

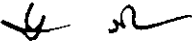
การประมาณตัวแปรไดอิเล็กทริกสำหรับเซลล์เดี่ยวพืชด้วยวิธีไดอิเล็กโทรโฟเรติก
Estimations of Dielectric Parameters for Single Plant Cells Using Dielectrophoretic
Method

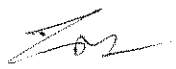
สรุวุฒิ บุญถวิล
Sorawuthi Bunthawin

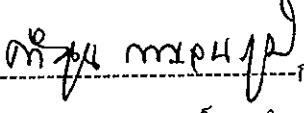
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
Master of Science Thesis in Physics
Prince of Songkla University
2541

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประมาณตัวแปรไดอิเล็กทริกสำหรับเซลล์เดี่ยวพืชด้วยวิธี
 ไดอิเล็กโทรพอเรติก
ผู้เขียน นาย สรรุณี บุญถวิล
สาขาวิชา ฟิสิกส์


คณะกรรมการที่ปรึกษา

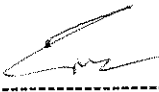

-----ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิกุล วณิชชาภิชาติ)

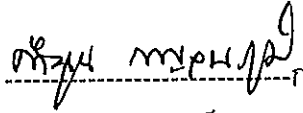

-----กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยรรยงค์ ภูเจริญ)

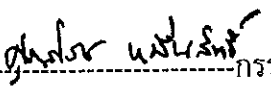

-----กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.คำนูน กาญจนภูมิ)

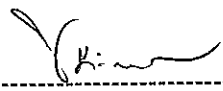
คณะกรรมการสอบ


-----ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิกุล วณิชชาภิชาติ)

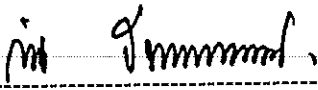

-----กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยรรยงค์ ภูเจริญ)


-----กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.คำนูน กาญจนภูมิ)


-----กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภสโรช หมิ่นสิทธิ์)


-----กรรมการ
(ดร.ประการ คुरुหงษา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ยินยอมให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์



(รองศาสตราจารย์ ดร. ก้าน จันทร์พรหมมา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประมาณตัวแปรไดอิเล็กทริกสำหรับเซลล์เดี่ยวพืชด้วยวิธี
 ไดอิเล็กโทรฟอเรติก
 ผู้เขียน นาย สรวุฒิ บุญถวิล
 สาขาวิชา ฟิสิกส์
 ปีการศึกษา 2541

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวพืชน้ำเค็ม *Chlorella* sp., *Tetraselmis* sp. และโพรโทพลาสต์กล้วยไม้ *Dendrobium* sp. โดยอาศัยการเหนี่ยวนำให้เซลล์เคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้าแบบทรงกระบอกคู่ขนานภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งใช้ช่วงความถี่กิโลเฮิรตซ์ถึงเมกะเฮิรตซ์ วัดความเร็วของการเคลื่อนที่ของเซลล์เพื่อประมาณค่าจริงของฟังก์ชันความถี่ ($\text{Re}[f(\omega)]$) ของเซลล์แต่ละชนิด พารามิเตอร์ที่วัดได้จากงานวิจัยนี้คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์ (σ_s) รัศมีของเซลล์ (R) ความหนืดของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์ (η) ส่วนสนามไฟฟ้าภายนอก (E) สามารถคำนวณจากรูปทรงของขั้วไฟฟ้า จากการประมาณค่าด้วยวิธีทำซ้ำและเปรียบเทียบกับสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่หาได้คือ สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ (σ_m) ค่าสภาพยอมของเยื่อหุ้มเซลล์ (ϵ_m) ค่าสภาพยอมของไซโทพลาสซึม (ϵ_c) ค่าสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม (σ_c) และความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ (δ) โดยอิงทฤษฎีแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกเซลล์หนึ่งชั้น

การเก็บข้อมูลความเร็วของเซลล์ในสนามไฟฟ้าได้ทดลองเฉพาะช่วงความถี่ที่ทำให้เซลล์เคลื่อนที่เกาะขั้วไฟฟ้า จากผลการทดลองของเซลล์ *Chlorella* sp. พบว่าการเพิ่ม σ_s จะทำให้ความถี่สนามไฟฟ้าที่ทำให้ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ เป็นศูนย์มีค่าลดลง ขณะที่เซลล์ *Tetraselmis* sp. และ *Dendrobium* sp. ค่าดังกล่าวกลับเพิ่มขึ้น ส่วนความเข้มสนามไฟฟ้าที่เลือกใช้มีค่าระหว่าง 13 ถึง 116 kV.m⁻¹ ขึ้นกับขนาดของเซลล์ที่ทดลอง และพบว่าการเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าจะทำให้เซลล์เคลื่อนที่เร็วขึ้นโดยไม่มีผลต่อขนาดของ $\text{Re}[f(\omega)]$ เนื่องจากค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างความเร็วและเกรเดียนต์ของความเข้มสนามไฟฟ้า จากการศึกษาสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ พบว่าค่าสูงสุดของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ในเซลล์แต่ละชนิดต่างกันกล่าวคือ เท่ากับ 2.50 0.30 และ 0.050 สำหรับเซลล์พืชน้ำเค็ม *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp. และโพรโทพลาสต์กล้วยไม้ *Dendrobium* sp. ตามลำดับ สำหรับโพรโทพลาสต์กล้วยไม้ ค่าสูงสุด

ของ $\text{Re}[f(\omega)]$ มีค่าต่ำกว่าที่พบในเซลล์แสงอาทิตย์ตอนมาก ทั้งๆที่ความหนืดของสารละลายที่ใช้ไม่แตกต่างกันนัก ($1.67 \pm 0.06 \text{ mN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ และ $1.35 \pm 0.03 \text{ mN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$) ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่ต่างกัน จึงน่าจะเป็นผลจากพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แต่ละชนิด เป็นที่น่าสังเกตว่าสเปกตรัมไดโอดีเล็กโทรฟอเรติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ของ *Chlorella* sp. ที่แขวนลอยในสารละลายที่มี σ_s เท่ากับ $12 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ และ $24 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ มีค่าสูงสุดอย่างชัดเจน

สำหรับทุกค่าของสนามไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าที่ทดลอง พบค่าที่เป็นไปได้ของพารามิเตอร์ 4 ตัว ดังตารางข้างล่าง

พารามิเตอร์	<i>Chlorella</i> sp.	<i>Tetraselmis</i> sp.	<i>Dendrobium</i> sp.	หน่วย
σ_c	11 - 17	15 - 42	1 - 21	$\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$
ϵ_m	$100 \epsilon_0$	$14 \epsilon_0 - 40 \epsilon_0$	$4 \epsilon_0 - 22 \epsilon_0$	
ϵ_c	$110 \epsilon_0 - 117 \epsilon_0$	$79 \epsilon_0 - 110 \epsilon_0$	$80 \epsilon_0 - 84 \epsilon_0$	
δ	20 - 34	18 - 50	10 - 15	nm

เมื่อ ϵ_0 คือสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่า $8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

Thesis Title	Estimations of Dielectric Parameters for Single Plant Cells Using Dielectrophoretic Method
Author	Mr.Sorawuthi Bunthawin
Major Program	Physics
Academic Year	1998

Abstract

This work estimated electrical parameters of marine phytoplanktons ; *Chlorella* sp. and *Tetraselmis* sp. , and protoplasts of *Dendrobium* sp. orchid. They were induced under AC. electric field using a pair of cylindrical parallel electrodes . Frequencies of the field were varied from few kilohertz to megahertz. Measurements were made for cell velocities so that real part of the frequency function , $\text{Re}[f(\omega)]$ could be estimated. Parameters that could be measured were the conductivity of the suspending medium (σ_s), cell radius (R), viscosity of the suspending medium (η). Electric field intensity (E) was calculated from the geometry of the electrodes . Assuming that a spherical single shell model was valid , the electrical parameters of the cells such as the conductivity of the membrane (σ_m), the permittivity of the membrane (ϵ_m), the permittivity of the cytoplasm (ϵ_c), the conductivity of the cytoplasm (σ_c) and thickness of the shell (δ) were estimated by iterative method.

Cell velocities were recorded only at field frequencies of which cells moved towards higher electric field region at the electrode surface . The results showed that ,for *chlorella* sp. an increase in σ_s shifted the $\text{Re}[f(\omega)]$ spectrum towards lower frequencies and increase the positive dielectrophoretic in the low frequency region .For *Tetraselmis* sp. and *Dendrobium* sp. the shift towards higher frequencies was observed. Suitable electric field strength used in this study varied from 13 kV.m^{-1} to 116 kV.m^{-1} , depending on cell size. It was found that increasing the field strength also increased cell velocity ,without affecting the magnitude of the $\text{Re}[f(\omega)]$. This is due to the fact that the $\text{Re}[f(\omega)]$ value on the ratio of cell velocity and electric field gradient. Experimented $\text{Re}[f(\omega)]$ showed different maximum value for each cell species. It was 2.50 ,0.30 for *Chlorella* sp.

and *Tetraselmis* sp., respectively. Whereas the value was 0.050 for *Dendrobium* sp. much smaller than that the former. Since the viscosity of the suspending medium used was similar ($1.67 \pm 0.06 \text{ mN.s.m}^{-2}$ and $1.35 \pm 0.03 \text{ mN.s.m}^{-2}$), the difference might mainly be influenced by their electrical parameters. Also noted that the $\text{Re}[f(\omega)]$ for *Chlorella* sp. clearly showed the peaks at the σ_s values of 12 mS.m^{-1} and 24 mS.m^{-1} .

For every E and σ_s used in this work, possible values for 4 parameters were;

parameter	<i>Chlorella</i> sp.	<i>Tetraselmis</i> sp.	<i>Dendrobium</i> sp.	unit
σ_c	11 - 17	15 - 42	1 - 21	mS.m^{-1}
ϵ_m	$100 \epsilon_0$	$14 \epsilon_0 - 40 \epsilon_0$	$4 \epsilon_0 - 22 \epsilon_0$	
ϵ_c	$110 \epsilon_0 - 117 \epsilon_0$	$79 \epsilon_0 - 110 \epsilon_0$	$80 \epsilon_0 - 84 \epsilon_0$	
δ	20 - 34	18 - 50	10 - 15	nm

where ϵ_0 is the permittivity of the free space = $8.85 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$

กิตติกรรมประกาศ

ปรัชญาในการทำงานข้อหนึ่งสอนให้ข้าพเจ้ารู้ว่า ยิ่งเรียนรู้เรายังไม่รู้ ยิ่งแก้ปัญหาก็ยิ่งเจอปัญหา บุคคลเพียงคนเดียวมักจะมองเห็นปัญหาเพียงด้านเดียว และมักจะลืมนองข้อดี และข้อผิดพลาดของตัวเอง เช่นเดียวกับปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดงานทดลองเพื่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่จะหลีกเลี่ยง “ การแก้ปัญหาคง ” ไปไม่ได้

งานวิจัยนี้ได้รับความสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และกลุ่มวิจัยชีวฟิสิกส์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเมมเบรนที่สนับสนุนทุนวิจัย ทุนการศึกษา และวัสดุวิจัยที่จำเป็นต่องานวิทยานิพนธ์ ซึ่งข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูงสำหรับ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิภพ วณิชานิชชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ท่านเสียสละเวลาตลอด ชี้นะอบรมพร่ำสอนลูกศิษย์คนนี้ และพยายามที่จะทำให้ข้าพเจ้าเข้าใจถึงความสำคัญของ “ การลงมือปฏิบัติ ” ขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูงสำหรับ รองศาสตราจารย์ ดร. คำณูณกาญจนภูมิ ที่ท่านได้ให้ความรู้และความช่วยเหลือในด้านเทคโนโลยีชีวภาพ และความช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องของข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ บรรยงค์ ภูเจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภสโรช หมั่นสิทธิ์ และ ดร. ประการ คุรุหงษา ที่ช่วยชี้แนะและแก้ไขวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์และทบวงมหาวิทยาลัยสำหรับทุนในการเดินทางไปศึกษาในส่วนของทฤษฎีทางด้านชีวฟิสิกส์ ตามโครงการแลกเปลี่ยนนักศึกษาและบุคลากรไทยกับต่างประเทศประจำปี 2539 ที่ UNESCO Centre for Membrane Science and Technology Department of Biophysics มหาวิทยาลัย New South Wales ออสเตรเลีย รวมทั้งขอขอบคุณ คุณ ชิดา เพชรมณี จากสถาบันเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งสงขลาที่อนุเคราะห์พื้นที่แปลงกักต่อนสำหรับงานทดลอง และขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนช่วยชี้แนะแก้ไขจนทำให้แก้ปัญหาดังกล่าวเหล่านี้ลุล่วงไปได้

สุดท้ายแต่ทว่ามิใช่มีความสำคัญน้อยสุด ข้าพเจ้าขอกราบแทบเท้า คุณแม่จรรจรณ สมงาม บุคคลที่อยู่เบื้องหลังของข้าพเจ้ามาตลอด และ แม่ปานียม พิศชวนชม รวมทั้งสี่พี่น้องของข้าพเจ้า คุณ มัณฑนา วิเทศวรกิจ และเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการชีวฟิสิกส์ทุกคนที่เป็นกำลังใจให้ตลอดการทำงาน ให้ความช่วยเหลือในห้องปฏิบัติการ และให้มิตรภาพของความเป็นเพื่อน

สรุจติ บุญถวิล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่	
1. บทนำ	1
การตรวจเอกสาร	4
วัตถุประสงค์ และขั้นตอนวิจัย	16
2. ทฤษฎีแรงไดอิเล็กโตรฟอเรติก	17
3. วิธีการทดลอง	28
วัสดุและอุปกรณ์	28
วิธีดำเนินการ	31
4. ผลการทดลอง	49
5. สรุปและวิจารณ์	83
บรรณานุกรม	91
ภาคผนวก	97
ประวัติผู้เขียน	124

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1. ช่วงความถี่ไดโอดีเล็กโทรฟอเรติกที่ได้จากการทดลองของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระยะ l ต่างๆกัน เพื่อตรวจหาความเข้มข้นไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการทดลอง	51
2. ช่วงความถี่ไดโอดีเล็กโทรฟอเรติกที่ได้จากการทดลองของเซลล์ทั้ง 3 ชนิด เมื่อระยะ l มีค่าเหมาะสมที่ทำให้เซลล์เกิดไดโอดีเล็กโทรฟอเรซิสแบบบวกและมีความเร็วพอเหมาะต่อการตรวจวัด	52
3. ผลการคำนวณความเข้มข้นไฟฟ้าและเทอมเกรเดียนต์สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	53
4. ข้อมูลเวลาการไหลของสารละลายในอุปกรณ์วัดความหนืด และค่าความหนืดที่คำนวณได้	56
5. ตัวอย่างผลการคำนวณความเร็วและ $\nabla(E_z^2)$ ที่แต่ละจุด z ค่า $vxFactor$ ที่คำนวณได้จะนำไปใช้เขียนกราฟร่วมกับ $\nabla(E_z^2)$	58
6. ตัวอย่างค่า $Re[f(\omega)]$ ของเซลล์แต่ละชนิดที่ความถี่สนามไฟฟ้าต่างๆกัน	60
7. ตัวอย่างค่าเฉลี่ย $Re[f(\omega)]$ จากการทดลองของเซลล์ทั้ง 3 ชนิดที่แต่ละความถี่สนามไฟฟ้า	61
8. ชุดเปรียบเทียบพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 3 \text{ mS.m}^{-1}$ เมื่อทดลองเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าต่างๆ	67
9. แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$	68
10. แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 12 \text{ mS.m}^{-1}$	69
11. แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 24 \text{ mS.m}^{-1}$	70
12. แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ <i>Tetraselmis</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$	71

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
13. แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ <i>Tetraselmis</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 12 \text{ mS.m}^{-1}$	72
14. แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ <i>Tetraselmis</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 24 \text{ mS.m}^{-1}$	73
15. แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของ <i>Dendrobium</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M แมนนิทอล $\sigma_s = 1 \text{ mS.m}^{-1}$	74
16. แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของ <i>Dendrobium</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M แมนนิทอล $\sigma_s = 7 \text{ mS.m}^{-1}$	75
17. แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของ <i>Dendrobium</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M แมนนิทอล $\sigma_s = 20 \text{ mS.m}^{-1}$	76
18. สรุปค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์ <i>Tetraselmis</i> sp. และ <i>Chlorella</i> sp.	77
19. ตัวอย่างผลการคำนวณแรงไดโพลีโทรฟอเรติก ณ ตำแหน่ง z ต่างๆของเซลล์ <i>Tetraselmis</i> sp. ขณะเข้าเกาะขั้วไฟฟ้า ที่ความถี่ 15 MHz ความเข้มสนามไฟฟ้า 85 kV.m^{-1} $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$ และ $\text{Re}[f(w)] = 0.11$	80
20. ตัวอย่างผลการคำนวณแรงไดโพลีโทรฟอเรติก ณ ตำแหน่ง z ต่างๆของเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. ขณะเข้าเกาะขั้วไฟฟ้า ที่ความถี่ 15 MHz ความเข้มสนามไฟฟ้า 116 kV.m^{-1} $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$ และ $\text{Re}[f(w)] = 0.1$	81
21. ตัวอย่างผลการคำนวณแรงไดโพลีโทรฟอเรติก ณ ตำแหน่ง z ต่างๆของโพรโท- พลาสต์กลัวยไม้ <i>Dendrobium</i> sp. ขณะเข้าเกาะขั้วไฟฟ้า ที่ความถี่ 15 MHz ความ เข้มสนามไฟฟ้า 13 kV.m^{-1} $\sigma_s = 7 \text{ mS.m}^{-1}$ และ $\text{Re}[f(w)] = 0.09$	82
22. พารามิเตอร์สำหรับเซลล์แต่ละชนิดจากงานวิจัยอื่น	87
23. สรุปผลการประมาณค่า 5 พารามิเตอร์ σ_m ϵ_m ϵ_c σ_c และ δ ของเซลล์ทั้ง 3 ชนิด	88

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1. องค์ประกอบและโครงสร้างของเซลล์พืชอย่างคร่าวๆ และรูปทรงและขนาดของเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. <i>Tetraselmis</i> sp. และ โพรโทพลาสต์ของใบกล้วยไม้ <i>Dendrobium</i> sp. ที่ใช้ในการทดลองนี้ (ไม่ได้วาดตามสัดส่วนจริง)	3
2. แบบจำลองระดับโมเลกุลของฟอสเฟตติดิลโคลอไรด์ หรือเลซิธิน (phosphatidylcholine , lecithin) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่แทนถึงฟอสโฟไลปิด	5
3. เยื่อหุ้มเซลล์ของ <i>Chara corallina</i> ซึ่งถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ส่วนที่เห็นเป็นแถบสีดำสองแถบในภาพคือบริเวณของฟอสโฟไลปิดที่ประกอบกันเป็นลิปิดไบเลเยอร์	6
4. แบบจำลองโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ตามแบบจำลอง Lipid globular - protein mosaic	7
5. ระบบพิกัดทรงกลมที่ใช้วิเคราะห์กับเซลล์ทรงกลม	18
6. การจัดวางขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัย	26
7. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวแกน Z กับตำแหน่ง Z ที่ตำแหน่งศูนย์คือตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างระยะที่วัดจากขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว เมื่อ $d = 300 \mu\text{m}$ $a = 62.5 \mu\text{m}$ และศักย์ไฟฟ้า 3 V	27
8. ความสัมพันธ์ระหว่างเข้มสนามไฟฟ้าในแนวแกน Y กับตำแหน่ง Y	27
9. ขั้วไฟฟ้าติดบนแผ่นไมโครสโคปสไลด์โดยกาวอีพอกซี	33
10. หลอดแก้วแคพิลลารีที่ผ่านการดึงให้ปลายมีขนาดเล็กกลง	34
11. อุปกรณ์สำหรับดูดและปล่อยเซลล์แพลงก์ตอน	35
12. ก การดูดและปล่อยเซลล์แพลงก์ตอนลงในภาชนะทดลอง ข แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับศึกษาไดอิเล็กโตรโฟรีซิส ค ภาคตัดขวางของภาชนะทดลองสำหรับศึกษากับเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. และ <i>Tetraselmis</i> sp.	36
13. ภาคตัดขวางภาชนะทดลองสำหรับศึกษาโพรโทพลาสต์ <i>Dendrobium</i> sp.	37

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
14. อุปกรณ์วัดความหนืดสารละลายยี่ห้อม Schcott Geratte	40
15. วิธีการหาความเร็วเซลล์ขณะเคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้า ด้วยวิธีการจับเวลา ขณะที่เซลล์เคลื่อนที่ผ่านแต่ละจุดตำแหน่ง z ที่กำหนดไว้บนจอโทรทัศน์	42
16. ผลกระทบของของ σ_s ต่อสเปกตรัม DEP	45
17. ผลกระทบของของ σ_c ต่อสเปกตรัม DEP	45
18. ผลกระทบของของ σ_m ต่อสเปกตรัม DEP	46
19. ผลกระทบของของ σ ต่อสเปกตรัม DEP	46
20. ผลกระทบของของ ϵ_s ต่อสเปกตรัม DEP	47
21. ผลกระทบของของ ϵ_c ต่อสเปกตรัม DEP	47
22. ผลกระทบของของ ϵ_m ต่อสเปกตรัม DEP	48
23. ผลกระทบของของ R ต่อสเปกตรัม DEP	48
24. แสดงความหนาแน่นเซลล์ในแต่ละวันของเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. และ <i>Tetraselmis</i> sp.	49
25. เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าแนวแกน Z ที่ระนาบศูนย์กลาง $Y=0$ สำหรับ ศึกษาไดอิเล็กโตรโฟรีซิสกับเซลล์ทั้ง 3 ชนิด	54
26. เปรียบเทียบ $\nabla(E^2)$ และระยะในแนวแกน z ที่ระนาบศูนย์กลาง $Y=0$ ที่ใช้ศึกษาไดอิเล็กโตรโฟรีซิสกับเซลล์แพลงก์ตอน	55
27. ตัวอย่างผลการหาความสัมพันธ์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่าง ตำแหน่งและเวลาที่เซลล์ใช้ในการเคลื่อนที่ ที่ 15 MHz , $E_z = 85.kV.m^{-1}$	57
28. ความสัมพันธ์ระหว่าง $\nabla(E_z^2)$ และ $vxFactor$ ที่แต่ละตำแหน่ง z ของ เซลล์ <i>Tetraselmis</i> sp. $R = 7 \mu m$ แขนงลอยในสารละลายซูโครส 0.5 M $\sigma_s = 6 mS.m^{-1}$ $\epsilon_s = 80\epsilon_0$ $\eta = 1.67 mN.s.m^{-2}$ ที่ 15 MHz $E_z = 85.kV.m^{-1}$ ค่า $Re[f(\omega)] = 0.087$	59

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
29. ไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติกสเปกตรัมเฉลี่ยของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ของเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. ที่แขวนลอยในสารละลายที่มี σ_s ต่างๆกัน	63
30. ไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติกสเปกตรัมเฉลี่ยของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ของเซลล์ <i>Tetraselmis</i> sp. ที่แขวนลอยในสารละลายที่มี σ_s ต่างๆกัน	64
31. ไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติกสเปกตรัมเฉลี่ยของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ของ <i>Dendrobium</i> sp. ที่แขวนลอยในสารละลายที่มี σ_s ต่างๆกัน	65
32. ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างผลการทดลองกับทฤษฎีที่ให้ความสอดคล้องมากที่สุดของเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 3 \text{ mS.m}^{-1}$	67
33. ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$	68
34. ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 12 \text{ mS.m}^{-1}$	69
35. ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 24 \text{ mS.m}^{-1}$	70
36. ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ <i>Tetraselmis</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$	71
37. ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ <i>Tetraselmis</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 12 \text{ mS.m}^{-1}$	72

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
38. ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กโทรเฟอริคของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ <i>Tetraselmis</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 24 \text{ mS.m}^{-1}$	73
39. ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กโทรเฟอริคของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ <i>Dendrobium</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 1 \text{ mS.m}^{-1}$ เมื่อเปลี่ยน ϵ_c 3 ค่า	74
40. ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กโทรเฟอริคของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ <i>Dendrobium</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 7 \text{ mS.m}^{-1}$ เมื่อเปลี่ยน σ_m 3 ค่า	75
41. ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กโทรเฟอริคของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ <i>Dendrobium</i> sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 20 \text{ mS.m}^{-1}$ เมื่อเปลี่ยน σ_m 3 ค่า	76
42. การเลื่อนของ f_0 ที่ให้ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ มีค่าเป็นศูนย์ของเซลล์ <i>Tetraselmis</i> sp. ทุกชุดการทดลองในสารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้า 3 ค่า	77
43. การเลื่อนของ f_0 ที่ให้ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ มีค่าเป็นศูนย์ของเซลล์ <i>Chlorella</i> sp. ทุกชุดการทดลองในสารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้า 3 ค่า	78
44. การเลื่อนของ f_0 ที่ให้ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ มีค่าเป็นศูนย์ของเซลล์ <i>Dendrobium</i> sp. ทุกชุดการทดลองในสารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้า 3 ค่า	79

บทที่ 1

บทนำ

เซลล์ชีวภาพมีองค์ประกอบที่เรียกว่าเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) ห่อหุ้มของเหลวไซโทพลาสซึมซึ่งบรรจุออร์แกเนลต่างๆไว้ภายในเซลล์ สำหรับเซลล์พืชจะมีผนังเซลล์ (cell wall) ห่อหุ้มเยื่อหุ้มเซลล์อีกชั้นหนึ่ง แตกต่างจากเซลล์สัตว์ซึ่งไม่มี เซลล์พืชบางชนิดมีจำนวนชั้นของผนังเซลล์มากกว่าหนึ่งชั้น อาทิ แพลงก์ตอนพืชน้ำเค็ม *Chlorella.sp* (Hills and Nakamura, 1981) โครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์โดยทั่วไป เกิดจากการรวมตัวของกรดไขมันกับกลีเซอรอล (glycerol) เรียกรวมว่าฟอสโฟไลปิด (phospholipid) กลุ่มโมเลกุลฟอสโฟไลปิดเหล่านี้จะจัดวางตัวโครงสร้างในลักษณะที่ก่อให้เกิดสภาพที่เสถียรที่สุด ที่เรียกว่า ลิปิดไบเลเยอร์ (lipid bilayer) มีแบบจำลองทางไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ชีวภาพบ่งชี้ว่าเยื่อหุ้มเซลล์มีคุณลักษณะเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก (Danielli and Daveson, 1935; Armstrong and Bezanilla, 1974) นอกจากนี้มีผู้เสนอความคิดว่า ไซโทพลาสซึม เยื่อหุ้มเซลล์ และผนังเซลล์ เป็นวัสดุไดอิเล็กทริกชีวภาพต่างชนิดกันต่อเรียงกันเป็นชั้นๆ (Schwan, 1985 และ 1988) เมื่อองค์ประกอบเหล่านี้ อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในเนื้อไดอิเล็กทริกซึ่งสมมูลกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบวงจรขนานอาร์ซี (parallel RC-circuit) ต่ออนุกรมกันตามจำนวนชั้นของไดอิเล็กทริก มีงานวิจัยจำนวนมากชี้ให้เห็นถึงผลกระทบของผิวสัมผัสของรอยต่อระหว่างชั้นวัสดุไดอิเล็กทริกเหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนค่าสภาพยอม (permittivity) และสภาพนำไฟฟ้า (conductivity) ของไดอิเล็กทริกแบบไม่เป็นเชิงเส้นตามความถี่ของสนามไฟฟ้าภายนอก ที่เรียกว่า ดิสเพอร์ชันของไดอิเล็กทริก (dielectric dispersion) (Schwarz, 1962; Bonincontro, et al., 1989; Garcia, et al., 1985; Schwan, 1988; Wang, et al., 1996; Foster, et al., 1992) ปรากฏการณ์ดังกล่าวอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของ แมกซ์เวลล์-แวกเนอร์ (Maxwell-Wagner)

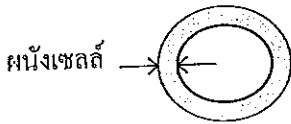
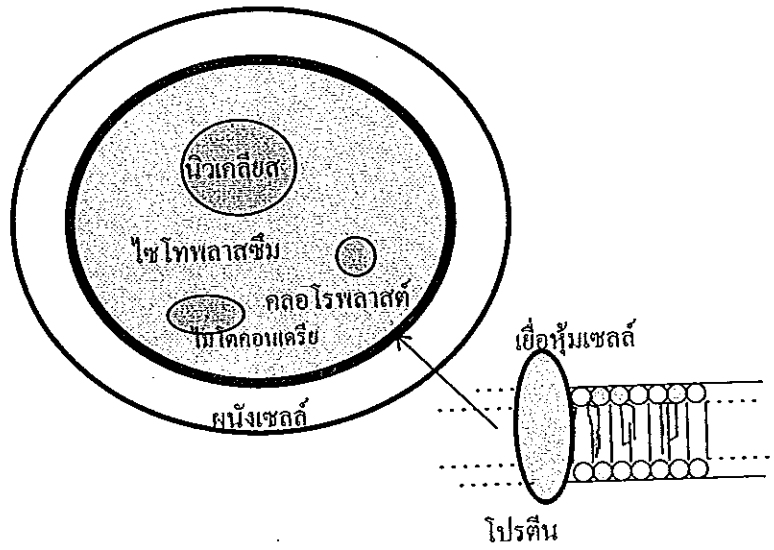
ในสภาวะที่เหมาะสม เซลล์จะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าในลักษณะต่างๆ อาทิ เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่มีความเข้มสนามสูงกว่าเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ไดอิเล็กโทรฟอเรซิส (Dielectrophoresis) มีงานวิจัยหลายงานแสดงให้เห็นว่าการตอบสนองนี้ขึ้นกับสภาพนำไฟฟ้าและสภาพยอมของไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึม เยื่อหุ้มเซลล์และชั้นผนังเซลล์ ข้อมูลเหล่านี้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาศามารถการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของเซลล์ และใช้คำนวณค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของเยื่อหุ้มเซลล์ รวมถึงประโยชน์ต่อการศึกษากการเปิดรูบนเยื่อหุ้มเซลล์ (Foster and Sowers, 1995; Stenger and Hui, 1991; Chang, 1989; Ho and Mittal, 1996) นอกจากนี้ยังเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สัมพันธ์กับการศึกษาในเยื่อบางสังเคราะห์ (synthetic membrane) อาทิ การศึกษาอิมพีแดนซ์ ความนำไฟฟ้า ความเก็บประจุ รวมถึงประโยชน์ที่อาจเกิดขึ้นต่อเทคโนโลยีของเซลล์และเทคโนโลยีเยื่อบางสังเคราะห์ในอนาคต ด้วยเหตุนี้งาน

วิจัยเพื่อประมาณค่าตัวแปรไดอิเล็กทริกของเซลล์ชีวภาพจึงถือเป็นงานที่ท้าทายและน่าสนใจองงานหนึ่ง และนับเป็นจุดเริ่มต้นอีกจุดหนึ่งของการนำศาสตร์ความรู้ในสหสาขาวิชามาประยุกต์ใช้ร่วมกันเพื่อก่อให้เกิดศักยภาพในการเรียนรู้เชิงเทคโนโลยีของเซลล์

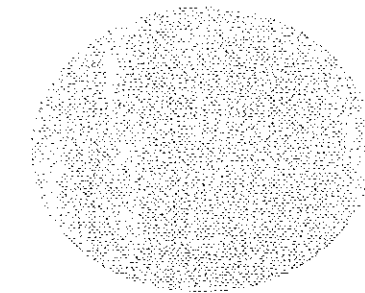
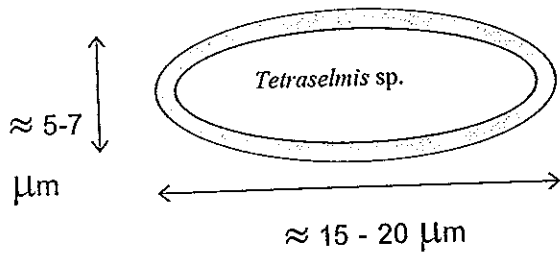
เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีเครื่องมือวัดค่าสภาพยอมและค่าสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวได้โดยตรง เว้นแต่จะกระทำโดยวิธีอ้อม ซึ่งแบ่งเป็นสองวิธีใหญ่คือวิธีไดอิเล็กโทรฟอเรซิส และวิธีหมุนเซลล์ ทั้งสองวิธีมีข้อดีและข้อด้อยต่างกัน กล่าวคือวิธีไดอิเล็กโทรฟอเรซิสเป็นวิธีศึกษาการเคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้าของเซลล์ ความเร็วของเซลล์จะขึ้นกับ สภาพนำไฟฟ้าและสภาพยอมของเซลล์และของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์ ความหนืดของสารละลาย ความถี่ของสนามไฟฟ้า ความเข้มสนามไฟฟ้า รวมทั้งรัศมีเซลล์ เป็นต้น สำหรับวิธีหมุนเซลล์อาศัยการเหนี่ยวนำให้เซลล์ 2 เซลล์เคลื่อนที่เข้าสัมผัสกันตามปรากฏการณ์โซ่เซลล์ (pearl chain) ความเร็วเชิงมุมในการหมุนเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างไดโพลโมเมนต์ระหว่างเซลล์ทั้งสอง ซึ่งขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่นเดียวกับวิธีไดอิเล็กโทรฟอเรซิสแต่วิธีไดอิเล็กโทรฟอเรซิสมีความสะดวกต่อการปฏิบัติกว่าวิธีหมุนเซลล์ ทั้งสองวิธีการที่กล่าวถึงนี้มีผู้วิจัยศึกษาจำนวนมาก อาทิ Radu, et al., 1996 ใช้วิธีศึกษาการหมุนของเซลล์ยีสต์ ประมาณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์ตามแบบจำลองเดี่ยวทรงรีผนังเซลล์สองชั้น โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว (four electrodes) Mahawora - silpa, et al., 1994 และ 1996 ใช้วิธีศึกษาไดอิเล็กโทรฟอเรซิสและการหมุนของเซลล์เม็ดเลือดแดงของคนและหนู ตามแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมผนังเซลล์หนึ่งชั้นโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบทรงกระบอกคู่ขนาน Marszalek, et al., 1991 ใช้วิธีศึกษาไดอิเล็กโทรฟอเรซิสกับเซลล์ *Neurospora crassa* ตามแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมผนังเซลล์หนึ่งชั้น โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบทรงกระบอกวางขนานกับขั้วไฟฟ้าแบบแผ่น เป็นต้น จากที่กล่าวมา พบว่าวิธีการวัดความเร็วไดอิเล็กโทรฟอเรติกของเซลล์เดี่ยวเป็นวิธีที่สะดวกต่อการปฏิบัติเหมาะสำหรับผู้ศึกษาเริ่มต้นและนักศึกษาในเชิงทฤษฎี ดังนั้นเพื่อการวิจัยสำหรับองค์ความรู้พื้นฐาน งานวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธีไดอิเล็กโทรฟอเรซิสของเซลล์เดี่ยว ตาม Mahaworasilpa, et al., 1994

ผู้ทำงานวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ได้เลือกใช้เซลล์เพลงก้นตอนพืชน้ำเค็มกลุ่มสาหร่ายสีเขียว

สองชนิดคือ *Chlorella* sp. (รูปร่างค่อนข้างกลมขนาดประมาณ 2 - 3 μm) และ *Tetraselmis* sp. (รูปร่างรี ขนาดตามยาว ประมาณ 7-20 μm และขนาดตามแนวกว้าง ประมาณ 5-10 μm) และเลือกใช้โพโทพลาสต์ของใบกล้วยไม้สายพันธุ์ *Dendrobium* sp. (รูปร่างกลม รัศมีประมาณ 30-60 μm) ซึ่งเป็นพืชชั้นสูง (ดูภาพประกอบ 1) โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำทฤษฎีเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกเซลล์หนึ่งชั้นมาประยุกต์ใช้กับเซลล์เดี่ยวพืชเหล่านี้



Chlorella sp. เส้นผ่าศูนย์กลาง
เซลล์ประมาณ 1-3 μm



โปรตีน
โปรโทพลาสต์กล้วยไม้เส้นผ่า
ศูนย์กลางประมาณ 30 - 60 μm

ภาพประกอบ 1 องค์ประกอบและโครงสร้างของเซลล์พืชอย่างคร่าวๆ และรูปทรงและขนาดของ
เซลล์ *Chlorella* sp. *Tetrastelmis* sp. และ โปรโทพลาสต์ของใบกล้วยไม้
Dendrobium sp. ที่ใช้ในการทดลองนี้ (ไม่ได้วาดตามสัดส่วนจริง)

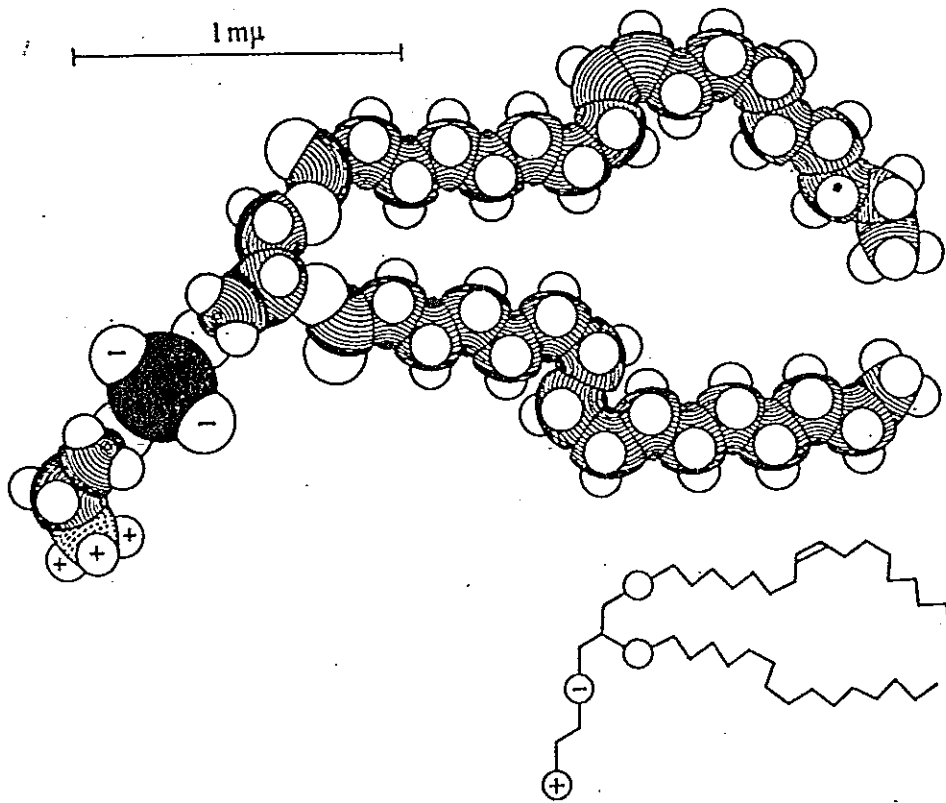
การตรวจเอกสาร

1. องค์ประกอบและโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์

เยื่อหุ้มเซลล์มีหน้าที่คัดเลือกสารที่แพร่ผ่านเข้าออกจากเซลล์ จึงเป็นองค์ประกอบของเซลล์ส่วนแรกที่ประจุและไอออนจะเคลื่อนที่ผ่าน Bernstein (1902) (อ้างตาม Sauer and Schlogl, 1985) กล่าวไว้ว่าของเหลวภายในเซลล์จะมีสภาพนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสภาพแวดล้อมภายนอกเซลล์ เนื่องจากภายในเซลล์มีกลไกที่จะพยายามรักษาระดับความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออน รวมทั้งไอออนชนิดอื่นๆ อาทิ โซเดียมและคลอไรด์ไอออน ในปริมาณที่สูงพอเพียงต่อการดำรงชีวิตของเซลล์ ความแตกต่างของปริมาณไอออนระหว่างภายในและภายนอกเยื่อหุ้มเซลล์นี้จะเป็นตัวก่อให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่เรียกว่าศักย์เมมเบรน (membrane potential) โดยปกติจะมีค่าอยู่ในระดับมิลลิโวลต์ ในสภาวะที่ไม่มีสิ่งรบกวนมารบกวนเซลล์ ศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์จะมีค่าเป็นลบเมื่อเทียบกับภายนอกเซลล์

โดยปกติเยื่อหุ้มเซลล์ประกอบขึ้นจากธาตุหลักทางเคมี 4 ธาตุคือ คาร์บอน , ไฮโดรเจน , ไนโตรเจน และออกซิเจน ประกอบขึ้นเป็นกรดไขมัน (fatty acid) ตัวอย่างเช่น กรดพาลมิติก (palmitic acid) ที่มีสูตรโครงสร้างประกอบด้วยสองส่วน กล่าวคือส่วนหางมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon chain) ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี และไม่สามารถแตกตัวในน้ำ (หรือไม่ละลายน้ำ) จึงเรียกส่วนนี้ว่าส่วนที่กลัวน้ำหรือไม่ชอบน้ำ (ไฮโดรโฟบิก, hydrophobic) สำหรับส่วนหัว มีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบขึ้นเป็นกลุ่มของกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid group) สามารถแตกตัวในตัวทำละลายทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำ จึงเรียกส่วนนี้ว่าส่วนที่ชอบน้ำ (ไฮโดรฟิลิก ,hydrophilic) โดยทั่วไปแล้วโมเลกุลของกรดไขมันที่อยู่ในเซลล์จะใช้ส่วนหัวเชื่อมพันธะโควาเลนต์กับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้เคียง ด้วยเหตุนี้กรดไขมันจึงมีความหลากหลายในรูปแบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโมเลกุลที่มันเข้ากลุ่มด้วย แต่โดยทั่วไปแล้วกรดไขมันที่พบในเยื่อหุ้มเซลล์มักจะรวมกลุ่มกับกลีเซอรอล (glycerol) ในลักษณะส่วนหัวสองหัวของกรดไขมันต่อเข้ากับกลีเซอรอล ดังภาพประกอบ 2 เรียกโดยรวมทั้งหมดว่า ฟอสโฟไลปิด ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของฟอสโฟไลปิดจะประกอบด้วย 2 หางที่ไม่มีขั้วของไฮโดรโฟบิก และส่วนหัวของกลุ่มไฮโดรฟิลิกที่มีขั้ว โดยที่ส่วนหัวจะหันเข้าจับกลุ่มกับโมเลกุลของน้ำ ส่วนส่วนหางจะพยายามอัดตัวและหันเข้าสู่บริเวณที่เป็นอากาศหรือสุญญากาศ หรือในลักษณะหางต่อหาง ลักษณะการจัดวางโครงสร้างของกลุ่มโมเลกุลเช่นนี้จะเกิดสภาพที่เสถียรที่สุดและใช้พลังงานในการจัดเรียงต่ำสุด ซึ่งเรียกว่าชั้น ลิปิดไบเลเยอร์ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าเยื่อหุ้มเซลล์ มีลักษณะคล้ายแซนด์วิช ดังภาพประกอบ 3 ซึ่งแสดงภาพถ่ายตัวอย่างของเยื่อหุ้มเซลล์

