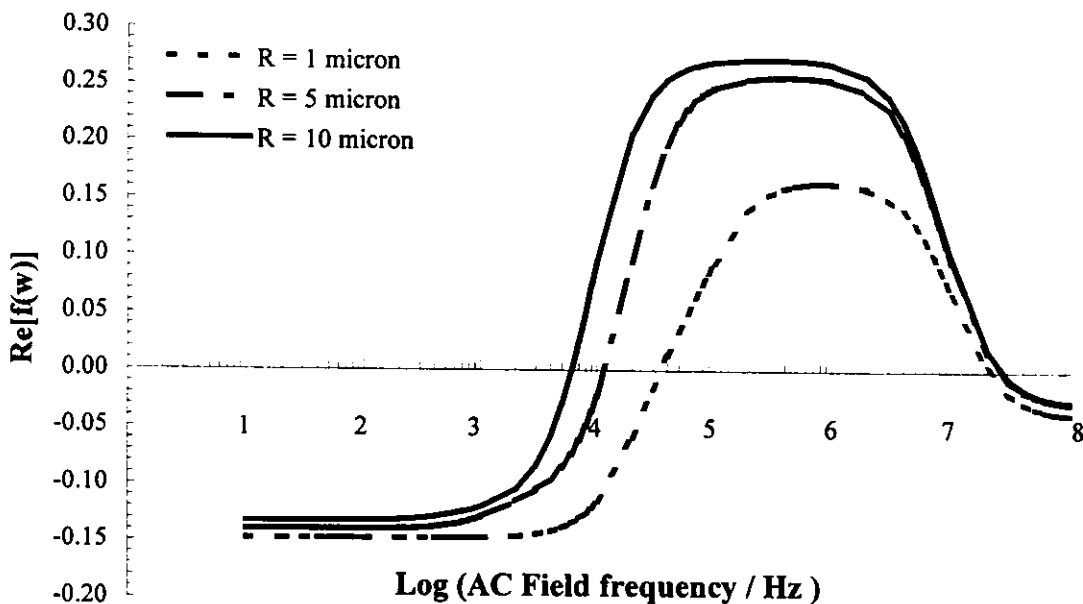
พลอตค่าไดอิเล็กทริกของทั้งเซลล์(เป็นจำนวนเท่าของ ϵ_0)เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้าตามสมการที่ 19 ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 Hz – 100 MHz ตามทฤษฎีการกระเจิงในช่วงแอลฟา – เบต้าดิสเพอชัน ของแบบจำลอง SDM



Theoretical plot of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency predictable from the double-shell model.

กราฟที่ 14

สเปกตรัมไดอิเล็กโทรเฟอริสตามแบบจำลอง SDM และไดอิเล็กโทรเฟอริสแบบลบที่ยาน
ความถี่ต่ำ



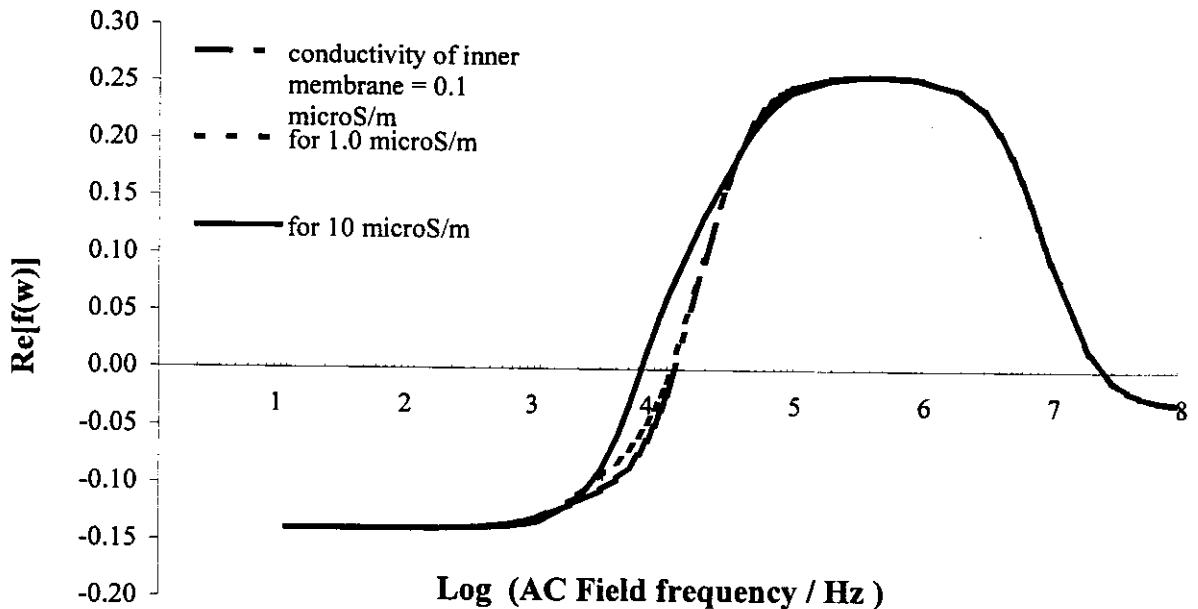
Theretical plots of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the cell radius predictable from the double-shell model.

กราฟที่ 15

สเปกตรัมไดโพลีกรโพรเซซที่พลอตจากหลายค่ารัศมีเซลล์เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่า $Re[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า(หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลีซึมตามสมการ 28 ที่หลายค่ารัศมีเซลล์ (R , หน่วยไมครอน) ในช่วงความถี่ 10Hz – 100 MHz



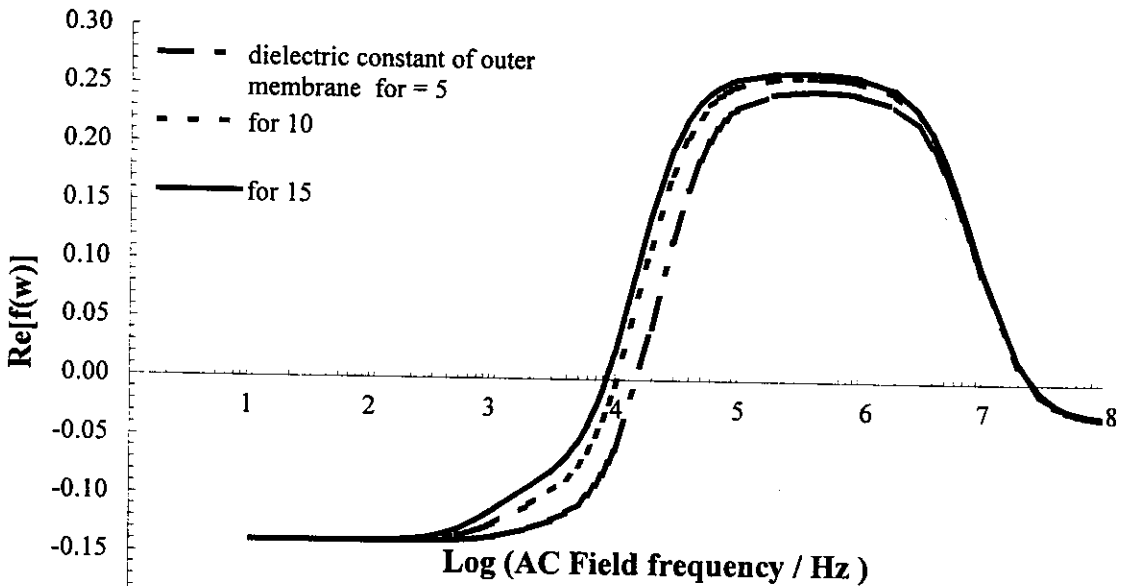
Theretical plots of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the conductivity of the inner membrane predictable from the double-shell model.