Chara corallina

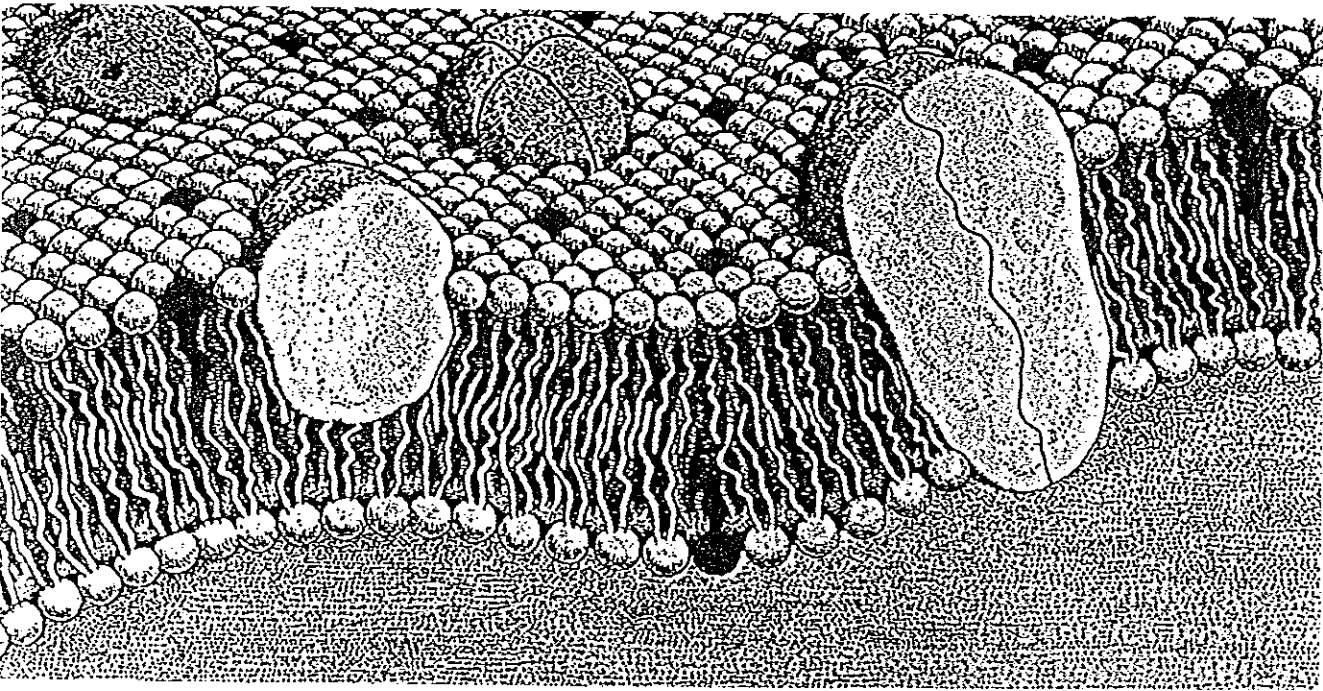


ภาพประกอบ 2 แบบจำลองระดับโมเลกุลของฟอสเฟตติลโคลอไรด์ หรือเลซิทิน
(phosphatidylcholine , lecithin) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่แทนถึงฟอสโฟไลปิด
(ที่มา Chapman , 1975)



ภาพประกอบ 3 เยื่อหุ้มเซลล์ของ *Chara corallina* ซึ่งถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ส่วนที่เห็นเป็นแถบสีดำสองแถบในภาพคือบริเวณของฟอสโฟไลปิด ที่ประกอบกันเป็นลิปิดไบเลเยอร์ (ที่มา Coster and Chilcott , 1997)

ในอดีตถึงปัจจุบัน ได้มีผู้คิดค้นแบบจำลองของเยื่อหุ้มเซลล์ไว้มาก แต่แบบจำลองที่เป็นที่ยอมรับกันมากที่สุดในขณะนี้คือ แบบจำลอง lipid globular-protein mosaic ตามภาพประกอบ 4 จากแบบจำลองจะพบว่า โปรตีนจะกระจายตัวฝังอยู่ตามพื้นผิวเยื่อหุ้มเซลล์ มีบางโมเลกุลที่ฝังตัวแบบทะลุเยื่อหุ้มเซลล์ (พบน้อย) ส่วนของไฮโดรฟิลิกจะหันเข้าสู่สารละลายหรือบริเวณที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบนั้นคือจะหันเข้าสู่ภายในและภายนอกเซลล์ ส่วนของไฮโดรโฟบิกจะหันปลายหางเข้าหากัน ก่อให้เกิดเป็นชั้นไบเลเยอร์ขึ้นตามรูป ส่วนที่เป็นจุดดำๆในรูปแสดงถึงคลอเรสเตอรอล (cholesterol) ไม่ว่าจะเป็เยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์สัตว์ เซลล์พืชหรือของออร์กาเนลต่างๆภายในเซลล์ จะมีองค์ประกอบที่เหมือนกันและมีโครงสร้างเป็นไปตามแบบจำลองนี้ โดยปกติ โปรตีนรวมทั้งฟอสโฟไลปิดที่เยื่อหุ้มเซลล์สามารถเปลี่ยนตำแหน่งได้อย่างอิสระ ลิปิดไบเลเยอร์เหล่านี้มีการเคลื่อนไหวแบบการไหลของของเหลว ฟอสโฟไลปิดแต่ละตัวก็อาจที่จะสลับที่กับตัวใกล้เคียงหรืออาจกลับหัวไปทาง (flip-flop) ข้ามฟากไปอีกฝั่งหนึ่งของไบเลเยอร์ แต่ค่อนข้างพบยาก (Hanawalt ,1980)



ภาพประกอบ 4 แบบจำลองโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ตามแบบจำลอง Lipid globular - protein mosaic จากภาพ ชั้นไขมันมีสองชั้น ส่วนของไฮโดรฟิลิกจะเรียงตัวหันไปยังด้านที่เป็นน้ำภายในและภายนอกเซลล์ ส่วนไฮโดรโฟบิกจะหันด้านเข้าสู่ส่วนที่ไม่มีน้ำภายในเยื่อหุ้มเซลล์ โดยมีก้อนโปรตีนขนาดใหญ่แทรกอยู่ในชั้นของไขมัน (ที่มา Singer and Nicolson , 1972)

2. สมบัติไดอิเล็กทริกของโมเลกุลชีวภาพ

โมเลกุลทางชีวภาพที่เล็กที่สุดคือน้ำ น้ำเป็นสสารที่มีผู้ให้ความสำคัญต่อการศึกษา มากกว่าสสารชนิดอื่น ในปี 1980 Grant (อ้างตาม Wyard, 1989) รายงานว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำที่วัดได้จากการทดลองวิธีบริดจ์ มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสนามไฟฟ้า กล่าวคือ ที่ความถี่ย่านต่ำกว่ากิโกลเฮิร์ตซ์มากๆ น้ำจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประมาณ 5 และที่ความถี่ย่านสูง น้ำจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประมาณ 80 ที่อุณหภูมิประมาณ 20°C เรียกการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกตามความถี่สนามไฟฟ้าว่าการดิสเพอซัน

สำหรับสารละลายโปรตีน เปปไทด์ และกรดอะมิโน ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เป็นสารละลายที่มีขั้ว โมเลกุลเหล่านี้มีลักษณะการกระจายตัวของประจุแบบขั้วซ้อน เพราะมีขนาดโมเลกุลที่ค่อนข้างใหญ่ ดังนั้น ไดโพลโมเมนต์ของโมเลกุลจึงไม่อาจจะพิจารณาจากระยะห่างของประจุเดี่ยวๆสองตัวได้ ในปี 1964 Haggis (อ้างตาม Grant, 1980) ทดลองพบว่า ไดอิเล็กทริกดิสเพอซันของโมเลกุลอะมิโนที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายจะเกิดในลักษณะลดลงแบบสองขั้นบันไดอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความถี่สูงขึ้น กล่าวคือ ที่ช่วงความถี่ย่านต่ำจะมีการลดค่าหนึ่งครั้ง จากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประมาณ 100 ลดลงเหลือ 70 และที่ความถี่สูงระดับจิกะเฮิร์ตซ์ อีกหนึ่งครั้ง จากค่าคงที่ไดอิเล็กทริก 70 ลดลงเหลือประมาณ 10 (ต่างจากกรณีของโมเลกุลน้ำซึ่งมีการลดค่าเพียงขั้นเดียว) สำหรับโมเลกุลชีวภาพประเภทสุดท้ายคือ กรดนิวคลีอิก เป็นโมเลกุลแบบมีขั้วและมีไดโพลโมเมนต์ขนาดสูงมากอยู่ในระดับประมาณ 15,000 Debye ซึ่งสูงกว่าของโปรตีน ดังนั้นความเป็นไดอิเล็กทริกน่าจะอยู่ในระดับที่สูง

3. นิยามและกลไกการเกิดไดอิเล็กโทรโฟเรซิส (Dielectrophoresis)

ไดอิเล็กโทรโฟเรซิสคือ การเคลื่อนที่ของไดอิเล็กทริกในสนามไฟฟ้าแบบแปรผันตามเวลา ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อระยะทางแบบไม่เป็นเชิงเส้น หรือที่เรียกว่าสนามไฟฟ้ากระแสสลับแบบไม่เอกรูป หรือเรียกย่อว่า สนามไฟฟ้าแบบไม่เอกรูป (non-uniform electric fields) โดยทั่วไปมักเกิดขึ้นในกรณีที่ วัตถุชนิดนั้นถูกแขวนลอยในสารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้าที่ต่ำ (ประมาณมิลลิซีเมนส์ต่อเมตร, $mS \cdot m^{-1}$)

เซลล์จัดเป็นวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (neutral matter) ไม่มีขั้ว และเป็นไดอิเล็กทริกแตกต่างจากประจุไฟฟ้า (charge) ซึ่งมีขั้ว ในกรณีการเคลื่อนที่ของประจุภายใต้สนามไฟฟ้าจะเรียกว่า อิเล็กโทรโฟเรซิส (Electrophoresis)

โมเลกุลภายในเซลล์ที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแบบไดโพล-ไดโพล จะถูกแรงของสนามไฟฟ้าภายนอกจัดเรียงทิศไดโพลเหล่านั้นใหม่ให้มีทิศตามสนามไฟฟ้า หากโมเลกุลใดยังไม่มีไดโพลอยู่ก่อนก็จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดไดโพลขึ้น ขณะที่ภายในโครงสร้างของอะตอมของธาตุแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบต่างๆของโมเลกุลเหล่านั้นจะถูกแรงจากสนามไฟฟ้าภายนอกกระทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนแนวทางการเคลื่อนที่วนรอบนิวเคลียสในลักษณะขยับออกจากเส้นทาง

เดิมตามทิศของแรงที่มากกระทำ เสมือนหนึ่งว่าประจุสองตัวที่มีขั้วตรงข้าม (นั่นคืออิเล็กตรอนขั้วลบและนิวเคลียสขั้วบวก) แยกตัวห่างจากกันให้ไกลกว่าเดิมเป็นระยะขจัดเล็กน้อยค่าหนึ่ง พฤติกรรมที่กล่าวมานี้ก่อให้เกิด ไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) ในระดับอะตอม และเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก ไดโพลโมเมนต์ดังกล่าวจะหายไป ในกรณีสนามไฟฟ้าภายนอกเป็นแบบกระแสตรง ทิศของไดโพลโมเมนต์จะขึ้นกับสภาพยอมและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์ และทิศของสนามไฟฟ้าภายนอกเซลล์ แต่ในกรณีที่สนามไฟฟ้าภายนอกเป็นแบบกระแสสลับ ไดโพลโมเมนต์จะมีการกลับสลับทิศตามทิศสนามไฟฟ้าภายนอกด้วยความถี่ในการกลับทิศเดียวกับความถี่ของสนามไฟฟ้า มีบางกรณีที่ความถี่ในการกลับทิศของไดโพลโมเมนต์อาจไม่สอดคล้องกับความถี่ของสนามไฟฟ้า เนื่องจากไดโพลกลับทิศไม่ทันตามทิศสนามไฟฟ้า นั่นคือที่ความถี่ย่านสูงมาก (ระดับจิกะเฮิรตซ์ขึ้นไป) (Sauer and Schlogl, 1985) สำหรับขนาดของไดโพลโมเมนต์จะขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไปในบทที่ 2

Pohl (1978) อธิบายว่า ความเข้มสนามไฟฟ้าที่มาก ไดโพลจะมีค่าสูง ในกรณีที่แรงภายนอกมีค่าสูงเกินแรงที่ยึดเหนี่ยวระหว่างประจุทั้งสองไว้ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดเป็นอิสระและวัตถุนั้นจะนำไฟฟ้าได้ เรียกพฤติกรรมนี้ว่าไดอิเล็กทริกเบรคดาวน์ (dielectric breakdown) นอกเหนือจากที่กล่าวมา ยังมีการเกิดไดโพลในลักษณะอื่นอีกแบ่งได้ตามตำแหน่งที่เกิด โดยส่วนใหญ่นิยมแบ่งตามการเกิดโพลาริซ (ไดโพลโมเมนต์ต่อหน่วยปริมาตร) หากเกิดที่ระดับอิเล็กตรอน(ดังที่กล่าวไปแล้ว) เรียกว่า electronic polarization หากเกิดขึ้นที่ระดับอะตอม จะเรียกว่า atomic polarization และหากเกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลในสสารชนิดนั้นไม่มีขั้วอยู่ก่อนแล้ว เกิดการวางตัวตามทิศสนามไฟฟ้าภายนอก จะเรียกการการโพลาริซแบบ Orientational หรือ dipolar polarization หรือหากเกิดขึ้นในโมเลกุลที่เป็นสายโซ่ยาวจำพวกพอลิเมอร์หรือในโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นโครงผลึก (lattice) จะเรียกว่า Nomadic polarization และแบบสุดท้ายเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุไดอิเล็กทริกต่างชนิดกัน เรียกว่า Interfacial polarization หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การโพลาริซแบบ แมกซ์เวลล์ - แวกเนอร์ (Maxwell - Wagner polarization) ซึ่ง Pohl เสนอว่าการโพลาริซแบบสุดท้ายมีอิทธิพลมากที่สุดต่อการเกิดไดโพลโมเมนต์ของเซลล์และนำมาใช้เป็นพื้นฐานทฤษฎีของแรงไดอิเล็กโตรโฟเรติก

อันตรกิริยาระหว่างไดโพลโมเมนต์กับสนามไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักในการก่อให้เกิดแรงไดอิเล็กโตรโฟเรติก กล่าวคือหากทิศของไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุไดอิเล็กทริกเสริมกับทิศของสนามไฟฟ้าภายนอกจะเกิดแรงลัพธ์กระทำต่อเซลล์ให้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าและจะเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ต่ำกว่าหากทิศของไดโพลโมเมนต์สวนทิศกับทิศของสนามไฟฟ้า เรียกแรงที่กระทำให้เกิดการเคลื่อนที่เช่นนี้ว่า แรงไดอิเล็กโตรโฟเรติก (Dielectrophoretic Force, F_{DEP}) ซึ่งมีค่าได้ทั้งบวก ลบ และศูนย์ Pohl(1978) ได้นิยามนิพจน์ทางคณิตศาสตร์ของแรงไดอิเล็กโตรโฟเรติกเป็นฟังก์ชันขึ้นกับ 1.เทอมโพลาริซ (polarization) 2.ปริมาตรของวัสดุไดอิเล็กทริก และ 3.เทอมของ

เกรเดียนต์ (gradient) ของสนามไฟฟ้าแบบแปรผันตามเวลายกกำลังสอง โดยที่เทอมโพลาริเซชันจะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับค่าสภาพยอมเชิงซ้อน (complex permittivity) และสภาพนำไฟฟ้าเชิงซ้อน (complex conductivity) ของวัสดุไดอิเล็กทริกและของสารละลายภายนอกที่ใช้แขวนลอยเซลล์ โดยทั่วไปวัสดุไดอิเล็กทริกแต่ละชนิดจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าภายนอกได้ไม่เท่ากันขึ้นกับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้

เมื่อสนามไฟฟ้าภายนอกผ่านทะลุชั้นเยื่อหุ้มเซลล์เข้าสู่ภายในเซลล์เหนี่ยวนำให้องค์ประกอบทุกส่วนภายในเซลล์เกิดการโพลาไรซ์ ทิศของไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวกำหนดทิศทางของการเคลื่อนที่ของเซลล์ โดยทั่วไปวัตถุจะเคลื่อนที่ได้ก็ต่อเมื่อมีแรงภายนอกกระทำ แต่ในกรณีนี้ แรงที่กระทำต่อเซลล์เกิดขึ้นจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอก กระตุ้นให้เซลล์เคลื่อนที่ด้วยตัวเอง หากไดโพลโมเมนต์มีค่าน้อยย่อมแสดงว่าเซลล์มีอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าได้ ในทางกลับกันหากไดโพลโมเมนต์มีค่าน้อยย่อมแสดงถึงการที่เซลล์มีอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าได้น้อย ดังนั้นอาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ขนาดของไดโพลโมเมนต์ย่อมแสดงถึงความสามารถในการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของเซลล์

กล่าวโดยสรุปคือ ไดอิเล็กโทรฟอเรซิสจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อเซลล์หรือวัตถุไดอิเล็กทริกใดๆเกิดไดโพลโมเมนต์ขึ้นภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าแบบไม่เอกรูป(เท่านั้น) ไม่ว่าสนามไฟฟ้านั้นจะเป็นแบบกระแสดตรงหรือกระแสสลับ แรงไดอิเล็กโทรฟอเรติกจะมีทิศตามทิศของไดโพลโมเมนต์กล่าวคือหากไดโพลมีทิศเสริมกับทิศสนามไฟฟ้าภายนอก แรงลัพธ์(หรือแรงสุทธิ)จะมีทิศตามทิศสนามไฟฟ้าภายนอก และหากไดโพลมีทิศสวนกันทิศของสนามไฟฟ้า แรงลัพธ์จะมีทิศสวนทิศสนามไฟฟ้าภายนอก โดยที่ขนาดของแรงขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ดังจะกล่าวในรายละเอียดในบทที่ 2

4.เทคนิคและวิธีการหาพารามิเตอร์ไฟฟ้าสำหรับไดอิเล็กทริกสถานะของเหลวและไดอิเล็กทริกแขวนลอย

ในอดีต สามารถหาพารามิเตอร์เหล่านี้สำหรับวัสดุไดอิเล็กทริกที่เป็นของเหลวด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดยอาศัยวงจรวิทสโตน บริดจ์ (wheatstone bridge) วิเคราะห์และประมวลผลตามทฤษฎีวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ Rosen, et al.(1968) ได้ทดลองวัดกับสารละลายโพแตสเซียมคลอไรด์ โดยใช้อุปกรณ์ที่มีขีดจำกัดการวัดภายในช่วงความถี่ 0.1 ถึง 10 MHz ต่อมา Anderson, et al.(1969) ทดลองวัดกับสารละลายเกลือ ขณะที่ Barbenza ได้ทดลองกับสารละลายที่นำไฟฟ้าหลายชนิด และตั้งแต่ปี 1970 เป็นต้นมา Jordan และ Grant, Beek, et al. ได้พัฒนาระบบวัดให้มีขีดความสามารถในการวัดได้ถึงช่วงความถี่ 100 MHz และสามารถทำการวัดกับสารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้าได้ต่ำสุดช่วง $0.1-1.0 \text{ S.m}^{-1}$ อย่างไรก็ตามเทคนิคเหล่านี้มีข้อจำกัดอยู่เพียงว่าของเหลวที่ต้องการจะวัดต้องเป็นสารเนื้อเดียว ไม่ใช่สารแขวนลอย และต้องมีปริมาตรที่มีนัยสำคัญพอเพียงที่เครื่องมือจะตรวจวัดได้ ด้วยเหตุนี้ เซลล์แขวนลอยชีวภาพที่มี

ขนาดเล็กระดับไมครอนจึงไม่สามารถนำมาตรวจสอบด้วยวิธีดังกล่าวได้ จนประมาณปี 1960 เป็นต้นมา Schwarz (1962 และ 1963) ได้พยายามหาค่าสภาพยอมของวัสดุไดอิเล็กทริกที่แขวนลอยในของเหลว โดยเริ่มทดลองกับไดอิเล็กทริกที่ไม่มีชีวิตที่คล้ายเซลล์นั้นคือเม็ดพลาสติกทรงกลมขนาดเล็กระดับไมครอนแขวนลอยในสารละลายโพแตสเซียมคลอไรด์ ด้วยวิธีการศึกษา ดิสเพอซันของไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความถี่ย่านต่ำไม่เกิน 20 kHz ซึ่งเรียก

ดิสเพอซันในช่วงความถี่นี้ว่า แอลฟา ดิสเพอซัน (α -dispersion) ต่อมา Grosse, et al. (1987) ได้เสนอนิพจน์ทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้วิเคราะห์หาค่าสภาพยอมของอนุภาคแขวนลอยไดอิเล็กทริกทรงกลม โดยอาศัยหลักการเดียวกันกับ Schwarz เลือกใช้สมการหาผลเฉลยต่างกันกล่าวคือ Schwarz ใช้สมการลาปลาซ (Laplace equation) และไม่นำผลกระทบที่เกิดจากการกระจายตัวของกลุ่มประจุที่บริเวณผิวไดอิเล็กทริกมาพิจารณาในเงื่อนไขขอบ แต่ Grosse วิเคราะห์โดยอาศัยผลเฉลยของสมการพัชชอง-โบลตซ์มานน์ (Poisson-Boltzmann equation) เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าของชั้นประจุที่ถูกรวมบริเวณชั้นไดอิเล็กทริก ทำให้ได้นิพจน์ทางคณิตศาสตร์ของสภาพยอมของไดอิเล็กทริกทรงกลม ที่เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่ของสนามไฟฟ้าภายนอก

Schwan (1985) ได้รายงานว่ เซลล์ชีวภาพจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้ากระแสสลับได้ ในช่วงความถี่ตั้งแต่ระดับเฮิรตซ์จนถึงไปถึงจิกะเฮิรตซ์ (10^9 Hz) และแบ่งช่วงความถี่ดังกล่าวไว้ 3 ช่วงคือ ช่วงความถี่ย่านต่ำ ช่วงความถี่ย่านกลาง และช่วงความถี่ย่านสูง อันตรกิริยาระหว่างไดอิเล็กทริกกับสนามไฟฟ้าในแต่ละช่วงความถี่ก่อให้เกิดการโพลาไรซ์ในลักษณะที่ต่างกัน ส่งผลให้เกิดการแปรเปลี่ยนค่าสภาพยอมตามความถี่สนามไฟฟ้า ในลักษณะลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น หากเกิดขึ้นในช่วงความถี่ย่านต่ำกว่าระดับกิโลเฮิรตซ์จะถูกเรียก แอลฟา - ดิสเพอซัน

(ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว) หากเกิดขึ้นในช่วงความถี่ย่านกลาง (ช่วงความถี่ประมาณกิโลเฮิรตซ์ถึง เมกะเฮิรตซ์) เรียก เบต้า-ดิสเพอซัน (β -dispersion) และหากเกิดขึ้นที่ความถี่ย่านสูงระดับ

เมกะเฮิรตซ์จนถึงจิกะเฮิรตซ์ จะเรียกแกมมา - ดิสเพอซัน (γ -dispersion) นอกจากนี้ Schwan ยังได้แบ่งดิสเพอซันที่ช่วงรอยต่อระหว่าง แอลฟา - ดิสเพอซัน และ เบต้า-ดิสเพอซัน

ซึ่งเรียกว่า เดลต้า - ดิสเพอซัน (δ -dispersion) อย่างไรก็ตาม ไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอนตายตัว สำหรับการแบ่งขอบเขตช่วงความถี่เหล่านี้ ทั้งนี้ขึ้นกับคุณลักษณะและองค์ประกอบของเซลล์แต่ละชนิด Schwan (1985 และ 1988) ได้อธิบายถึงความแตกต่างระหว่างดิสเพอซันเหล่านี้ไว้ดังนี้

แอลฟา - ดิสเพอซัน เกิดจากชั้นประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวเซลล์ส่งอิทธิพลดึงดูดไอออนของสารละลายภายนอกที่มีขั้วตรงข้ามที่อยู่บริเวณใกล้เคียงให้มาออกัน เสมือนหนึ่งได้สร้างชั้นของค่าความนำไฟฟ้า (conductance) ห่อหุ้มเซลล์ โดยที่ชั้นประจุดังกล่าวจะมีความหนาสัมพันธ์กับความเข้มข้นและชนิดของไอออนของสารละลายที่อยู่ล้อมรอบเซลล์ เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า ความสัมพันธ์ของ Debye และเรียกความหนาของชั้นประจุนี้ว่า Debye length โดยปกติค่าความนำไฟฟ้าของชั้นประจุที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าอยู่ประมาณนาโนซีเมนส์ และสามารถแปรเปลี่ยนค่าได้ตาม

ความถี่ของสนามไฟฟ้าที่เรียกว่าค่าแอดมิตแตนซ์ (admittance) จากสมมุติฐานที่กล่าวมานี้ คาดว่าเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เกิดการดิสเพอชั่นของไดอิเล็กทริกแบบแอลฟาขึ้น มีผู้คิดทฤษฎีขึ้นมารองรับสมมุติฐานดังกล่าวไว้ อาทิ Schwarz (1962) แต่ทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับเป็นของ Grosse and Foster (1987)

เบต้า - ดิสเพอชั่น เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างชั้นของเหลวภายในเซลล์กับสารละลายที่อยู่ภายนอกเซลล์ โดยมีเยื่อหุ้มเซลล์ที่คั่นอยู่ระหว่างตัวกลางทั้งสองชนิดทำหน้าที่เสมือนตัวเก็บประจุและตัวต้านทานที่ต่อกันแบบขนาน ที่มีค่าอิมพีแดนซ์แปรเปลี่ยนค่าแบบไม่เป็นเชิงเส้นตามความถี่ของสนามไฟฟ้า หรือเรียกว่า ดิสเพอชั่นของอิมพีแดนซ์ ส่งผลต่อการยอมให้ประจุสนาม หรือกระแสไฟฟ้า แพร่ผ่านเข้าสู่เซลล์ได้ยากง่ายต่างกัน พฤติกรรมเหล่านี้ก่อให้เกิดการดิสเพอชั่นของไดอิเล็กทริกแบบเบต้า มีผู้นิยมศึกษาการดิสเพอชั่นกรณีนี้ เนื่องจากมีทฤษฎีมารองรับเป็นจำนวนมาก ทฤษฎีแรกเริ่มเสนอโดย Maxwell (1873) ศึกษาในกรณีไดอิเล็กทริกในสนามไฟฟ้าเป็นแบบกระแสดตรง จากนั้นในปี 1914 Wagner ได้พัฒนาทฤษฎีสำหรับใช้ในกรณีสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และพัฒนาต่อมาโดย Schwan(1957) และ Pauly and Schwan(1959) (อ้างตาม Coster, et al.,1996) ในปัจจุบันทฤษฎีของ Maxwell - Wagner ยังเป็นที่ยอมรับและใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์ที่ความถี่ย่านกลาง

ในกรณีท้ายสุดคือ แกมมา - ดิสเพอชั่น เนื่องจากยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดถึงกลไกจึงได้มีผู้เสนอสมมุติฐานไว้บ้าง อาทิเช่น ในปี 1988 Schwan เสนอว่า การดิสเพอชั่นที่ความถี่ย่านสูง น่าจะเกิดจากการที่ภายในเซลล์มีองค์ประกอบของน้ำเป็นหลัก ซึ่งโดยปกติ น้ำเป็นสารที่คุณสมบัติที่เรียกว่า ดิสเพอซีฟ (dispersive) หมายถึงมีการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพยอมได้ตามความถี่สนามไฟฟ้า ภายใต้ช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าระดับจิกะเฮิรตซ์ น้ำจะมีความยอมประมาณ 78 - 80 เท่าของสภาพยอมสูญญากาศ หากความถี่สูงเกินกว่านี้ ค่าสภาพยอมจะมีค่าลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการแยกประจุในการเกิดไดโพลโมเมนต์ภายในเซลล์ลดลง ผลที่ตามมาคือไดโพลโมเมนต์จะมีความถี่ในการสลับทิศน้อยกว่าความถี่ในการสลับทิศของสนามไฟฟ้า ก่อให้เกิดความไม่สอดคล้องกัน การศึกษาดิสเพอชั่นในกรณีนี้มีผู้ให้ความสนใจน้อยเนื่องจากมีความยุ่งยากต่อการติดตั้งอุปกรณ์ที่ศึกษาอีกทั้งมีทฤษฎีที่มารองรับน้อย

สำหรับการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์นี้ ได้เลือกศึกษาไดอิเล็กโทรโพเรซิส ในช่วงความถี่ย่านกลาง ประมาณช่วง kHz ถึง 15 MHz ด้วยเหตุผลสองประการที่ว่า หนึ่ง เพื่อก่อให้เกิดความเป็นเอกภาพ ทักษะในการปฏิบัติ และความต่อเนื่องของกระบวนการเรียนรู้ในเบื้องต้น จึงจำเป็นต้องมุ่งเน้นศึกษาเฉพาะไดอิเล็กโทรโพเรซิสของเซลล์เดี่ยวภายใต้ช่วงความถี่ย่านกลางที่ก่อให้เกิดเซลล์เกิดการดิสเพอชั่นแบบเบต้า ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่คาดว่าเยื่อหุ้มเซลล์จะมีคุณสมบัติเด่นในทางเก็บประจุไฟฟ้า โดยอาศัยแนวทางปฏิบัติและทฤษฎีของนักวิจัยที่ได้เคยทำมา สอง เพื่อต้องการหลีกเลี่ยงปัญหาความร้อนที่เกิดกับขั้วไฟฟ้า จากการศึกษาเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการนี้พบว่า

กรณีที่ความถี่ของสนามไฟฟ้าต่ำกว่าระดับกิโลเฮิร์ตซ์ ขั้วไฟฟ้าที่ร้อนจะก่อให้เกิดฟองก๊าซที่ผิว ขั้วส่งผลรบกวนต่อระบบทดลอง

จากการที่ไม่สามารถวัดค่า สภาพยอม และค่าสภาพนำไฟฟ้า ของไซโตพลาสซึม ของเยื่อหุ้มเซลล์ ของเซลล์ชีวภาพซึ่งมีขนาดเล็กระดับไมครอนได้โดยตรง จึงประมาณค่าพารามิเตอร์เหล่านี้โดยวิธีอ้อม กล่าวคือ พารามิเตอร์บางตัวที่สามารถกระทำการวัดได้โดยตรง เช่น สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์ ขนาดและรูปร่างของเซลล์ รวมทั้งความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ จะถูกนำไปเป็นข้อมูลเสริมในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าอื่นที่เหลือ (Mihai, *et al.*, 1996) Schwan, 1988 รายงานว่าเทคนิคการหาพารามิเตอร์ของเซลล์มีหลายวิธีแต่วิธีที่นิยมศึกษาคือวิธีไดอิเล็กทริกสเปกโทรสโกปี (Dielectric Spectroscopy) ซึ่งแบ่งย่อยออกได้เป็นสองวิธีคือ หนึ่งเทคนิคการใช้ไมโครอิเล็กโทรด (Microelectrode Tecnnique) และสอง เทคนิคการแขวนลอยเซลล์ (Suspension Technique) วิธีการแรกจะใช้ขั้วไฟฟ้าขนาดเล็กสองอันสอดเข้าไปในเซลล์ที่ต้องการจะศึกษาขั้วไฟฟ้าอันหนึ่งจะให้กระแส และอีกอันหนึ่งจะทำหน้าที่วัดศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์เทียบกับศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่อยู่ภายนอกเซลล์ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์จะถูกประมวลค่าจากกระแสและศักย์ไฟฟ้างดังกล่าว แต่เทคนิคนี้มีขีดจำกัดการศึกษาได้ในช่วงความถี่ย่านต่ำประมาณ 10 kHz เท่านั้น (ทำนองเดียวกับเทคนิคโวลเตจ แพทช์ แคลมป์ (Voltage Patch Clamp Technique)) ข้อด้อยของเทคนิคนี้ถูกแก้ไขด้วย วิธีการแขวนลอยเซลล์ กล่าวคือ วิธีการนี้สามารถศึกษาได้ภายในช่วงความถี่ที่กว้างจากระดับเฮิร์ตซ์ถึงระดับ 70 GHz โดยการนำเซลล์ที่จะศึกษาแขวนลอยอยู่ในสารละลายที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดจากขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายนอกตัวเซลล์ แต่ถึงอย่างไรก็ดีทั้งวิธีที่หนึ่งและสองจะใช้รูปแบบการประมวลผลด้วยวิธีกระทำซ้ำ (Iterative Method) เพื่อหาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าสำหรับศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์

5.แบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์ชีวภาพ

ในการกระทำซ้ำเพื่อประมวลค่าพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลอง จำเป็นต้องอาศัยสมการคณิตศาสตร์ที่จำลองกลไกการแลกเปลี่ยนพลังงาน แลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้า รวมถึงกลไกการกักเก็บประจุของเยื่อหุ้มเซลล์ ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเรียกว่าแบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์ แบบจำลองที่ง่ายที่สุดคือแบบจำลองเซลล์ทรงกลมที่ไม่มีผนังเซลล์ ความซับซ้อนของแบบจำลองขึ้นกับรูปร่างของเซลล์และจำนวนชั้นของผนังเซลล์ ทั้งนี้เนื่องจากรูปร่างที่ไม่ใช่ทรงกลมจะยากต่อการวิเคราะห์ระบบพิกัด อีกทั้งจำนวนชั้นของผนังเซลล์จะมีผลต่อจำนวนพารามิเตอร์ จำนวนพารามิเตอร์ที่มากจะยากต่อการวิเคราะห์และยากต่อการประมาณค่า ตัวอย่างเช่น เซลล์พืชที่มีผนังเซลล์ 1 ชั้น จะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้แก่ สภาพนำไฟฟ้าและสภาพยอมของผนังเซลล์ ของชั้นเยื่อหุ้มเซลล์ และของไซโทพลาสซึม ตามลำดับ รวมถึงความหนาของผนังเซลล์และของเยื่อหุ้มเซลล์ รวมจำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมดมี 8

พารามิเตอร์ (Asami, *et al.*, 1984; Mihai, *et al.*, 1996) หากเซลล์มีผนังเซลล์สองชั้น จะมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 11 พารามิเตอร์ รูปแบบการวิเคราะห์จะมีลักษณะคล้ายกับการนำพารามิเตอร์ที่ทราบค่าไปใช้ประมาณหาพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า โดยอาศัยผลการทดลองเป็นเครื่องมือเชื่อมโยงระหว่างทฤษฎีกับพารามิเตอร์เหล่านั้น ดังนั้นแบบจำลองเซลล์ที่ดีคือแบบจำลองที่มีความละเอียดและมีความสอดคล้องกับเซลล์ต้นแบบมากที่สุด แต่จะยากต่อการวิเคราะห์มากขึ้นเช่นกัน

ของเหลวภายในเซลล์โดยทั่วไปจะมีสภาพนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสภาพแวดล้อมภายนอกเซลล์ แต่ถึงอย่างไรก็ตามก็ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าสภาพนำไฟฟ้าภายในเซลล์รวมทั้งสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ ควรอยู่ในระดับใด นักวิจัยส่วนใหญ่รายงานผลการวิจัยว่าควรอยู่ในระดับ 0.1 S.m^{-1} ขึ้นไป (Kaler and Jones, 1990; Fuhr and Kuzmin, 1986 และ Radu, *et al.*, 1996) ในปี 1996 Asami, *et al.* เสนอว่า วิธีการตรวจสอบหาสมบัติไดอิเล็กทริกของเซลล์ ควรเลือกใช้แบบจำลองทางไฟฟ้าที่มีรูปทรงสอดคล้องใกล้เคียงกับเซลล์ที่จะนำมาศึกษาให้มากที่สุด แบบจำลองทางไฟฟ้าสำหรับเซลล์พืชจึงค่อนข้างมีความหลากหลาย แบ่งคร่าวๆได้เป็น แบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกเซลล์หนึ่งชั้น (Spherical Single Shell Model, SSM) (Kaler and Jones, 1990) แบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกเซลล์สองชั้น (Spherical Double Shell Model, SDM) (Asami, *et al.*, 1984) แบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงรีเปลือกเซลล์หนึ่งชั้น (Ellipsoidal Single Shell Model, ESM) (Saito, *et al.*, 1966 และ Watanabe, *et al.*, 1991), แบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงรีเปลือกเซลล์สองชั้น (Ellipsoidal Double Shell Model, EDM) (Radu, *et al.*, 1996) เป็นต้น ถึงแม้ว่าแบบจำลองเหล่านี้จะมีรูปแบบการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันออกไป แต่ได้อาศัยหลักการเดียวกันกล่าวคือ นำผลกระทบของแมกซ์เวลล์-แวกเนอร์ มาใช้วิเคราะห์การโพลาไรซ์ของกลุ่มประจุที่บริเวณชั้นรอยต่อระหว่างชั้นไดอิเล็กทริก

ในปี 1996 Asami, *et al.* เลือกใช้เซลล์เม็ดเลือดขาว เซลล์น้ำเหลือง และ โพรโทพลาสต์พืช เป็นเซลล์ต้นแบบ วิเคราะห์หาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์ภายในช่วงความถี่สนามไฟฟ้า 1 kHz ถึง 1 GHz โดยเลือกใช้แบบจำลอง SSM SDM และแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลม

เปลือกสองชั้นที่มี vesicle ฝังอยู่ระหว่างชั้นของนิวเคลียสและเยื่อหุ้มเซลล์ตามลำดับ แสดงผลอยู่ในรูปของไดอิเล็กทริกดิสเพอชันที่ได้จากการกระจายของ โคล-โคล (Cole-Cole Dispersion) ได้ค่าอยู่ในช่วงหนึ่งถึงประมาณพันเท่าของสภาพยอมของสุญญากาศ นอกจากนี้ ในปีเดียวกัน Radu, *et al.* ได้ประมาณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ โพรโทพลาสซึมของเซลล์ยีสต์ ศึกษาภายในช่วงความถี่ของสนามไฟฟ้า 1 kHz ถึง 10 MHz โดยอาศัยแบบจำลองทางไฟฟ้า EDM ได้ค่า ในระดับ $\mu\text{S.m}^{-1}$ 0.2 S.m^{-1} และ ประมาณ 6 เท่าของสภาพยอมของสุญญากาศ ตามลำดับ สำหรับงานวิจัยในเซลล์สัตว์พบว่า ในปี 1996 Asami, *et al.* ได้ทดลองหาค่าความเก็บประจุไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวไตสุนัข ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า สแกนนิ่ง ไดอิเล็กทริก ไมโครสโคป (Scanning dielectric microscope) ได้ผลอยู่ในช่วง

เฟมโตฟารัด และ นาโนซีเมนส์ ตามลำดับ ขณะที่ในปี 1994 Mahaworasilpa, *et al.* ได้รายงาน
ว่า เซลล์เม็ดเลือดแดงของคนและหนู มีสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมและของเยื่อหุ้มเซลล์
ประมาณ 0.1 S.m^{-1} และ $\mu\text{S.m}^{-1}$ ตามลำดับ จากทั้งหมดที่กล่าวมาพอสังเขปจะสังเกตเห็น
ว่าสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมมีค่าอยู่ในระดับที่สูงมากเมื่อเทียบกับสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อ
หุ้มเซลล์ และมีค่าสูงกว่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์เดี่ยวพืช
2. เพื่อศึกษาความเหมาะสมของการนำแบบจำลองทางไฟฟ้าเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกเซลล์หนึ่งชั้น มาประยุกต์ใช้กับเซลล์เดี่ยวพืช

ขั้นตอนการวิจัย

1. เตรียมเซลล์เดี่ยว โดยใช้แพลงก์ตอนพืชน้ำเค็ม 2 ชนิด ได้แก่ *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp. (ได้รับความอนุเคราะห์หัวเชื้อจากสถาบันเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งสงขลา) และ โพรโทพลาสต์ของใบกล้วยไม้ *Dendrobium*.sp
2. พัฒนาอุปกรณ์ปล่อยและดูดเซลล์เดี่ยว และชุดทดลองสำหรับศึกษาไดอิเล็กโทรโฟรีซิส
3. ศึกษาการเกิดไดอิเล็กโทรโฟรีซิสของเซลล์ พร้อมทั้งหาความเข้มข้นไฟฟ้าและสภาวะที่เหมาะสม
4. วัดความเร็วของเซลล์
5. หาค่าจริงของฟังก์ชันความถี่ ($\text{Re}[f(\omega)]$)
6. ประเมินพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์โดยอาศัยแบบจำลองทางไฟฟ้าเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกเซลล์หนึ่งชั้น

บทที่ 2

ทฤษฎีแรงไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติก

2.1 นิพจน์ทางคณิตศาสตร์รูปแบบเฉพาะของแรงไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติกสำหรับไดอิเล็กทริกในอุดมคติ

ภายใต้สมมติฐานว่า เซลล์จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกแบบเอกพันธ์ (homogeneous) ไอโซโทรปิก (isotropic) และเชิงเส้น (linear) หมายความว่าสภาพยอมของเซลล์ไม่ขึ้นกับตำแหน่งในเนื้อสารไดอิเล็กทริก ไม่ขึ้นกับทิศสนามไฟฟ้า และไม่ขึ้นกับขนาดของสนามไฟฟ้า แรงไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติกมีค่า ดังสมการ

$$\vec{F}_{(DEP)} = \text{Re}[(\vec{\mu}(\omega) \cdot \nabla) \vec{E}] \quad 1)$$

(ดูที่มาของสมการในภาคผนวก 1)

เมื่อ $\vec{\mu}(\omega)$ คือไดโพลโมเมนต์ ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นภายในเซลล์หรือภายในเนื้อไดอิเล็กทริก มีหน่วยเป็น คูลอมบ์.เมตร ($C \cdot m$) \vec{E} คือสนามไฟฟ้าภายนอก มีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเมตร ($V \cdot m^{-1}$) สัญลักษณ์ ∇ คือ ตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า เกรเดียนต์ หรือ เดล (gradient or del) ทำหน้าที่อนุพันธ์ปริมาณที่เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับตำแหน่งเทียบกับตำแหน่งในทางฟิสิกส์หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเวกเตอร์ใดๆ ต่อตำแหน่ง แรงไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติก จึงมีหน่วยเป็น นิวตัน (N) หรือ คูลอมบ์.โวลต์ .เมตร⁻¹ ($C \cdot V \cdot m^{-1}$)

จากสมการ 1 จะพบว่าแรงไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติกแปรผันตรงกับ ไดโพลโมเมนต์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าภายนอกต่อหน่วยระยะทาง โดยมีความสัมพันธ์กับการเกิด โพลาริเซชันตามสมการ

$$\vec{\mu}(\omega) = V \vec{P}(\omega) \quad 2)$$

เมื่อ V คือปริมาตรของวัสดุไดอิเล็กทริก (หรือปริมาตรเซลล์) และ $\vec{P}(\omega)$ คือโพลาริเซชันซึ่งมีค่าขึ้นกับความถี่ของสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น $C \cdot m^{-2}$ ดังนั้นโดยนัยแล้ว โพลาริเซชันจึงหมายถึงความหนาแน่นของประจุผูกพัน (bound charge) ต่อหน่วยพื้นที่ที่อยู่ในไดอิเล็กทริก

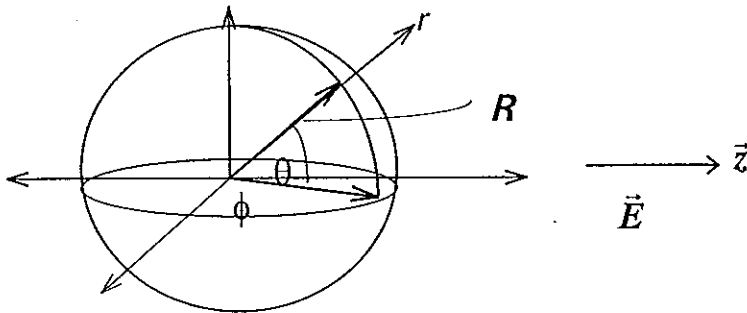
สรุปว่า นิพจน์ของแรงไดอิเล็กทริกโทรฟอเรติกมีค่าขึ้นกับสองเทอมหลัก เทอมแรกคือไดโพลโมเมนต์ภายในไดอิเล็กทริกที่ถูกเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าภายนอกซึ่งไม่อาจจะทำการวัดปริมาณได้ด้วยวิธีการทดลอง เทอมที่สองคือสนามไฟฟ้าภายนอกซึ่งสามารถควบคุมความเข้มและทิศทางได้ด้วยวิธีการทดลอง (จะกล่าวในรายละเอียดในบทวิธีการทดลอง) ดังนั้นการ

พิสูจน์หาพจน์คณิตศาสตร์สำหรับแรงไดโพลเล็กโทรฟอเรติก จะแยกเป็นสองส่วนดังที่กล่าว โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้

การวิเคราะห์หาเทอมไดโพลโมเมนต์ของเซลล์ทรงกลมเริ่มต้นจากวิธีการหาค่าศักย์ไฟฟ้าภายในและภายนอกของเซลล์ โดยใช้สมการลาปลาซพิกัดทรงกลม (Laplace equation) ในกรณีที่กำหนดให้สนามไฟฟ้าภายนอกมีทิศในแนวแกน Z ตามภาพประกอบ 5 ศักย์ไฟฟ้าจะไม่ขึ้นกับพิกัด ϕ สมการลาปลาซจึงลดรูปเหลือ 2 มิติ คือ

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \theta} = 0 \quad 3)$$

เมื่อ r และ θ ระบุไว้ตามระบบพิกัดทรงกลมดังภาพ



ภาพประกอบ 5 ระบบพิกัดทรงกลมที่ใช้วิเคราะห์กับเซลล์ทรงกลม

กำหนดให้ สัญญลักษณ์ i และ o แทน ภายในและภายนอกเซลล์ ศักย์ไฟฟ้าภายในและภายนอกเซลล์หาค่าจากผลเฉลยของสมการเลอจอง (Legendre equation) พบว่ามีค่า

$$V_o = \left(\frac{A}{r^2} + Br \right) \cos \theta,$$

24)

$$V_i = \left(\frac{C}{r^2} + Dr \right) \cos \theta$$

เมื่อ A, B, C และ D คือค่าคงที่ที่ต้องหาจากเงื่อนไขขอบ (boundary condition) จากเงื่อนไขต่อเนื่องของสนามไฟฟ้าที่บริเวณภายในและภายนอกไดโพลเล็กทริก ศักย์ไฟฟ้าบริเวณภายในและบริเวณภายนอกจะต้องมีค่าเท่ากัน และสนามไฟฟ้ากระจัด (displacement electric field, \vec{D}) จะต้องมีค่าต่อเนื่องในแนวตั้งฉากกับผิวเซลล์ และมีค่าเท่ากันทั้งภายในและภายนอกเซลล์ได้ว่า

$$\text{ที่ } r=R \quad V_o = V_i \quad 5)$$

และจาก $\vec{D}_i = \epsilon'_s \vec{E}$ จะได้ว่า

$$\epsilon'_s \frac{\partial V_o}{\partial r} = \epsilon'_{eff} \frac{\partial V_i}{\partial r}$$

เมื่อ ϵ'_{eff} คือค่ายังผลของสภาพยอมเชิงซ้อนของเซลล์ เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่อยู่ห่างไกลจากเซลล์จะไม่ถูกรบกวนจากเซลล์ แต่ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงจะถูกรบกวน ดังนั้นอีกหนึ่งเงื่อนไขคือที่ระยะอนันต์ $r = \infty$

$$V_o = -Er \cos \theta = -\vec{E} \cdot \vec{z} \quad 6)$$

และที่ $r=0$ หรือที่จุดศูนย์กลางเซลล์ ศักย์ไฟฟ้ามีค่าจำกัดค่าหนึ่งนั่นคือ $V_i =$ คงที่ จากเงื่อนไขขอบเหล่านี้ นำไปหาค่าคงที่ A, B, C และ D ได้คำตอบคือ

$$\begin{aligned} A &= \frac{\epsilon'_{eff} - \epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s} R^3 E, \\ B &= -E, \\ C &= 0, \\ D &= -\frac{3\epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s} E \end{aligned} \quad 7)$$

เมื่อ ϵ'_s คือสภาพยอมเชิงซ้อนของสารละลายแขวนลอย (ดูการพิสูจน์ในภาคผนวก 2) นำค่าคงที่เหล่านี้แทนกลับลงในสมการที่ 4 จะได้ว่า ศักย์ไฟฟ้าภายในและภายนอกเซลล์ทรงกลมมีค่า

$$\begin{aligned} V_o &= \left(\frac{\epsilon'_{eff} - \epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s} \frac{R^3}{r^3} - 1 \right) \vec{E} \cdot \vec{z}, \\ V_i &= -\frac{3\epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s} \vec{E} \cdot \vec{z}. \end{aligned} \quad 8)$$

สนามไฟฟ้าภายในเซลล์ หาได้จากความสัมพันธ์ $\vec{E} = -\nabla V$ มีค่าเป็น

$$\vec{E}_i = \frac{3\epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s} \vec{E} \quad 9)$$

จากนิยาม โพลาริซั่มที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ จะมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่าง สนามไฟฟ้ากระจัดที่เกิดขึ้นในเซลล์กับสนามไฟฟ้ากระจัดที่เกิดภายนอกเซลล์ เมื่อแทนค่าสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ จากสมการที่ 9 โพลาริซั่มจะมีค่าเป็น

$$\vec{P}(\omega) = (\epsilon'_{eff} - \epsilon'_s) \vec{E}_i = \frac{\epsilon'_{eff} - \epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s} 3\epsilon'_s \vec{E} \quad (10)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ 10 ลงในสมการที่ 2 ไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จะมีค่า

$$\vec{\mu}(\omega) = V\vec{P}(\omega) = \frac{4}{3} \pi R^3 \vec{P}(\omega) = 4\pi R^3 \epsilon'_s \frac{\epsilon'_{eff} - \epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s} \vec{E} \quad (11)$$

แทนสมการที่ 11 ลงในสมการที่ 1 จะได้ว่า

$$\vec{F}_{(DEP)} = \text{Re}[(\vec{\mu}(\omega) \cdot \nabla) \vec{E}] = \text{Re}\left[4\pi R^3 \epsilon'_s \frac{\epsilon'_{eff} - \epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s} \vec{E} \cdot \nabla \vec{E}\right]$$

โดยการอาศัยความสัมพันธ์ $(\vec{E} \cdot \nabla) \vec{E} = \frac{\nabla \vec{E}^2}{2}$ และพิจารณาว่าเทอม $4\pi R^3$ และเทอมสนาม

ไฟฟ้า \vec{E} เป็นปริมาณจริง ไม่ใช่ปริมาณเชิงซ้อน ดังนั้น

$$\vec{F}_{(DEP)} = 2\pi R^3 \text{Re}\left[\epsilon'_s \frac{\epsilon'_{eff} - \epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s}\right] \nabla \vec{E}^2 \quad (12)$$

เนื่องจากเทอมที่อยู่ในเครื่องหมาย [...] มีค่าขึ้นกับ ϵ'_{eff} ซึ่งมีความซับซ้อนและยุ่งยากต่อการคำนวณมาก Sher (1968) ได้เสนอการประมาณค่าไว้ดังนี้คือ ในกรณีที่ สารละลายภายนอกที่ใช้แขวนลอยเซลล์ มีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ต่ำประมาณ Ms.m^{-1} และอยู่ภายใต้ช่วงความถี่ของสนาม

ไฟฟ้าย่านกลาง คือ ระดับกิโวลต์ขึ้นไป จากความสัมพันธ์ $\epsilon'_s = \epsilon_s - j \frac{\sigma_s}{\omega} \approx \epsilon_s$ ดังนั้น

นิพจน์ของแรงไดโพลีโทรฟอเรติกในรูปแบบเฉพาะสำหรับเซลล์ทรงกลมมีค่าเป็น

$$\vec{F}_{(DEP)} = 2\pi R^3 \epsilon_s \text{Re}\left[\frac{\epsilon'_{eff} - \epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s}\right] \nabla \vec{E}^2 \quad (13)$$

2.2 รายละเอียดเกี่ยวกับเทอม $\text{Re}[f(\omega)]$

ที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า แรงและความเร็วไดโพลโทรฟอเรติกเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเทอม $\text{Re}[f(\omega)]$ หากจะพิจารณาถึงความหมายแล้ว $\text{Re}[f(\omega)]$ เป็นเทอมที่บ่งบอกถึงคุณลักษณะการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของเซลล์ ซึ่งขึ้นกับ ϵ'_{eff} และค่า ϵ'_s นั่นคือ

$$\text{Re}[f(\omega)] = \text{Re}\left[\frac{\epsilon'_{eff} - \epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s}\right] \quad (14)$$

ในกรณีที่ $\epsilon'_{eff} > \epsilon'_s$ ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ จะมีค่าเป็นบวกแสดงถึง ทิศทางของไดโพลโมเมนต์ที่เกิดภายในเซลล์มีทิศเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้าภายนอก และในกรณีที่ $\epsilon'_{eff} < \epsilon'_s$ ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ จะมีค่าเป็นลบ แสดงถึงทิศทางของไดโพลโมเมนต์ที่เกิดภายในเซลล์มีทิศตรงกันข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้าภายนอก สำหรับขนาดของไดโพลโมเมนต์จะขึ้นกับผลต่างระหว่าง ϵ'_{eff} และ ϵ'_s หากเซลล์มีค่า $\epsilon'_{eff} \gg \epsilon'_s$ นั้นหมายถึงเซลล์จะประพฤติตัวเป็นไดโพลทริกที่เด่นกว่าสารละลาย ดังนั้น สนามไฟฟ้าภายนอกจะมีทิศเข้าสู่เซลล์และภายในเซลล์จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ตามมา แต่กระนั้นก็ตามการเกิดไดโพลโมเมนต์ ก็ไม่ได้แปรผันตรงกับขนาดของสนามไฟฟ้าที่แพร่เข้ามาสู่เซลล์เพียงอย่างเดียว สมการที่ 11 แสดงให้เห็นว่า ไดโพลโมเมนต์ภายในเซลล์มีค่าขึ้นกับรัศมีของเซลล์ด้วย เป็นที่น่าสังเกตว่าทั้ง ϵ'_{eff} และ ϵ'_s ต่างก็เป็นปริมาณที่ขึ้นกับความถี่ของสนามไฟฟ้า ดังนั้นเทอม $\text{Re}[f(\omega)]$ จะมีค่าขึ้นกับความถี่ของสนามไฟฟ้า Mahaworasilpa, et al., 1994 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเทอม $\text{Re}\left[\frac{\epsilon'_{eff} - \epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s}\right]$ กับความถี่ของสนาม ไว้ดังต่อไปนี้

เนื่องจากพารามิเตอร์ทุกตัวในวงเล็บ [...] เป็นปริมาณเชิงซ้อน ดังนั้นจึงต้องทำการกระจายปริมาณเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของส่วนจริงและส่วนจินตภาพ จะได้ว่า

$$f(\omega) = \left[\frac{\epsilon'_{eff} - \epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s} \right] = - \frac{(1 - \alpha_s)(1 + 2\alpha_c) - (1 + 2\alpha_s)(1 - \alpha_c) \left(\frac{R - \delta}{R}\right)^3}{(2 + \alpha_s)(1 + 2\alpha_c) - 2(1 - \alpha_s)(1 - \alpha_c) \left(\frac{R - \delta}{R}\right)^3} \quad (15)$$

เมื่อ

$$\alpha_s = \frac{\epsilon'_m}{\epsilon'_s} = \frac{\sigma_m + j\omega\epsilon_m}{\sigma_s + j\omega\epsilon_s}$$

และ

$$\alpha_c = \frac{\varepsilon'_m}{\varepsilon'_c} = \frac{\sigma_m + j\omega\varepsilon_m}{\sigma_c + j\omega\varepsilon_c}$$

ในกรณีที่ ความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ (δ) มีค่าน้อยกว่า รัศมีของเซลล์ (R) ในระดับที่ทำให้ $\frac{\delta}{R}$ มีค่าน้อยๆ $\approx 10^{-3}$ สามารถประมาณเทอม $f(\omega)$ ได้เป็น

$$f(\omega) = - \frac{(\alpha_c - \alpha_s) + (1 + 2\alpha_s)(1 - \alpha_c) \frac{\delta}{R}}{(\alpha_s + 2\alpha_c) + (1 - \alpha_s)(1 - \alpha_c) \frac{2\delta}{R}} \quad (16)$$

แทนค่า α_c และ α_s พร้อมทั้งกระจายเทอมทั้งหมดให้อยู่ในรูปส่วนจริงและส่วนจินตภาพ จะได้ว่า

$$\text{Re}[f(\omega)] = - \left[\frac{AB + CD\omega^2}{B^2 + D^2\omega^2} \right] \quad (17)$$

เมื่อ

$$A = (2k - 1)(\sigma_c\sigma_m - \varepsilon_c\varepsilon_m\omega^2) + (1 - k)(\sigma_s\sigma_m - \varepsilon_s\varepsilon_m\omega^2) + k[\sigma_s\sigma_c - 2\sigma_m^2 + \omega^2(2\varepsilon_m^2 - \varepsilon_s\varepsilon_c)]$$

$$B = (1 - 2k)(\sigma_c\sigma_m - \varepsilon_c\varepsilon_m\omega^2) + 2(1 - k)(\sigma_s\sigma_m - \varepsilon_s\varepsilon_m\omega^2) + 2k[\sigma_s\sigma_c + \sigma_m^2 - \omega^2(\varepsilon_m^2 + \varepsilon_s\varepsilon_c)]$$

$$C = (2k - 1)(\sigma_m\varepsilon_c + \sigma_c\varepsilon_m) + (1 - k)(\sigma_m\varepsilon_s + \sigma_s\varepsilon_m) + k(\sigma_c\varepsilon_s + \sigma_s\varepsilon_c - 4\sigma_m\varepsilon_m)$$

$$D = (1 - 2k)(\sigma_m\varepsilon_c + \sigma_c\varepsilon_m) + 2(1 - k)(\sigma_m\varepsilon_s + \sigma_s\varepsilon_m) + 2k(\sigma_c\varepsilon_s + \sigma_s\varepsilon_c + 2\sigma_m\varepsilon_m)$$

ดูรายละเอียดการพิสูจน์ ในภาคผนวก 3

2.3 ความเร็วไดโพลโทรฟอเรติก

เซลล์ทรงกลมที่ถูกแขวนลอยในของเหลวที่มีค่าความหนืด η หากถูกแรงไดโพลโทรฟอเรติก แบบบวกกระทำ เซลล์จะเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงกว่า นั่นคือ เซลล์จะเคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้า ตลอดการเคลื่อนที่ของเซลล์จะเกิดแรงต้านในทิศตรงกันข้ามกับแรงไดโพลโทรฟอเรติก เรียกแรงนี้ว่า แรงลากของสโตกส์ (stokes 'drag force, \vec{F}_η)

เป็นที่น่าสนใจว่า ณ ที่เวลาเท่าใดที่เซลล์จะเริ่มเข้าสู่สภาวะของความเร็วยุติ นั่นคือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ หรือเกือบจะคงที่ ปัญหานี้จึงเป็นปัญหาหนึ่งที่น่าสนใจต่อการป้องกันความผิดพลาดในการคำนวณความเร็วไดโพลโทรฟอเรติก จากข้อมูลจากการทดลองในเบื้องต้นชี้ให้เห็นว่าเซลล์ไม่ได้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ แต่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นด้วยค่าความเร่ง จากสมการการเคลื่อนที่ตามกฎข้อที่สองของนิวตันจะได้ว่า

$$m \frac{\partial \vec{v}_{DEP}}{\partial t} = \vec{F}_{DEP} - \vec{F}_\eta \quad (18)$$

เมื่อ m คือ มวลของเซลล์ , \vec{v}_{DEP} คือ ความเร็วไดโพลโทรฟอเรติก และ t คือ เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ในกรณีนี้ไม่นำเทอมที่เกี่ยวข้องกับเทอมแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อเซลล์เข้ามาพิจารณา เนื่องจากการทดลองนี้จะเลือกวัดความเร็วของเซลล์ที่เคลื่อนที่ในระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบของแรงโน้มถ่วงเท่านั้น ดังนั้นความเร็วจึงมีทิศตั้งฉากกับทิศแรงโน้มถ่วง และมีทิศการเคลื่อนที่ในลักษณะหนึ่งมิติ โดยที่

$$\vec{F}_\eta = 6\pi\eta R \vec{v}_{DEP} = \beta \vec{v}_{DEP} \quad \text{เมื่อ} \quad \beta = 6\pi\eta R \quad (19)$$

จากสมการที่ 13 แรงไดโพลโทรฟอเรติกสำหรับเซลล์ทรงกลมเปลือกเดี่ยว มีค่า

$$\vec{F}_{DEP} = 2\pi\epsilon_s R^3 \text{Re}[f(w)] \nabla(\vec{E})^2$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 19 และจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$\frac{d \vec{v}_{DEP}}{d t} = -\frac{\beta}{m} (\vec{v}_{DEP} - \vec{\gamma}) \quad (20)$$

เมื่อ

$$\vec{\gamma} = \frac{\vec{F}_{DEP}}{\beta} = \frac{\epsilon_s R^2 \text{Re}[f(w)] \nabla(\vec{E})^2}{3\eta} \quad (21)$$

โดยที่เทอม $\vec{\gamma}$ เป็นเทอมที่บอกถึงความเร็วมีหน่วยเป็น $m.s^{-1}$ หากพิจารณาว่าเทอม $\nabla(E)^2$ มีความเป็นเอกรูปต่ำ และอินทิเกรตสมการ 20 เทียบกับความเร็วจะได้ว่า

$$\vec{v}_{DEP}(t) = \vec{\gamma} \left[\frac{1 + ce^{-\frac{2\beta t \sqrt{\vec{\gamma}}}{m}}}{1 - ce^{-\frac{2\beta t \sqrt{\vec{\gamma}}}{m}}} \right]^2 \quad (22)$$

จากสมการนี้สามารถหาผลเฉลยเฉพาะ (particular solution) โดยทำการหาค่าคงที่ c โดยพิจารณาเงื่อนไขเริ่มต้น เหล่านี้ คือเมื่อเวลาเริ่มต้น $t = 0$ ความเร็วไดอิเล็กโตรฟอเรติกต้องมีค่าเป็นศูนย์ $\vec{v}_{DEP}(0) = 0$ และ เมื่อเวลา $t \rightarrow \infty$ เทอมที่อยู่ใน [...] มีค่าประมาณ 1 ดังนั้น $\vec{v}_{DEP}(t) = \vec{\gamma}$ จากเงื่อนไขเหล่านี้ทำให้หาค่าคงที่ $c = -1$ สมการที่ 22 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ใหม่เป็น

$$\vec{v}_{DEP}(t) = \vec{\gamma} \left[\tanh\left(\frac{\beta t \sqrt{\vec{\gamma}}}{m}\right) \right]^2 \quad (23)$$

จากสมการ จะพบว่า เมื่อเวลา $t \rightarrow \infty$, $\vec{v}_{DEP}(t) \rightarrow \vec{\gamma}$ ดังนั้นความเร็วไดอิเล็กโตรฟอเรติกตามกฎข้อที่หนึ่งของนิวตัน จะมีค่า

$$\vec{v}_{(DEP)} = \frac{e_s R^2 \operatorname{Re}[f(\omega)] \nabla(\vec{E})^2}{3\eta} \quad (24)$$

สมการที่ 24 เป็นสมการที่เป็นรูปแบบเฉพาะ คือใช้ได้เพียงกรณีเดียวคือกรณีความเร็วคงที่ แต่สำหรับความเร็วรูปแบบกรณีทั่วไปคือความเร็วตามสมการที่ 23 แต่ในการทดลองนี้เลือกใช้ความเร็วตามสมการ 24 โดยจะวัดความเร็วซึ่งสัมพันธ์กับระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้าและ $\nabla(\vec{E})^2$

2.4 การคำนวณเทอม $\nabla(\bar{E}^2)$

การวิจัยนี้ใช้ขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกคู่ขนานจุ่มในสารละลายตัวกลางที่นำไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ ขั้วไฟฟ้าถูกจัดในลักษณะวางตัวตามยาวในทิศแกน Y ตามภาพประกอบ 6 เมื่อ a คือรัศมีของ ขั้วไฟฟ้าซึ่งวางแยกห่างกันเทียบจากจุดศูนย์กลางของขั้วไฟฟ้าเป็นระยะ d และจ่ายศักย์ไฟฟ้า แก่ขั้วไฟฟ้าแบบกระแสสลับ $V(t) = V_0 \sin \omega t$ สนามไฟฟ้าที่ทุกจุดที่สนใจในระนาบ YZ คำนวณได้จากผลเฉลยของสมการลาปลาซที่กีดทรงกระบอกในสองมิติ จากการพิสูจน์โดย Mahaworasilpa, et al., 1994 พบว่า สนามไฟฟ้าในแนวแกน Z และแกน Y มีค่าตามสมการ

$$\bar{E}_{(y,z)} = \frac{Vd}{2 \ln\left(\frac{d-a}{a}\right)} \left(\frac{\hat{E}_y}{\frac{d^2}{4} + y^2} + \frac{\hat{E}_z}{\frac{d^2}{4} - z^2} \right) \quad (25)$$

(ดูวิธีพิสูจน์ในภาคผนวก 5)

เมื่อ d คือ ระยะห่างที่วัดจากจุดศูนย์กลางของขั้วไฟฟ้า

a คือ รัศมีของขั้วไฟฟ้า

y, z คือ ตำแหน่งที่วัดจากระนาบศูนย์กลางขั้วไฟฟ้า (equatorial plane) ในทิศแกน y และ z ตามลำดับ และ \hat{E} หมายถึงเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของสนามไฟฟ้า

เมื่อทำการหาเกรเดียนต์สนามไฟฟ้าจะได้ว่า

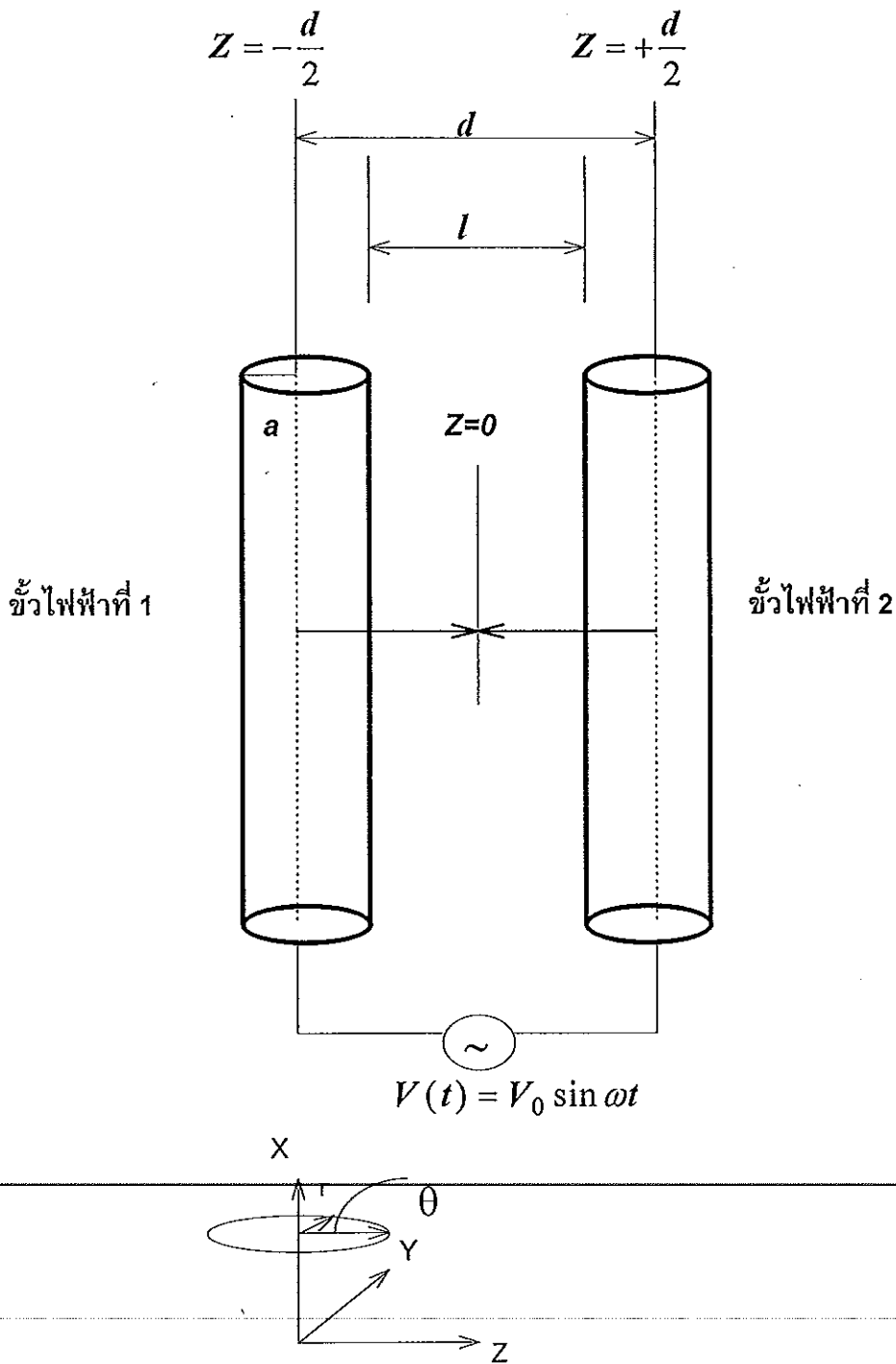
$$\nabla(\bar{E}^2) = \left[\frac{Vd}{\ln\left(\frac{d-a}{a}\right)} \right]^2 \left[\frac{z}{\left(\frac{d^2}{4} - z^2\right)^3} \hat{z} - \frac{y}{\left(\frac{d^2}{4} + y^2\right)^3} \hat{y} \right] \quad (26)$$

ในกรณีที่เซลล์เคลื่อนที่ในหนึ่งมิติที่ระนาบ $Y = 0$ พจน์หลังสุดของสมการจะมีค่าเป็นศูนย์ การคำนวณผลในเชิงตัวเลขกระทำโดยการแทนค่า V, d, a และตำแหน่ง z ลงในสมการ สำหรับการหาค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ อาศัยความสัมพันธ์จากการจัดรูปสมการ 24 ใหม่ ได้สมการ

$$\frac{\bar{v} \times \text{Factor}}{\nabla(\bar{E}^2)} = \frac{3\eta\bar{v}}{\epsilon_s R^2} \cdot \frac{1}{\nabla(\bar{E}^2)} = \text{Re}[f(\omega)] \quad (27)$$

เมื่อ

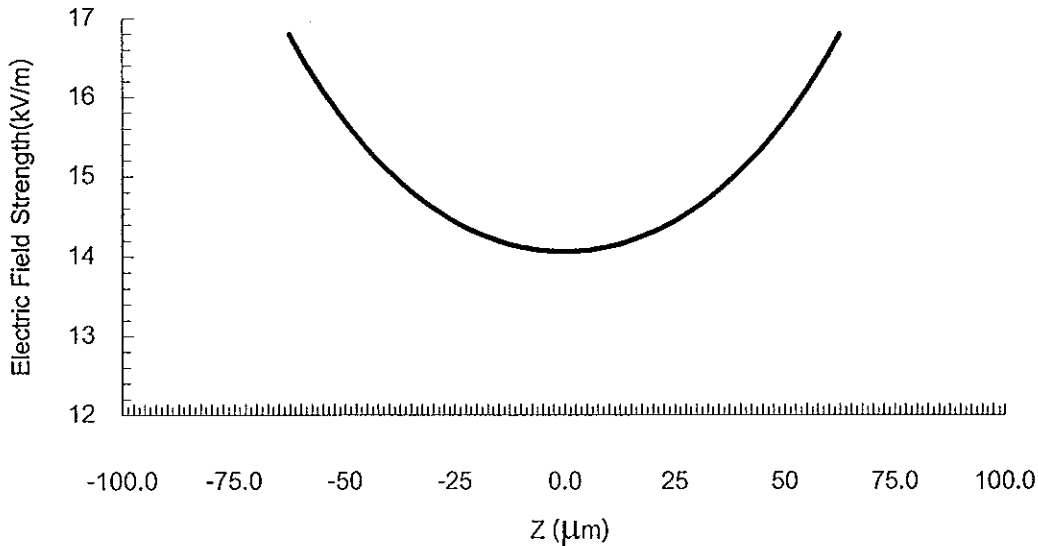
$$\text{Factor} = \frac{3\eta}{\epsilon_s R^2}$$



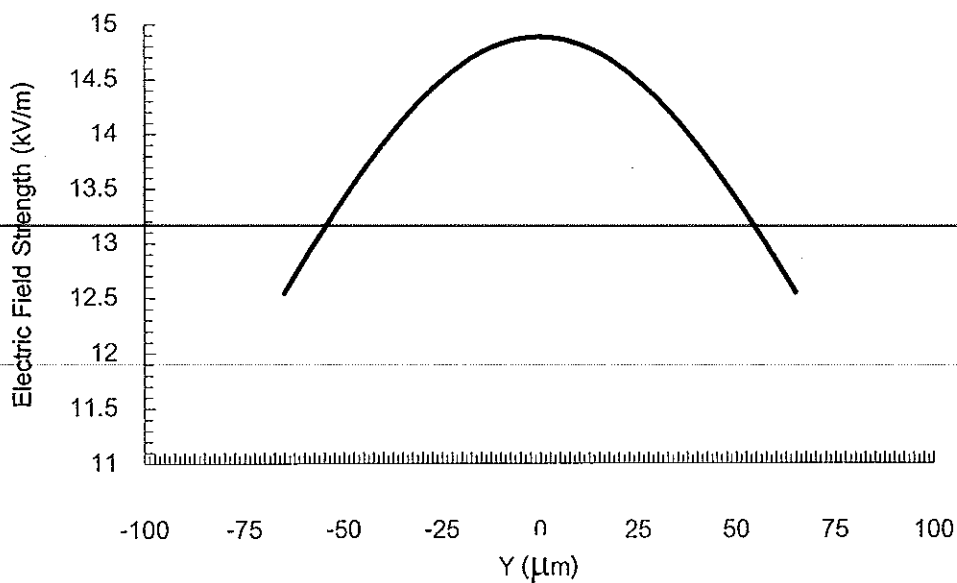
ภาพประกอบ 6 การจัดวางขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัย (ที่มา Mahaworasilpa, 1992)

จากสมการ 27 แสดงให้เห็นว่าความชันของกราฟระหว่าง $\frac{3\eta\vec{v}}{\epsilon_s R^2}$ กับ $\nabla(\vec{E}^2)$ คือค่า

$\text{Re}[f(\omega)]$ เมื่อพลอตกราฟสมการที่ 25 เทียบกับหนึ่งในแนวแกน Y และ Z ได้กราฟในภาพประกอบ 7 และ 8



ภาพประกอบ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวแกน Z กับตำแหน่ง Z ที่ตำแหน่งศูนย์คือตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างระยะที่วัดจากผิวขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว เมื่อ $d = 300 \mu\text{m}$ $a = 62.5 \mu\text{m}$ และศักย์ไฟฟ้า 3 V



ภาพประกอบ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้าในแนวแกน Y กับตำแหน่ง Y

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์การทดลองและขั้นตอนการวิจัย ซึ่งแบ่งเป็นสองส่วนหลัก โดยส่วนแรกเกี่ยวกับการเตรียมเซลล์ การพัฒนาอุปกรณ์สำหรับศึกษาไดอิเล็กโทรฟอเรซิสของเซลล์เดี่ยว และการหาความเร็วของเซลล์ในสนามไฟฟ้า ส่วนที่สองเกี่ยวกับการหาค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ โดยอาศัยข้อมูลจากส่วนแรก

ส่วนที่ 1. วัสดุและอุปกรณ์ของ การเพาะเลี้ยง การเตรียมเซลล์ การพัฒนาอุปกรณ์สำหรับศึกษา ไดอิเล็กโทรฟอเรติก การหาความเข้มข้นสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการเกิดไดอิเล็กโทรฟอเรติก การวัดสภาพนำไฟฟ้า การวัดความหนืดสารละลาย และการวัดความเร็ว แบ่งเป็นหัวข้อย่อยคือ

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงและเตรียมเซลล์ ได้แก่

- 1 หัวเชื้อแพลงก์ตอนพืชน้ำเค็มของ *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp. ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งทะเลสงขลา
- 2 ดันอ่อนกล้วยไม้ *Dendrobium* sp. ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อในห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพทางพืช
- 3 น้ำเลี้ยงแพลงก์ตอนสูตรของ Sato and Serikawa (1978) สำหรับเพาะเลี้ยงแพลงก์ตอนทั้งสองชนิด
- 4 ชุดอุปกรณ์การเพาะเลี้ยงเซลล์แพลงก์ตอน ได้แก่ ขวดแก้วรูปชมพู่ขนาด 1 l พร้อมจุกยางสำหรับปิดปากขวดแก้วเพาะเลี้ยง จุกยางตั้งกล่าวถูกเจาะรูไว้สองรู สำหรับสอดท่อสายยางต่อกับเครื่องให้ออกซิเจน โดยมีสำลีสําหรับกรองอากาศคั้นไว้ที่ปลายท่อ ชุดอุปกรณ์ดังกล่าวถูกจัดขึ้นตาม จุติพร (2541)
- 5 เครื่องวัดความเค็มของสารละลาย (salinity hand refractrometer) รุ่น No.508-IIw ยี่ห้อ NIPPON OPTICAL WORKS
- 6 เครื่องวัดความเข้มแสง รุ่น 3421 ยี่ห้อ HIOKI E.E
- 7 หม้ออบความดันไอนํ้า (autoclave) สําหรับฆ่าเชื้ออุปกรณ์การเพาะเลี้ยงเซลล์
- 8 กล้องจุลทรรศน์แบบหัวกลับยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น CHS กำลังขยาย 400 เท่าสําหรับนับความหนาแน่นเซลล์
- 9 สไลด์นับเซลล์ขนาดช่องนับ 1 x 1 x 0.1 mm ยี่ห้อ BOECO German
- 10 แผ่นแก้วปิดสไลด์ (cover glass)
- 11 ไมโครสโคปสไลด์ (microscope slide) ขนาด 25 mm x 75 mm หนา 1 mm

วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการย้อมผนังเซลล์ ได้แก่

- 1 จานเพาะเลี้ยง (petri dish) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm
- 2 เอนไซม์สำหรับย้อมผนังเซลล์ ได้แก่ เอนไซม์ Cellulase Onozuka - R10 ของบริษัท YAKULT HONSHA เอนไซม์ Dricelase ของบริษัท KYOWA HAKKO KOQYO และเอนไซม์ Marcerozyme Onozuka - R10 ของบริษัท YAKULT HONSHA
- 3 สารละลายแมนนิทอล (D-mannitol ของ Fluka Biochemika Assay > 98 %)
- 4 เครื่องเขย่า (shaker) รุ่น VRN-200
- 5 เครื่องชั่งน้ำหนักระบบดิจิทัลแบบทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ METTLER รุ่น PJ400
- 6 เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง ของ Fisher Scientific รุ่น Accamel pH meter 910
- 7 เตาให้ความร้อนแบบที่มีเครื่องกวน (Hot plate with magnetic stirrer) ยี่ห้อ Heidolph รุ่น MR3001
- 8 มีดผ่าตัด(สำหรับหั่นใบกล้วยไม้)
- 9 ตะแกรงกรองชนิดไนลอน (nylon mesh) ขนาดรูตาข่าย 141 และ 64 μm
- 10 เครื่องปั่นแยก (centrifuge) ยี่ห้อ IEC HN-Sii
- 11 เครื่องปั่นแยกขนาดเล็ก (microcentrifuge) ยี่ห้อ Denver Instrument รุ่น M0009861
- 12 หลอดปั่นแยกขนาด 1 และ 15 ml
- 13 หลอดดูดสารพร้อมจุกยาง
- 14 สารเรืองแสงฟลูออเรสเซนต์ของสี Calcafluor white (CFW) บริษัท SIGMA Co.Ltd.

อุปกรณ์ปล่อยและดูดเซลล์เดี่ยวและชุดทดลองสำหรับศึกษาไดอิเล็กโตรโฟเรซิส ได้แก่

- 1 หลอดฉีดยาขนาด 10 ml
- 2 ท่อยางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm
- 3 หลอดแก้วแคพิลลารี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 mm ยี่ห้อ VITREX
- 4 แผ่นแก้วสไลด์
- 5 เส้นลวดนิเกิล - อัลลอย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 125 μm ยี่ห้อ California fine wire มีความต้านทานเชิงผิว $2.445 \text{ ohm.ft}^{-1}$
- 6 ชุดอุปกรณ์ดึงลวดพร้อมอุปกรณ์ปรับกระแสและแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสสลับ (Variable AC. Voltage)
- 7 กาวอีพอกซี
- 8 อุปกรณ์ตรึงลวด นิเกิล-อัลลอย ที่ปรับระยะได้
- 9 สปริงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm

- 10 ชุดจับยึดอิเล็กทรอนิกส์ (Manipulator) ของ NARISHIGE JAPAN รุ่น MO-202
- 11 เครื่องตั้งหลอดแก้วแคพิลลารี ของ NARISHIGE JAPAN รุ่น SO-3
class 2.5
- 12 กล้องจุลทรรศน์แบบหัวกลับยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น DXC -107AP กำลังขยาย 600 เท่า
- 13 ระบบบันทึกภาพและเสียง Hi - Fi Stereo รุ่น SLV-K872
- 14 โทรทัศน์สีขนาด 24 นิ้ว ยี่ห้อ SONY

วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้า ได้แก่

- 1 เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า ของ STAND FORD RESEARCH SYSTEM รุ่น DS
340
- 2 ออสซิลโลสโคปแบบ 2 ช่องสัญญาณ ของ HAMEG รุ่น HM 303-4
- 3 สายโคแอกเซียล รุ่น RQ - 58AV หัวต่อแบบ M-BNC
- 4 เครื่องวัดสนามไฟฟ้า ยี่ห้อ Tetracon 325 รุ่น LF 318
- 5 สารละลายซูโครส (sucrose ของ BDH Laboratory supplies)
- 6 สารละลายโพแตสเซียมคลอไรด์
- 7 ไมโครปิเปต ยี่ห้อ Nichipet รุ่น 5000DG
- 8 อุปกรณ์สำหรับวัดความหนืดสารละลาย ยี่ห้อ Schcott Geratte รุ่น 51610 / I

วัสดุและอุปกรณ์วัดความเร็วเซลล์ในสนามไฟฟ้า ได้แก่

- 1 แผ่นสเกลพลาสติกใสขนาด 20 x 30 cm
- 2 นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ CITIZEN รุ่น LC QUARTZ
- 3 ม้วนวีดีโอสำหรับบันทึกภาพขนาดความยาว 120 และ 180 นาที ยี่ห้อ Panasonic
- 4 เครื่องเล่นและบันทึกภาพ ยี่ห้อ Panasonic รุ่น NV-SD205
- 5 โทรทัศน์สี ยี่ห้อ Panasonic
- 6 อุปกรณ์แปลงสัญญาณภาพ (color video camera) ยี่ห้อ SONY (CCD - IRIS)

อุปกรณ์ประมวลผลเชิงทฤษฎี ได้แก่

- 1 ไมโครคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ LASER รุ่น 16 X Max
- 2 โปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel

3.2 การเพาะเลี้ยงเซลล์ และการเตรียมเซลล์

3.2.1 การเตรียมภาชนะ

ก่อนเริ่มทำการเพาะเลี้ยงเซลล์ทุกครั้ง ทำความสะอาดและฆ่าเชื้ออุปกรณ์ต่างๆรวมทั้งภาชนะที่ใช้ทดลองด้วยหม้ออบความดันไอน้ำที่ความดันประมาณ 1.1 kg.cm^{-2} ที่อุณหภูมิ 250° F นานประมาณ 15 นาที ปิดปากภาชนะด้วยแผ่นอลูมิเนียม เพื่อป้องกันเชื้อโรคและคอยการใช้งานภาชนะที่สะอาดพร้อมใช้จะถูกนำไปใช้ในการทดลองตอนต่อไป ดังนี้

3.2.2 การเพาะเลี้ยงเซลล์แฟลงก์ตอน

ผสมหัวเชื้อเซลล์ *Chorella sp.* และ *Tetraselmis.sp* ในสารละลายน้ำเลี้ยงสูตร Sato & Serikawa (ดูวิธีการเตรียมภาคผนวกที่ 6) โดยใช้อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อต่อสารละลาย 1 : 10 โดยปริมาตร ให้ความหนาแน่นเซลล์เริ่มต้นประมาณ 10^5 cell / ml เพาะเลี้ยงในขวดรูปชมพู่ที่ต่อกับท่ออากาศในตู้เพาะเลี้ยงที่มีความเข้มแสงประมาณ 3000 lux ซึ่งถูกควบคุมระบบการเปิดปิดไฟด้วยสวิทช์อัตโนมัติให้มีเวลาการให้แสง 12 ชั่วโมงต่อวัน โดยมีอุณหภูมิการเพาะเลี้ยงในช่วงเปิดแสง $25 \pm 3^{\circ} \text{ C}$ สุ่มตัวอย่างเซลล์จากขวดเพาะเลี้ยงมานับความหนาแน่นทุกวันจนกระทั่งจำนวนเซลล์เริ่มลดลง (ดูผลในภาพประกอบ 24) เพื่อบันทึกและติดตามผลการเจริญเติบโต เลือกเซลล์ในระยะลือกเฟสของการเติบโตมาทำการทดลองพร้อมทั้งนำไปขยายพันธุ์ต่อในอัตราส่วน 1:10 เช่นเดิมเพื่อเตรียมเซลล์สำหรับการทดลองชุดต่อไป

3.2.3 การเตรียมโพโรโทพลาสต์จากใบอ่อนของกล้วยไม้ *Dendrobium sp.*

เนื่องจากเอนไซม์ Cellulase มีหน้าที่ย่อยเปลือกเซลล์ ส่วนผสมระหว่าง Driselase และ Macerozyme ทำหน้าที่แยกกลุ่มเซลล์ที่ยึดติดกันเป็นเนื้อเยื่อให้ออกจากกันเป็นเซลล์เดี่ยว ดังนั้น เอนไซม์ที่ใช้ในขั้นต้นจึงมีอัตราส่วนผสมระหว่าง Cellulase Driselase และ Macerozyme ขึ้นตอนการย่อยมีดังนี้

เลือกใบของกล้วยไม้ ที่มีขนาดประมาณ $0.5 \times 5 \text{ cm}$ ความหนาของใบไม่เกิน 1 mm นำไปล้างให้สะอาดแล้วซับใบให้แห้ง ตัดปลายยอดออกประมาณ 2.5 cm นำไปซังอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักใบต่อปริมาตรเอนไซม์ 1 : 10 หั่นใบเป็นแว่นให้เล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยใช้มีดหั่นตามแนวขวางของใบเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ในการย่อย แล้วนำไปผสมลงในเอนไซม์ในจานเพาะเลี้ยง นำจานที่มีเนื้อเยื่อใบไปเขย่าที่ความเร็ว 80 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25° C บันทึกผลทุกๆหนึ่งชั่วโมง โดยตรวจหาโพโรโทพลาสต์กล้วยไม้ที่มีลักษณะกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ $80 \mu\text{m}$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ตรวจสอบการมีผนังเซลล์อีกครั้งด้วยเทคนิคการย้อมสารเรืองแสงฟลูออเรสเซนส์ (fluorescence) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

เตรียมแผ่นสไลด์โดยหยดตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบด้วยหลอดดูดสารลงบนไมโคร-

สโคปสไลด์ จากนั้นหยดสารเรืองแสงฟลูออเรสเซนส์ประมาณ 1 หยด ลงบนตัวอย่าง แล้วปิดด้วยแผ่นแก้วปิดสไลด์ด้วยความระมัดระวัง (เนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์บางจะแตกง่าย) นำไปตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบหัวกลับด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ต ส่วนที่มีการเรืองแสงสีขาวนวลคือส่วนที่มีผนังเซลล์ และส่วนที่ไม่เรืองแสงคือส่วนที่ไม่มีผนังเซลล์ ดังนั้นเซลล์ที่พร้อมสำหรับนำไปทดลองได้ควรเป็นเซลล์ที่ไม่มีการเรืองแสงที่ผิวเซลล์ ทำการสุมตัวอย่างโพรโทพลาสต์ 20 เซลล์ เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างจำนวนเซลล์ที่มีและไม่มีผนังเซลล์ สำหรับการย่อยผนังเซลล์ในครั้งต่อไป จะไม่ทำการตรวจสอบการมีผนังเซลล์ด้วยเทคนิคดังกล่าวอีก

3.2.4 การคัดเลือกเซลล์และการเตรียมเซลล์

โดยปกติเซลล์แต่ละเซลล์อาจมีรัศมีเซลล์ที่ไม่เท่ากัน แตกต่างกันตามอายุ การวิจัยจึงได้กำหนดใช้เซลล์เดี่ยวทดลองซ้ำหลายครั้ง ครั้งละหนึ่งเซลล์ โดยเลือกเซลล์ให้มีขนาดใกล้เคียงหรือเท่ากัน สำหรับเซลล์ *Chlorella* sp. อายุ 3 วัน จะเลือกใช้ที่เซลล์ที่มีรัศมีเซลล์ประมาณ $1 \mu\text{m}$ สำหรับเซลล์ *Tetraselmis* sp. ซึ่งมีรูปร่างรีจะเลือกเซลล์ที่มีความยาวกึ่งแกนเอกและโทประมาณ 9 และ $3.5 \mu\text{m}$ และในกรณีโพรโทพลาสต์กล้วยไม้ *Dendrobium* sp จะเลือกใช้เซลล์ที่มีรัศมีประมาณ $35-40 \mu\text{m}$ การวัดขนาดเซลล์กระทำโดยการใช้สายตาสังเกตดูขนาดเซลล์เทียบกับสเกลที่ปรากฏในเลนส์กำลังขยายที่ตา

เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่เซลล์ *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp. อาศัยคือน้ำเลี้ยงหรือน้ำทะเลเทียมซึ่งมีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่สูงมากประมาณ 4.57 S.m^{-1} อีกทั้งสภาพแวดล้อมที่โพรโทพลาสต์กล้วยไม้แขวนลอยอยู่ในขั้นตอนการเตรียมหลังสุดคือเอนไซม์ซึ่งมีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 5.7 และมีสภาพนำไฟฟ้าที่สูง ตามหลักการทางทฤษฎีแล้ว (ดูบทที่ 2) ไดอิเล็กโตรโฟรีซิสจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อสารละลายภายนอกเซลล์มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำกว่าหรือทัดเทียมกับสภาพนำไฟฟ้าภายในเซลล์ซึ่งมีผู้ตั้งสมมติฐานไว้ว่าสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมควรมีค่าอยู่ระดับ $0.1 - 5 \text{ S.m}^{-1}$ (Kaler and Jones, 1990 ; Fuhr and Kuzmin, 1986 ; Radu, et al., 1996 และ Mahaworasiipa, et al., 1994) ดังนั้นขั้นตอนแรกก่อนที่จะนำเซลล์ไปทดลองจึงต้องทำการปั่นแยกเซลล์ออกจากสภาพแวดล้อมเดิม ที่ 5000 รอบต่อนาที (1.8 g) นาน 4.5 นาที จากนั้นล้างเซลล์ 2 ครั้งด้วยสารละลายซูโครสสำหรับเซลล์ *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp. และใช้แมนนิทอลสำหรับโพรโทพลาสต์ *Dendrobium* sp.