กราฟที่ 16

สเปกตรัมไดโพลีกรโพรเซสที่พลอตจากหลายค่าความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่า $Re[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า (หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลีซึม ตามสมการ 28 ที่หลายค่าความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก (d_{om} , ในหน่วยนาโนเมตร) ในช่วงความถี่ 10Hz – 100 MHz



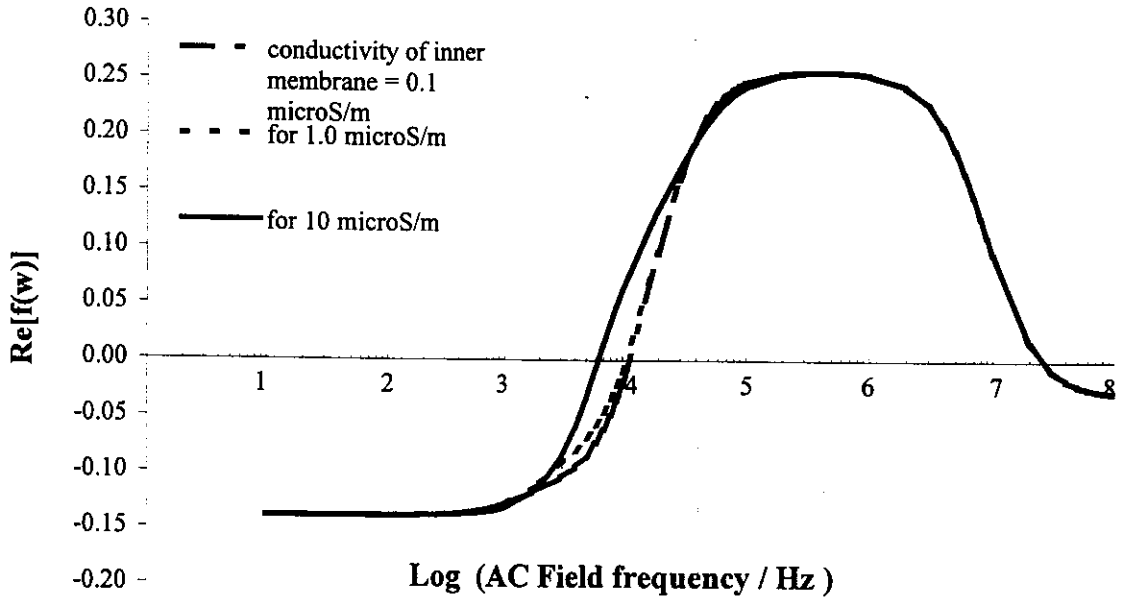
Theoretical plots of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the dielectric constant of outer membrane predictable from the double-shell model.

กราฟที่ 17

สเปกตรัมไดอิเล็กทริกโทรโพเรซิสที่พลอตจากหลายค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก
เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่า $Re[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า(หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลีริม
ตามสมการ 28 ที่หลายค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก (ϵ_{om}) เป็นจำนวนเท่าของ
ไดอิเล็กทริกสุญญากาศ (ϵ_0) ในช่วงความถี่ 10Hz – 100 MHz