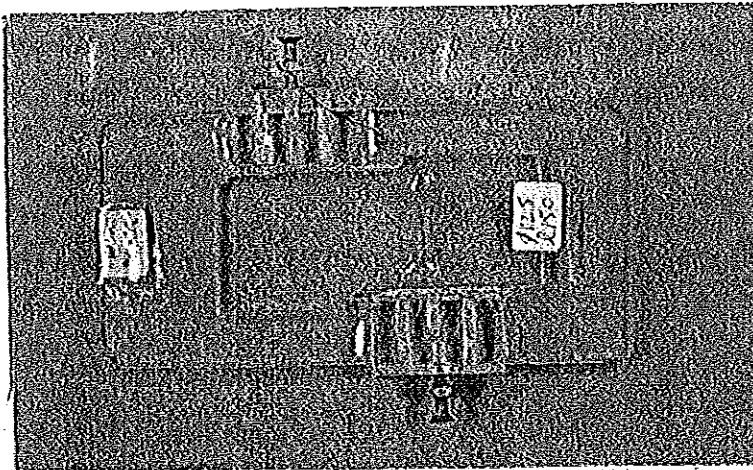
3.3 การพัฒนาชุดอุปกรณ์ดูดและปล่อยเซลล์เดี่ยว และการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง

เพื่อให้เซลล์ทั้ง 3 ชนิดอยู่ที่กึ่งกลางขั้วไฟฟ้าคู่ขนาน ระนาบศูนย์กลางขั้วไฟฟ้าที่ $Z = 0$ และ $Y = 0$ จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถปล่อยเซลล์ที่ละเซลล์ลงในตำแหน่งดังกล่าวได้ สำหรับเซลล์แพลงก์ตอนทั้งสองชนิดได้แก่ *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp. จะใช้อุปกรณ์ดูด

และปล่อยเซลล์เดี่ยวที่สร้างขึ้นดังจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป สำหรับการจัดตำแหน่งโพโรโทพลาสติก *Dendrobium* sp. จะใช้อุปกรณ์จับยึดแบบไมโคร

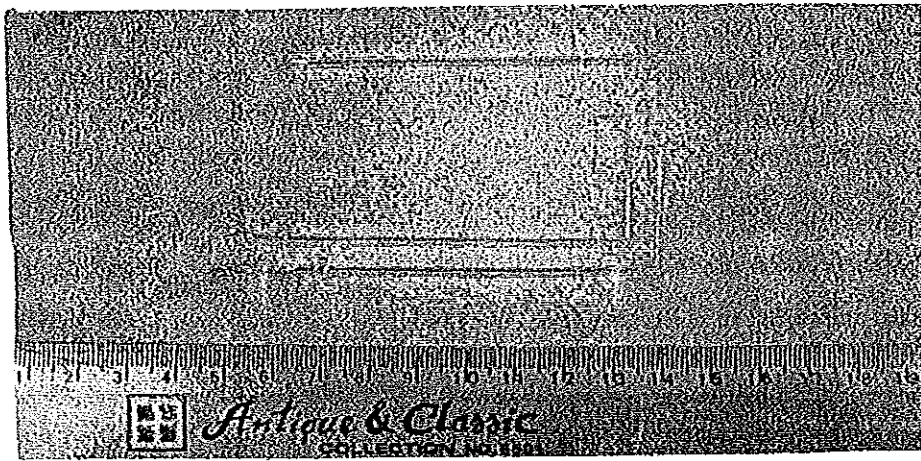
3.3.1 การสร้างชุดอุปกรณ์ดูดและปล่อยเซลล์แพลงก์ตอน

การสร้างชุดอุปกรณ์ดูดและปล่อยเซลล์แบ่งเป็นสองส่วนหลักคือ ส่วนการเตรียมขั้วไฟฟ้าและการสร้างภาชนะทดลอง ส่วนที่สองคือการสร้างอุปกรณ์ปล่อยเซลล์ ส่วนแรกมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้ ดึงเส้นลวดนิเกิล-อัลลอยให้ตรงโดยชุดอุปกรณ์ดึงลวดที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการชีวฟิสิกส์ แล้วนำไปยึดติดกับแผ่นแก้วสไลด์ซึ่งมีขนาด 26 x 76 mm ที่หนาประมาณ 1 mm ด้วยกาวอีพอกซี ดังภาพประกอบ 9 ด้วยวิธีการนี้ ลวดทั้งคู่ที่จะใช้เป็นขั้วไฟฟ้าจะขนานกันอย่างสมมาตร



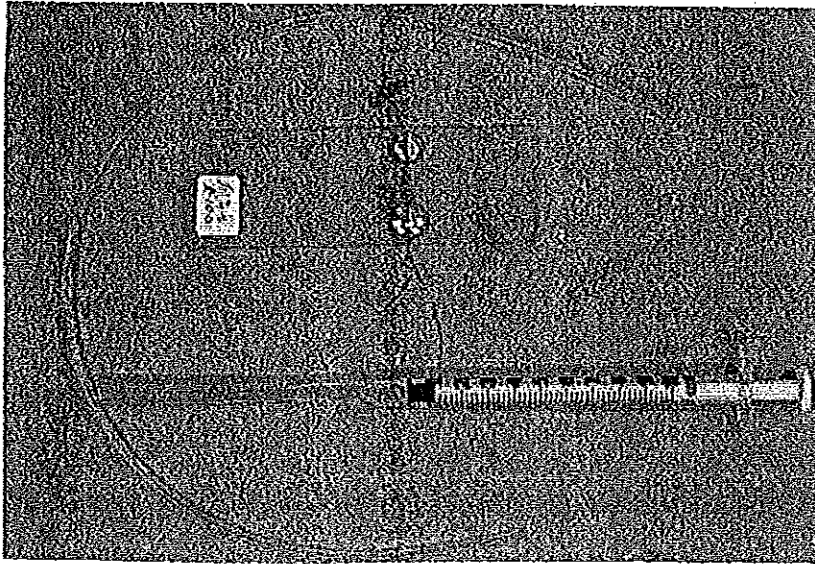
ภาพประกอบ 9 ขั้วไฟฟ้าติดบนแผ่นไมโครโคปสไลด์โดยกาวอีพอกซี ปลายลวดที่ยื่นจากแผ่นไมโครโคปสไลด์ มีไว้เพื่อให้ตัดขั้วไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า

สำหรับส่วนที่สอง การสร้างอุปกรณ์สำหรับดูดและปล่อยเซลล์เดี่ยวที่มีขนาดเล็ก (*Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp.) มีวิธีการสร้างดังนี้ เลือกใช้หลอดแก้วแคพิลลารีที่มีความกว้างของปลายเปิดที่พอดีกับขนาดของเซลล์ ในกรณีของ *Chlorella* sp. จะใช้ประมาณ 5 μm และสำหรับ *Tetraselmis* sp. จะใช้ประมาณ 20 μm ด้วยวิธีการดึงปลายหลอดแก้วแคพิลลารีให้เล็กลงด้วยเครื่องดึง จากนั้นทำการตรวจสอบขนาดของปลายหลอดแก้วแคพิลลารีอีกครั้งด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบหัวกลับ เมื่อผ่านการดึงจะมีลักษณะดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 หลอดแก้วแคพิลลารีที่ผ่านการดึงให้ปลายมีขนาดเล็กลง

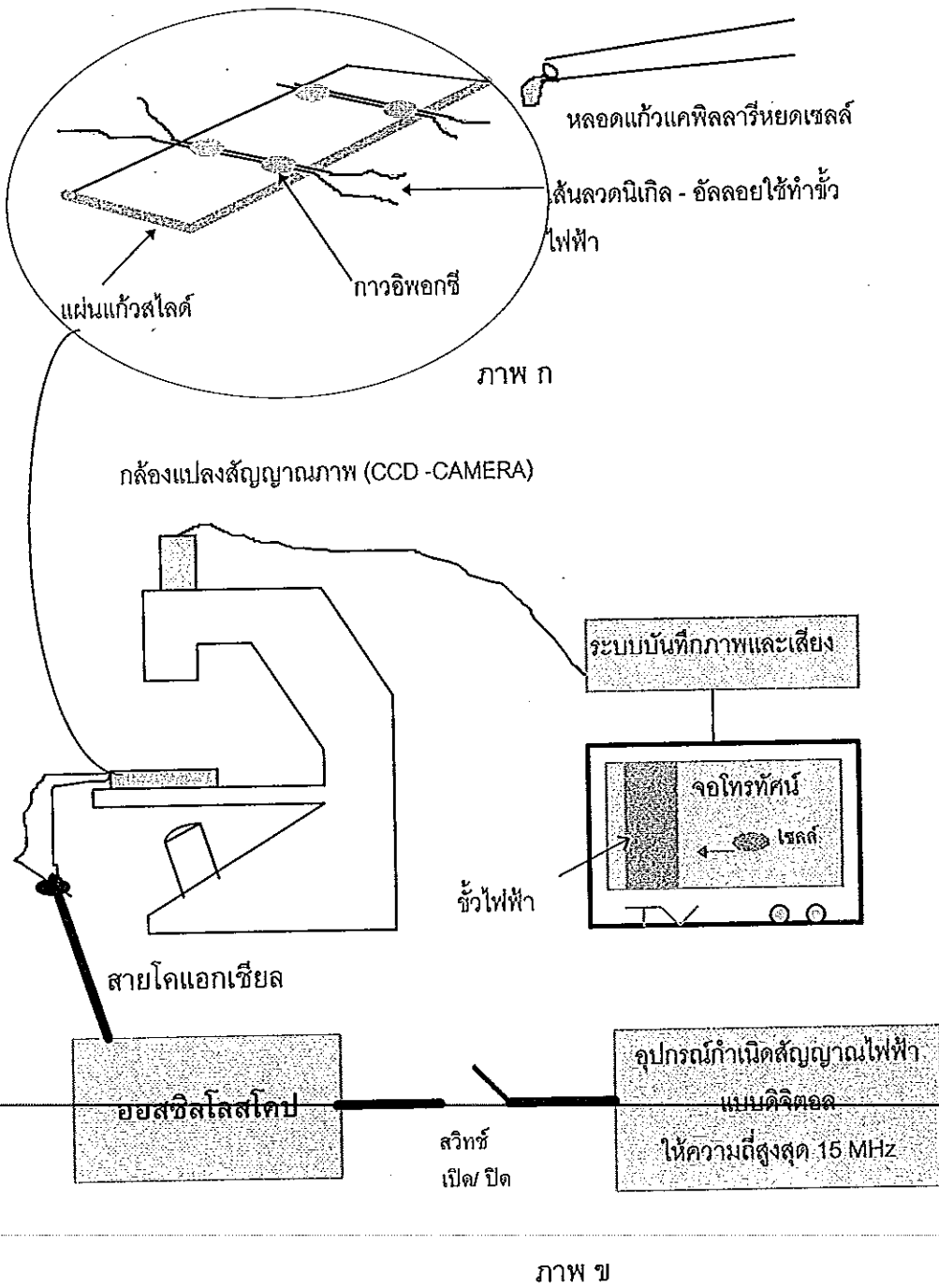
นำปลายอีกด้านของหลอดแก้วแคพิลลารี (ด้านที่ไม่ได้ผ่านการดึง) ต่อเข้ากับท่ออย่างขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 mm) ซึ่งปลายด้านหนึ่งของท่ออย่างต่อกับกระบอกฉีดยาขนาด 10 ml ตามภาพประกอบ 11



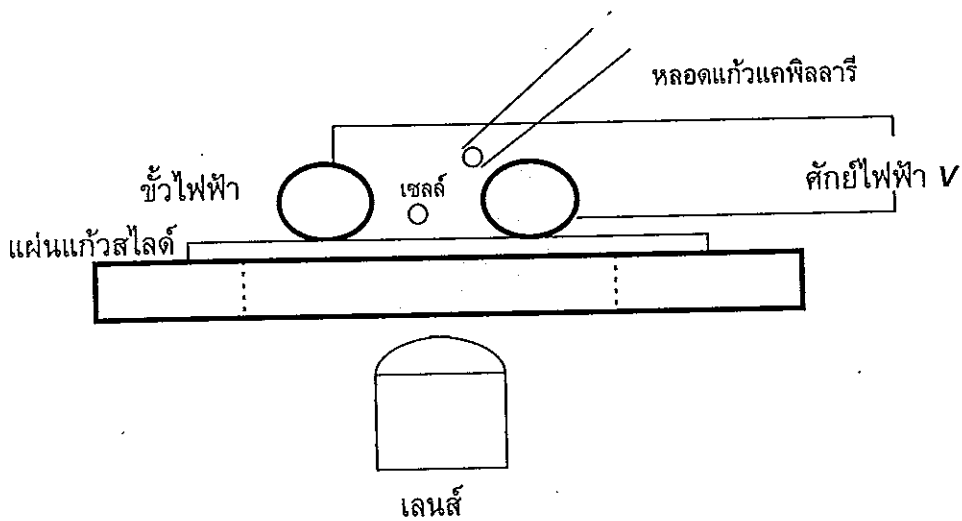
ภาพประกอบ 11 อุปกรณ์สำหรับดูดและปล่อยเซลล์แมลงก้นดอ

ชุดอุปกรณ์ดังกล่าวอาศัยหลักการดังต่อไปนี้คือ เมื่อจุ่มหลอดแก้วแคพิลลารีที่มีขนาดปลายพอดีกับขนาดของเซลล์ ของเหลวที่อยู่บริเวณใกล้เคียงจะนำพาเซลล์บริเวณดังกล่าว ดูดให้เข้ามาอยู่ในหลอดแก้วแคพิลลารี ตามหลักการของแคพิลลารี แอคชัน (capillary action) ปริมาตรของของเหลวรวมทั้งเซลล์ที่ถูกดูดเข้ามาจะมีขีดจำกัดค่าหนึ่ง ขึ้นกับค่าความหนืดและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผนังแก้วหลอดแก้วแคพิลลารีกับของเหลว รวมทั้งรัศมีของปากหลอดแก้วแคพิลลารี โดยปกติของเหลวที่เข้าไปมีปริมาตรที่น้อยมาก ดังนั้นเซลล์ที่อยู่ไกลจากปากหลอดแก้วแคพิลลารีอาจจะไม่ถูกดูดเข้ามา ด้วยเหตุนี้ หลักการแคพิลลารีจึงเหมาะกับการปรับระยะและตำแหน่งเซลล์(ที่มีขนาดเล็ก)แบบละเอียด แต่สำหรับในกรณีที่ต้องการย้ายตำแหน่งเซลล์หรือต้องการดูดเซลล์ให้อยู่ในหลอดแก้วแคพิลลารีต้องทำการสูบล้างและอัดก๊าซภายในหลอดแก้วแคพิลลารีเพื่อเพิ่มแรงที่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างของเหลวกับผนังแก้วดูดของเหลวให้เข้าสู่หลอดแก้วแคพิลลารีด้วยปริมาตรที่มากขึ้น การสูบล้างและอัดตัวของอากาศกระทำโดยอาศัยสปริงดันก้านสูบของกระบอกฉีดขนาด 10 ml ให้มีจังหวะสูบล้างและอัดตัวของอากาศภายในท่อสายยาง ที่ต่อระหว่างปลายกระบอกฉีดยากับปลายด้านท้ายของหลอดแก้วแคพิลลารี ดังภาพประกอบ 11 อุปกรณ์เหล่านี้ถูกสร้างขึ้นโดยงานวิจัยนี้ภายในห้องปฏิบัติการชีวฟิสิกส์

อุปกรณ์ทั้งสองส่วนที่กล่าวมา ถูกนำไปติดตั้งร่วมกับกล่องจุลทัศน์แบบหัวกลับที่มีกล้องบันทึกสัญญาณภาพจากเข้าสู่ระบบบันทึกภาพและเสียง ถ่ายถอดสัญญาณภาพออกสู่หน้าจอของโทรทัศน์ ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของหลอดแก้วแคพิลลารีด้วยชุดจับยึดแบบไมโครไน 3 มิติ สำหรับกระบอกเข็มฉีดยาจะถูกยึดติดบนแท่นจับ วางอุปกรณ์ทั้งสองส่วนไว้คนละด้านของกล่องจุลทัศน์ เพื่อให้ใช้งานได้ทั้งมือซ้ายและขวาพร้อมกัน ส่วนภาชนะทดลองจะวางไว้บนแท่นของฐานกล่องจุลทัศน์ โดยที่ปลายลวดไฟฟ้าคู่ขนานทั้งสองเส้นจะต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 ก การดูและปล่อยเซลล์แพลงก์ตอนลงในภาชนะทดลอง
 ข แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับศึกษาไดอิเล็กโทรฟอเรซิส

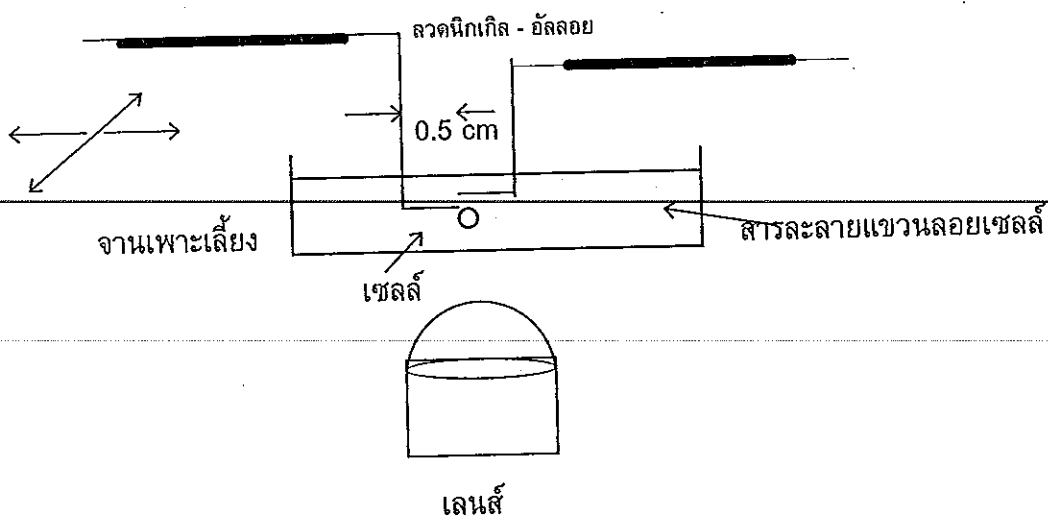


ภาพประกอบ 12 ค ภาคตัดขวางของภาชนะทดลองสำหรับศึกษาเกี่ยวกับเซลล์ *Chlorella* sp.
และ *Tetraselmis* sp.

3.3.2 การจัดวางชุดอุปกรณ์จับยึดแบบไมโครสำหรับจัดตำแหน่งโปรโทพลาสต์

Dendrobium sp.

ชุดอุปกรณ์จับยึดแบบไมโครสำหรับจัดตำแหน่งโปรโทพลาสต์ *Dendrobium* sp. จัดวางไว้ดังภาพประกอบ 13 มีวิธีการดังนี้



ภาพประกอบ 13 ภาคตัดขวางภาชนะทดลองสำหรับศึกษาโปรโทพลาสต์ *Dendrobium* sp.

นำจานเพาะเลี้ยงที่มีโพรโทพลาสต์แขวนลอยในสารละลายแมนนิทอล 0.5 M มาเติมสารละลายแมนนิทอลที่มีความเข้มข้นและสภาพนำไฟฟ้าเท่าเดิม จนกระทั่งความหนาแน่นของโพรโทพลาสต์มีค่าน้อยมาก ๆ จากนั้นจุ่มขั้วไฟฟ้าให้ตกคร่อมโพรโทพลาสต์ที่ต้องการจะทดลอง โดยปรับตำแหน่งและระยะห่างระหว่างขั้วให้ได้ค่าที่ต้องการด้วยชุดจับยึดแบบไมโคร พยายามขยับตำแหน่งของลวดจนให้โพรโทพลาสต์อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างขั้ว (ไม่จำเป็นต้องอยู่ที่ตำแหน่ง $z = 0$ และ $y = 0$) และทดลองให้สนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงไดโพลีโทรเฟอร์ติกแบบบวกกระทำให้เซลล์เคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วภายในช่วงเวลาสั้น ๆ (3-5 วินาที) เพื่อดึงเซลล์ให้เคลื่อนที่เข้าสู่ระนาบ $y = 0$ จากนั้น ขยับตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าด้วยชุดจับยึดแบบไมโครอีกครั้ง จนทำให้เซลล์มีตำแหน่งอยู่ใกล้เคียงที่ $z = 0$ เมื่อได้ตำแหน่งเริ่มต้นเป็นที่ต้องการแล้วจึงเริ่มให้สนามไฟฟ้าที่มีความถี่ที่จะทดลอง เมื่อโพรโทพลาสต์เคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้า ให้หยุดการให้สนามไฟฟ้า จากนั้นขยับเส้นลวดที่มีโพรโทพลาสต์เกาะอยู่ให้มาอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้นการเคลื่อนที่ใหม่ และขยับ (สั้น) ขั้วไฟฟ้าเพื่อให้โพรโทพลาสต์หลุดออกจากขั้วและลอยอยู่ที่บริเวณดังกล่าวอีกครั้ง ทำการทดลองเช่นนี้ซ้ำไปจนกระทั่งถึงความถี่สนามไฟฟ้าที่เซลล์ถูกผลักออกจากขั้วไฟฟ้า

3.4 การหาความเข้มสนามไฟฟ้าและสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดไดโพลีโทรเฟอร์ติส

การหาความเข้มสนามไฟฟ้า (รวมทั้งขนาดของทอม $\nabla(E^2)$) ที่เหมาะสมต่อการเกิดไดโพลีโทรเฟอร์ติสของเซลล์ทั้ง 3 ชนิด สามารถกระทำได้ด้วยวิธีการทางการทดลองสามวิธี โดยอิงความรู้ในเชิงทฤษฎีดังนี้คือ 1.ทดลองเปลี่ยนระยะ l กล่าวคือระยะ l ที่น้อยจะให้ค่า $\nabla(E^2)$ มาก 2.เปลี่ยนขนาด a กล่าวคือระยะ a ที่มากจะให้ค่า $\nabla(E^2)$ มาก และ 3.เปลี่ยนความต่างศักย์ตกคร่อมขั้วไฟฟ้า (V) หากต้องการ $\nabla(E^2)$ ที่มากต้องให้ V มาก สำหรับการทดลองนี้เลือกใช้วิธีการทดลองเปลี่ยนค่า l และความต่างศักย์ไฟฟ้างี้

เซลล์ที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายจะถูกนำไปทดลองเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้า สำหรับเซลล์ *Chlorella sp.* และ *Tetraselmis sp.* จะเริ่มทดลองเปลี่ยนค่า l ต่างๆ (ด้วยชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น) ในการทดลองนี้กำหนดให้เป็น $l = 100$ 150 200 260 และ 275 μm พร้อมทั้งทดลองเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมขั้วไฟฟ้าจนได้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการเหนี่ยวนำให้เซลล์เคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้า(ทุกสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้) ด้วยความเร็วที่เหมาะสม (ไม่ช้าหรือเร็วจนเกินไป) สำหรับโพรโทพลาสต์ใช้วิธีการเช่นเดียวกัน แต่ใช้วิธีการขยับตำแหน่งขั้วไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์จับยึดแบบไมโครเพื่อหาระยะ l ที่เหมาะสม

3.5 การวัดสภาพนำไฟฟ้าและการปรับสภาพนำไฟฟ้าสารละลายสำหรับแขวนลอยเซลล์

สารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์ *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp. คือ สารละลายซูโครสที่เข้มข้น 0.5 M ปรับสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายซูโครสด้วยสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.1 M วัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายซูโครสด้วยเครื่องวัดสภาพนำไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง 25 ± 2 °C จนกระทั่งได้สารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้าตามต้องการคือ 3 6 12 และ 24 mS.m⁻¹ สารละลายซูโครสที่ปรับสภาพนำไฟฟ้าแล้วจะถูกเก็บไว้ในตู้เย็นภายใต้ อุณหภูมิ 10 ± 2 °C และรอที่จะใช้งานในครั้งต่อไป หนึ่งทุกครั้งที่จะนำสารละลายซูโครสไปใช้งานจะต้องทำการตรวจวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าอีกครั้งและให้สารละลายมีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้อง

สำหรับสารละลายที่ใช้แขวนลอยโพรโทพลาสต์กล้วยไม้ คือสารละลายแมนนิทอล 0.5 M ที่มีสภาพนำไฟฟ้าเป็น 17 และ 20 mS.m⁻¹ รายละเอียดการเตรียมและการเก็บเป็นไปในการทำงานเกี่ยวกับของสารละลายซูโครส

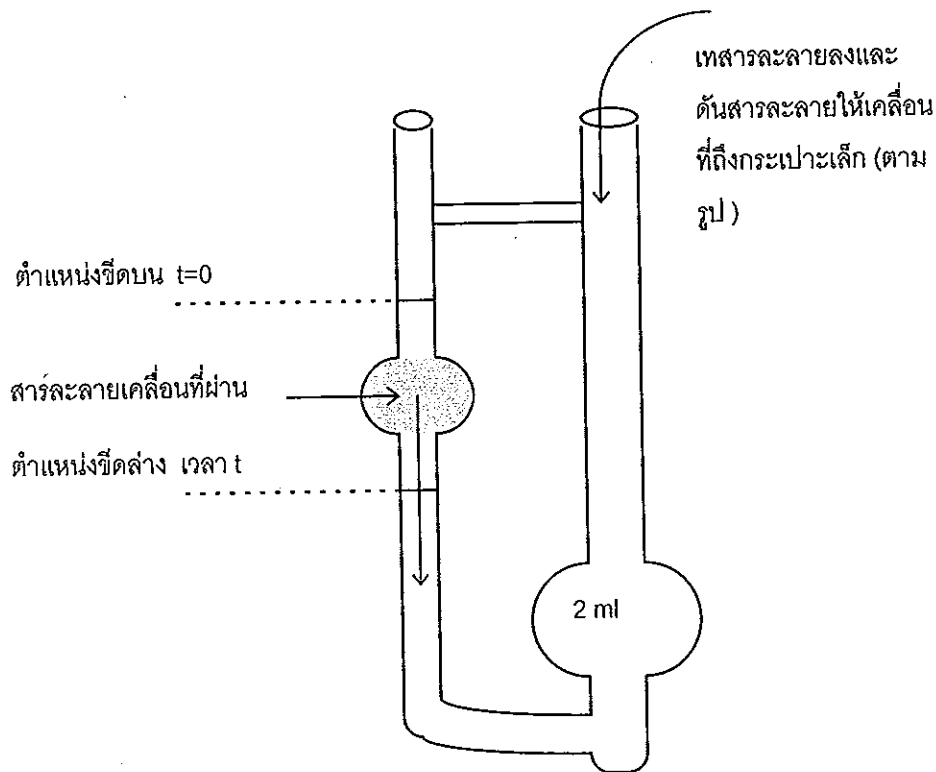
3.6 การวัดความหนืดของสารละลาย

สารละลายซูโครส และสารละลายแมนนิทอล สามารถหาค่าความหนืดได้จากเครื่องวัดความหนืด ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

เตรียมสารละลายที่ต้องการวัดให้มีปริมาตร 2 ml จากนั้นเทลงในกระเปาะของอุปกรณ์ดูดสารให้เคลื่อนขึ้นไปอยู่ที่ระดับที่มีเครื่องหมายกำหนดไว้ (ดูภาพประกอบ 14) จากนั้นปล่อยให้สารไหลลงมาตามท่อและจับเวลาการไหลของสารละลายที่เคลื่อนที่ผ่านเครื่องหมายขีดบนและขีดล่าง ทำซ้ำเช่นนี้ 5 ครั้ง แล้วนำเวลาที่บันทึกได้มาหาค่าเฉลี่ย และนำไปแทนค่าในสมการหาความหนืดของสาร ดังนี้

$$\eta = Dkt_{mean} \quad (28)$$

เมื่อ η คือความหนืดของสารละลาย k คือค่าคงที่สำหรับอุปกรณ์วัด มีค่า 1.1×10^{-8} มีหน่วยเป็น $m^2 \cdot s^{-2}$ t_{mean} คือเวลาเฉลี่ยที่สารละลายใช้ในการเคลื่อนที่วัดในหน่วยวินาที และ D คือความหนาแน่นของสารละลายหาค่าจากสมการ $D = \frac{M}{V}$ เมื่อ M คือมวลและ V คือ ปริมาตรของสารละลาย คำนวณในหน่วยของ $kg \cdot m^{-3}$ ดังนั้นความหนืดจะมีหน่วยเป็น $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ หรือ $N \cdot s \cdot m^{-2}$ หนึ่งขั้นตอนการทดลองกระทำที่อุณหภูมิห้อง



ภาพประกอบ 14 อุปกรณ์วัดความเร็วของเซลล์ Schott Geratte

3.7 การวัดความเร็วของเซลล์

บันทึกข้อมูล กำลังขยายของกล้อง ความถี่ของสนามไฟฟ้า ขนาดของขั้วไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้าของสารละลาย และระยะ l ที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง โดยผู้ทำการทดลองอัดเสียงพูดลงในระบบบันทึกภาพและเสียง หลังจากนั้นจึงทำปรับระยะและตำแหน่งให้เซลล์แขวนลอยอยู่ในตำแหน่งที่ $z_0 = 0$ และ $y = 0$ (หรือให้ใกล้เคียงตำแหน่งดังกล่าวมากที่สุด) ด้วยชุดอุปกรณ์ดูดและปล่อยเซลล์เดี่ยว แล้วจึงเริ่มให้ความถี่และความต่างศักย์แก่ขั้วไฟฟ้า โดยเริ่มจากความถี่ย่านสูงเพื่อหลีกเลี่ยงและป้องกันปัญหาขั้วไฟฟ้าร้อนเมื่อความถี่สนามไฟฟ้าต่ำ และหลีกเลี่ยงปัญหาเซลล์แตกตัวและเสียรูปที่ความถี่สนามไฟฟ้าต่ำๆ งานวิจัยนี้จึงได้เริ่มทำการทดลองลดความถี่สนามไฟฟ้าจาก 15 MHz (ซึ่งเป็นความถี่สูงสุดของอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณที่ใช้) จนถึงความถี่ต่ำที่สุดที่เซลล์เริ่มผลัดออกจากขั้วหรือไม่เกาะขั้ว ทำการทดลองภายในเวลาที่น้อยที่สุด

เท่าที่จะทำได้ (ประมาณ 30 นาที) เนื่องจากยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดถึงระยะเวลาที่เซลล์เขววน
ลอยอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจะมีผลต่อเซลล์หรือไม่อย่างไร

เมื่อเซลล์อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นที่พร้อมจะถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่เข้าเกาะขั้ว จะเริ่มให้
สนามไฟฟ้าที่ความถี่และความต่างศักย์ที่กำหนด พร้อมทั้งทำการบันทึกภาพการเคลื่อนที่ด้วย
ระบบบันทึกภาพตามภาพประกอบ 12 ข เมื่อเซลล์เคลื่อนที่เกาะขั้วไฟฟ้า จะหยุดการให้สนาม
ไฟฟ้า จากนั้นทำการจัดตำแหน่งเซลล์ดังกล่าวกลับให้มาอยู่ที่ตำแหน่ง $z_0 = 0$ ใหม่อีกครั้ง
กระทำซ้ำเช่นนี้จนกระทั่งพบความถี่ที่เซลล์ผลักรอกออกจากขั้วไฟฟ้า จากนั้นทดลองซ้ำกับเซลล์ตัว
อื่น

เมื่อทำการทดลองเสร็จ นำม้วนบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของเซลล์เคลื่อนขณะเข้าเกาะขั้ว
ไฟฟ้ามาร่วมภาพซ้ำแบบกลับไปกลับมาเพื่อบันทึกสิ่งดังต่อไปนี้ตามภาพประกอบ 15

1. ตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่

2. ระยะทางการเคลื่อนที่แต่ละช่วง

3. เวลาที่ใช้ในแต่ละช่วงการเคลื่อนที่ รวมทั้งเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเคลื่อนที่

พยายามกำหนดจุดบันทึกระยะทางและเวลาให้มีจำนวนช่วงจุดมากกว่า 4 จุด วิธีการมีดังต่อไปนี้

- บันทึกตำแหน่งเริ่มต้น z_0 และวัดระยะห่างระหว่างตำแหน่ง z_0 และ $z = 0$

- กำหนดตำแหน่ง z ใดๆลงบนสเกลที่หน้าจอภาพโทรทัศน์ ไม่น้อยกว่า 3 ตำแหน่ง

- จับเวลาในแต่ละช่วงการเคลื่อนที่ หากกำหนดให้มีจำนวนตำแหน่ง n จุด ดังนั้นจะมีช่วง
เวลาที่ต้องทำการวัด $n - 1$ ช่วง นั่นคือช่วงเวลาที่เซลล์ใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างตำแหน่ง

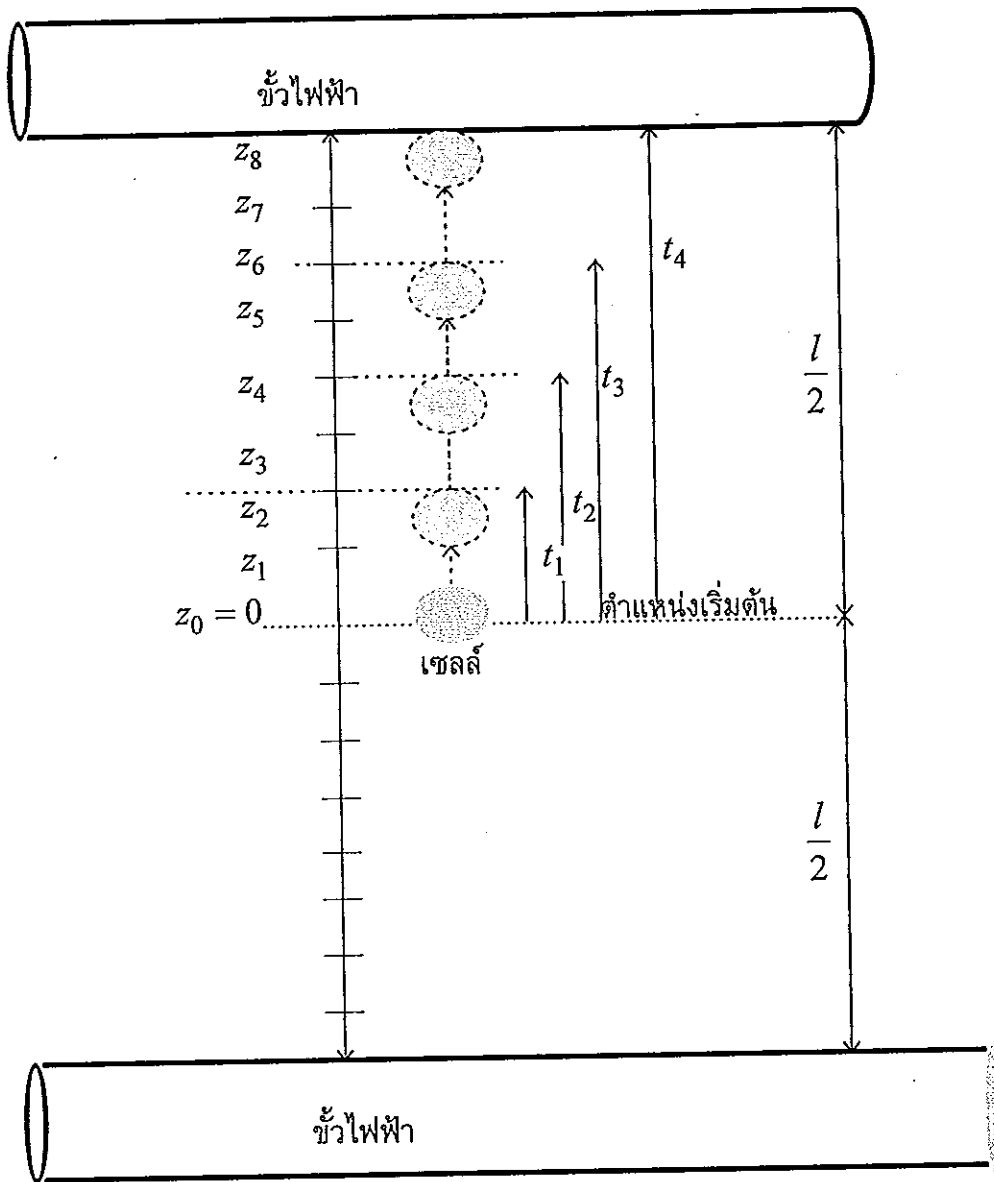
$z_0 \rightarrow z_1, z_0 \rightarrow z_2, \dots, z_0 \rightarrow z_n$ โดยที่แต่ละช่วงทำการจับเวลาซ้ำสามครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย
กำหนดให้มีค่าเป็น t_n

- นำตำแหน่ง z_0 ถึง z_n และเวลาที่ $t_{n=0} = 0$ ถึง t_n ไปเขียนกราฟและหาความ
สัมพันธ์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อหาความเร็วในแต่ละจุด z_0 ถึง z_n นั่นคือ v_{z_0} ถึง v_{z_n}

- นำตำแหน่ง z_0 ถึง z_n ไปแทนในสมการที่ 26 เพื่อหาเทอม $\nabla(E^2)$

- นำความเร็ว(बदดล)ที่ได้ไปคูณกับเทอม $Factor = \frac{3\eta}{\epsilon_s R^2}$ (สมการ 27) และเขียน

กราฟร่วมกับ $\nabla(E^2)$ ความชันของกราฟจะแสดงถึงค่า $Re[f(\omega)]$ ดังนั้นกราฟหนึ่งกราฟจะ
ให้ค่า $Re[f(\omega)]$ เพียงหนึ่งค่า ณ ที่ความถี่สนามไฟฟ้าหนึ่งๆ หากทำการทดลองหลายความ
ถี่จำนวน n ความถี่ ค่า $Re[f(\omega)]$ จะมี n ค่า



ภาพประกอบ 15 วิธีการหาความเร็วเซลล์ขณะเคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้า ด้วยวิธีการจับเวลา ขณะที่เซลล์เคลื่อนที่ผ่านแต่ละจุดตำแหน่ง z ที่กำหนดไว้บนจอโทรทัศน์ ภาพเซลล์จะถูกเล่นภาพแบบย้อนกลับไปที่ตำแหน่งเริ่มต้นใหม่นั้นคือ z_0 จากนั้นกระทำซ้ำจนกระทั่งเซลล์เคลื่อนที่ถึงผิวขั้วไฟฟ้า นำข้อมูลที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ถดถอยระหว่างตำแหน่งและเวลาเพื่อนำไปหาฟังก์ชันความเร็ว

นำชุดข้อมูลของเวลาและตำแหน่งที่เซลล์ใช้ในการเคลื่อนที่ไปหาความสัมพันธ์ถดถอยแบบพหุนาม (polynomial) กำลังสาม

สมการตำแหน่ง $Z(t)$ ที่เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับตำแหน่งเริ่มต้นและเวลา เขียนได้ในรูปสมการ $z(t) = \pm at^3 \pm bt^2 \pm ct + z_0$ ขั้นตอนต่อไปทำการหาอนุพันธ์สมการ $z(t)$ เทียบกับเวลาจะได้สมการความเร็วที่เป็นฟังก์ชันขึ้นกับเวลา ($v(t)$) เมื่อถึงขั้นตอนนี้จะสังเกตพบว่าตำแหน่งเริ่มต้น (Z_0) จะไม่มีผลต่อสมการความเร็วอีกต่อไป ดังสมการ $v(t) = \frac{dZ(t)}{dt} = \pm 3at^2 \pm 2bt \pm c$ เมื่อ a, b และ c คือค่าคงที่หาจากวิธีเกาส์เซียน (Gaussian eliminate) เมื่อแทนค่าเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จริงของเซลล์ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาและความเร็วและตำแหน่ง

ขั้นตอนการหาสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเอกเซล (Excel Program) (ดูรายละเอียดในภาคผนวกที่ 4)

ส่วนที่สอง การหาค่า $Re[f(\omega)]$ และวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์

3.8 วิธีหาค่า $Re[f(\omega)]$

นำชุดข้อมูลเวลาที่ตำแหน่ง n ใดๆ (t_n) ที่วัดได้จริงตามการทดลอง แทนค่าลงในสมการความสัมพันธ์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นของความเร็วซึ่งเป็นฟังก์ชันขึ้นกับเวลา v_{t_n} เพื่อหาค่าความเร็วที่แต่ละจุดตำแหน่ง z และนำชุดข้อมูล z_n ไปแทนค่าลงในสมการ 26 เพื่อคำนวณเทอม $\nabla(E^2)$ จะได้ชุดข้อมูลใหม่ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง v_{z_n} และ $\nabla(E^2)_n$ เขียนเป็นคู่ลำดับเป็น $(\nabla(E^2)_n, v_{z_n})$ และเมื่อนำเทอม **Factor** คูณกับ v_{z_n} จะได้ว่า ความชันกราฟของชุดคู่ลำดับดังกล่าว, $(\nabla(E^2)_n, v_{z_n} \times \text{Factor})$ คือค่า $Re[f(\omega)]_f$ เมื่อ i คือความถี่ที่สอดคล้องกับการทดลองนั้นๆ (ดูภาพประกอบ 28)

3.9 วิธีประมาณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์

สมมติค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ตามงานวิจัยของ Kaler and Jones, 1990 Fuhr and Kuzmin, 1986 Radu, et al., 1996 และ Mahaworasilpa, et al., 1994 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงดังนี้

σ_m	มีค่าระหว่าง	10^{-7} ถึง 10^{-6}	$S.m^{-1}$
σ_c	มีค่าระหว่าง	0.1 ถึง 5	$S.m^{-1}$
ϵ_m	มีค่าระหว่าง	3 ถึง 10	ϵ_0
ϵ_c	มีค่าระหว่าง	50 ถึง 80	ϵ_0

เมื่อพบว่าสเปกตรัมของทั้งสองชุดยังไม่สอดคล้องกัน ได้เปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าเหล่านี้ใหม่ จนกระทั่งได้ชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด (พิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของสองชุดสเปกตรัม โดยให้ค่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ไม่เกิน 50 %) อาศัยกระบวนการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ (ดูภาพประกอบ 16 ถึง 23 ประกอบ)

1. ปรับขอบเขตช่วงความถี่สเปกตรัม DEP ของทฤษฎี , S_T , ให้มีค่าซ้อนทับกับขอบเขตของช่วงความถี่ของสเปกตรัม DEP ของการทดลอง , S_E , ปรับค่า ϵ_m และ δ ที่ความถี่ย่านต่ำ ประมาณ KHz (ให้สัญลักษณ์ความถี่ย่านต่ำเป็น f_0) และปรับค่า σ_c หากต้องการปรับที่ความถี่ย่านสูงประมาณ MHz (ให้สัญลักษณ์ความถี่ย่านสูงเป็น f_∞)
2. ปรับขนาดของสเปกตรัม DEP ที่ f_0 ด้วยการปรับค่า σ_m และที่ f_∞ ด้วยการปรับค่า ϵ_c
3. หากการปรับค่าพารามิเตอร์ในครั้งนี้ทำให้ S_T เลื่อนไปจาก S_E ให้กระทำขั้นตอนที่ 1 และ 2 ซ้ำใหม่จนกระทั่ง

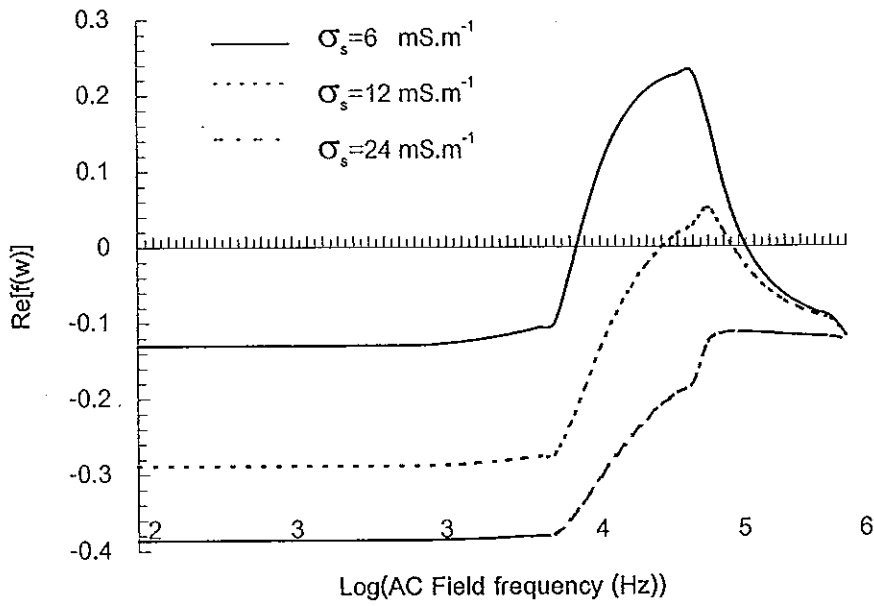
$$S_T - S_E \approx 0 \quad \text{และ}$$

$$\sum_n ((\text{Re}[f(\omega)]_n - \text{Re}[f(\omega)]_{Tn})^2)^{1/2} \approx 0 \quad \text{หรือเข้าใกล้ศูนย์}$$

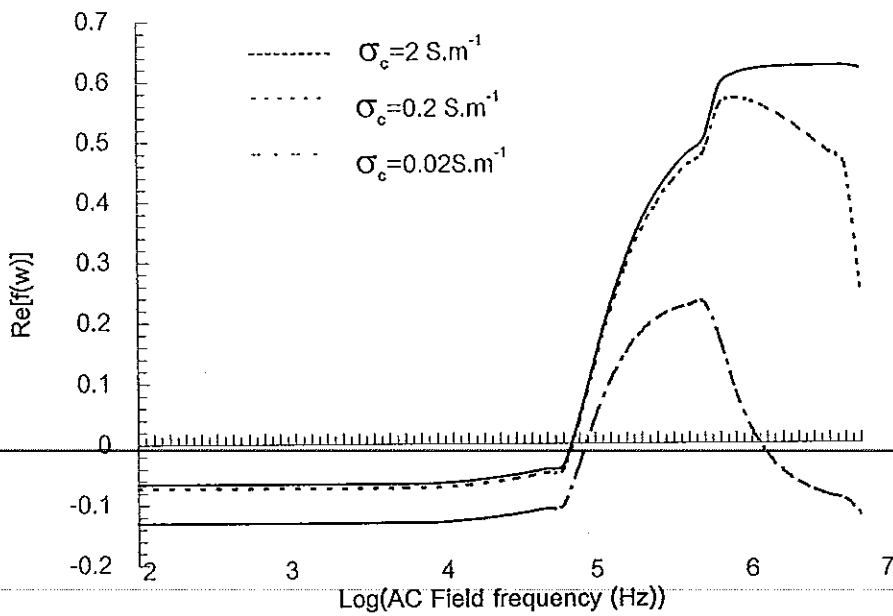
เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของสองชุดสเปกตรัมมีค่าเป็น

$$\sum_n \left(\frac{((\text{Re}[f(\omega)]_n - \text{Re}[f(\omega)]_{Tn})^2)^{1/2}}{\text{Re}[f(\omega)]_n} \right) \times \left(\frac{100}{n} \right) \quad (29)$$

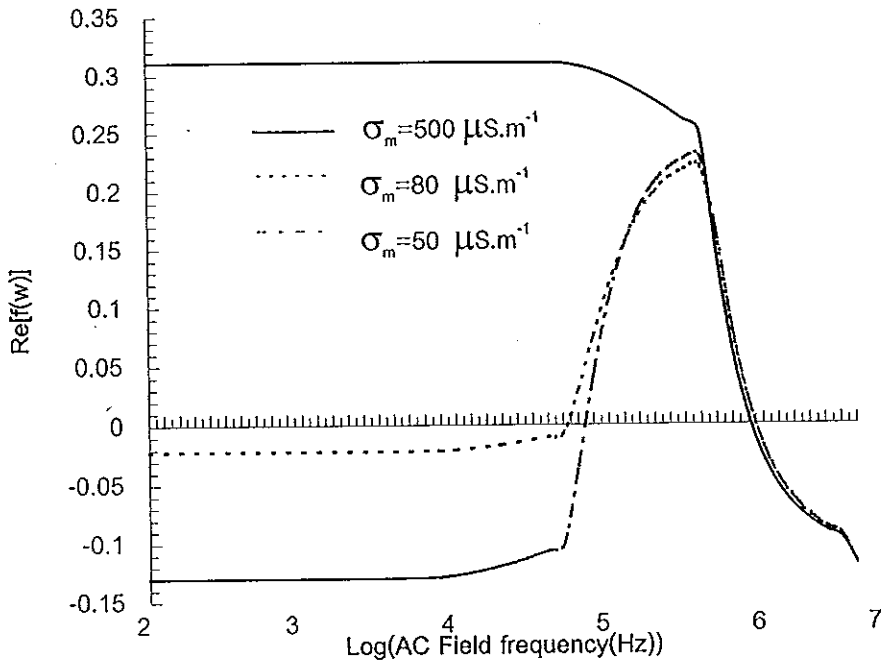
ค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวผลต่อสเปกตรัม DEP ในลักษณะต่างกัน ดังภาพประกอบต่อไปนี้



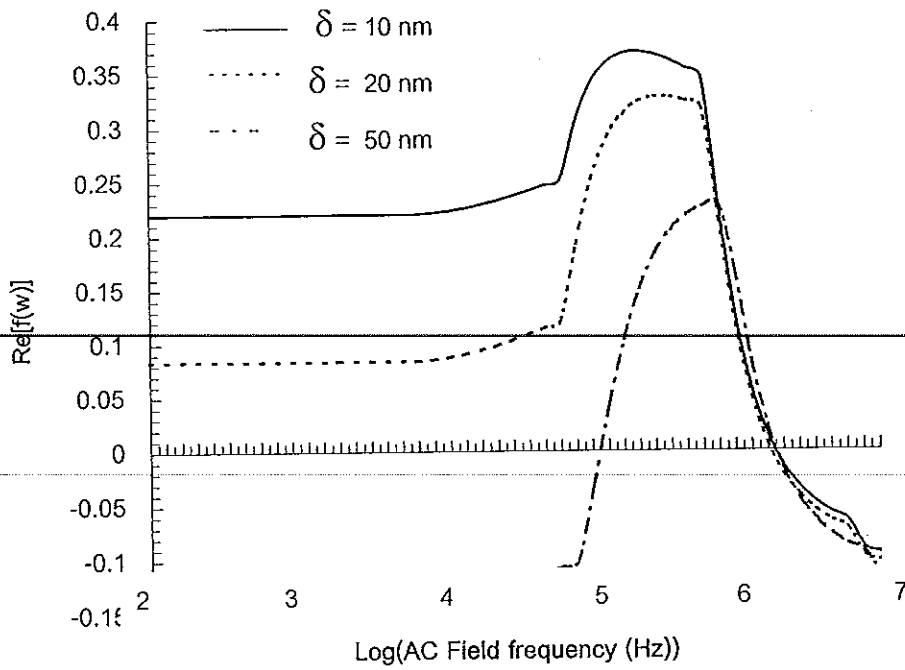
ภาพประกอบ 16 ผลกระทบของของ σ_s ต่อสเปกตรัม DEP



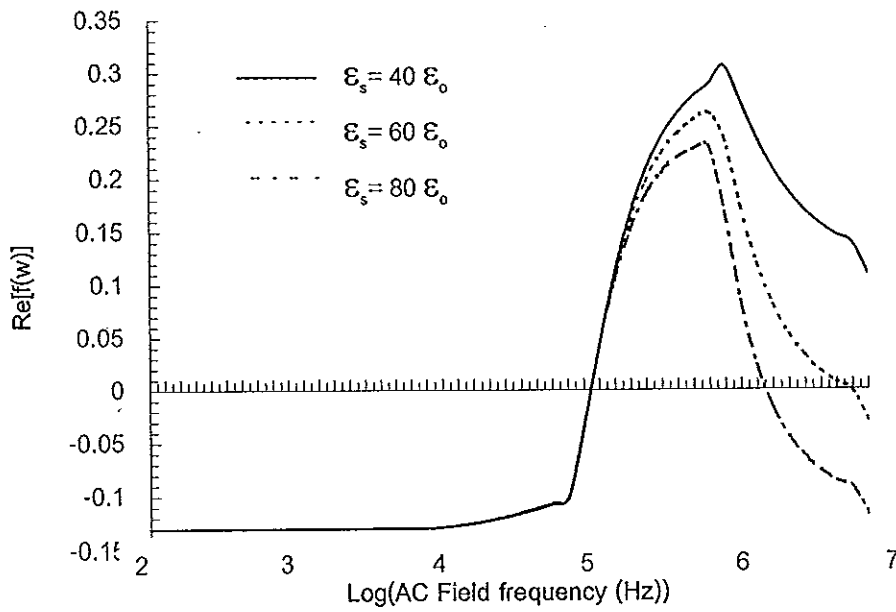
ภาพประกอบ 17 ผลกระทบของของ σ_c ต่อสเปกตรัม DEP



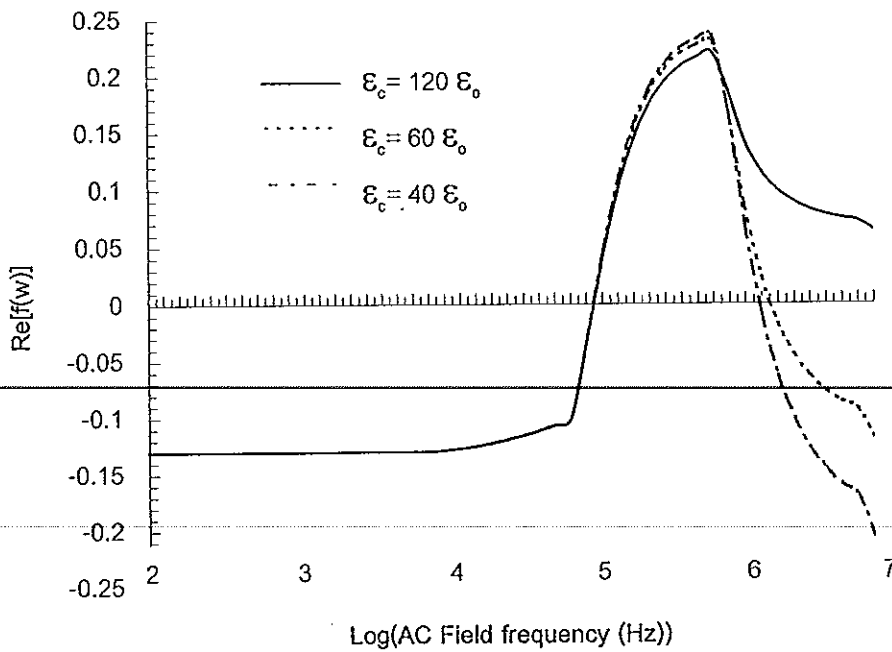
ภาพประกอบ 18 ผลกระทบของของ σ_m ต่อสเปกตรัม DEP



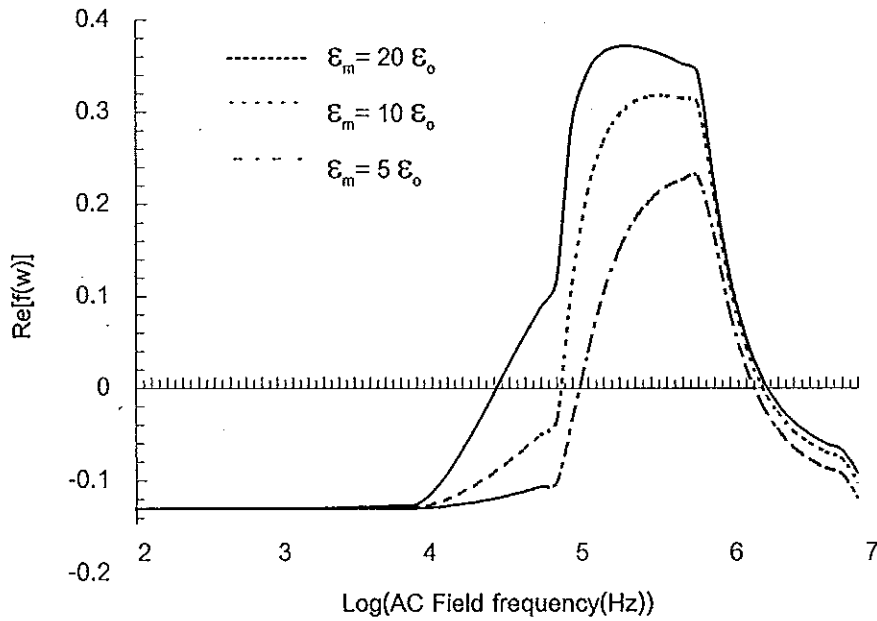
ภาพประกอบ 19 ผลกระทบของของ δ ต่อสเปกตรัม DEP



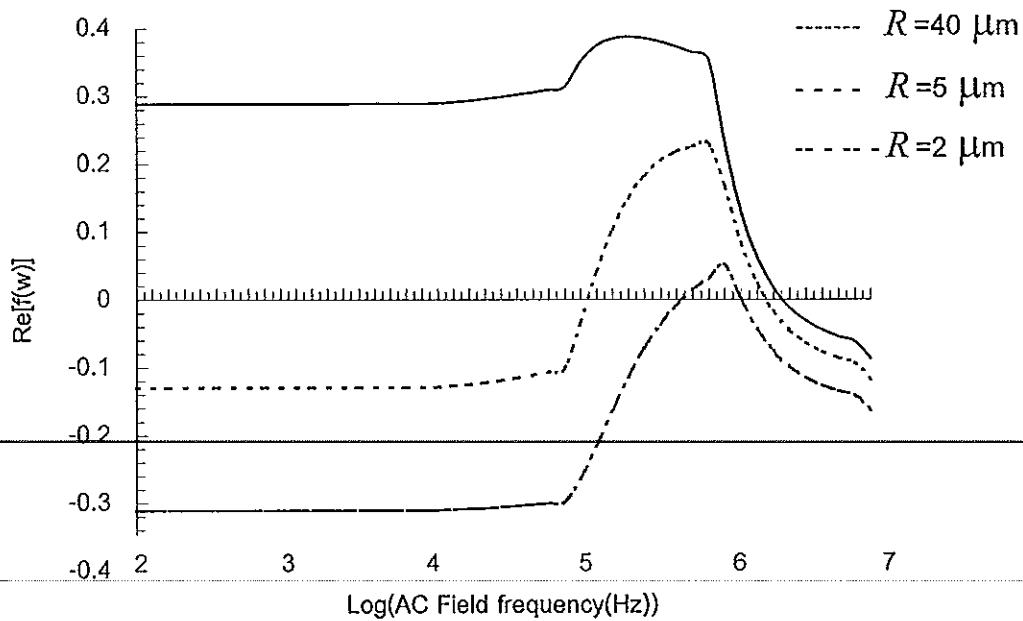
ภาพประกอบ 20 ผลกระทบของของ ϵ_s ต่อสเปกตรัม DEP



ภาพประกอบ 21 ผลกระทบของของ ϵ_c ต่อสเปกตรัม DEP



ภาพประกอบ 22 ผลกระทบของของ ϵ_m ต่อสเปกตรัม DEP



ภาพประกอบ 23 ผลกระทบของของ R ต่อสเปกตรัม DEP (ภาพประกอบ 16 - 23 อาศัยพารามิเตอร์เหล่านี้ในการเขียนกราฟ $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$ $\sigma_c = 0.02 \text{ S.m}^{-1}$ $\sigma_m = 50 \mu\text{S.m}^{-1}$ $\epsilon_s = 80\epsilon_0$ $\epsilon_c = 60\epsilon_0$ $\epsilon_m = 5\epsilon_0$ $\delta = 50 \text{ nm}$ และ $R = 5 \mu m$)

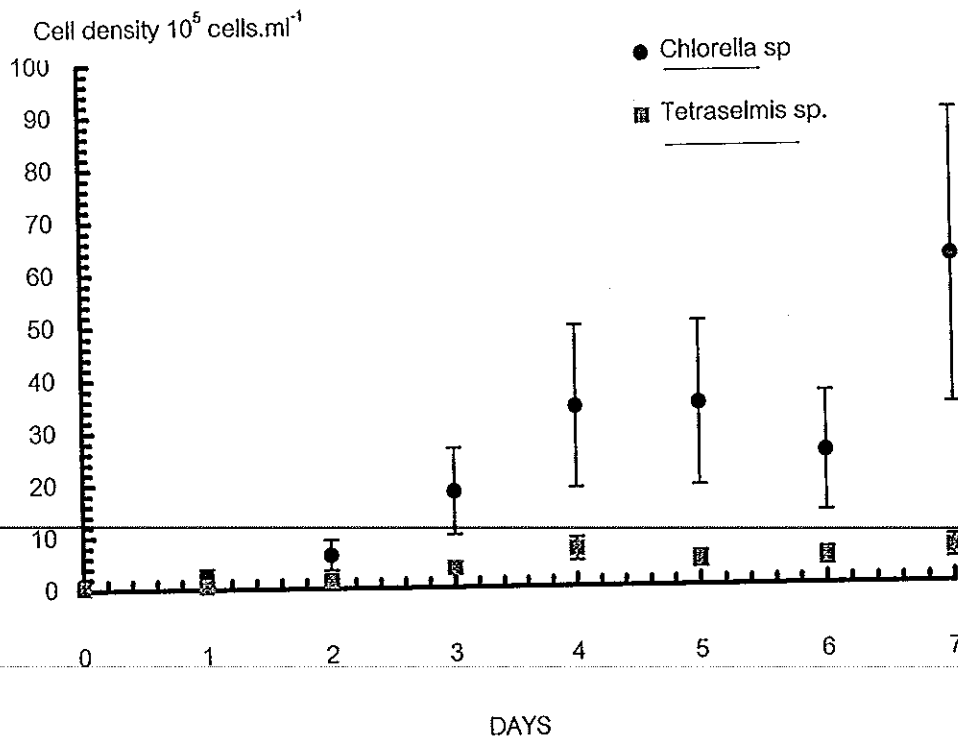
บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงผลการเพาะเลี้ยงเซลล์ ผลการทดลองเหนี่ยวนำเซลล์ทั้ง 3 ชนิด ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าต่างๆ กัน และในสารละลายแขวนลอยที่มีความหนืดคงที่แต่เปลี่ยนแปลงสภาพนำไฟฟ้าของสารละลาย

4.1 ผลการเพาะเลี้ยงเซลล์แพลงก์ตอน

จากการติดตามความหนาแน่นเซลล์ *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp. โดยวิธีนับความหนาแน่นเซลล์ พบว่าช่วงอายุที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเพิ่มความหนาแน่นเซลล์ต่อวันสูงสุดอยู่ในวันที่ 3 ถึง 4 ดังภาพประกอบ 36 ดังนั้นจึงเป็นที่คาดว่าเซลล์ที่มีอายุในช่วงวันที่ 3 น่าจะเป็นช่วงวงจรชีวิตที่เหมาะสม การทดลองนี้จึงกำหนดเลือกใช้เซลล์ช่วงอายุดังกล่าวสำหรับนำไปใช้ทดลอง



ภาพประกอบ 24 แสดงความหนาแน่นเซลล์ในแต่ละวันของเซลล์ *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp.

4.2. ผลการย่อยผนังเซลล์โพรโทพลาสต์กล้วยไม้สายพันธุ์ *Dendrobium* sp.

สำหรับผลการเตรียมโพรโทพลาสต์กล้วยไม้สายพันธุ์ *Dendrobium* sp. พบว่า สูตรเอนไซม์ที่ใช้สำหรับย่อยผนังเซลล์ที่เหมาะสมคือเอนไซม์สูตร Cellulase 1% Dricelase 1% Marcerozyme 0.5% ในสารละลาย 0.6 M แมนนิทอล ได้โพรโทพลาสต์ที่มีลักษณะกลมที่มีรัศมีเซลล์ในช่วง 30-60 ไมครอน สีเขียวอ่อนใสจำนวนมาก และจากผลการตรวจสอบการมีผนังเซลล์ด้วยเทคนิคการย้อมสารเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์พบโพรโทพลาสต์ที่ไม่มีผนังเซลล์ 5 เซลล์จาก 20 เซลล์ คิดเป็นอัตราส่วนประมาณ 70 % การทดลองนี้ได้เลือกใช้โพรโทพลาสต์ที่มีรัศมีในช่วงประมาณ 40 μm

4.3 ผลการพัฒนาชุดอุปกรณ์ดูดและปล่อยเซลล์เดี่ยว

สำหรับผลการพัฒนาอุปกรณ์ในส่วนของการดูดปล่อยและดูดเซลล์เดี่ยวโดยใช้หลอดแก้วแคพิลลารีขนาดปลายเปิดประมาณ 20 μm สำหรับ *Tetraselmis* sp. และ ขนาดประมาณ 5 μm สำหรับ *Chorella* sp. สามารถดูดและปล่อยเซลล์เดี่ยวให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้ สำหรับในส่วนของการสร้างภาชนะทดลองพบว่า ขั้วไฟฟ้าที่ใช้มีความตรงและสม่ำเสมอเหมาะสมต่อการใช้งาน อีกทั้งยังพบว่า อัตราส่วนระหว่าง binder และ harder ที่ประมาณ 50 % มีความเหมาะสมต่อการยึดเส้นลวดให้เกาะติดกับแผ่นแก้วไมโครสโคปสไลด์และสามารถรักษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าไว้ได้ภายใต้อุณหภูมิทดลองประมาณ 25 $^{\circ}\text{C}$

สำหรับผลการปรับตำแหน่งเริ่มต้น $z = 0$ ของโพรโทพลาสต์ *Dendrobium* sp. ด้วยอุปกรณ์จับยึดแบบไมโคร พบว่าใช้งานได้ดีและสามารถทำการปรับระยะตำแหน่งเริ่มต้นของเซลล์ให้ใกล้เคียงที่ $z = 0$ และ $y = 0$ ได้

4.4 ผลการศึกษาความเข้มสนามไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการเกิดไดโพลีโทรเฟอร์ริสของ

Chorella sp. *Tetraselmis* sp. และโพรโทพลาสต์กล้วยไม้ *Dendrobium* sp.

ผลการศึกษาการเกิดไดโพลีโทรเฟอร์ริสของเซลล์ทั้งสามชนิด พบว่า สำหรับเซลล์

Chorella sp. ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 V หากระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าสูงกว่า 100 μm สนามไฟฟ้าจะต่ำกว่า 116 $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ ซึ่งต่ำเกินไปที่จะเหนี่ยวนำให้เซลล์เคลื่อนที่ได้ และพบว่า ที่ระยะห่าง 100 μm เซลล์จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ไม่มากเกินไป ทำให้สามารถวัดความเร็วได้ ทำนองเดียวกัน พบว่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ทดลองกับเซลล์ *Tetraselmis* sp. และ *Dendrobium* sp. ควรเป็น 150 μm ที่ศักย์ไฟฟ้า 10 V และ 450 μm ที่ศักย์ไฟฟ้า 3 V ตามลำดับ โดยมีช่วงความถี่ไดโพลีโทรเฟอร์ริคของเซลล์ทั้ง 3 ชนิดแสดงไว้ดังตาราง 2

ตาราง 1 ความถี่ไดอิเล็กโทรพอเรติกที่ได้จากการทดลองของเซลล์แพลงก์ตอนที่มีระยะ
 l ต่างๆกัน เพื่อตรวจหาความเข้มข้นไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการทดลอง ในกรณี
 ดังกล่าว ระยะ l ที่ใช้ยังไม่มีความเหมาะสม

สภาพนำไฟฟ้า ของสารละลาย σ_s (mS/m)	ความถี่ไดอิเล็กโทรพอเรติก		
	<i>Tetraselmis</i> sp.		<i>Chlorella</i> sp.
	$l = 260 \mu\text{m}, 10V$	$l = 200 \mu\text{m}, 10V$	$l = 200 \mu\text{m}, 10V$
1			
3			80 k-15 MHz
6	500kHz - 15MHz	11 ± 8 kHz - 15 MHz	15MHz*
7			
12	15MHz*	30 kHz -15 MHz	4 ± 2 kHz -15MHz
20			
24	15 MHz*	15 MHz*	200 ± 20 kHz -15 MHz

* ไม่พบการเกิดไดอิเล็กโทรพอเรซิสที่ความถี่ต่ำกว่านี้

ตาราง 2 ช่วงความถี่ไดอิเล็กโทรเฟอริคที่ได้จากการทดลองของเซลล์ทั้ง 3 ชนิด เมื่อระยะ l มีค่าเหมาะสมที่ทำให้เซลล์เกิดไดอิเล็กโทรเฟอริคแบบบวกละและมีความเร็วพอเหมาะต่อการตรวจวัด

สภาพนำไฟฟ้า ของสารละลาย σ_s (mS.m ⁻¹)	ความถี่ไดอิเล็กโทรเฟอริค		
	<i>Chlorella</i> sp. $l = 100 \mu\text{m}$ (10V)	<i>Tetraselmis</i> sp. $l = 150 \mu\text{m}$ (10V)	<i>Dendrobium</i> sp. $l = 450 \mu\text{m}$ (3V)
1			10 ± 5 kHz - 15 MHz
3	30 ± 10 kHz - 15 MHz		
6	30 ± 10 kHz - 15 MHz	7 ± 3 kHz - 15 MHz	
7			20 ± 10 kHz - 15 MHz
12	3 ± 1 kHz - 15 MHz	20 ± 10 kHz - 15 MHz	
20			30 ± 20 kHz - 15 MHz
24	0.6 ± 0.5 kHz - 15 MHz	90 ± 10 kHz - 15 MHz	

ผลของความเข้มข้นไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการเกิดไดอิเล็กโทรเฟอริคสำหรับเซลล์ทั้ง 3 ชนิดพบว่า ความเข้มข้นไฟฟ้าที่ทำให้เซลล์ *Chlorella* sp. เริ่มเกิดไดอิเล็กโทรเฟอริคแบบบวกละคือความเข้มข้นไฟฟ้าประมาณ 69 kV.m^{-1} ($l \approx 200 \mu\text{m}$) แต่ความเข้มข้นไฟฟ้ายังมีค่าไม่มากพอที่เซลล์จะเกิดไดอิเล็กโทรเฟอริคตลอดช่วงความถี่ของสนามไฟฟ้า และเมื่อเปลี่ยนระยะ $l \approx 100 \mu\text{m}$ (ให้ความเข้มข้นไฟฟ้า 116 kV.m^{-1}) พบว่าเซลล์จะเคลื่อนที่เข้า

เกาะขั้วไฟฟ้าด้วยความเร็วที่พอดี (ไม่เกิน $75 \mu\text{m.s}^{-1}$) ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้ ที่ทุกสภาพนำไฟฟ้าที่ใช้ระหว่าง 3 mS.m^{-1} ถึง 24 mS.m^{-1}

สำหรับเซลล์ *Tetraselmis sp.* จะเริ่มเกิดไดโอดีเล็กโทรฟอเรติกเมื่อใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าประมาณ 69 kV.m^{-1} แต่ความเข้มสนามไฟฟ้ายังมีค่าไม่มากพอที่เซลล์จะเกิดไดโอดีเล็กโทรฟอเรซิส ตลอดช่วงความถี่ของสนามไฟฟ้า และเมื่อเปลี่ยนระยะ $l \approx 150 \mu\text{m}$ (ให้ความเข้มสนามไฟฟ้า 85 kV.m^{-1}) พบว่าเซลล์จะเคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้าด้วยความเร็วที่พอดี (ไม่เกิน $75 \mu\text{m.s}^{-1}$) ตลอดช่วงความถี่ที่ทดลองและทุกสภาพนำไฟฟ้าที่ใช้ระหว่าง 6 mS.m^{-1} ถึง 24 mS.m^{-1}

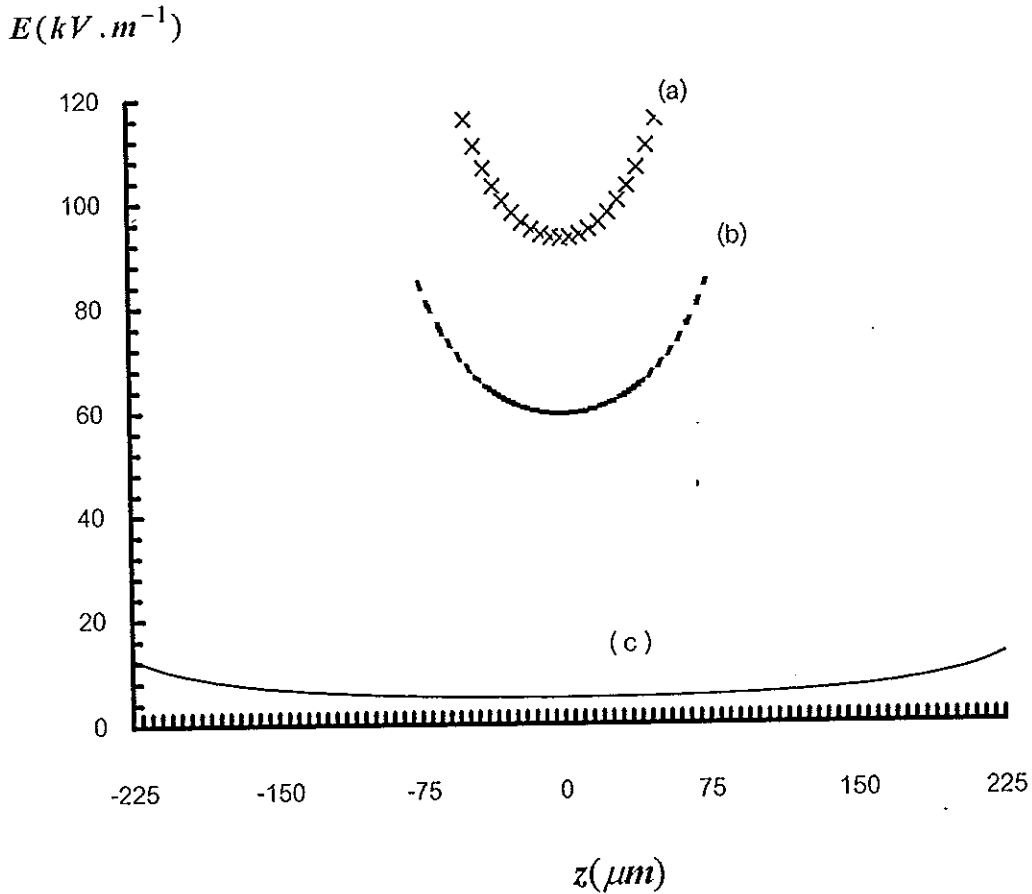
และสำหรับโพรโทพลาสต์ *Dendrobium sp.* จะเริ่มเกิดไดโอดีเล็กโทรฟอเรติกและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่พอเหมาะขณะเข้าเกาะขั้วไฟฟ้าเมื่อใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าประมาณ 13 kV.m^{-1} ($l \approx 450 \mu\text{m}, V = 3 \text{ volts}$) ทุกสภาพนำไฟฟ้าที่ใช้ระหว่าง 10 mS.m^{-1} ถึง 200 mS.m^{-1} หากใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่มากกว่านี้ เซลล์จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มากกว่า $60 \mu\text{m.s}^{-1}$ (โดยประมาณ) และเซลล์จะเกิดการยึดตัวตามทิศสนามไฟฟ้าที่ความถี่สนามไฟฟ้าย่านต่ำ

จากผลการทดลองในตาราง 2 พบว่า เมื่อเปลี่ยนสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์ให้มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ขอบเขตช่วงความถี่ไดโอดีเล็กโทรฟอเรติกย่านต่ำของเซลล์ *Chlorella sp.* ขยับลงไปที่ความถี่สนามไฟฟ้าที่ต่ำลง สำหรับเซลล์ *Tetraselmis sp.* และโพรโทพลาสต์ *Dendrobium sp.* จะขยับไปที่ความถี่สนามไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างเด่นชัด ผลการคำนวณค่า $\nabla(E^2)$ ที่ใช้ในการหาความเร็ว เขียนสรุปไว้ในตารางดังต่อไปนี้

ตาราง 3 ผลการคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าและเทอมเกรเดียนต์สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง เมื่อ $E_{z \text{ max}}$ และ $\nabla(E^2)_{z \text{ max}}$ คือสนามไฟฟ้าสูงสุดและเกรเดียนต์ของสนามไฟฟ้ากำลังสองสูงสุดพิจารณาที่ผิวขั้วไฟฟ้า

ชนิดเซลล์	$l(\times 10^{-6} \text{ m})$	$V_{rms}(\text{volts})$	$E_{z \text{ max}}(\text{kV.m}^{-1})$	$\nabla(E^2)_{z \text{ max}}(\times 10^{13} \text{ V}^2.\text{m}^{-3})$
<i>Chlorella sp.</i>	100	10	115.9266	26.4645
<i>Tetraselmis sp.</i>	150	10	84.5984	16.1661
<i>Dendrobium sp.</i>	450	3	12.79711	0.4601

สนามไฟฟ้าในแนวแกน Z ที่ใช้สำหรับเซลล์ทั้ง 3 ชนิด แสดงได้ดังกราฟคือ



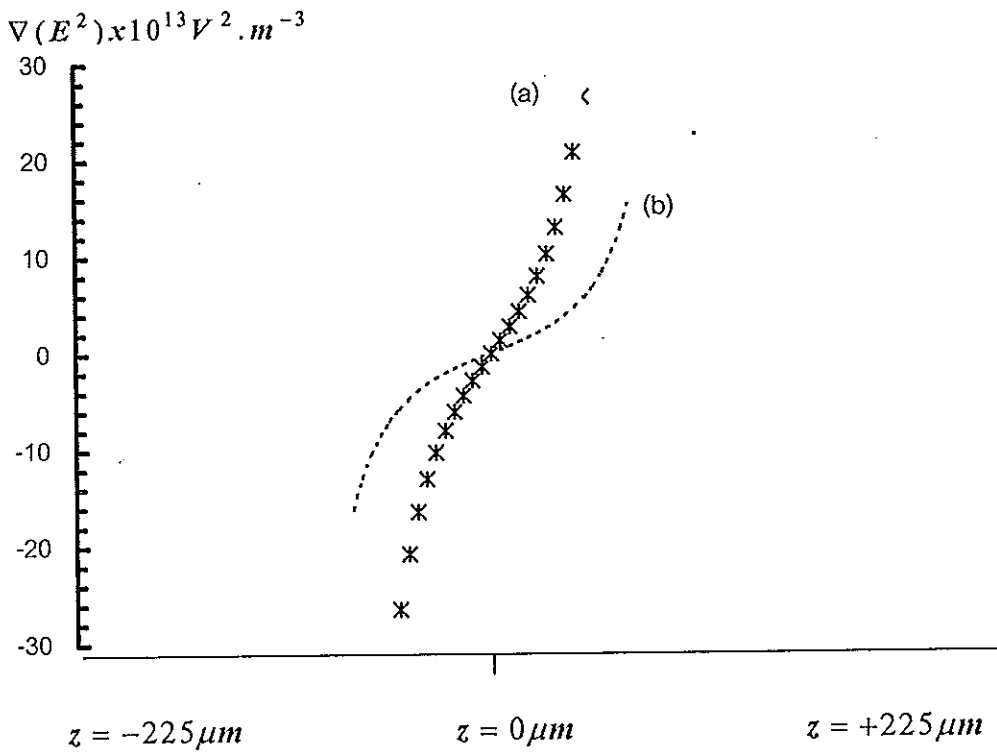
ภาพประกอบ 25 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าแนวแกน Z ที่ระนาบศูนย์กลาง $Y=0$ สำหรับ

ศึกษาไดอิเล็กโตรโฟรีซิสกับเซลล์ทั้ง 3 ชนิด

(a) ทดลองกับ *Chlorella* sp. ใช้ระยะ $l = 100 \mu m$ (ศักย์ไฟฟ้า 10V)

(b) ทดลองกับ *Tetraselmis* sp. ใช้ระยะ $l = 150 \mu m$ (ศักย์ไฟฟ้า 10V)

(c) ทดลองกับ *Dendrobium* sp. ใช้ระยะ $l = 450 \mu m$ (ศักย์ไฟฟ้า 3V)



- ภาพประกอบ 26 เปรียบเทียบ $\nabla(E^2)$ และระยะในแนวแกน z ที่ระนาบศูนย์กลาง $Y=0$ ที่ใช้ศึกษาไดโพลโทรฟอเรซิสกับเซลล์แพลงก์ตอน
- (a) ทดลองกับ *Chlorella* sp. ใช้ระยะ $l = 100 \mu\text{m}$ (ศักย์ไฟฟ้า 10V)
- (b) ทดลองกับ *Tetraselmis* sp. ใช้ระยะ $l = 150 \mu\text{m}$ (ศักย์ไฟฟ้า 10V)

สำหรับสนามไฟฟ้าที่ทดลองกับ *Dendrobium* sp. ใช้ระยะ $l = 450 \mu\text{m}$ (ศักย์ไฟฟ้า 3V) ให้ค่า $\nabla(E^2)$ สูงสุดที่ $\pm 0.5 \times 10^{13} \text{V}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ ซึ่งเป็นค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $\nabla(E^2)$ ที่ใช้กับ *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp.