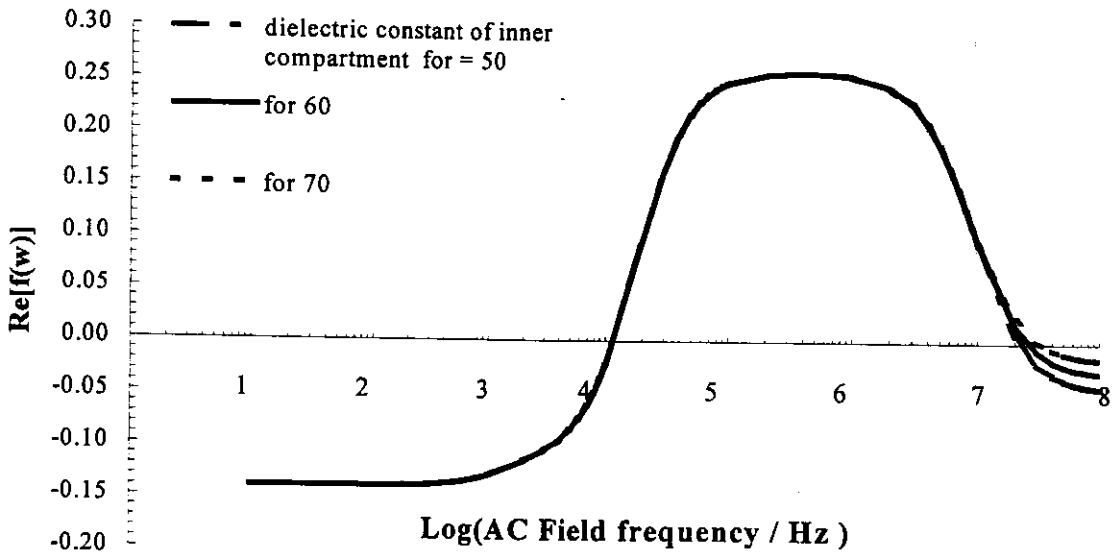
Theoretical plots of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the conductivity of the inner membrane predictable from the double-shell model.

กราฟที่ 18

สเปกตรัมไดอิเล็กโทรโพเรซิสที่พลอตจากหลายค่าสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน
 เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

พล็อตค่า $Re[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า(หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลีซึม
 ตามสมการ 28 ที่หลายค่าสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน (σ_{im} , หน่วยซีเมนส์/เมตร)
 ในช่วงความถี่ 10Hz – 100 MHz



Theoretical plots of $\text{Re}[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the dielectric constant of inner cytoplasm predictable from the double-shell model.

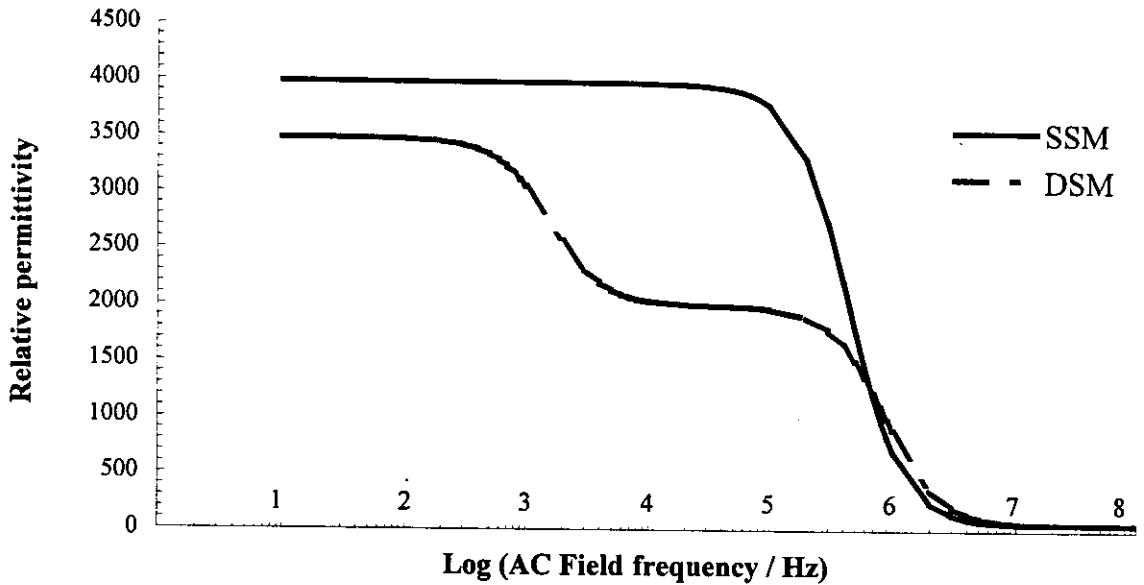
กราฟที่ 19

สเปกตรัมไดอิเล็กทริกโพรเซสที่พลอตจากหลายค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายภายนอกเทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า (หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลิซึม ตามสมการ 28 ที่หลายค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายภายนอกเซลล์ (σ_s , ซีเมนส์/เมตร)

ในช่วงความถี่ 10Hz – 100 MHz



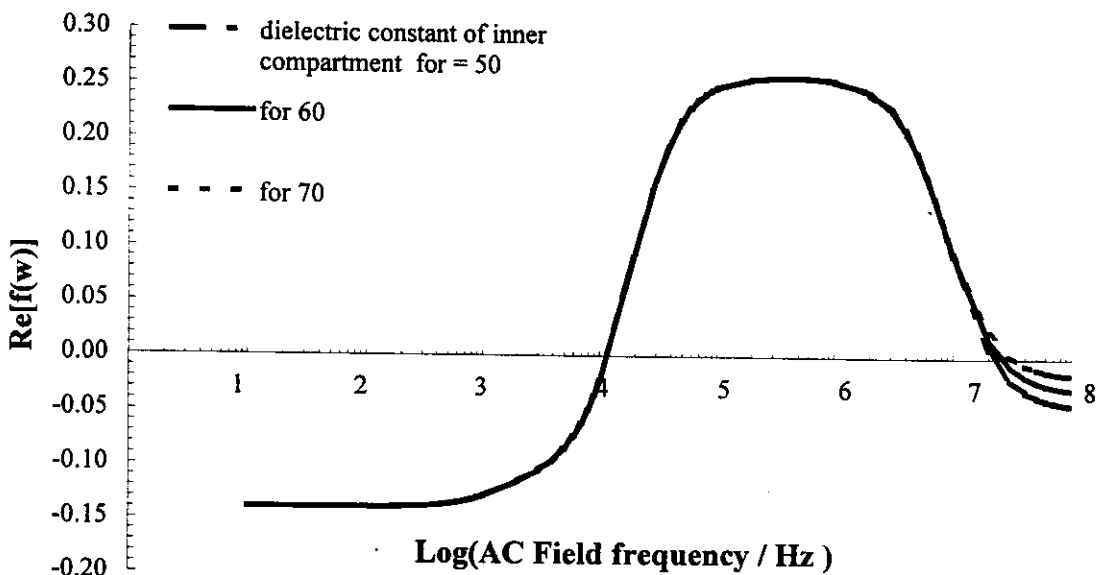
Theoretical frequency dependence of relative permittivity predictable from the single shell model (solid line) and the double shell model (interrupted line).

กราฟที่ 20

ไดอิเล็กทริกดิสเพอชันตามแบบจำลอง SSM และ SDM

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่าไดอิเล็กทริกของทั้งเซลล์(เป็นจำนวนเท่าของ ϵ_0) เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า จากแบบจำลอง SDM ตามสมการที่ 19 ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 Hz - 100 MHz ตามทฤษฎี การกระเจิงในช่วงแอลฟา - เบต้าดิสเพอชัน เทียบกับแบบจำลอง SSM