จากกราฟทั้งสองรูปที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า ขนาดของ $\nabla(E^2)$ ที่ระยะจาก

$$l=0 \rightarrow l=\frac{z}{2} \text{ มีความสมมาตรกับ } l=0 \rightarrow l=-\frac{z}{2} \text{ ดังนั้นไม่ว่าเซลล์จะเคลื่อนที่ไปในทิศทาง}$$

$+z$ หรือ $-z$ น่าจะมีความเร็ว बदดลที่เท่ากัน และจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นขณะที่เคลื่อนที่เข้าใกล้ขั้วไฟฟ้าในลักษณะที่คล้ายกราฟ $\nabla(E^2)$ (เมื่อถือว่าพารามิเตอร์ต่างๆ อันได้แก่ $\epsilon_s, R^2, \text{Re}[f(\omega)]$ และ η เป็นค่าคงที่) นั่นหมายความว่า เซลล์มีโอกาสที่จะเคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วได้ทั้งสองขั้วด้วยความเร็วที่เท่ากันขึ้นกับว่าตำแหน่งเริ่มต้นของเซลล์อยู่ใกล้ขั้วไฟฟ้าขั้วใด

4.5 ผลการวัดความหนืดสารละลายซูโครสและแมนนิทอล

จากการวัดความหนืดโดยวิธีตามหัวข้อ 3.6 ได้ผลการทดลองเชิงสถิติดังนี้

ตาราง 4 ข้อมูลเวลาการไหลของสารละลายในอุปกรณ์วัดความหนืด และค่าความหนืดที่คำนวณได้ \pm แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

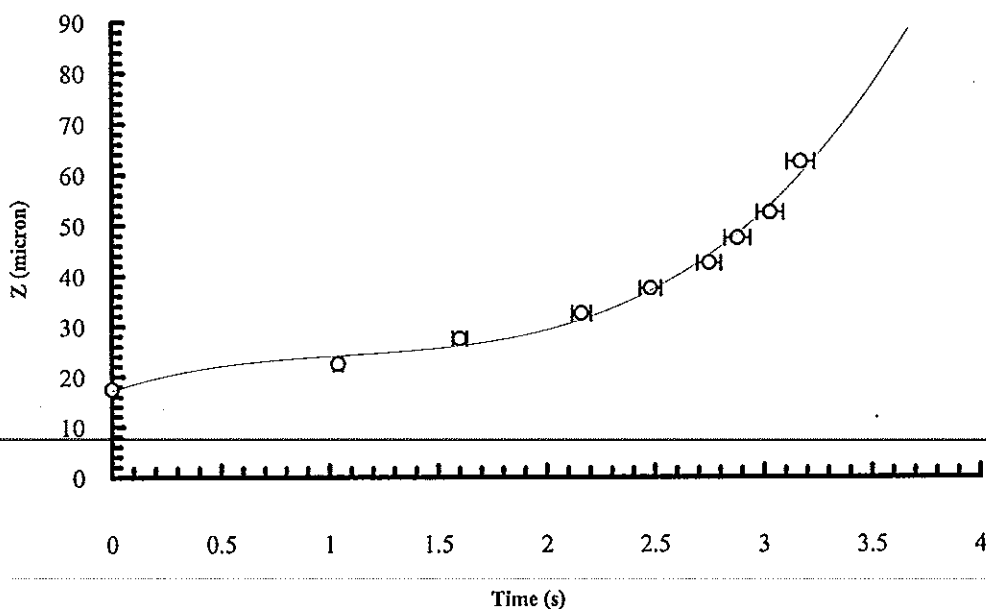
ชนิด สารละลาย น้ำตาล 0.5M	เวลา (s)	เวลาเฉลี่ย(s)	ความหนาแน่น (kg.m^{-3})	ความหนืด (mN.s.m^{-2})
ซูโครส	141.85,141.85,142.44 141.98,141.94	141.91 ± 0.065	1.07 ± 0.12	1.67 ± 0.06
แมนนิทอล	102.93,104.09,105.66 106.66,106.06,105.66	104.88 ± 1.33	1.0050 ± 0.18	1.35 ± 0.03
ซอบิทอล*	107.52,107.32,107.57 107.87,108.28	107.71 ± 0.369	1.025 ± 0.13	1.21 ± 0.04

4.6 ผลการประมาณพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์ตามแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกเซลล์หนึ่งชั้น

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการหาความสัมพันธ์ถดถอยแบบไม่เชิงเส้นระหว่างตำแหน่ง z และเวลาที่เซลล์ใช้ในการเคลื่อนที่ t ตามรูปแบบโพลีโนเมียลกำลังสาม จากนั้นจะนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาเพื่อให้ได้มาซึ่งสมการความเร็ว และนำสมการความเร็วที่ได้ไปเข้ากระบวนการวิเคราะห์ค่า $\text{Re}[f(\omega)]_n$ เพื่อนำค่าที่ได้ไปเข้ากระบวนการปรับสเปคตรัม DEP และประมวลค่าพารามิเตอร์ออกมา ซึ่งเป็นขั้นตอนท้ายสุด ผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้

4.6.1 ผลการหาความสัมพันธ์ถดถอยแบบไม่เชิงเส้นระหว่างตำแหน่ง z และเวลาที่เซลล์ใช้ในการเคลื่อนที่ t

ตัวอย่างชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดตำแหน่งและเวลาที่เซลล์ใช้ในการเคลื่อนที่ของเซลล์ *Tetraselmis* sp. 1 เซลล์ที่แขวนลอยในสารละลายซูโครส 0.5 M ที่มีสภาพนำไฟฟ้า 6 mSm^{-1} เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า 85 Kv.m^{-1} ที่ความถี่ 15 MHz เป็นดังนี้



ภาพประกอบ 27 ตัวอย่างผลการหาความสัมพันธ์ถดถอยแบบไม่เชิงเส้นระหว่างตำแหน่งและเวลาที่เซลล์ใช้ในการเคลื่อนที่ ที่ 15 MHz , $E_z = 85. \text{kV.m}^{-1}$

ผลของการหาระยะทางที่สนามไฟฟ้าดังกล่าวดูได้จากตาราง 5 และโดยอาศัยข้อมูลดังกล่าว แทนค่าในสมการ 8 และ 11 ในภาคผนวก 4 ได้ความสัมพันธ์ที่ถดถอยแบบโพลีโนเมียลกำลังสาม คือ

$$z(t) = 3.3039t^3 - 10.671t^2 + 14.152t + 17.221$$

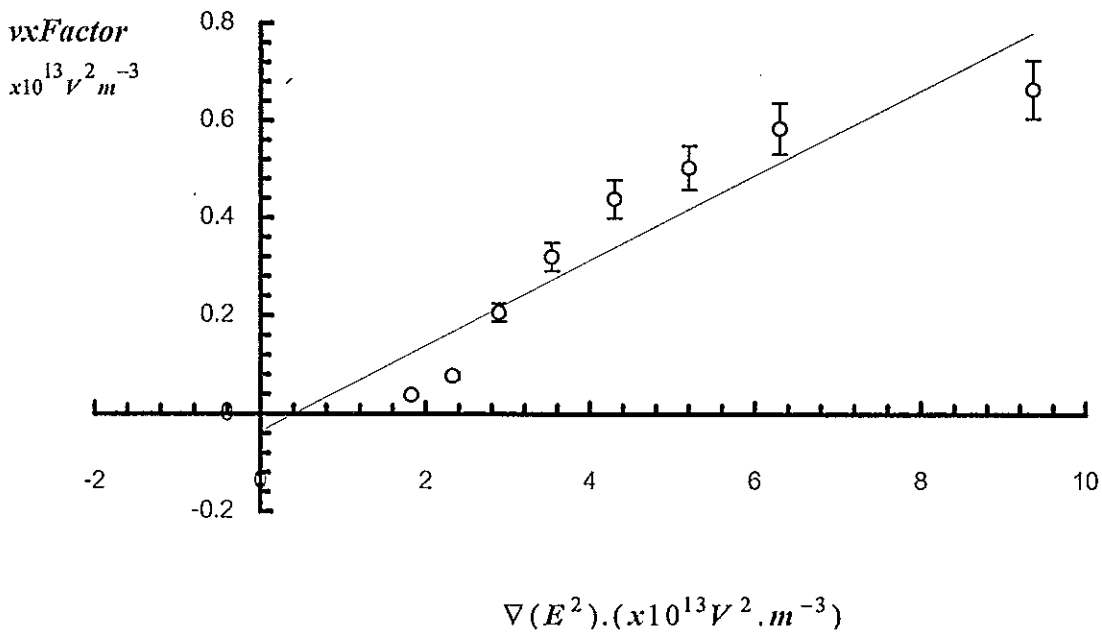
และอนุพันธ์ของสมการเทียบกับเวลามีค่า

$$v(t) = \frac{dz(t)}{dt} = 9.9117t^2 - 21.342t + 14.152$$

แทนเวลาในแต่ละจุดที่วัดได้จริงลงในสมการและกระทำตามขั้นตอน จะได้ข้อมูลในตาราง 5

ตาราง 5 ตัวอย่างผลการคำนวณความเร็วและ $\nabla(E_z^2)$ ที่แต่ละจุด z ค่า $vxFactor$ ที่คำนวณได้จะนำไปใช้เขียนกราฟร่วมกับ $\nabla(E_z^2)$ ดังภาพประกอบ 28

(วินาที)	z (ไมครอน)	$v(t) = 9.9117t^2 - 21.342t + 14.152$ $\times 10^{-6} \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	$\nabla(E_z^2) \times 10^{13} \text{ (V}^2\text{.m}^{-3}\text{)}$	$vxFactor$ $\times 10^{13} \text{ (V}^2\text{.m}^{-3}\text{)}$
0	17.5	-	-	-
1.04	22.5	2.676815	1.82	0.03865
1.6	27.5	5.378	2.32	0.07768
2.16	32.5	14.297	2.89	0.2065
2.48	37.5	22.185	3.53	0.3204
2.75	42.5	30.419	4.29	0.4393
2.88	47.5	34.899	5.20	0.5039
3.03	52.5	40.484	6.29	0.5846
3.17	62.5	46.100	9.35	0.6601

4.6.2 ผลการหาค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ 

ภาพประกอบ 28 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\nabla(E_z^2)$ และ $vxFactor$ ที่แต่ละตำแหน่ง z ของเซลล์ *Tetraselmis* sp. $R = 7 \mu\text{m}$ แขนงลอยในสารละลายซูโครส 0.5 M $\sigma_s = 6 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ $\epsilon_s = 80\epsilon_0$ $\eta = 1.67 \text{ mN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ที่ 15 MHz $E_z = 85 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ค่า $\text{Re}[f(\omega)] = 0.087$

แถบความผิดพลาดที่แสดงในภาพเป็นความผิดพลาดรวมของความเร็วของเซลล์และค่าความหนืด สำหรับความชันของกราฟตามภาพประกอบ 28 คือค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ หากจากการใช้โปรแกรม Excel หาสมการถดถอยเชิงเส้น เพื่อลากเส้นผ่านข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่ความถี่สนามไฟฟ้าอื่นๆ สามารถหาค่าด้วยวิธีการเช่นเดียวกันดังตาราง 6 แสดงตัวอย่างผลการหาค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ ของเซลล์แต่ละชนิดที่ความถี่สนามไฟฟ้าต่างๆกัน ดังนี้

ตาราง 6 ตัวอย่างค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ ของเซลล์แต่ละชนิดที่ความถี่สนามไฟฟ้าต่างกัน

ชนิดเซลล์	$R(\mu\text{m})$	$\sigma_s(\text{mS}\cdot\text{m}^{-1})$	$E_{z(\text{max.})}(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	$f(\text{Hz.})$	$\text{Re}[f(\omega)]$
<i>Chlorella</i> sp.	1	60	116	15 MHz	0.090
				600 kHz	0.34
				100 kHz	0.19
<i>Tetraselmis</i> sp.	5.57	60	85	15 MHz	0.090
				600 kHz	0.28
				100 kHz	0.25
<i>Dendrobium</i> sp.	40	70	13	15 MHz	0.12
				600 kHz	0.14
				100 kHz	0.010

ข้อมูลการคำนวณค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ จากการทดลองทั้งหมดดูได้จากภาคผนวก 7

ผลการหาค่า $\text{Re}[f(\omega)]_n$ ในเซลล์ 3 ชนิดคือ *Chlorella sp.*, *Tetraselmis sp.* และ โพรโทพลาสต์กล้วยไม้ *Dendrobium sp.* ชนิดละ 3 ชุด ชุดละ 3 เซลล์ ได้แสดงไว้ในตาราง 7 จะเห็นว่าค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ เปลี่ยนแปลงตามความถี่สนามไฟฟ้า

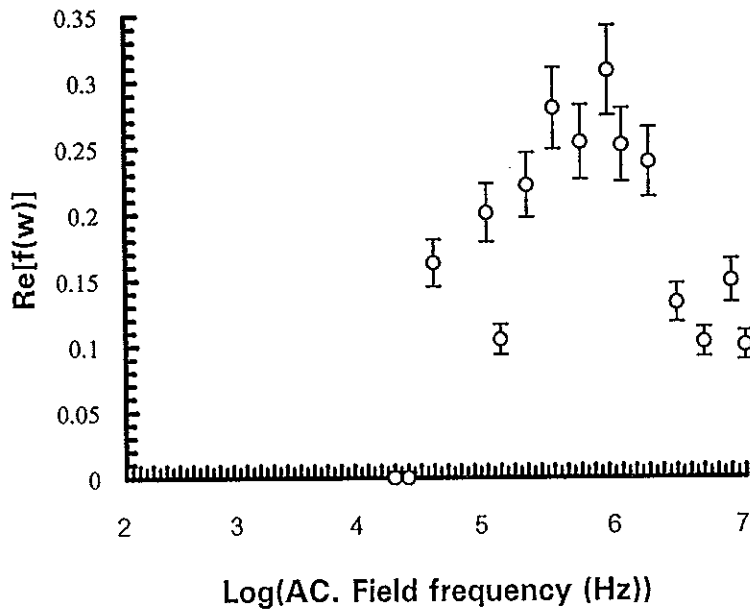
ตาราง 7 ตัวอย่างค่าเฉลี่ย $\text{Re}[f(\omega)]$ จากการทดลองของเซลล์ทั้ง 3 ชนิดที่แต่ละความถี่สนามไฟฟ้า (ดูข้อมูลทุกชุดผลการคำนวณค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ ในภาคผนวก 7)

ความถี่สนามไฟฟ้า (Hz)	$\text{Re}[f(\omega)]$		
	<i>Chlorella sp.</i> $\sigma_s = 0.006 S.m^{-1}$	<i>Tetraselmis sp.</i> $\sigma_s = 0.006 S.m^{-1}$	<i>Dendrobium sp.</i> $\sigma_s = 0.007 S.m^{-1}$
15 MHz	0.10 ± 0.03	0.09 ± 0.01	0.013 ± 0.002
10 MHz	0.15 ± 0.01	0.11 ± 0.02	0.016 ± 0.003
8 MHz	0.10 ± 0.02	0.12 ± 0.03	0.015 ± 0.006
6 MHz	0.13 ± 0.02	0.17 ± 0.03	0.013 ± 0.008
4 MHz	0.24 ± 0.04	0.18 ± 0.02	0.013 ± 0.004
2 MHz	0.25 ± 0.04	0.21 ± 0.05	0.011 ± 0.004
1 MHz	0.31 ± 0.05	0.21 ± 0.03	0.013 ± 0.003
800 kHz	0.25 ± 0.06	0.30 ± 0.03	0.015 ± 0.004
600 kHz	0.28 ± 0.06	0.29 ± 0.03	0.011 ± 0.003
400 kHz	0.22 ± 0.05	0.22 ± 0.05	0.012 ± 0.004
200 kHz		0.23 ± 0.05	0.010 ± 0.003
100 kHz	0.20 ± 0.04	0.23 ± 0.03	0.014 ± 0.002
80 kHz			0.008 ± 0.008
60 kHz	0.16 ± 0.02	0.12 ± 0.02	0.008 ± 0.005
50 kHz		0.12 ± 0.01	
40 kHz	0.04 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.008 ± 0.003
30 kHz	0.04 ± 0.02	0.09 ± 0.01	0.007 ± 0.003
20 kHz	0.00	0.03 ± 0.00	0.000
10 kHz			
8 kHz		0.00	

4.6.3 ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่สัมพันธ์กับความถี่สนามไฟฟ้า

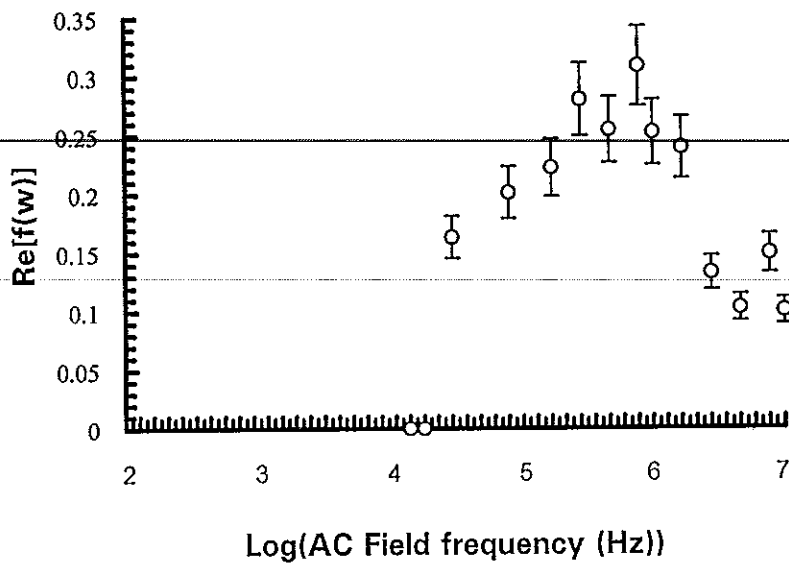
เมื่อนำข้อมูลระหว่างค่า $\text{Re}[f(\omega)]_n$ กับความถี่ f_n ของสนามไฟฟ้าดังตัวอย่างจากตาราง 7 เขียนกราฟ ได้ผลการทดลองทุกชุดการทดลองดังต่อไปนี้

Chlorella sp., $\sigma_s = 3 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ $E = 116 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ $R = 1 \mu\text{m}$ และ $\eta = 167 \pm 006 \text{ mN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$



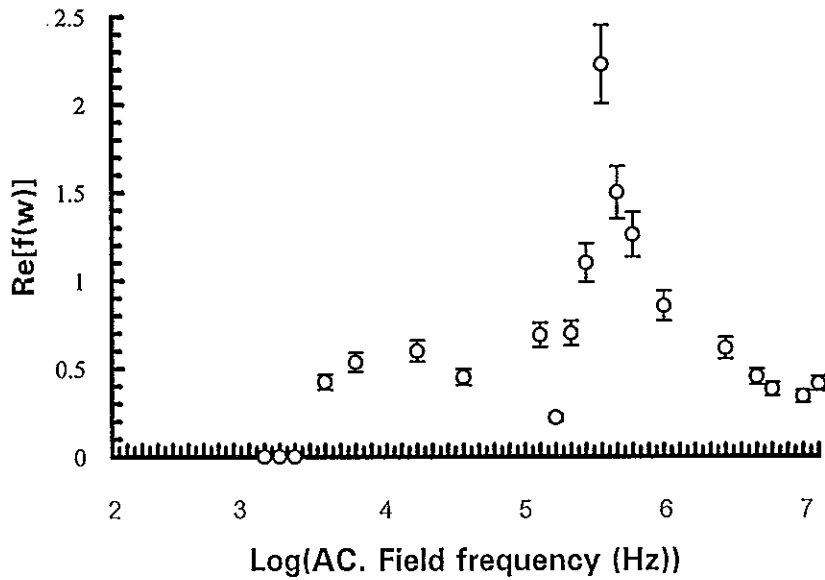
ภาพประกอบ 29 ก

Chlorella sp., $\sigma_s = 6 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ $E = 116 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ $R = 1 \mu\text{m}$ และ $\eta = 167 \pm 006 \text{ mN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$



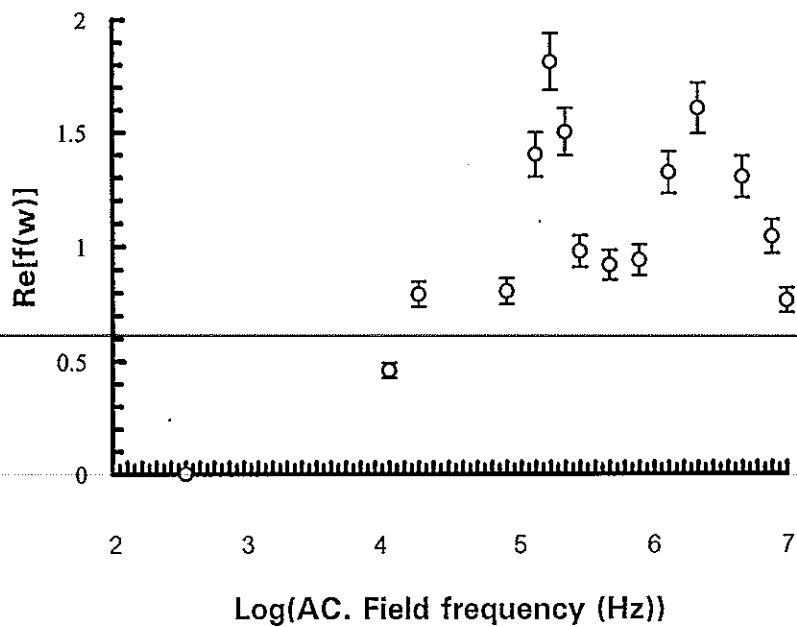
ภาพประกอบ 29 ข

Chlorella sp. , $\sigma_s = 12 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ $E = 116 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ $R = 1 \mu\text{m}$ และ $\eta = 167 \pm 006 \text{ mN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$



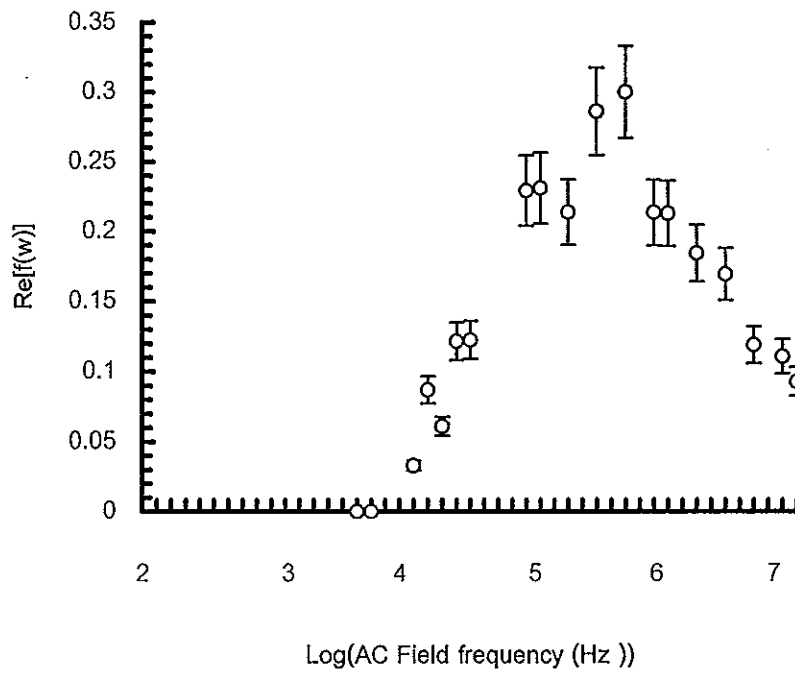
ภาพประกอบ 29 ค

Chlorella sp. , $\sigma_s = 24 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ $E = 116 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ $R = 1 \mu\text{m}$ และ $\eta = 167 \pm 006 \text{ mN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$



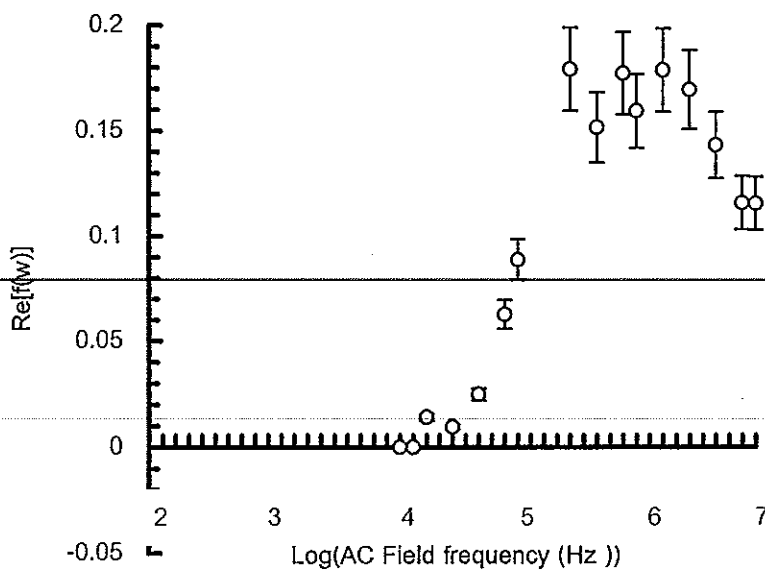
ภาพประกอบ 29 ได้ใช้เล็กโทรฟอเรติกสเปกตรัมเฉลี่ยของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ของเซลล์ *Chlorella* sp. ที่แขวนลอยในสารละลายที่ σ_s ต่างๆกัน

Tetraselmis sp. , $\sigma_s = 6 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ $E = 85 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ $R = 7 \mu\text{m}$ และ $\eta = 1.67 \pm 0.06 \text{ mN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$



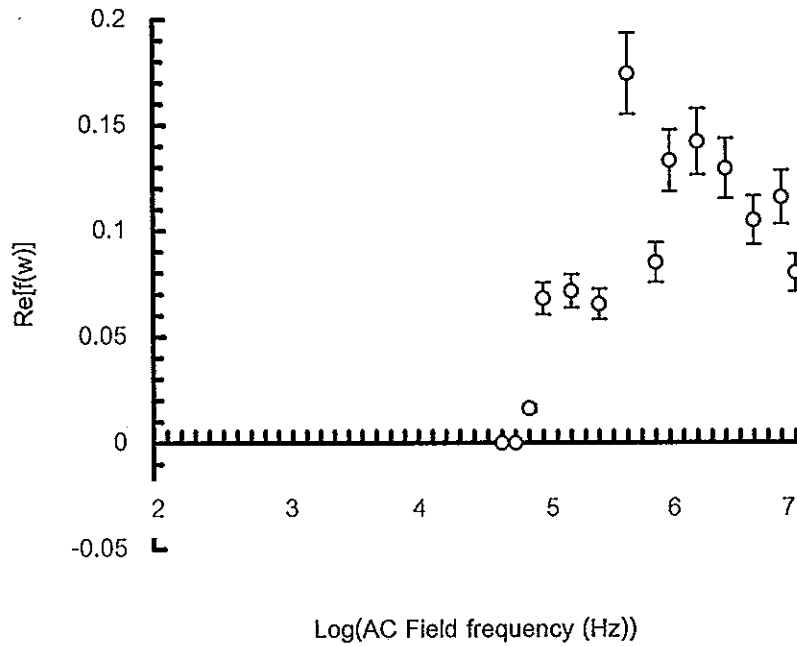
ภาพประกอบ 30 ก

Tetraselmis sp. , $\sigma_s = 12 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ $E = 85 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ $R = 7 \mu\text{m}$ และ $\eta = 1.67 \pm 0.06 \text{ mN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$



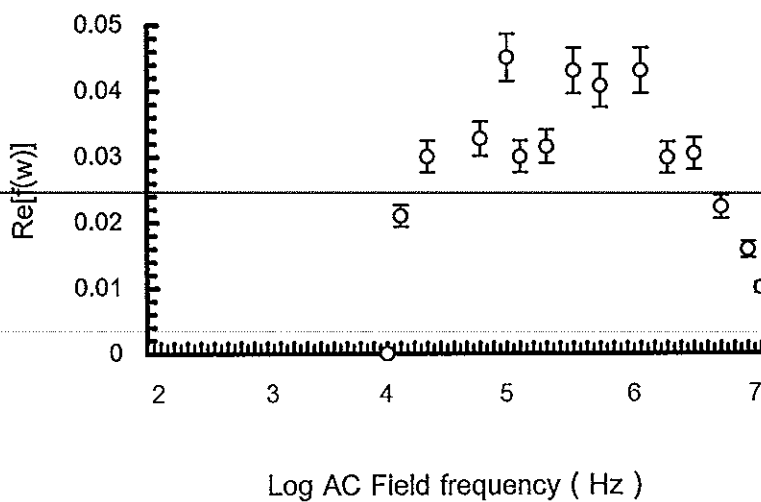
ภาพประกอบ 30 ข

Tetraselmis sp. , $\sigma_s = 24 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ $E = 85 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ $R = 7 \mu\text{m}$ และ $\eta = 1.67 \pm 0.06 \text{ mV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$



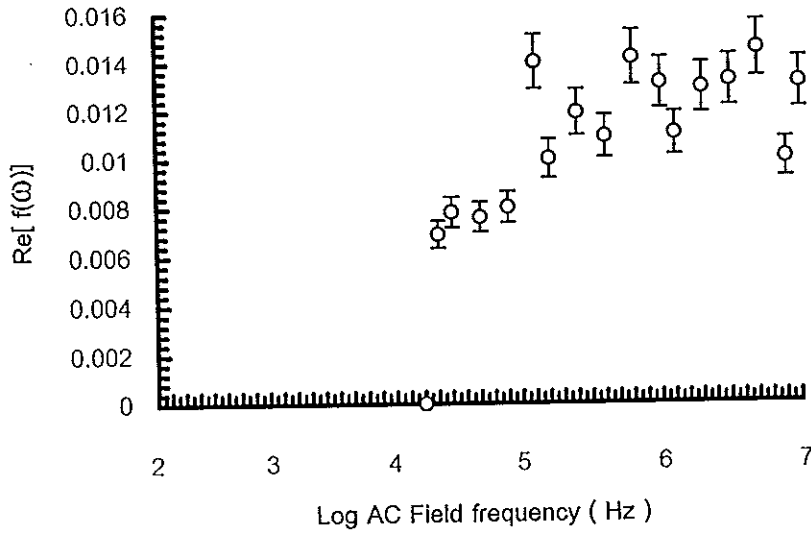
ภาพประกอบ 30 ไดอแกรมโทรฟอเรติกสเปกตรัมเฉลี่ยของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ของเซลล์ *Tetraselmis* sp. ที่แขวนลอยในสารละลายที่มี σ_s ต่างกัน

Dendrobium sp. , $\sigma_s = 1 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ $E = 13 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ $R \approx 40 \mu\text{m}$ และ $\eta = 1.347 \pm 0.03 \text{ mV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$



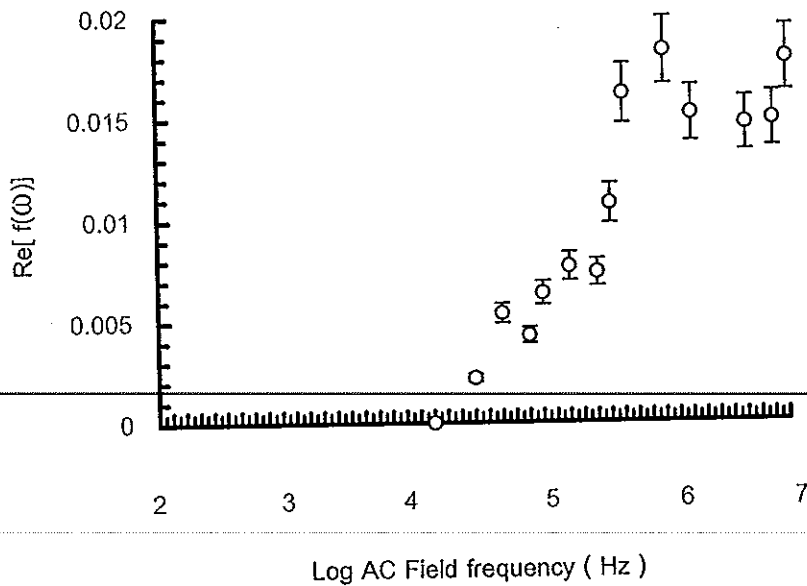
ภาพประกอบ 31 ก

Dendrobium sp. , $\sigma_s = 7 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ $E = 13 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ $R \approx 40 \mu\text{m}$ และ $\eta = 1347 \pm 0.03 \text{ mV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$



ภาพประกอบ 31 ข

Dendrobium sp. , $\sigma_s = 20 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ $E = 13 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ $R \approx 40 \mu\text{m}$ และ $\eta = 1347 \pm 0.03 \text{ mV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$



ภาพประกอบ 31 ค

ภาพประกอบ 31 ได้อิเล็กโทรฟอเรติกสเปกตรัมเฉลี่ยของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ของ *Dendrobium* sp. แขนงลอยในสารละลายที่มี σ_s ต่างกัน

4.7. ผลการประมวลค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์

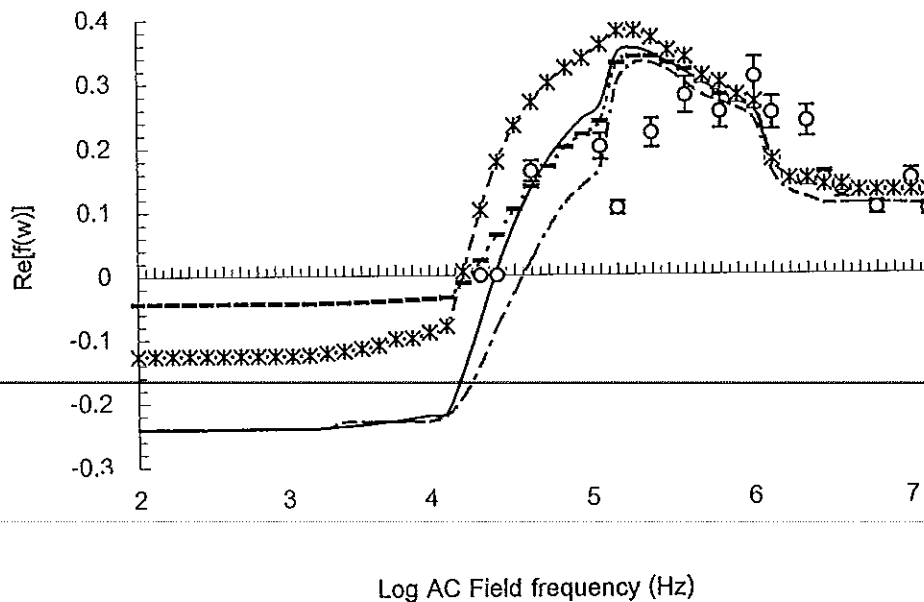
จากการปรับสเปกตรัมในหัวข้อ 3.8.2 ได้ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าดังนี้

ตาราง 8 ชุดเปรียบเทียบพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ *Chlorella* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 3 \text{ mS.m}^{-1}$ เมื่อทดลองเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าต่างๆ

δ nm	σ_c S.m ⁻¹	σ_s S.m ⁻¹	σ_m $\mu\text{S.m}^{-1}$	ϵ_c ϵ_0	ϵ_s ϵ_0	ϵ_m ϵ_0	R 10^{-6} m	Discrepancy %
30	0.01	0.003	80	117	80	100	1	46.1
50	0.01	0.003	80	117	80	100	1	34.6
50	0.01	0.003	200	117	80	100	1	33.1
50	0.01	0.003	80	100	80	100	1	40.5
50	0.01	0.003	80	117	80	70	1	35.3

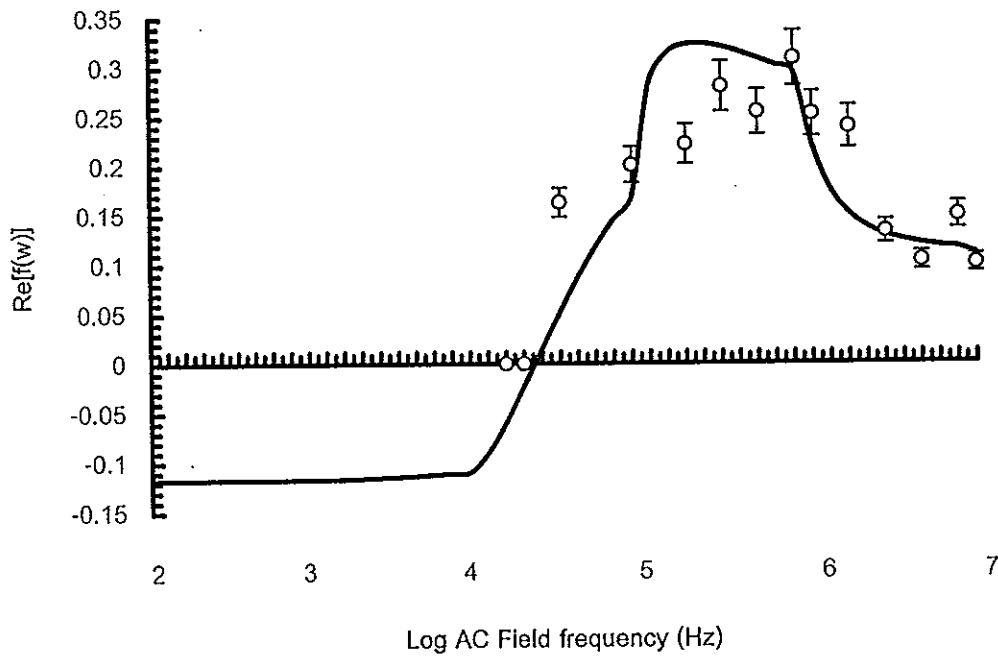
สัญลักษณ์ในกราฟ หมายถึง ได้เปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ใช้อักษรตัวหนา ส่วนพารามิเตอร์อื่นคงที่

**** - - - - - . - . - - - -



ภาพประกอบ 32 ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กโทรเฟอเดติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างผลการทดลองกับทฤษฎีที่ให้ความสอดคล้องมากที่สุดของเซลล์ *Chlorella* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 3 \text{ mS.m}^{-1}$

Chlorella sp. , $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$



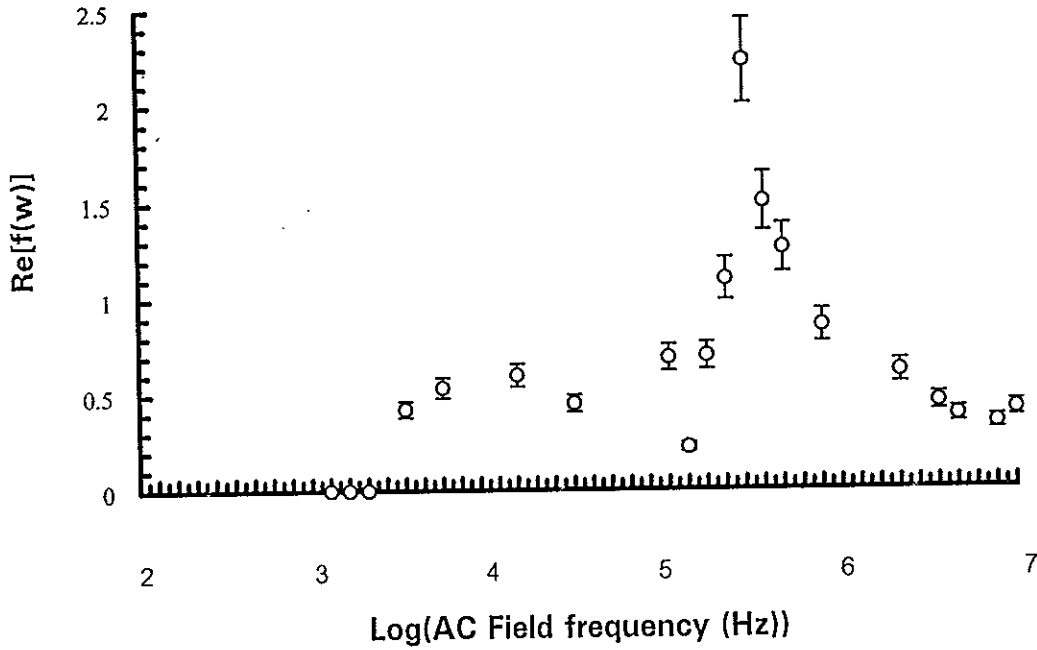
ภาพประกอบ 33 ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กทริกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ *Chlorella* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$

ตาราง 9 แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ *Chlorella* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$

Chlorella.sp.

δ	σ_c	σ_s	σ_m	ϵ_c	ϵ_s	ϵ_m	R	Discrepancy
nm	S.m^{-1}	S.m^{-1}	m S.m^{-1}	ϵ_0	ϵ_0	ϵ_0	10^{-6} m	%
34	0.017	0.006	0.2	110	80	100	1	19.9

สำหรับกรณี *Chlorella* sp. ใน 0.5 M ซูโครส สภาพนำไฟฟ้า 12 mS.m⁻¹ พบว่ารูปแบบสเปกตรัมมีค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ สูงสุดสองค่า (ที่ $f \approx 500\text{kHz}$ และ $f \approx 10\text{kHz}$) ดังภาพประกอบ 34 จึงไม่สามารถใช้แบบจำลอง SSM ปรับสเปกตรัม DEP ให้สอดคล้องและไม่สามารถทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้

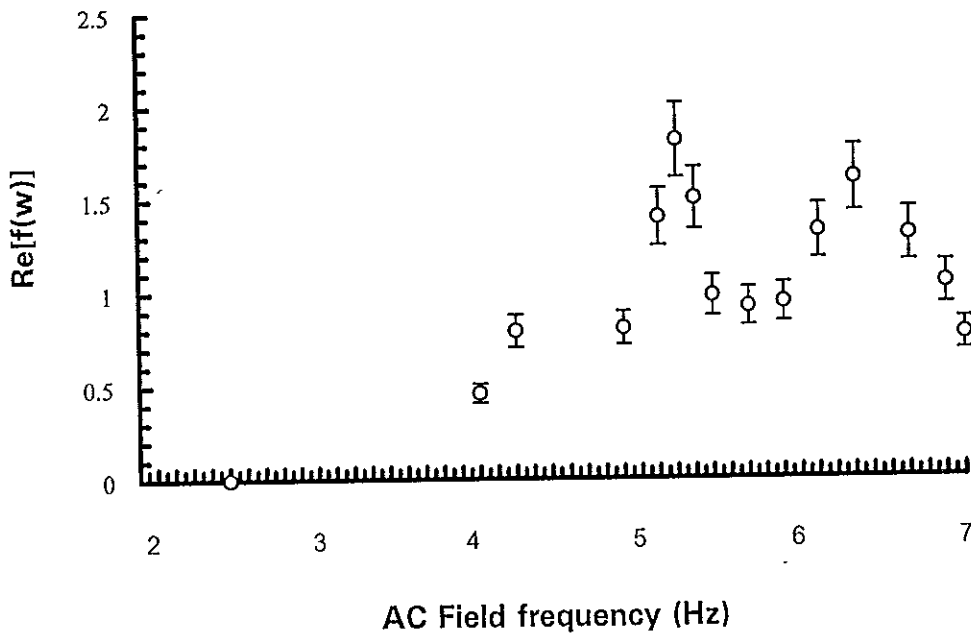


ภาพประกอบ 34 ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กโทรเฟอริคของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ *Chlorella* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 12 \text{ mS.m}^{-1}$

ตาราง 10 แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ *Chlorella* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 12 \text{ mS.m}^{-1}$

δ	σ_c	σ_s	σ_m	ϵ_c	ϵ_s	ϵ_m	R	Discrepancy
nm	S.m ⁻¹	S.m ⁻¹	m S.m ⁻¹	ϵ_0	ϵ_0	ϵ_0	10^{-6} m	%
		0.012			80		1.2	
ไม่สามารถทำการประมวลค่าพารามิเตอร์ด้วยแบบจำลอง SSM								

สำหรับกรณี *Chlorella* sp. ใน 0.5 M ซูโครส สภาพนำไฟฟ้า 24 mS.m^{-1} พบว่ารูปแบบสเปกตรัมมีค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ สูงสุดสองค่าคือที่ $f \approx 500 \text{ kHz}$ และ $f \approx 5 \text{ MHz}$ ดังภาพประกอบ 35 จึงไม่สามารถใช้แบบจำลอง SSM ปรับสเปกตรัม DEP ให้สอดคล้องตามได้

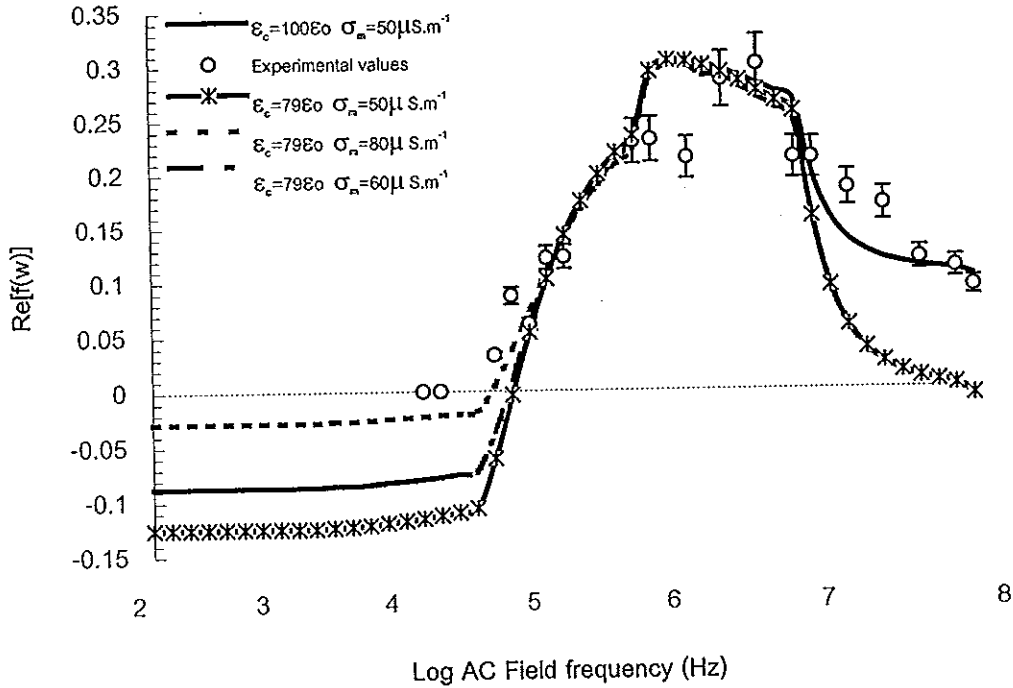


ภาพประกอบ 35 ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กโทรเฟอริกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ *Chlorella* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 24 \text{ mS.m}^{-1}$

ตาราง 11 แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ *Chlorella* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 24 \text{ mS.m}^{-1}$

δ	σ_c	σ_s	σ_m	ϵ_c	ϵ_s	ϵ_m	R	Discrepancy
nm	S.m^{-1}	S.m^{-1}	m S.m^{-1}	ϵ_0	ϵ_0	ϵ_0	10^{-6} m	%
		0.024			80		1.1	

Tetraselmis sp. ใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$

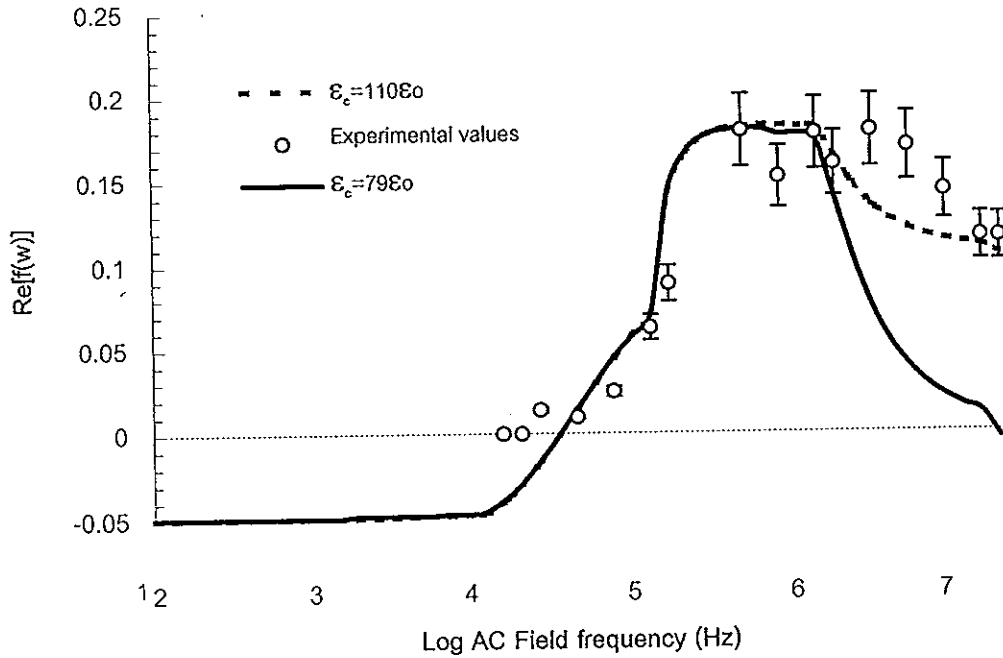


ภาพประกอบ 36 ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กทริกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ *Tetraselmis* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$

ตาราง 12 แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ *Tetraselmis* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$

δ	σ_c	σ_s	σ_m	ϵ_c	ϵ_s	ϵ_m	R	Discrepancy
nm	S.m^{-1}	S.m^{-1}	mS.m^{-1}	ϵ_0	ϵ_0	ϵ_0	10^{-6} m	%
50	0.015	0.006	0.05	110	80	40	5.568 ± 0.47	54

Tetraselmis sp. ใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 12 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$.