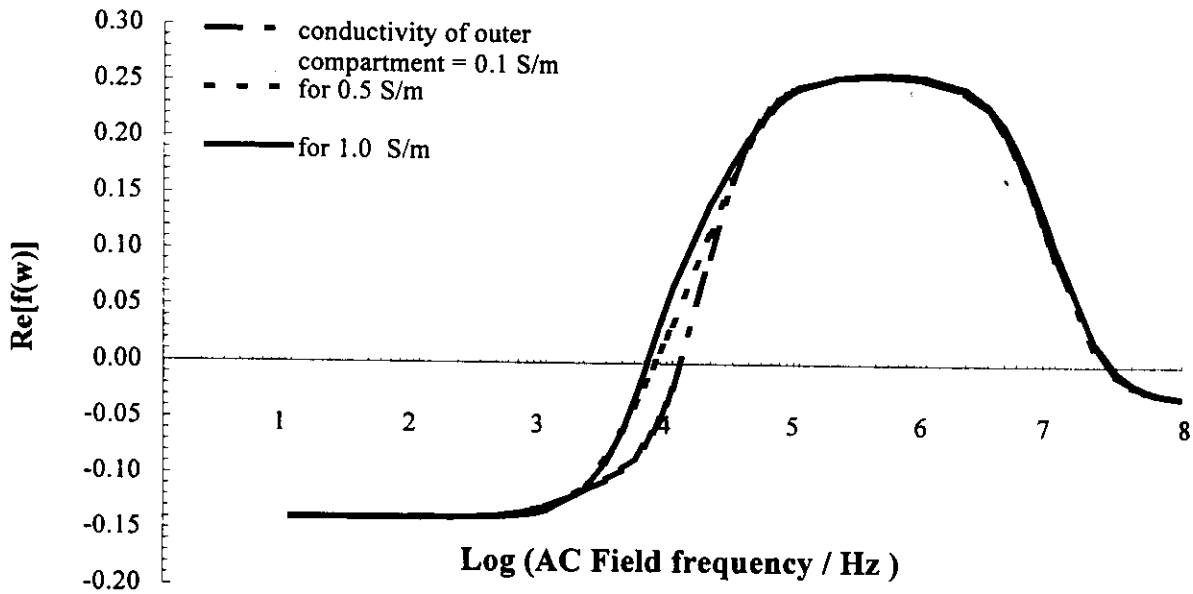
Theoretical plots of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the dielectric constant of inner cytoplasm predictable from the double-shell model.

กราฟที่ 21

สเปกตรัมไดโพลีโพรเรซิสที่พลอตจากหลายค่าไดโพลีทริกของไซโทพลาสซึมชั้นใน
เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่า $Re[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า(หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลีซึมตามสมการ 28 ที่หลายค่าไดโพลีทริกของไซโทพลาสซึมชั้นใน (ϵ_{ic}) เป็นจำนวนเท่าของค่าคงที่ไดโพลีทริกสุญญากาศ ϵ_0 ในช่วงความถี่ 10Hz – 100 MHz



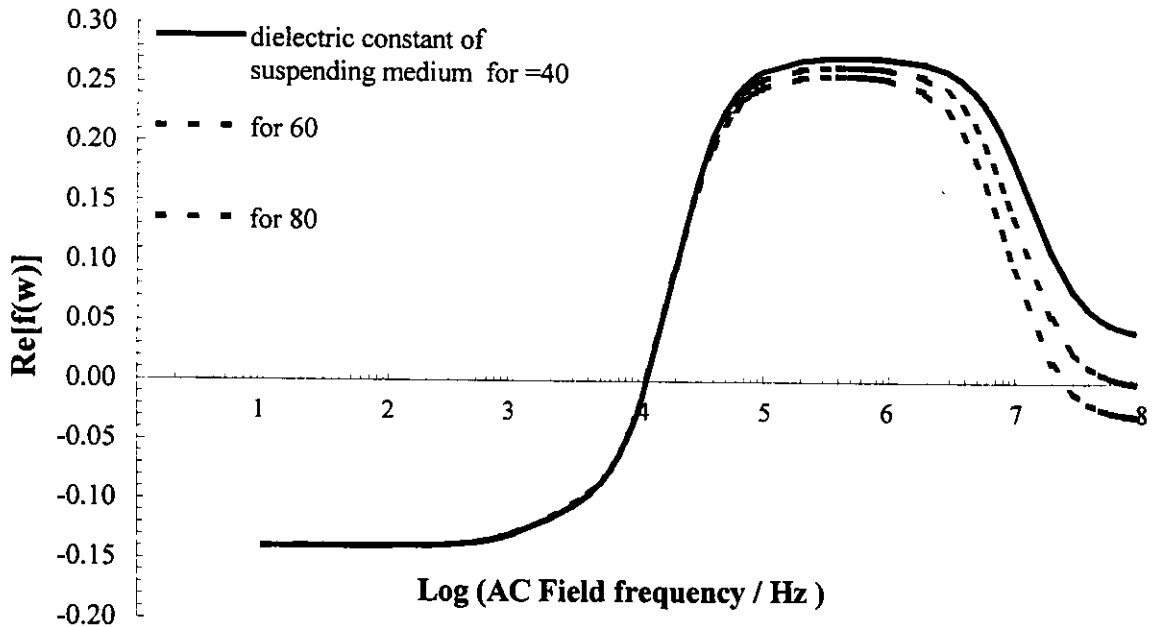
Theoretical plots of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the conductivity of the outer compartment predictable from the double-shell model.

กราฟที่ 22

สเปกตรัมไดโพลีโทรฟอเรซิสที่พลอตจากหลายค่าไดโพลีทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่า $Re[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า (หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลีซึ่ม ตามสมการ 28 ที่หลายค่าไดโพลีทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน (ϵ_{im}) เป็นจำนวนเท่าของค่าคงที่ไดโพลีทริกสูญญากาศ ϵ_0 ในช่วงความถี่ 10 Hz – 100 MHz



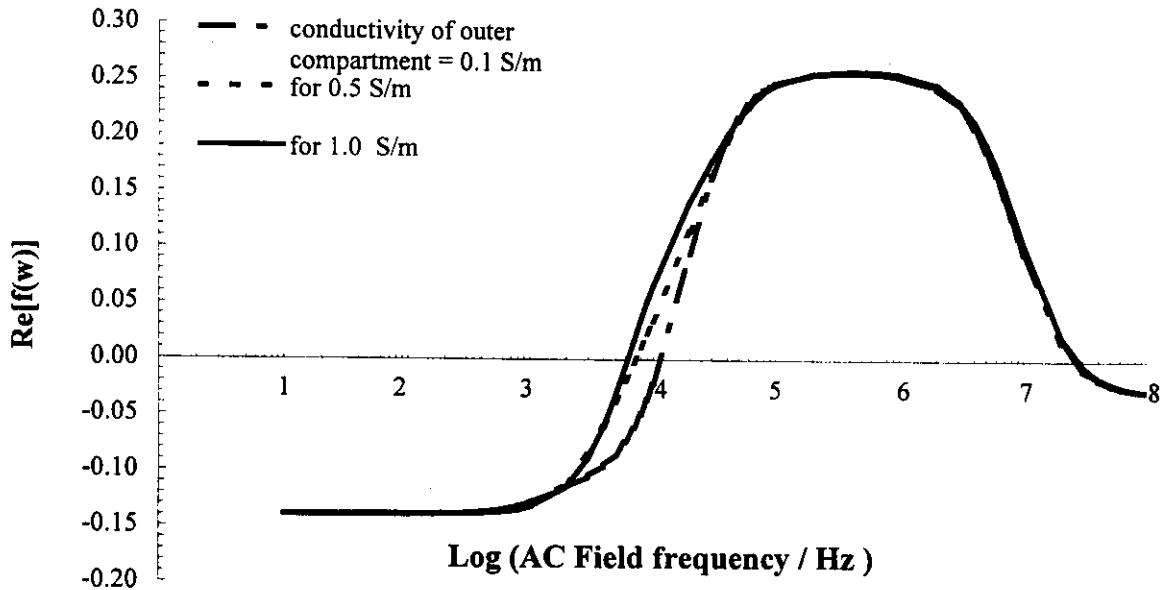
Theoretical plots of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the dielectric constant of the suspending medium predictable from the double-shell model.

กราฟที่ 23

สเปกตรัมไดอิเล็กทริกโพเรซิสที่พลอตจากหลายค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายภายนอกเซลล์
เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่า $Re[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า(หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลีซิมตามสมการ 28 ที่หลายค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายภายนอกเซลล์ (ϵ_s) เป็นจำนวนเท่าของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสุญญากาศ ϵ_0 ในช่วงความถี่ 10Hz – 100 MHz



Theoretical plots of $Re[f(\omega)]$ as a function of field frequency for various values of the conductivity of the outer compartment predictable from the double-shell model.

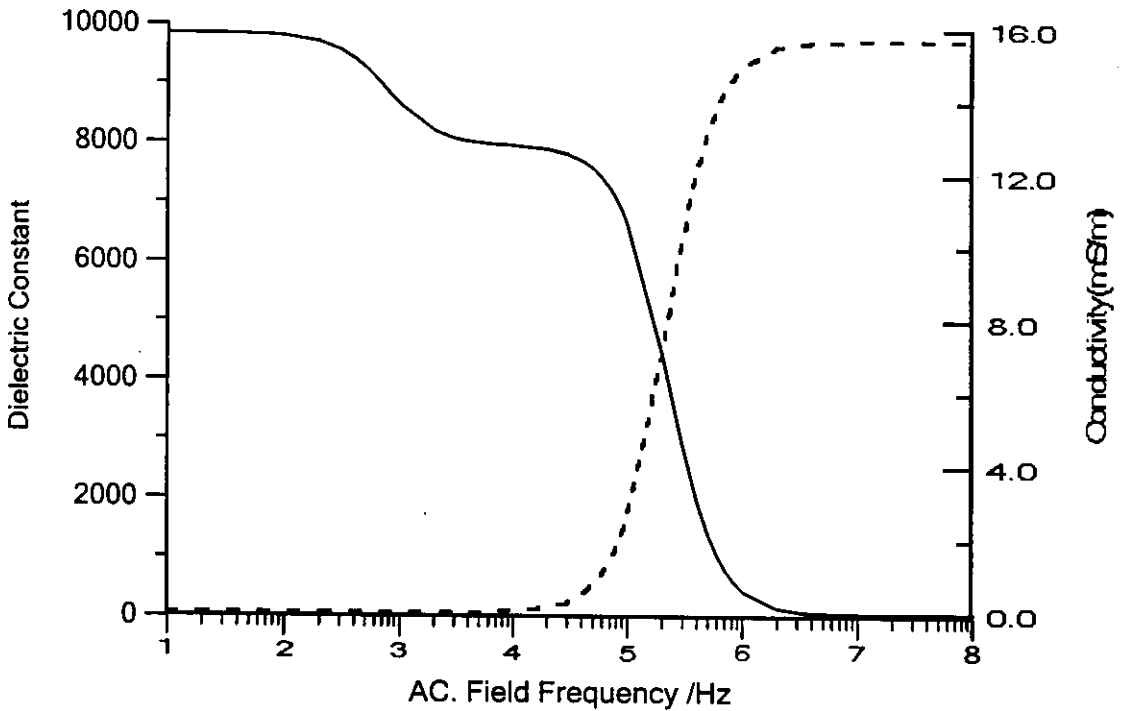
กราฟที่ 24

สเปกตรัมไดโพลีกรโพรเซสที่พลอตจากหลายค่าสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมชั้นนอก
เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่า $Re[f(\omega)]$ เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่สนามไฟฟ้า(หน่วยเฮิรตซ์) บนสเกลล็อกกาลีซึมตามสมการ 28 ที่หลายค่าสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมชั้นนอก(σ_{oc} , ซีเมนส์/เมตร)

ในช่วงความถี่ 10Hz – 100 MHz



Theoretical frequency dependence of relative permittivity, ϵ , (solid line) and conductivity, σ , (interrupted line) predictable from the double shell model (SDM)

กราฟที่ 25

ไดอิเล็กทริกดิสเพอชันของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์
คำนวณตามแบบจำลอง SDM

คำอธิบายกราฟ

พลอตค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเซลล์ (เป็นจำนวนเท่าของ ϵ_0) เส้นทึบ - แกนตั้งฝั่งซ้ายมือ จากส่วนจริงของสมการที่ 19 และค่าสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์ เส้นประ-แกนตั้งฝั่งขวามือ จากส่วนจินตภาพสมการที่ 19 เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า

ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 Hz – 100 MHz สเกลล็อกกาลีซึม ตามทฤษฎีการกระเจิงในช่วงแอลฟา - เบต้าดิสเพอชัน ของแบบจำลอง SDM