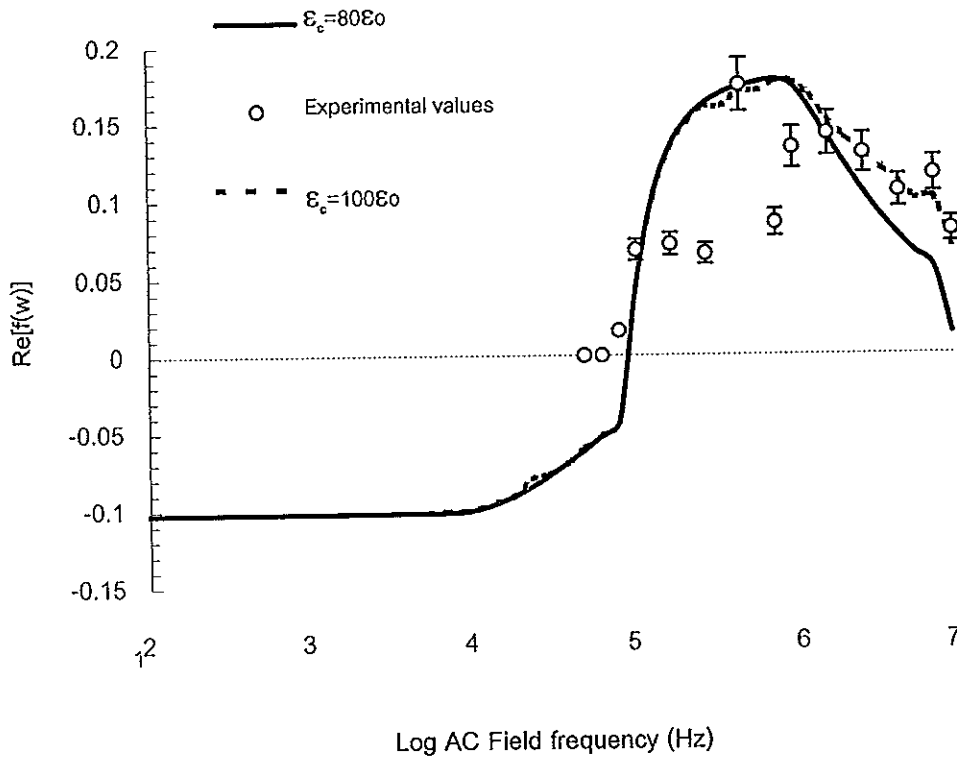


ภาพประกอบ 37 ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กโทรเฟรติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ *Tetraselmis* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 12 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$

ตาราง 13 แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ *Tetraselmis* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 12 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$

δ	σ_c	σ_s	σ_m	ϵ_c	ϵ_s	ϵ_m	R	Discrepancy
nm	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	$\text{m S} \cdot \text{m}^{-1}$	ϵ_0	ϵ_0	ϵ_0	10^{-6} m	%
21	0.021	0.012	0.08	79	80	22	5.38 ± 0.47	34

Tetraselmis sp. ใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 24 \text{ mS.m}^{-1}$

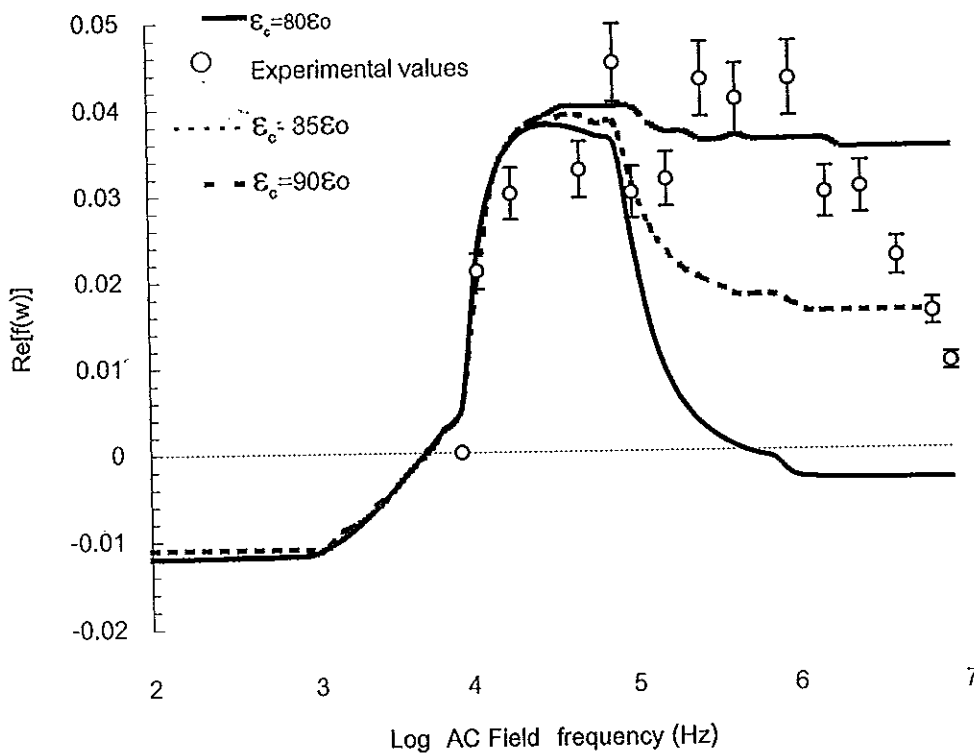


ภาพประกอบ 38 ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กทริกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ *Tetraselmis* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 24 \text{ mS.m}^{-1}$

ตาราง 14 แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์ *Tetraselmis* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M ซูโครส $\sigma_s = 24 \text{ mS.m}^{-1}$

δ	σ_c	σ_s	σ_m	ϵ_c	ϵ_s	ϵ_m	R	Discrepancy
nm	S.m^{-1}	S.m^{-1}	mS.m^{-1}	ϵ_0	ϵ_0	ϵ_0	10^{-6} m	%
18	0.042	0.024	0.089	80	80	14	6.00 ± 0.57	29.7

Dendrobium sp. ใน 0.5 M แมนนิทอล $\sigma_s = 1 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$

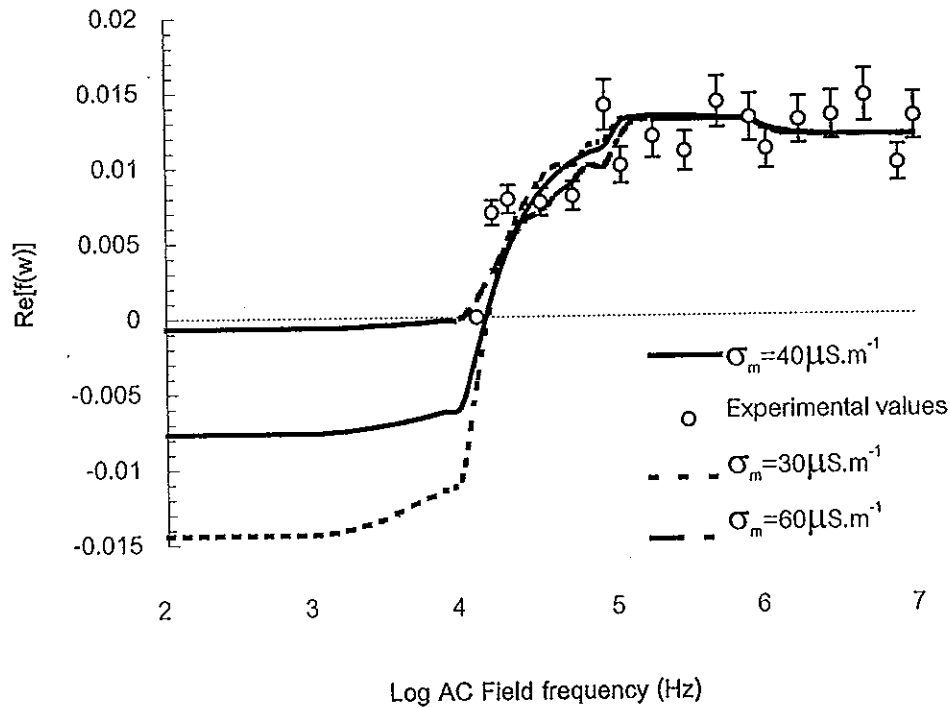


ภาพประกอบ 39 ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กโทรเวดิกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของ *Dendrobium* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M แมนนิทอล $\sigma_s = 1 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ เมื่อเปลี่ยน ϵ_c 3 ค่า

ตาราง 15 แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของ *Dendrobium* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M แมนนิทอล $\sigma_s = 1 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$

δ	σ_c	σ_s	σ_m	ϵ_c	ϵ_s	ϵ_m	R	Discrepancy
nm	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	$\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	ϵ_0	ϵ_0	ϵ_0	10^{-6} m	%
20	1.15	1	3	80	80	4	39 ± 0.47	70.1

Dendrobium sp. ใน 0.5 M แมนนีทอล $\sigma_s = 7 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$

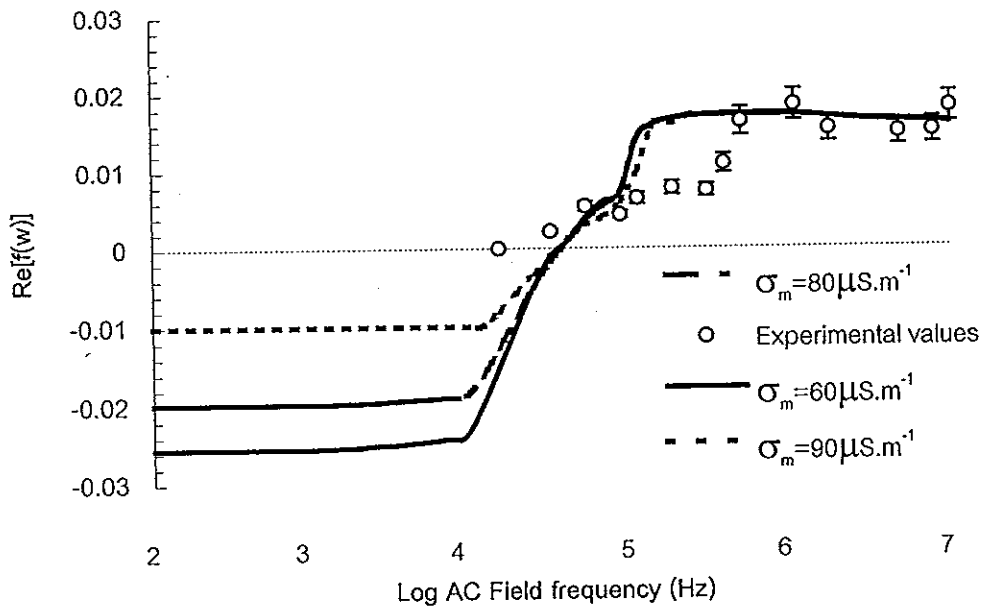


ภาพประกอบ 40 ผลการปรับสเปกตรัมไดอิเล็กโทรเฟติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของ *Dendrobium* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M แมนนีทอล $\sigma_s = 7 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ เมื่อเปลี่ยน σ_m 3 ค่า

ตาราง 16 แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของ *Dendrobium* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M แมนนีทอล $\sigma_s = 7 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$

δ	σ_c	σ_s	σ_m	ϵ_c	ϵ_s	ϵ_m	R	Discrepancy
nm	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	$\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	ϵ_0	ϵ_0	ϵ_0	10^{-6} m	%
15	7.3	7	40	83	80	22	41	18.9

Dendrobium sp. ใน 0.5 M แมนนีทอล $\sigma_s = 20 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$



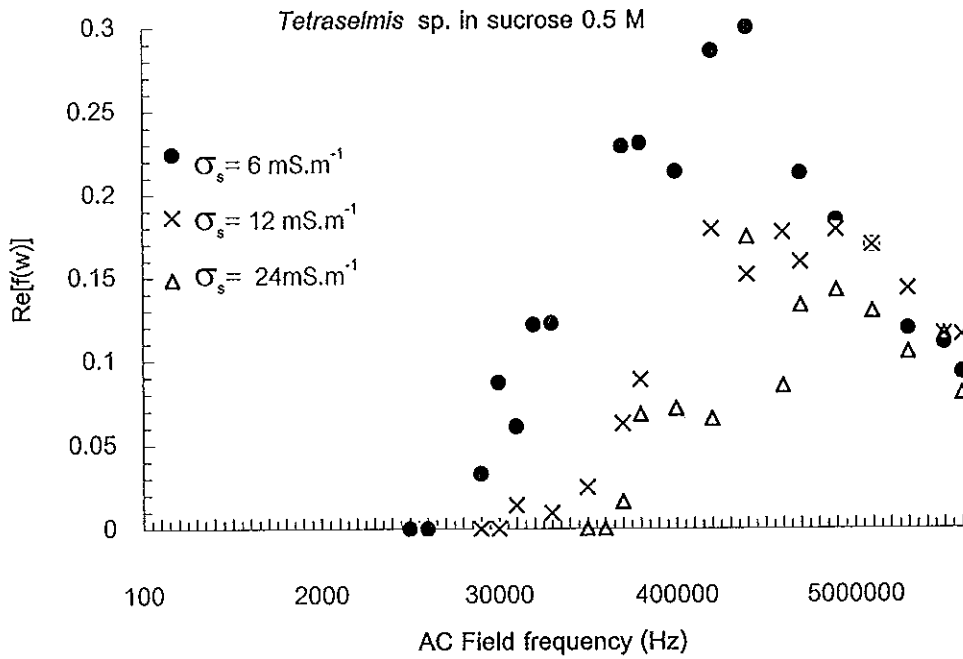
ภาพประกอบ 41 ผลการปรับสเปกตรัมไดโพลีกราฟเรดิคของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ระหว่างการทดลองกับทฤษฎีของ *Dendrobium* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M แมนนีทอล $\sigma_s = 20 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ เมื่อเปลี่ยน σ_m 3 ค่า

ตาราง 17 แสดงชุดพารามิเตอร์ไฟฟ้าของ *Dendrobium* sp. ที่แขวนลอยใน 0.5 M แมนนีทอล $\sigma_s = 20 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$

δ	σ_c	σ_s	σ_m	ϵ_c	ϵ_s	ϵ_m	R	Discrepancy
nm	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	$\mu\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	ϵ_0	ϵ_0	ϵ_0	10^{-6} m	%
15	21	20	80	84	80	22	37.5	54

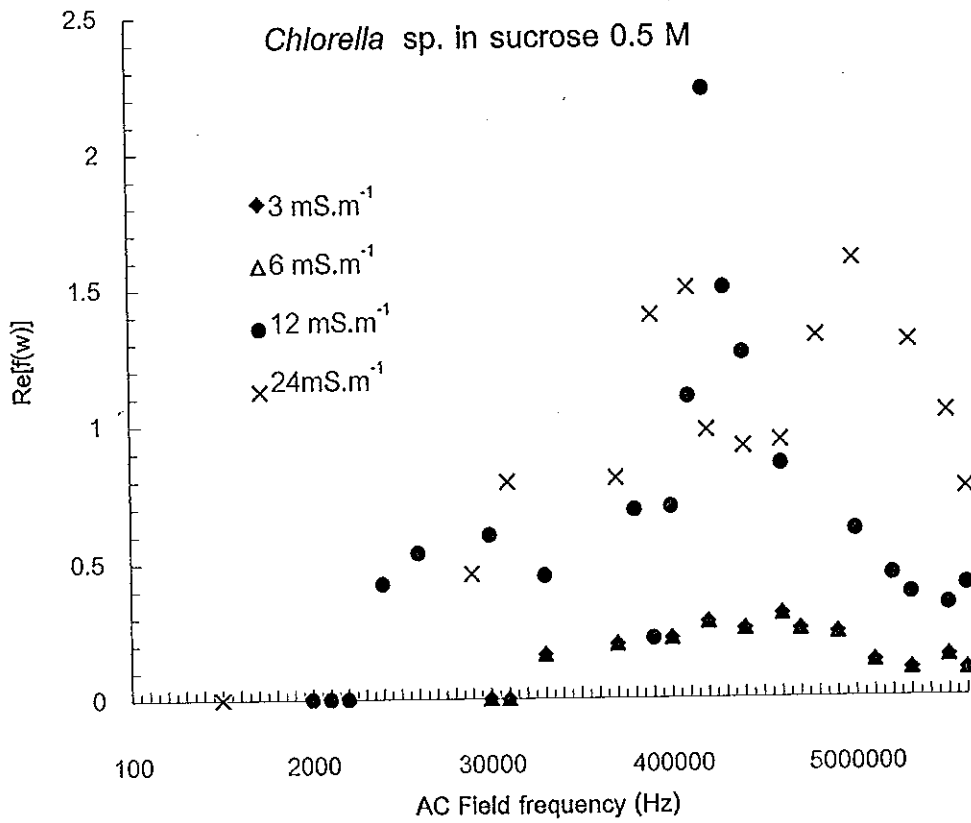
ตาราง 18 สรุปค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์ *Tetraselmis* sp. และ *Chlorella* sp.

cell	δ nm	σ_c S.m ⁻¹	σ_m mS.m ⁻¹	ϵ_c ϵ_0	ϵ_m ϵ_0
Chl.	20-34	0.010-0.017	0.08-0.20	110-117	100
Tet.	18-50	0.015-0.042	0.01-0.08	79 -110	14-40

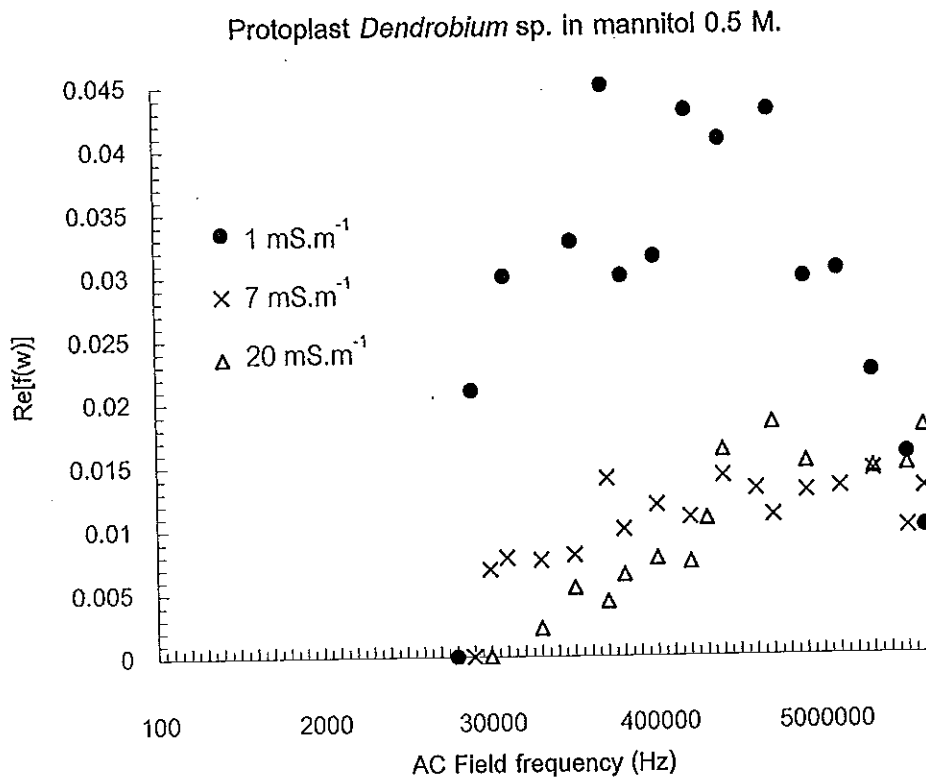


ภาพประกอบ 42 การเลื่อนของ f_0 ที่ให้ค่า $Re[f(\omega)]$ มีค่าเป็นศูนย์ของเซลล์

Tetraselmis sp. ทุกชุดการทดลองในสารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้า 3 ค่า



ภาพประกอบ 43 การเลื่อนของ f_0 ที่ให้ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ มีค่าเป็นศูนย์ของเซลล์
Chlorella sp. ทุกชุดการทดลองในสารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้า 3 ค่า



ภาพประกอบ 44 การเลื่อนของ f_0 ที่ให้ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ มีค่าเป็นศูนย์ของ *Dendrobium* sp. ทุกชุดการทดลองในสารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้า 3 ค่า

เมื่อพิจารณาแรงไดโพลโทรพอเรติกที่กระทำต่อเซลล์แต่ละชนิดขณะเคลื่อนที่แรงเข้าเกาะขั้วไฟฟ้าตามการทดลอง พบว่ามีค่าในระดับพิโคนิวตัน (10^{-12} N) กำหนดไว้แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 19 ตัวอย่างผลการคำนวณแรงไดโพลีโทรฟอเรติก ณ ตำแหน่ง z ต่างๆของเซลล์ *Tetraselmis* sp. ขณะเข้าเกาะขั้วไฟฟ้า ที่ความถี่ 15 MHz ความเข้มสนามไฟฟ้า 85 kV.m^{-1} $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$ และ $\text{Re}[f(w)] = 0.11$

ตำแหน่งที่	$z(\mu\text{m})$	$v(\mu\text{m.s}^{-1})$	$F_{DEP} (x10^{-12} \text{ N})$
z_1	22.5	2.68	1.54
z_2	27.5	5.38	1.96
z_3	32.5	14.30	2.43
z_4	37.5	22.19	2.98
z_5	42.5	30.42	3.63
z_6	47.5	34.90	4.39
z_7	52.5	40.48	5.31
z_8	62.5	46.10	7.90

และในทำนองเดียวกัน แรงไดโพลีโทรฟอเรติกของเซลล์ *Chlorella* sp. และ โพรโทพลาสต์กล้วยไม้ *Dendrobium* sp. เขียนสรุปไว้ดังตารางตามลำดับต่อไปนี้

ตาราง 20 ตัวอย่างผลการคำนวณแรงไดโพลีโทรฟอเรติก ณ ตำแหน่ง z ต่างๆของเซลล์ *Chlorella* sp. ขณะเข้าเกาะขั้วไฟฟ้า ที่ความถี่ 15 MHz ความเข้มสนามไฟฟ้า 116 kV.m^{-1} $\sigma_s = 6 \text{ mS.m}^{-1}$ และ $\text{Re}[f(w)] = 0.1$

ตำแหน่งที่	$z(\mu\text{m})$	$v(\mu\text{m.s}^{-1})$	$F_{DEP} (x10^{-12} \text{ N})$
z_1	21.0	1.104	0.028
z_2	24.5	1.107	0.034
z_3	28.0	1.17	0.041
z_4	31.5	1.50	0.049
z_5	35.0	1.98	0.058
z_6	38.5	2.40	0.068
z_7	42.0	2.79	0.080
z_8	45.5	3.12	0.094
z_9	49.0	3.41	0.012

ตาราง 21 ตัวอย่างผลการคำนวณแรงไดอิเล็กโตรโฟเรติก ณ ตำแหน่ง z ต่างๆของ
โพรโทพลาสต์กล้วยไม้ *Dendrobium* sp. ขณะเข้าเกาะขั้วไฟฟ้า ที่ความถี่
15 MHz ความเข้มสนามไฟฟ้า 13 kV.m^{-1} $\sigma_s = 7 \text{ mS.m}^{-1}$ และ $\text{Re}[f(\omega)] = 0.09$

ตำแหน่งที่	$z(\mu\text{m})$	$v(\mu\text{m.s}^{-1})$	$F_{DEP} (x10^{-12} \text{ N})$
z_1	90.0	1.406	4.325
z_2	105	5.475	5.689
z_3	120	15.02	7.515
z_4	135	24.55	10.05
z_5	150	34.02	13.72
z_6	165	43.37	19.29
z_7	195	49.92	43.68
z_8	225	53.80	136.35

ข้อมูล z ในตารางจากตาราง ได้จากการวัดตำแหน่งที่เซลล์เคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้างัด
ตัวอย่างภาพประกอบ 15

ผลการคำนวณในตารางจะสังเกตเห็นว่า แรงไดอิเล็กโตรโฟเรติกจะมีค่าเพิ่มขึ้นถ้าเซลล์
อยู่ใกล้ขั้วไฟฟ้ายิ่งขึ้น ทำให้เซลล์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง
หาความเร็ว เซลล์ที่มีขนาดต่างกันย่อมมีแรงไดอิเล็กโตรโฟเรติกขนาดต่างกัน แต่เซลล์คนละ
ชนิดที่มีขนาดเดียวกันไม่จำเป็นต้องมีแรงไดอิเล็กโตรโฟเรติกมากกระทำในปริมาณที่เท่ากัน ทั้งนี้
ขึ้นกับเทอม $\text{Re}[f(\omega)]$

สรุปผลการประมาณค่าพารามิเตอร์พบว่า เซลล์เดี่ยวพืชน้ำเค็ม *Tetraselmis* sp. ที่มีอายุ
3 วัน ในห้องปฏิบัติการ มีค่าความหนาของผนังเซลล์ระหว่าง 18 nm ถึง 50 nm มีสภาพนำ
ไฟฟ้าของไซโตพลาสซึมมีค่าอยู่ในช่วง 0.015 S.m^{-1} ถึง 0.042 S.m^{-1} สภาพนำไฟฟ้าของผนัง
เซลล์ มีค่า 0.01 ถึง 0.08 mS.m^{-1} สภาพยอมของไซโตพลาสซึมมีค่าอยู่ในช่วง 79 ถึง 110
เท่าของสภาพยอมสุญญากาศ สภาพยอมของผนังเซลล์ มีค่า 14 ถึง 40 เท่าของสภาพยอม
สุญญากาศ

สำหรับเซลล์ *Chlorella* sp. ที่มีอายุ 3 วันในห้องปฏิบัติการ พบว่า ชุดการทดลองที่มีสภาพนำไฟฟ้า 3 mS.m^{-1} และ 6 mS.m^{-1} สามารถทำการประมาณค่าความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ได้ค่า 20 nm และ 34 nm ตามลำดับ สภาพนำไฟฟ้าของไซโตพลาสซึมมีค่าอยู่ในช่วง 10 mS.m^{-1} ถึง 17 mS.m^{-1} สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ มีค่า 0.08 mS.m^{-1} ถึง 0.2 mS.m^{-1} สภาพยอมของไซโตพลาสซึมมีค่าอยู่ในช่วง 110 ถึง 117 เท่าของสภาพยอมสุญญากาศ สภาพยอมของเยื่อหุ้มเซลล์มีค่า 100 เท่าของสภาพยอมสุญญากาศ

สำหรับผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์ *Dendrobium* sp. พบว่า ค่าความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ มีค่า 15 nm ถึง 20 nm สภาพนำไฟฟ้าของไซโตพลาสซึมมีค่าอยู่ในช่วง 1.15 mS.m^{-1} ถึง 21 mS.m^{-1} สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ มีค่า $3 \text{ }\mu\text{S.m}^{-1}$ ถึง $80 \text{ }\mu\text{S.m}^{-1}$ สภาพยอมของไซโตพลาสซึมมีค่าอยู่ในช่วง 80 ถึง 84 เท่าของสภาพยอมสุญญากาศ สภาพยอมของเยื่อหุ้มเซลล์ มีค่าอยู่ในช่วง 4 ถึง 22 เท่าของสภาพยอมสุญญากาศ

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

สมการแรงไดอิเล็กโทรโฟเรติก (สมการที่ 13) ซึ่งให้เห็นว่า รัศมีเซลล์และความเข้มข้นสนามไฟฟ้ามีผลต่อการเกิดไดอิเล็กโทรโฟเรซิส สอดคล้องกับผลการทดลองกล่าวคือ เซลล์ *Chlorella* sp. ที่มีรัศมีเซลล์ประมาณ $1 \mu\text{m}$ และเซลล์ *Tetraselmis* sp. ที่มีรัศมีเซลล์ประมาณ $5 \mu\text{m}$ เกิดไดอิเล็กโทรโฟเรซิสในสนามที่มีความเข้มข้นในช่วง $85 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1} - 116 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ แต่สำหรับโพรทอพลาสต์ *Dendrobium* sp. ที่มีรัศมีเซลล์ประมาณ $40 \mu\text{m}$ จะเกิดไดอิเล็กโทรโฟเรซิสในสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มข้น $13 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ จึงตั้งข้อสังเกตว่า เซลล์จะเกิดไดอิเล็กโทรโฟเรซิสได้ต้องอาศัยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นที่สูงเหมาะสม เซลล์เล็กต้องอาศัยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นสูงกว่าเซลล์ใหญ่ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ยังไม่อาจสรุปได้ว่า รัศมีเซลล์และความเข้มข้นสนามไฟฟ้าเท่านั้นที่มีผลต่อการเกิดไดอิเล็กโทรโฟเรซิส ทั้งนี้เพราะ แรงไดอิเล็กโทรโฟเรติกยังมีค่าขึ้นกับเทอม $\text{Re}[f(\omega)]$ ซึ่งขึ้นกับสภาพยอมและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์

ภายใต้สมมติฐานว่า แรงไดอิเล็กโทรโฟเรติกที่กระทำให้เซลล์ทั้ง 3 ชนิด เคลื่อนที่ในสารละลายเข้าเกาะขั้วไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแรงลากของวัตถุทรงกลมตามกฎของสโตกส์ โดยที่แรงทั้งสองกระทำกับเซลล์ในทิศตรงกันข้ามตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่หนึ่งของนิวตัน ในเชิงทฤษฎีทำให้ทราบว่า ความเร็วของเซลล์มีค่าขึ้นกับเทอมต่างๆในสมการที่ 24 (บทที่ 2) มีเพียงสองเทอมเท่านั้นที่มีค่าได้ทั้งบวกและลบนั่นคือเทอม $\nabla(\bar{E}^2)$ และเทอม $\text{Re}[f(\omega)]$ จึงได้ข้อสรุปว่า ทิศทางการเคลื่อนที่ของเซลล์ขึ้นกับสองเทอมดังกล่าว แต่ขนาดของความเร็วมีค่าขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง อาทิ ϵ_s , R และ η เป็นต้น นอกจากนี้ ผลการวัดความเร็วของเซลล์ทั้ง 3 ชนิด ซึ่งให้เห็นว่า เซลล์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเข้าเกาะขั้วไฟฟ้าน่าจะเป็นผลจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ไม่เอกรูป โดยที่แนวโน้มของความเร็วมีความสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างเทอม

$\nabla(\bar{E}^2)$ กับระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้าตามสมการที่ 26 ซึ่งแปลความหมายของสมการได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นไฟฟ้ายกกำลังสองที่เกี่ยวกับระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้า ฉะนั้น เซลล์จึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้ขั้วไฟฟ้า สมเหตุสมผลกับความเร็วตามสมการ 24 แต่ยังเป็นที่ยสงสัยว่า การใช้กฎของสโตกส์สำหรับวัตถุทรงกลมประยุกต์ใช้กับเซลล์ทรงรีแบบ *Tetraselmis* sp. จะมีผลต่อการวิเคราะห์ความเร็วหรือไม่อย่างไร ซึ่งน่าจะทำการวิจัยต่อไปในอนาคต

เป็นที่สังเกตว่าพารามิเตอร์แต่ละตัวตามแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเลือกหนึ่งชั้น ได้แก่ σ_m , σ_s , σ_c , ϵ_m , ϵ_s , ϵ_c , δ และ R ส่งผลต่อไดอิเล็กโทรโฟเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ในลักษณะเหมือนกัน 2 ประการคือ มีผลต่อขนาดและมีผลต่อขอบเขตช่วงความ

ถี่ของไดโพลโทรโพเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ อีกทั้งยังเป็นที่ตั้งข้อสังเกตได้ว่าพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ ชุดของพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อไดโพลโทรโพเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่บริเวณความถี่ย่านต่ำ ได้แก่ σ_s , σ_m , ε_m , R และ δ และชุดของพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อไดโพลโทรโพเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่บริเวณความถี่ย่านสูง ได้แก่ σ_c , ε_c และ ε_s (ดูภาพประกอบ 16 ถึง 23) นอกจากนี้ยังพบว่าในกรณีที่ σ_c มีค่าอยู่ในระดับที่น้อย ๆ (ประมาณ $mS.m^{-1}$) และ σ_m มีค่าที่สูง (มากกว่า $\mu S.m^{-1}$) σ_c , ε_s และ ε_m จะมีผลกระทบต่อขนาดของไดโพลโทรโพเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่ความถี่ย่านกลาง (ดูภาพประกอบ 17 20 และ 22) อย่างเห็นได้ชัด แต่ในขณะที่ σ_c และ σ_m มีค่าอยู่ในระดับประมาณ $0.1 S.m^{-1}$ และ $\mu S.m^{-1}$ พารามิเตอร์เหล่านี้แทบจะไม่มีผลกระทบต่อขนาดของไดโพลโทรโพเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่ความถี่ย่านกลางเลย

จากข้อมูลทำให้ทราบว่า σ_c ของ *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp. มีค่าน้อยกว่าของเซลล์พืชน้ำจืดโดยทั่วไป สำหรับ σ_m มีค่าอยู่ในระดับที่สูงกว่า $\mu S.m^{-1}$ ซึ่งสูงกว่าของเยื่อหุ้มเซลล์พืชทั่วไป (เยื่อหุ้มเซลล์โดยทั่วไปมีค่าในระดับ $0.1 - 1 \mu S.m^{-1}$) แต่ ε_c และ ε_m มีค่าสูงผิดปกติ สำหรับ δ มีค่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (ดูตาราง 22 ประกอบ) จึงนำไปสู่คำถามที่สำคัญคือ ทำไมพารามิเตอร์ σ_c , ε_c และ ε_m ของเซลล์สองชนิดนี้จึงมีค่าแตกต่างจากเซลล์พืชทั่วไป ผู้วิจัยมีความเห็นว่า มีความเป็นไปได้สองประการคือ หนึ่ง สภาพแวดล้อมที่เซลล์อาศัยอยู่คือน้ำทะเลน่าจะมามีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของผนังเซลล์และไซโทพลาสซึม จึงทำให้พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าสำหรับองค์ประกอบเหล่านี้มีความแตกต่างจากเซลล์พืชน้ำจืด และ สอง อาจเกิดจากความไม่เหมาะสมของการนำแบบจำลอง SSM มาประยุกต์ใช้กับเซลล์พืชทั้งสอง

เมื่อเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แพลงก์ตอนทั้งสองชนิดนี้ พบว่าพารามิเตอร์โดยส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน (ดูตาราง 18 ประกอบ) ยกเว้นค่า ε_m ที่ต่างกัน ในเบื้องต้นจึงสันนิษฐานว่าผนังเซลล์ของเซลล์ทั้งสองน่าจะมามีอิทธิพลต่อการประมาณค่าสภาพยอมของเยื่อหุ้มเซลล์ และสันนิษฐานว่าผนังเซลล์ของเซลล์ทั้งสองมีองค์ประกอบที่ต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งองค์ประกอบของผนังเซลล์ของ *Chlorella* sp. น่าจะมีสารที่มีความเป็นฉนวนสูงเป็นองค์ประกอบหลัก

เป็นที่น่าสังเกตว่า ชุดการทดลองของ *Chlorella* sp. ที่แขวนลอยสารละลายซูโครสที่มี σ_s เท่ากับ $12 S.m^{-1}$ และ $24 S.m^{-1}$ มีรูปแบบไดโพลโทรโพเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่มีลักษณะเฉพาะ กล่าวคือ ปรากฏค่าสูงสุดของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่เด่นชัดที่ความถี่สนามไฟฟ้า 500 kHz และที่ 5 MHz (ดูภาพประกอบ 29 ค และ ง) ผู้ทำการวิจัยตั้งข้อสังเกตว่าที่ σ_s สูงๆจำนวนของยอดสเปกตรัมน่าจะแสดงถึงพฤติกรรมการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของชั้นผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ Asami, et al., 1996 ทดลองในเซลล์น้ำเหลืองและโพรโทพลาสต์พืช ที่ชี้ให้เห็นว่า จำนวนชั้นของไดโพลทริกที่ห่อหุ้มเซลล์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า

ของไดโพลีทริกที่เรียกว่าไดโพลีทริกดิสเพอซันในลักษณะเป็นชั้นบันได ซึ่งอาจเป็นเพราะผลกระทบของรอยต่อชั้นไดโพลีทริกต่างชนิดดังกล่าว

สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์กล้วยไม้ *Dendrobium* sp. พบว่า σ_c มีค่าน้อยกว่าของเซลล์พืชบกโดยทั่วไป สำหรับ ϵ_c และ ϵ_m มีค่าค่อนข้างสูง ส่วน δ มีค่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (ดูตาราง 22 ประกอบ)

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการเพิ่ม σ_s ต่อไดโพลีทริกฟอเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ของเซลล์แต่ละชนิด พบว่า สำหรับชุดการทดลองของ *Tetraselmis* sp. และ โพรโทพลาสต์ *Dendrobium* sp. จะส่งผลให้ f_0 (ขอบเขตของช่วงความถี่ย่านต่ำที่ให้ $\text{Re}[f(\omega)]$ มีค่าเป็นบวก) เปลี่ยนค่าไปที่ความถี่สูงขึ้นแต่ไม่ส่งผลต่อขอบเขตช่วงความถี่ย่านสูงของสเปกตรัม (f_∞) ทำให้ขอบเขตช่วงความถี่ไดโพลีทริกฟอเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่ให้ค่าเป็นบวกมีช่วงแคบลง นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดของ $\text{Re}[f(\omega)]$ มีค่าลดลง แต่สำหรับชุดการทดลองของ *Chlorella* sp. กลับเป็นไปในทางตรงข้ามกล่าวคือ เปลี่ยนค่าไปที่ความถี่ต่ำลง แต่ไม่ส่งผลต่อขอบเขตช่วงความถี่ย่านสูงของสเปกตรัม (f_∞) ทำให้ขอบเขตช่วงความถี่ไดโพลีทริกฟอเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่ให้ค่าเป็นบวกมีช่วงกว้างขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดของ $\text{Re}[f(\omega)]$ กลับมีค่าเพิ่มขึ้น จึงเป็นที่สงสัยว่า ทำไมแนวโน้มของไดโพลีทริกฟอเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ของ *Chlorella* sp. จึงสวนทางกับทฤษฎีแบบจำลอง SSM ทั้งนี้อาจเป็นเพราะจำนวนชั้นของผนังเซลล์น่าจะมีผลกระทบก็เป็นได้

ผู้วิจัยตั้งข้อสมมติฐานของผลกระทบของ σ_s ต่อไดโพลีทริกฟอเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ไว้ว่า สนามไฟฟ้าภายนอกที่แพร่ผ่านจากตัวกลางสารละลายภายนอกเซลล์เข้าสู่ภายในเซลล์ได้ย่อมหมายถึงภายในเซลล์ย่อมมีโอกาสเกิดการโพลาริซชัน แต่เนื่องจากคุณลักษณะเด่นของความเป็นวัสดุไดโพลีทริกของเซลล์คือการมีสภาพนำไฟฟ้าที่น้อย เมื่อเซลล์ถูกแขวนลอยในสารละลายตัวกลางที่มี σ_s สูงกว่า σ_c สนามไฟฟ้าจะไม่แพร่ผ่านเข้าสู่เซลล์ (หรือแพร่ผ่านเข้าสู่เซลล์น้อย) เพราะเนื่องจากธรรมชาติของสนามไฟฟ้า (หรือกระแสไฟฟ้า) จะเลือกไหลและแพร่ผ่านเข้าสู่บริเวณของตัวกลางที่มีความต้านทานต่ำกว่าซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่า เพื่ออนุรักษ์พลังงานในการถ่ายเทพลังงานระหว่างประจุในการนำพาสนามไฟฟ้าให้มีความต่อเนื่อง ดังนั้นด้วยเหตุนี้ ในกรณีนี้ เซลล์จะเกิดอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าได้น้อย ผลคือ ไดโพลีทริกมีขนาดน้อย ทำให้ช่วงความถี่ที่ให้ค่าไดโพลีทริกฟอเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ มีค่าบวกแคบและมีขนาดน้อยลง

สำหรับในกรณีที่สารละลายภายนอกเซลล์มี σ_s ต่ำกว่า σ_c ผลลัพธ์จะเป็นในทางกลับกันคือ เซลล์เกิดอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าได้มากขึ้นและทำให้ช่วงความถี่ที่ให้ค่าไดโพลีทริกฟอเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ เป็นบวกกว้างขึ้นและมีขนาดมากขึ้น เป็นที่สังเกตว่า σ_s จะมีผลต่อไดโพลีทริกฟอเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ เฉพาะช่วงความถี่ย่านต่ำเท่านั้น ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะ ที่ความถี่ย่านต่ำ พลังงานของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงกว่ากรณีสนามไฟฟ้าที่ความถี่

สูง ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างอันตรกิริยาของเซลล์กับสนามไฟฟ้าและกับ σ_s จึงน่าจะมีผลเด่นชัดต่อไดโพลโทรฟอเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่ความถี่สนามไฟฟ้าย่านต่ำ

เป็นที่น่าสังเกตว่าอัตราส่วนระหว่าง $\frac{\sigma_c}{\sigma_s}$ ของพารามิเตอร์ที่ประมาณได้จากโพโรโท-

พลาสต์ทั้ง 3 ชุดการทดลอง มีค่าประมาณ 1 เท่า สำหรับ *Tetraselmis* sp. ทุกชุดการทดลอง มีค่าประมาณ 2 เท่า และสำหรับ *Chlorella* sp. มีค่าประมาณ 3 เท่า นั้นหมายความว่า σ_s และ σ_c ที่กล่าวมามีค่าใกล้เคียงกัน จึงยังเป็นที่กลางแคลงใจ เนื่องจากมีค่าต่างจากงานวิจัยอื่นมาก ซึ่งมีค่าในระดับที่มากกว่า 100 เท่า (ดูตาราง 22 ประกอบ) หากพิจารณาค่าสูงสุดของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่วิเคราะห์ได้จากการทดลองของเซลล์ทั้ง 3 ชนิดพบว่ามีค่าต่างกันคือ สำหรับเซลล์ *Chlorella* sp. พบว่ามีค่าประมาณ 0.30 กรณีทดลองในสารละลายซูโครสที่มี $\sigma_s = 3 \text{ mS.m}^{-1}$ และ 6 mS.m^{-1} และมีค่า 2.50 ในกรณี $\sigma_s = 12 \text{ mS.m}^{-1}$ และ 24 mS.m^{-1} สำหรับ *Tetraselmis* sp. มีค่า 0.30 และสำหรับ *Dendrobium* sp. มีค่า 0.050 ค่าเหล่านี้ให้ผลสอดคล้องกับสมมติฐานของอัตราส่วนระหว่างสภาพนำไฟฟ้าภายในและภายนอกของเซลล์ทั้ง 3 ชนิด นั่นคือ

$\text{Re}[f(\omega)]$ ของ *Chlorella* sp. > $\text{Re}[f(\omega)]$ ของ *Tetraselmis* sp. > $\text{Re}[f(\omega)]$ ของ

Dendrobium sp เมื่อ $\frac{\sigma_c}{\sigma_s}$ ของเซลล์แต่ละชนิดมีค่า 3 เท่า 2 เท่า และ 1 เท่าตามลำดับ แต่ยังคง

เป็นที่สงสัยเกี่ยวกับ σ_c ที่ค่อนข้างต่ำ อาจเป็นเพราะความไม่เหมาะสมของแบบจำลอง SSM ที่นำมาประยุกต์ใช้กับ *Chlorella* sp. ซึ่งมีผนังเซลล์หลายชั้น รวมทั้งกับเซลล์ทรงรี *Tetraselmis* sp. จึงไม่สอดคล้องตามแบบจำลอง และสำหรับโพโรโทพลาสต์ *Dendrobium* sp. ซึ่งมีลักษณะที่สอดคล้องตามแบบจำลองมากที่สุดแต่มี 3 พารามิเตอร์ที่แตกต่างจากกลุ่มวิจัยอื่นนั่นคือ $\sigma_c, \varepsilon_c, \varepsilon_m$ ผู้วิจัยตั้งข้อสังเกตว่า โพโรโทพลาสต์อาจมีองค์ประกอบอื่นที่ยังไม่ได้รวมเข้าไว้ในแบบจำลอง อาทิ แวกิวโอล ตามที่ Asami, et al., 1996 ได้รายงานไว้

อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาแนวโน้มของไดโพลโทรฟอเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ของเซลล์ทั้งสาม มีลักษณะคล้ายกันกล่าวคือ ขนาดสเปกตรัมที่ให้ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ แบบบวกจะมีค่าสูงสุดที่ช่วงความถี่ย่านกลางเท่านั้นและมีค่าลดลงที่ช่วงความถี่ย่านต่ำและสูง สอดคล้องตามแบบจำลอง SSM

ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าแต่ละตัวของเซลล์ทั้งสามชนิดมีความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกันคือ

1. σ_c มีค่ามากกว่า σ_s
2. σ_m มีค่าน้อยกว่า σ_c มากๆ และมีค่าน้อยกว่า σ_s
3. ε_m มีค่าน้อยกว่า ε_c และ ε_c ควรมีค่าน้อยกว่า ε_s ทั้งนี้อาจเนื่องจาก เยื่อหุ้มเซลล์มีองค์ประกอบของน้ำที่น้อยกว่าของไซโตพลาซึมจึงมีความเป็นฉนวนที่สูงกว่า แต่ก็ยังมีค่าน้อยกว่าของสารละลายภายนอกเซลล์ซึ่งมีน้ำเป็นตัวทำละลาย

4. ความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์, δ , โดยปกติควรมีค่าอยู่ในระดับ 7.5-10 นาโนเมตร (William, 1977) หากรวมความหนาของเปลือกเซลล์ด้วย ค่า δ อาจมีค่ามากกว่านี้ แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาขีดจำกัดของการสมมติค่าตามอัตราส่วนระหว่าง δ/R ต้องมีค่าไม่เกิน 10^{-3} (เพื่อความสอดคล้องในเชิงทฤษฎี ดูภาคผนวก 3)

เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้ได้อาศัยข้อมูลการวัดความเร็วแบบบวมที่เซลล์เคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้าประมาณค่า σ_c , ε_m และ ε_c ได้เท่านั้น แต่สำหรับการประมาณค่า σ_m จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลการวัดความเร็วแบบลบประกอบ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ทั้งสามค่า σ_c , ε_m และ ε_c ที่ประมาณได้ ย่อมมีความเป็นไปได้ที่สูงกว่าค่าประมาณ σ_m แต่ถึงอย่างไรก็ตามจากการทดลองเปลี่ยนค่า σ_m (ในเชิงทฤษฎี) พบว่า ค่า σ_m มีความไวที่สูงมากต่อการเปลี่ยนค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ แบบลบ ที่ความถี่ไฟฟ้าย่านต่ำ ดังนั้นถึงแม้ว่าจะไม่มีข้อมูลของความเร็วแบบลบ ก็พอจะอนุมานได้ว่า ค่า σ_m ที่ประมาณได้มีค่าอยู่ในช่วงที่พอจะยอมรับได้และมีความเป็นไปได้ที่ค่อนข้างสูง (ดูภาพประกอบ 32 36 40 และ 41)

สรุปผล

จากวัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์นี้คือ

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์เดี่ยว ได้ข้อสรุปว่าวิธีการไดอิเล็กทริกโพเรติกโดยอาศัยแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกหนึ่งชั้น (A Spherical Single Shell Model, SSM) ใช้ทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ σ_m , ϵ_m , ϵ_c , σ_c และ δ ได้เป็นช่วง และสันนิษฐานว่าค่า σ_m , ϵ_m และ δ ตามแบบจำลองดังกล่าวน่าจะเป็นค่ารวมของเยื่อหุ้มเซลล์กับของผนังเซลล์สำหรับเซลล์แพลงก์ตอน *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp. จึงทำให้ค่าที่ได้แตกต่างจากงานวิจัยอื่น แต่สำหรับ *Dendrobium* sp. ค่าทั้งสามนี้เป็นค่าของเยื่อหุ้มเซลล์โดยตรง ผลการประมาณค่า 5 พารามิเตอร์เหล่านี้มีค่าเป็นไปได้ต่างๆ กันดังนี้

ตาราง 23 สรุปผลการประมาณค่า 5 พารามิเตอร์ σ_m , ϵ_m , ϵ_c , σ_c และ δ ของเซลล์ทั้ง 3 ชนิด

พารามิเตอร์	<i>Chlorella</i> sp.	<i>Tetraselmis</i> sp.	<i>Dendrobium</i> sp.	หน่วย
σ_m	80 - 200	10 - 80	3 - 80	$\mu S . m^{-1}$
σ_c	<u>11 - 17</u>	<u>15 - 42</u>	<u>1 - 21</u>	$mS . m^{-1}$
ϵ_m	<u>100</u> ϵ_0	14 ϵ_0 - <u>40</u> ϵ_0	4 ϵ_0 - <u>22</u> ϵ_0	
ϵ_c	<u>110</u> ϵ_0 - <u>117</u> ϵ_0	79 ϵ_0 - <u>110</u> ϵ_0	80 ϵ_0 - 84 ϵ_0	
δ	20 - 34	18 - 50	10 - 15	nm

เมื่อ ϵ_0 คือสภาพยอมของสุญญากาศ มีค่า $8.85 \times 10^{-12} F . m^{-1}$

ค่าพารามิเตอร์ที่ต่างจากงานวิจัยอื่นคือ 1) σ_c ของเซลล์ทั้ง 3 ชนิด เนื่องจากมีค่าน้อยผิดปกติ 2) ϵ_m ของ *Chlorella* sp. มีค่ามากผิดปกติ และ 3) ϵ_c ของ *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp. มีค่ามากผิดปกติ

ความแตกต่างของสมบัติทางไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์เดี่ยวทั้ง 3 บ่งบอกจากพารามิเตอร์ σ_m และ ϵ_m ซึ่งมีค่าต่างๆ กันกล่าวคือ σ_m และ ϵ_m ของเซลล์ *Chlorella* sp. มีค่ามากกว่าของ *Tetraselmis* sp. ส่วน σ_m และ ϵ_m ของ *Tetraselmis* sp. มีค่าใกล้เคียงกับ *Dendrobium* sp. แสดงว่า เยื่อหุ้มเซลล์ของ *Chlorella* sp. มีความเป็นไดอิเล็กทริกที่สูงกว่าเซลล์อีกสองชนิดมาก และสูงมากเมื่อเทียบกับเซลล์พืชทั่วไป และเมื่อพิจารณาความแตกต่างของคุณสมบัติไดอิเล็กทริกระหว่างเซลล์แพลงก์ตอนกับโพรโทพลาสต์ *Dendrobium* sp. พบว่ามีพารามิเตอร์เพียงตัวเดียว ที่พอจะบอกความแตกต่างได้นั้นคือ ϵ_c ทั้งนี้เนื่องจาก ϵ_c ของ

Chlorella sp. และ *Tetraselmis* sp. ($80 \text{ } \epsilon_0 - 117 \text{ } \epsilon_0$) มีค่าค่อนข้างสูงกว่าของ *Dendrobium* sp. ($80 \text{ } \epsilon_0 - 84 \text{ } \epsilon_0$)

2. ผลของความเข้มข้นไฟฟ้าต่อการเกิดไดอิเล็กโทรโพเรซิส ได้ข้อสรุปว่า

รัศมีเซลล์และความเข้มข้นไฟฟ้ามีผลต่อการเกิดไดอิเล็กโทรโพเรซิส กล่าวคือ เซลล์จะเกิดไดอิเล็กโทรโพเรซิสได้ต้องอาศัยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มที่สูงเหมาะสม และ เซลล์ที่มีขนาดเล็กจะเกิดไดอิเล็กโทรโพเรซิสได้ต้องอาศัยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงกว่าเซลล์ที่มีขนาดใหญ่ จากผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการเกิดไดอิเล็กโทรโพเรซิสของเซลล์ *Chlorella* sp. และเซลล์ *Tetraselmis* sp. อยู่ในช่วง $85 - 116 \text{ kV.m}^{-1}$ แต่สำหรับโพรโทพลาสต์ *Dendrobium* sp. จะเกิดไดอิเล็กโทรโพเรซิสในสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มประมาณ 13 kV.m^{-1}

สำหรับผลการทดลองเปลี่ยนสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายของเซลล์ *Chlorella* sp. พบว่าการเพิ่ม σ_s จะทำให้ความถี่สนามไฟฟ้าที่ทำให้ค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ เป็นศูนย์มีค่าลดลง ขณะที่เซลล์ *Tetraselmis* sp. และ *Dendrobium* sp. ค่าดังกล่าวกลับเพิ่มขึ้น และพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นไฟฟ้าจะทำให้เซลล์เคลื่อนที่เร็วขึ้นโดยไม่มีผลต่อขนาดของ $\text{Re}[f(\omega)]$ เนื่องจากค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างความเร็วและเกรเดียนต์ของความเข้มข้นไฟฟ้า จากการศึกษสเปกตรัมไดอิเล็กโทรโพเรติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ พบว่าค่าสูงสุดของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ในเซลล์แต่ละชนิดต่างกันกล่าวคือ เท่ากับ 2.50 0.30 และ 0.050 สำหรับเซลล์แพลงก์ตอน *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp. และโพรโทพลาสต์กล้วยไม้ *Dendrobium* sp. ตามลำดับ สำหรับโพรโทพลาสต์กล้วยไม้ ค่าสูงสุดของ $\text{Re}[f(\omega)]$ มีค่าต่ำกว่าที่พบในเซลล์แพลงก์ตอนมาก ดังนั้นค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ ที่ต่างกัน จึงน่าจะเป็นผลจากพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แต่ละชนิด แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าสเปกตรัมไดอิเล็กโทรโพเรติกของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ของ *Chlorella* sp. ที่แขวนลอยในสารละลายที่มี σ_s เท่ากับ 12 mS.m^{-1} และ 24 mS.m^{-1} มีค่าสูงสุดอย่างชัดเจน

3. ความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SSM กับเซลล์ทั้ง 3 ชนิด ได้ข้อสรุปว่า

หากใช้เกณฑ์ตัดสินว่าความเหมาะสมของแบบจำลอง SSM ขึ้นกับ เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างไดอิเล็กโทรโพเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ ของทฤษฎีกับปฏิบัติ (ดูสมการ 29) จะสรุปได้ว่าเซลล์ทั้ง 3 ชนิด ยังไม่เหมาะสมกับแบบจำลองดังกล่าว เนื่องจากโดยเกณฑ์เฉลี่ยพบว่าเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนมีค่าสูงกว่า 10 % ทุกชุดการทดลอง และพบว่าบางชุดการทดลองมีค่าสูงถึง 50 - 70 % แต่หากใช้แนวโน้มของไดอิเล็กโทรโพเรติกสเปกตรัมของ $\text{Re}[f(\omega)]$ เป็นตัวกำหนดความเหมาะสม พบว่าแบบจำลอง SSM พอจะประยุกต์ใช้กับเซลล์ทั้ง 3 ชนิดนี้ได้ ยกเว้นในกรณีของเซลล์ *Chlorella* sp. แขวนลอยในสารละลายซูโครสที่มีสภาพนำไฟฟ้า 12 และ 24 mS.m^{-1}

บรรณานุกรม

- ลัดดา วงศ์รัตน์. 2539. คู่มือการเลี้ยงแพลงก์ตอน. กรุงเทพฯ. : คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จตุพร สุดศิริ. 2541. " ความถี่สัญญาณไฟฟ้ากระแสลับที่เหมาะสมต่อการคัดแยกแพลงก์ตอนพืช ". สงขลา : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (สำเนา)
- Anderson, F.P.,Brookes, H.C., Hotz, M.C.B and Spoog, A.H.1969.Journal of Physics E:Sci.Instrum. 2,499-502.
- Armstrong , C.M.and Bezanilla, F.1974, "Charge movement associated with the opening and closing of the activation gates of the Na channel ", Journal of Gen. Physiol., 63 :533-552.
- Asami, K. and Irimajiri, A. 1984. " Dielectric analysis of mitochondria isolated from rat liver II. Intact mitochondria as simulated by a double - shell model ", Journal of Biochimica et Biophysica Acta . 778, 570-578.
- Asami, K., Yonezawa, T., Wakamatsu, H. and Koyanagi, N. 1996. " Dielectric spectroscopy of biological cells ", Journal of Bioelectrochemistry and Bioenergetics. 40, 79 - 98.
- Barbenza, G.H.1969.Journal of Physics E:Sci.Instrum. 2,871-874.
- Beek, W.M.V.,Touw,F.V.and Mandel, M.1975.Journal of Physics E:Sci.Instrum.2,385-389.
- Bernstein , J.1902. "Untersuchungen zur thermodynamik der bioelektrischen strome" , 1 (Erster Theil) , Journal of Arch. Ges. Physiol.92 : 521-562.
- Bonincontro, A., Cametti, C. and Biasio, A.D. 1989. " Effect of volume ion polarizations on Maxwell - Wagner dielectric dispersion " , Journal of Physics D: Apply.Physics. 13, 1529 -1535.

- Bordi, F. and Cametti, C. 1989. "Passive electrical properties of biological cell membranes determined from Maxwell - Wagner conductivity dispersion measurements" , Journal of Bioelectrochemistry and Bioenergetics. 22, 135 - 144.
- Chang, D.C. 1989a. "Cell poration and cell fusion using an oscillating electric field" , Journal of Biophysics. 56, 641-652.
- Chapman, D.,1975. Cell Membranes - Biochemistry, Cell Biology and Pathology.
New York : HP Publishing.
- Corson, D. and Lorrain, P. 1970. Introduction to Electromagnetic Fields and Waves .
Bombay : W.H.Freeman and Company.
- Coster, H.G.L., Chilcott, T.C. and Coster, A.C.F. 1996. " Impedance spectroscopy of interfaces , membranes and ultrastructures " , Journal of Bioelectrochemistry and Bioenergetics. 40, 79 - 98.
- Coster, H. G. L. and Chilcott, T. 1997. " Fundamentals of Membrane Science - A Laboratory Course Relating to Biological and Synthetic Membrane " . In Membrane Science Relavant into Biological and Synthetic Membrane, 21 July - 1 August 1997, Prince of Songkla University ,Hat - Yai. 1 - 6.
- Danielli, J.F. and Davson , H. 1935. "A contribution to the theory of permeability of thin films" , Journal of Cell. Comp. Physiol. 5,495-508.
-
- Debye, P. 1929. Polar molecules . New York: The Chemical Catalogue Co.
-
- Foster, K.R. ,Sauer, F.A. and Schwan, H.P.1992. " Electrorotation and levitation of cells and colloidal particles" , Journal of Biophysics. 63,180-190.
- Foster, K.R. and Sauer, A.E.1995. " Dielectrophoretic forces and potentials induced on pairs of cells in an electric field" , Journal of Biophysics. 69,777-784.

- Fuhr, G., Graser, R. and Hagedorn, R. 1986. " Rotation of dielectrics in a rotating electric high - frequency field ", Journal of Biophysics . 49, 395 -402.
- Fuhr, G., and Kuzmin, P.I. 1986. " Behaviour of cells in rotating electric fields with account to surface charges and cell structures ", Journal of Biophysics . 50, 789 - 795.
- Garcia, A., Grosse,C. and Brito, P. 1985." On the effect of volume charge distribution on the Maxwell - Wagner relaxation". Journal of Physics D: Appl.Phys. 18, 739-745.
- Gheorghiu, E. 1994. " The dielectrics behaviour of suspensions of spherical cells : a unitary approach", Journal of Physics A: Math. Gen. 27, 3883 -3893.
- Grant, E.H.1980. Solid State Biophysics (Wyard,S.J.eds.) . New York :McGraw - Hill.
- Grosse, C. and Foster,K.R.1987. " Permittivity of suspension of charged spherical particles in electrolyte Solution", Journal of Physical Chemistry. 91, 3073 -3076.
- Grosse, C. 1988. " Permittivity of a suspension of charged spherical particles in electrolyte Solution. 2. Influence of the surface conductivity and asymetry of the electrolyte on the low - high - frequency relaxations", Journal of Physical Chemistry. 92, 3905 -3910.
- Haggis ,G.H. 1964. Introduction to Molecular Biology , London : Longman .
- Hanawalt, P.C. 1980. Molecules to Living Cells ,San francisco : W.H. Freeman and Company.
- Hills, C. and Nakamura, H. 1978 . Food from sunlight . California : University of the Trees Press.
- Ho, S.Y. and Mittal G.S.1996. " Electroporation of cell membrane :A Review ", Critical Reviews in Biotechnology.16(4), 349 - 362.

Jordan BP. and Grant, E.H.1970.Journal of Physics E:Sci.Instrum. 2,764-766.

Kaler, K.V.I.S. and Jones, T.B. 1990. " Dielectrophoretic spectra of single cells determined by feedback - controlled levitation ", Journal of Biophysics. 57, 173 - 182.

Mahaworasilpa, T.1992. " Cell Electro - Dynamics : The Mechanics of living Cells in Intense Alternating Electric Fields ",Ph.d. Thesis University of New South Wales, Australia.

Mahaworasilpa, T.,Coster, H.G.L. and George, E.P. 1994. " Forces on biological cells due to applied (AC) electric fields. I. Dielectrophoresis ",Journal of Biochimica et Biophysica Acta. 1193, 118-126.

Mahaworasilpa, T.,Coster, H.G.L. and George, E.P. 1996. " Forces on biological cells due to applied (AC) electric fields. II. Electro - rotation ",Journal of Biochimica et Biophysica Acta. 1281, 5-14.

Marszalek, P. and Zielin'ski, J.J. 1989. " Experimental verification of a theoretical treatment of the mechanism of dielectrophoresis ", Journal of Bioelectrochemistry and Bioenergetics . 22, 289 - 298.

Marszalek, P., Zielin'ski, J.J.,Fikus, M. and Tsong, T.Y. 1991. " Determination of electric parameters of cell membranes by a dielectrophoresis method ", Journal of Biophysics . 59, 982 - 987.

Mihai, C.M., Mehedintu, M. and Gheorghiu, E. 1996. " The derivation of cellular properties from dielectric spectroscopy data ", Journal of Bioelectrochemistry and Bioenergetics. 40, 187 - 192.

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", Journal of Bioelectrochemistry and Bioenergetics. 40, 79 - 98.
- Rosen, D., Bignall, R. and Wisse, J.D.M. 1968. Journal of Physics E:Sci.Instrum. 2,22-28.
- Saito, M., Schwan, H.P and Schwarz, G. 1966. " Response of nonspherical biological particles to alternating electric fields ", Journal of Biophysics. 6, 313-327.
- Sauer, F.A. and Schlogl, R.W. 1985. Interactions between Electromagnetic Fields and Cells (Chiabrere, A., Nicolini. C. and Schwan, H.P.) . New York : Plenum Press. 203 - 251 .
- Schwarz, G. 1962. " A theory of the low - frequency dielectric dispersion of colloidal particles in electrolyte solution ", Journal of Chemical Physics . 66, 2636 - 2642.
- Schwarz, G. 1963. " General Equation for the Mean Electrical Energy of a Dielectric Body in an Alternating Electrical Field ", Journal of Chemical Physics .letter to editor, 2387 - 2388.
- Schwan, H.P. 1985."Dielectric properties of the cell surface and electric field effects on cells" , Studia biophysica . 110,13-18.
- Schwan, H.P. 1988."Dielectric spectroscopy and electro - rotation of biological cells " , Ferroelectrics . 86,205 -223.
- Sher, L.D. 1968. " Dielectrophoresis in lossy dielectric media ", Nature. 220, 695 - 696.
- Singer, S.J. and Nicolson, G.L. 1972. " The fluid mosaic model of the structure of cell membranes". Science. 7,455.

- Stenger, D.A., Kaler, K.V.I.S. and Hui, S.W. 1991. " Dipole interactions in electrofusion - contributions of membrane potential and effective dipole interaction pressure". Journal of Biophysics. 59,1074-1084.
- Turcu, I. and Lucaciu, C.M. 1989. " Dielectrophoresis: a spherical shell model ", Journal of Physics A: Math. Gen. 22, 985 -993.
- Wang, W.X. 1988. "The potential for a homogeneous spheroid in a spheroidal coordinate system: (At an exterior point " , Journal of Physics A: Math. Gen. . 21, 4245-4250.
- Wang, W.X., Pethig, R. and Jones, T.B.1996. "Relationship of dielectrophoretic and electrorotational behaviour exhibited by polarized particles ",Journal of Physics D: Appl. Phys. . 25, 905-912.
- Watanabe, M., Suzuki, T. and Irimajiri, A. 1991. " Dielectric behavior of the frog lens in the 100 Hz to 500 MHz range (simulation with an allocated ellipsoidal - shells model) " ,Journal of Biophysics. 59, 139-149.

ภาคผนวก

ภาคผนวก 1

แรงที่กระทำต่อวัตถุไดอิเล็กทริกเมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า

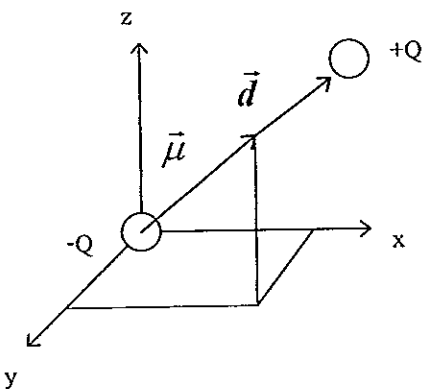
เมื่อวัตถุไดอิเล็กทริกถูกวางในสนามไฟฟ้า จะเกิดแรงชนิดหนึ่งมากระทำต่อวัตถุนั้น แรงดังกล่าวเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างสนามไฟฟ้ากับไดโพลโมเมนต์ในเนื้อสารไดอิเล็กทริก โดยปกติแรงที่กล่าวนี้มีขนาดน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงทางไฟฟ้าอื่นๆ แต่ก็อยู่ในระดับที่พอจะตรวจวัดได้ จากตำราของ Corson และ Lorrain ใน Introduction to Electromagnetic fields and waves (1970) ได้แสดงที่มาไว้ดังนี้

ทันทีที่สนามไฟฟ้าแพร่ผ่านเข้าสู่เนื้อสารไดอิเล็กทริก ไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะพยายามจัดวางตัวในแนวเดียวกับทิศสนามไฟฟ้าภายนอก การจัดวางตัวดังกล่าวย่อมเกิดทอร์คขึ้น โดยทั่วไปทอร์คเกิดจากผลคูณแบบคอสระหว่างระยะทางจากจุดหมุนไปยังตำแหน่งที่ถูกแรงกระทำ ให้หมุน \vec{r} คู่กับแรง \vec{F} เขียนเป็นสมการได้คือ $\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$ แต่ในกรณีที่เรากำลังพิจารณาที่นี่ \vec{r} เทียบเท่ากับไดโพลโมเมนต์ (ไดโพลโมเมนต์คือผลคูณระหว่างขนาดของประจุกับระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง) และ \vec{F} เทียบเท่ากับความเข้มสนามไฟฟ้าภายนอก (\vec{E}) ที่กระทำให้ไดโพล ($\vec{\mu}$) เกิดการหมุนตัวหรือจัดวางทิศทางตามทิศสนาม ดังนั้นทอร์คของไดโพลโมเมนต์เขียนเป็นสมการได้คือ

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{E} \quad \text{มีหน่วยเป็น } C.V \quad 1)$$

ในกรณีที่สนามไฟฟ้าภายนอกเป็นแบบกระแสตรง แรงสุทธิที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นศูนย์ (นั่นคือแรงที่กระทำที่ปลายทั้งสองด้านของไดโพลโมเมนต์มีค่าเท่ากัน) กรณีเดียวที่จะเกิดแรงสุทธิได้คือกรณีของสนามไฟฟ้าภายนอกเป็นแบบไม่เอกรูป (nonuniform) (นั่นคือแรงที่กระทำที่ปลายทั้งสองด้านของไดโพลโมเมนต์มีค่าไม่เท่ากัน ด้านที่อยู่ในบริเวณที่มีความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าจะมีแรงมากกว่าด้านตรงข้าม)

เมื่อต้องการหาแรงที่กระทำต่อไดอิเล็กทริก จะเริ่มพิจารณาจากไดโพลโมเมนต์ซึ่งวางอยู่ในสนามไฟฟ้าตามแกนพิกัดดังรูป



กำหนดให้ความเข้มสนามไฟฟ้าอยู่ที่จุดกำเนิดพิกัด เขียนได้เป็น

$$\vec{E} = E_x \hat{i} + E_y \hat{j} + E_z \hat{k}$$

และ $\vec{\mu} = \mu_x \hat{i} + \mu_y \hat{j} + \mu_z \hat{k} \quad 2)$

$$\vec{d} = d_x \hat{i} + d_y \hat{j} + d_z \hat{k}$$

และจะได้ว่า องค์ประกอบในแนวแกนต่างๆ ของแรงที่กระทำต่อไดโพลมีค่าดังนี้

$$F_x = Q \left(E_x + \frac{\partial E_x}{\partial x} d \cdot \hat{i} + \frac{\partial E_x}{\partial y} d \cdot \hat{j} + \frac{\partial E_x}{\partial z} d \cdot \hat{k} \right) - QE_x \quad 3)$$

และในทำนองเดียวกัน

$$F_y = Q \left(E_y + \frac{\partial E_y}{\partial x} d \cdot \hat{i} + \frac{\partial E_y}{\partial y} d \cdot \hat{j} + \frac{\partial E_y}{\partial z} d \cdot \hat{k} \right) - QE_y \quad 4)$$

$$F_z = Q \left(E_z + \frac{\partial E_z}{\partial x} d \cdot \hat{i} + \frac{\partial E_z}{\partial y} d \cdot \hat{j} + \frac{\partial E_z}{\partial z} d \cdot \hat{k} \right) - QE_z \quad 5)$$

ทั้งสามสมการนี้เขียนในรูปใหม่โดยอาศัยความสัมพันธ์ $\vec{\mu} = Q \cdot \vec{d}$ จะได้ว่า

$$F_x = \left(\frac{\partial E_x}{\partial x} \mu_x + \frac{\partial E_x}{\partial y} \mu_y + \frac{\partial E_x}{\partial z} \mu_z \right) \quad 6)$$

$$F_y = \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} \mu_x + \frac{\partial E_y}{\partial y} \mu_y + \frac{\partial E_y}{\partial z} \mu_z \right) \quad 7)$$

และ

$$F_z = \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} \mu_x + \frac{\partial E_z}{\partial y} \mu_y + \frac{\partial E_z}{\partial z} \mu_z \right) \quad 8)$$

เมื่อรวมทุกองค์ประกอบของแรงโดยเขียนในรูปสมการแรงลัพธ์จะได้ว่า

$$\vec{F} = \left(\mu_x \frac{\partial}{\partial x} + \mu_y \frac{\partial}{\partial y} + \mu_z \frac{\partial}{\partial z} \right) (E_x \hat{i} + E_y \hat{j} + E_z \hat{k}) \quad 9)$$

$$= (\vec{\mu} \cdot \nabla) \vec{E} \quad 10)$$

ในกรณีที่ไดโพลโมเมนต์อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ ไดโพลจะมีทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ จากสมการที่ 1 ในบทที่ 2 เมื่อทำการจัดรูปสมการให้เหมือนกับสมการที่ 10 คือแยกส่วนของเทอมไดโพลและเทอมสนามไฟฟ้า จะพบว่า

$$\vec{F} = \text{Re}[(\vec{\mu} \cdot \nabla) \vec{E}] \quad 11)$$

ภาคผนวก 2

วิธีการหาค่าคงที่ A, B, C และ D ตามสมการที่ 22 ในบทที่ 2

จากสมการที่ 22 ศักย์ไฟฟ้าภายในและภายนอกเซลล์จะมีค่า

$$V_o = \left(\frac{A}{r^2} + Br\right) \cos \theta, \quad (1)$$

$$V_i = \left(\frac{C}{r^2} + Dr\right) \cos \theta \quad (2)$$

หาค่า C

โดยการแทนเงื่อนไขขอบที่ว่า ที่ $r = 0, V_i =$ ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ลงในสมการที่ 2 ได้ว่า

$$V_i = \left(\frac{C}{0} + 0\right) \cos \theta = (\infty + 0) \cos \theta \quad (3)$$

สมการนี้จะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อ $C = 0$ เท่านั้น จึงจะทำให้ $V_i =$ มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง

หาค่า B

และจากเงื่อนไขที่ว่า สนามไฟฟ้าที่อยู่ห่างไกลจากเซลล์จะไม่ถูกรบกวนโดยเซลล์ แต่ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงเซลล์จะถูกรบกวน ดังนั้นที่ระยะอนันต์ $r = \infty$ ศักย์ไฟฟ้ามีค่า

$$\vec{E} = -\nabla V$$

$$\int_0^{V_a} dV = -\int_0^z \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$V_a = -Er \cos \theta = -E \cdot z \quad (4)$$

และแทนค่า $r = \infty$ ลงในสมการที่ 1 พบว่าพจน์ $\frac{A}{r^2} \ll Br$, และ $\frac{A}{r^2} \rightarrow 0$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$V_a = Br \cos \theta, \quad (5)$$

เปรียบเทียบสมการ 4 กับสมการ 5 พบว่า

$$B = -E$$

หาค่า A

จากเงื่อนไขขอบที่ว่าศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่างภายในและนอกเซลล์(หรือที่ผิวเซลล์)ต้องมีค่าเท่ากัน ดังนั้น ที่ $r = R$;

$$V_a = V_i \quad (6)$$

แทนค่าสมการที่ 1 และ 2 ลงในสมการที่ 6 จะได้ว่า

$$\left(\frac{A}{r^2} + Br\right) = \left(\frac{C}{r^2} + Dr\right) \quad (7)$$

แทนค่า $r = R, B = E, C = 0$ ลงในสมการ 7 จะได้ว่า

$$\left(\frac{A}{R^2} + ER\right) = DR \quad (8)$$

ดังนั้น

$$A = R^3(D + E)$$

หาค่า D

จากเงื่อนไขต่อเนื่องของสนามไฟฟ้ากระจัด (displacement electric field) จะต้องมีค่าต่อเนื่องในแนวตั้งฉากกับผิวเซลล์ที่ผิวเซลล์ $r = R$ และมีค่าเท่ากันทั้งภายในและภายนอกเซลล์, ดังนั้นจากสมการสนามไฟฟ้าขจัด $\vec{D}_i = \epsilon'_i \vec{E}$ เขียนตามเงื่อนไขขอบได้ดังนี้

$$\text{ที่ } r = R \quad \vec{D}_o = \vec{D}_i$$

จะได้ว่า

$$\epsilon'_s \frac{\partial V_a}{\partial r} = \epsilon'_{eff} \frac{\partial V_i}{\partial r} \quad (9)$$

แทนค่าสมการที่ 1 และ 2 ลงในสมการที่ 9 จะได้ว่า

$$\epsilon'_s \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{A}{r^2} + Br\right) \cos \theta \right] = \epsilon'_{eff} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{C}{r^2} + Dr\right) \cos \theta \right] \quad (10)$$

$$\epsilon'_s \left[-\frac{2A}{r^3} - Br \right] = \epsilon'_{eff} \left[-\frac{2C}{r^2} + Dr \right] \quad (11)$$

แทนค่า $r = R, B = E, C = 0$ และ $A = R^3(D + E)$

จะได้ว่า

$$-3\varepsilon'_s E = (\varepsilon'_{eff} + 2\varepsilon'_s)D$$

ดังนั้น

$$D = -\frac{3\varepsilon'_s}{\varepsilon'_{eff} + 2\varepsilon'_s} E$$

แทนค่า D ลงในค่า A จะได้ว่า

$$A = \frac{\varepsilon'_{eff} - \varepsilon'_s}{\varepsilon'_{eff} + 2\varepsilon'_s} R^3 E,$$

$$B = -E,$$

$$C = 0,$$

$$D = -\frac{3\varepsilon'_s}{\varepsilon'_{eff} + 2\varepsilon'_s} E$$

เมื่อ

ภาคผนวก 3

วิธีการหา $\text{Re}[f(\omega)] = -\left[\frac{AB + CD\omega^2}{B^2 + D^2\omega^2}\right]$ ในสมการ 17

จากสมการ

$$f(\omega) = -\frac{\left[(1 - \alpha_s)(1 + 2\alpha_c) - (1 + 2\alpha_s)(1 - \alpha_c)\left(\frac{R - \delta}{R}\right)^3\right]}{(2 + \alpha_s)(1 + 2\alpha_c) - 2(1 - \alpha_s)(1 - \alpha_c)\left(\frac{R - \delta}{R}\right)^3} \quad 1)$$

จะพบว่าเทอม $\left(\frac{R - \delta}{R}\right)^3$ สามารถกระจายได้เป็น

$$\begin{aligned} \left(\frac{R - \delta}{R}\right)^3 &= \frac{R^3 - 3R^2\delta + 3R\delta^2 - \delta^3}{R^3} \\ &= 1 - \frac{3\delta}{R} + 3\frac{\delta^2}{R^2} - \frac{\delta^3}{R^3} \end{aligned} \quad 2)$$

เมื่อพิจารณาสองเทอมหลังของสมการจะพบว่า ในกรณีที่ $\delta \ll R$ นั้นหมายความว่า เยื่อหุ้มเซลล์ (เปลือกเซลล์) มีความหนาน้อยกว่ารัศมีเซลล์มาก (โดยปกติความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์มีค่าประมาณ 7-10 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่ารัศมีเซลล์มาก) หากสมมติให้มีความหนาของเปลือกเซลล์อยู่ในระดับที่มากกว่าสิบนานาเมตรและเซลล์มีขนาดระดับไมครอน จะได้ว่า

$$\frac{\delta}{R} \approx 10^{-2} \text{ ดังนั้นจึงสามารถตัดเทอม } 3\frac{\delta^2}{R^2} - \frac{\delta^3}{R^3} \text{ ออกได้เนื่องจากมีนัยสำคัญที่น้อย ดังนั้น}$$

$$\left(\frac{R - \delta}{R}\right)^3 \approx 1 - \frac{3\delta}{R} \quad 3)$$

แทนค่าสมการ 3 ลงในสมการ 1 จะได้ว่า

$$f(\omega) = - \frac{\left[(1-\alpha_s)(1+2\alpha_c) - (1+2\alpha_s)(1-\alpha_c) \left(1 - \frac{3\delta}{R}\right) \right]}{(2+\alpha_s)(1+2\alpha_c) - 2(1-\alpha_s)(1-\alpha_c) \left(1 - 3\frac{\delta}{R}\right)} \quad 4)$$

$$= - \frac{[(1-\alpha_s)(1+2\alpha_c) - (1+2\alpha_s)(1-\alpha_c)] + 3(1+2\alpha_s)(1-\alpha_c) \frac{\delta}{R}}{[(2+\alpha_s)(1+2\alpha_c) - 2(1-\alpha_s)(1-\alpha_c)] + 6(1+2\alpha_s)(1-\alpha_c) \frac{\delta}{R}} \quad 5)$$

คูณกระจายในแต่ละวงเล็บจะได้ว่า

$$f(\omega) = - \frac{3(\alpha_c - \alpha_s) + 3(1+2\alpha_s)(1-\alpha_c) \frac{\delta}{R}}{3(2\alpha_c + \alpha_s) + 6(1-\alpha_s)(1-\alpha_c) \frac{\delta}{R}}$$

$$f(\omega) = - \frac{(\alpha_c - \alpha_s) + (1+2\alpha_s)(1-\alpha_c) \frac{\delta}{R}}{(2\alpha_c + \alpha_s) + (1-\alpha_s)(1-\alpha_c) 2 \frac{\delta}{R}} \quad 6)$$

แทนค่า $\alpha_s = \frac{\varepsilon'_m}{\varepsilon'_s}$ $\alpha_c = \frac{\varepsilon'_m}{\varepsilon'_c}$ ลงในสมการที่ 6 โดยกำหนดให้ $k = \frac{\delta}{R}$

$$f(\omega) = - \frac{\left(\frac{\varepsilon'_m}{\varepsilon'_c} - \frac{\varepsilon'_m}{\varepsilon'_s} \right) + \left(1 + 2 \frac{\varepsilon'_m}{\varepsilon'_s} \right) \left(1 - \frac{\varepsilon'_m}{\varepsilon'_c} \right) k}{\left(2 \frac{\varepsilon'_m}{\varepsilon'_c} + \frac{\varepsilon'_m}{\varepsilon'_s} \right) + \left(1 - \frac{\varepsilon'_m}{\varepsilon'_s} \right) \left(1 - \frac{\varepsilon'_m}{\varepsilon'_c} \right) 2k} \quad 7)$$

เมื่อ $\varepsilon'_m = \varepsilon_m - j \frac{\sigma_m}{\omega}$ $\varepsilon'_c = \varepsilon_c - j \frac{\sigma_c}{\omega}$ และ $\varepsilon'_s = \varepsilon_s - j \frac{\sigma_s}{\omega}$

สมการ 7 สามารถจัดรูปสมการได้ใหม่เป็น

$$f(\omega) = -\frac{\varepsilon'_m \varepsilon'_s (1-k) - \varepsilon'_m \varepsilon'_c (1-2k) + k(\varepsilon'_s \varepsilon'_c - 2\varepsilon_m'^2)}{\varepsilon'_c \varepsilon'_m (1-2k) + 2\varepsilon'_m \varepsilon'_s (1-2k) + 2k(\varepsilon_m'^2 + \varepsilon'_s \varepsilon'_c)} \quad 8)$$

คูณกระจายและแทนค่าสภาพยอมเชิงซ้อนทุกตัวในทุกวงเล็บและจัดกลุ่มแยกเป็นส่วนจริงและ

ส่วนจินตภาพ โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้ $\frac{(x+jy)}{(m-jn)} = \frac{(xm-yn) + j(ym+xn)}{m^2+n^2}$

ในที่สุดจะได้ว่า

$$f(\omega) = -\left[\frac{AB + CD\omega^2}{B^2 + D^2\omega^2} \right] - j\omega \left[\frac{BC - AD}{B^2 + D^2\omega^2} \right] \quad 9)$$

เมื่อส่วนจริงของ $f(\omega)$ คือ $\text{Re}[f(\omega)] = -\left[\frac{AB + CD\omega^2}{B^2 + D^2\omega^2} \right]$ และส่วนจินตภาพคือ

$$\text{Im}[f(\omega)] = -\omega \left[\frac{BC + AD}{B^2 + D^2\omega^2} \right]$$

โดยที่

$$A = (2k-1)(\sigma_c \sigma_m - \varepsilon_c \varepsilon_m \omega^2) + (1-k)(\sigma_s \sigma_m - \varepsilon_s \varepsilon_m \omega^2) + k[\sigma_s \sigma_c - 2\sigma_m^2 + \omega^2(2\varepsilon_m^2 - \varepsilon_s \varepsilon_c)]$$

$$B = (1-2k)(\sigma_c \sigma_m - \varepsilon_c \varepsilon_m \omega^2) + 2(1-k)(\sigma_s \sigma_m - \varepsilon_s \varepsilon_m \omega^2) + 2k[\sigma_s \sigma_c + \sigma_m^2 - \omega^2(\varepsilon_m^2 + \varepsilon_s \varepsilon_c)]$$

$$C = (2k-1)(\sigma_m \varepsilon_c + \sigma_c \varepsilon_m) + (1-k)(\sigma_m \varepsilon_s + \sigma_s \varepsilon_m) + k(\sigma_c \varepsilon_s + \sigma_s \varepsilon_c - 4\sigma_m \varepsilon_m)$$

$$D = (1-2k)(\sigma_m \varepsilon_c + \sigma_c \varepsilon_m) + 2(1-k)(\sigma_m \varepsilon_s + \sigma_s \varepsilon_m) + 2k(\sigma_c \varepsilon_s + \sigma_s \varepsilon_c + 2\sigma_m \varepsilon_m)$$

ภาคผนวก 4

การหาความสัมพันธ์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด
(Nonlinear regression curve.Method of least squares)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการหาความสัมพันธ์ที่เป็นแบบไม่เชิงเส้นระหว่างตัวแปรสองตัวที่ปรากฏในการทดลองคือ ตำแหน่ง z และเวลา t เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ของสองตัวแปรนี้จำเป็นต้องมีจำนวนชุดข้อมูลอย่างน้อยสอง ในกรณีหาความสัมพันธ์แบบเส้นตรง และอย่างน้อยสาม กรณีหาความสัมพันธ์แบบพาราโบลา และอย่างน้อยสี่ ในกรณีหาความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล กำลังสาม เป็นต้น จากตำราของ Erwin Kreyzig ใน Introductory Mathematical statistics (1978) ได้แสดงวิธีการหาโดยพิจารณา ดังนี้ กำหนดให้กลุ่มตัวอย่างมีจำนวน n ค่าคือ $(t_1, z_1), \dots, (t_n, z_n)$ แนวโน้มของชุดข้อมูล(นั่นคือชุดข้อมูลที่ (t_{n+1}, z_{n+1})) หาได้ด้วยวิธีการทดลองสร้างความสัมพันธ์หนึ่งขึ้นมา กำหนดให้เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลา t_i เขียนได้เป็น $Z(t_i)$ (เรียกค่าในทางทฤษฎี) และกำหนดให้ Z_i เป็นค่าในทางปฏิบัติ ความสอดคล้องระหว่างค่าทั้งสอง ประเมินได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$q = \sum_{i=1}^n [Z_i - Z(t_i)]^2 \quad 1)$$

ค่า q ที่น้อยแสดงถึงความสอดคล้องที่สูง ค่า q ที่มากแสดงถึงความสอดคล้องที่ต่ำ และค่าหากมีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองสอดคล้องกันอย่างสมบูรณ์ แต่จะสอดคล้องกันในรูปความสัมพันธ์เช่นไร ขึ้นกับชนิดของความสัมพันธ์นั้นๆ แต่ในที่นี้จะใช้รูปสมการโพลีโนเมียลตามการวิเคราะห์ในบททดลอง
นั่นคือ

$$z(t) = b_0 + b_1 t + \dots + b_m t^m, \quad 2)$$

(สมการดังกล่าวครอบคลุมถึงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น)

เมื่อประยุกต์ใช้กับชุดข้อมูล $Z(t_i)$ จะได้ว่า

$$Z(t_i) = b_0 + b_1 t_i + \dots + b_m t_i^m, \quad 3)$$

สมการที่ 3) จะมีความสอดคล้องกับชุดข้อมูล $Z(t_i)$ สูงสุดเมื่อใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\partial q}{\partial b_0} = 0, \frac{\partial q}{\partial b_1} = 0, \dots, \frac{\partial q}{\partial b_m} = 0 \quad 4)$$

เราเรียกสมการนี้ว่า สมการปกติ (normal equation) ผลเฉลยที่ได้จากสมการเหล่านี้จะถูกนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ในสมการที่ 2) ด้วยวิธีหาผลเฉลยแบบ Gauss' s elimination method กรณีตัวอย่างความสัมพันธ์ที่กำหนดขึ้นเป็นแบบพาราโบลา คือ

$$Z(x) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 \quad 5)$$

จะได้ว่า $Z(t_i) = b_0 + b_1 t_i + b_2 t_i^2$

เมื่อแทนค่าสมการนี้ลงในสมการที่ 1) จะได้ว่า

$$q = \sum_{i=1}^n (Z_i - b_0 - b_1 t_i - b_2 t_i^2)^2 \quad 6)$$

เมื่อทำการหาอนุพันธ์สมการเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ b_0, b_1 และ b_2 จะได้ชุดของสมการดังนี้

$$\begin{aligned} b_0 n + b_1 \sum t_i + b_2 \sum t_i^2 &= \sum Z_i \\ b_0 \sum t_i + b_1 \sum t_i^2 + b_2 \sum t_i^3 &= \sum t_i Z_i \\ b_0 \sum t_i^2 + b_1 \sum t_i^3 + b_2 \sum t_i^4 &= \sum t_i^2 Z_i \end{aligned} \quad 7)$$

แทนค่า t_i และ Z_i (จากข้อมูลผลการทดลอง) ลงในสมการเหล่านี้ แล้วใช้วิธีทางเมตริกซ์ที่เรียกว่า Gauss's elimination method หาค่าสัมประสิทธิ์จากชุดของสมการเหล่านี้ ค่าสัมประสิทธิ์แต่ละตัวจะนำไปแทนค่ากลับลงในสมการ 5 อีกครั้ง จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ตลอดของสองตัวแปรดังกล่าว

ในกรณีที่กำหนดความสัมพันธ์เริ่มต้นเป็นฟังก์ชันของโพลีโนเมียลกำลังสาม (ตามการทดลอง) จะได้ว่า

$$Z(x) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \quad 8)$$

และ $Z(t_i) = b_0 + b_1 t_i + b_2 t_i^2 + b_3 t_i^3 \quad 9)$

เมื่อแทนค่าสมการนี้ลงในสมการที่ 1) จะได้ว่า

$$q = \sum_{i=1}^n (Z_i - b_0 - b_1 t_i - b_2 t_i^2 - b_3 t_i^3)^2 \quad (10)$$

เมื่อทำการหาอนุพันธ์สมการเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ b_0, b_1 และ b_2 จะได้ชุดของสมการดังนี้

$$\begin{aligned} b_0 n + b_1 \sum t_i + b_2 \sum t_i^2 &= \sum Z_i \\ b_0 \sum t_i + b_1 \sum t_i^2 + b_2 \sum t_i^3 + b_3 \sum t_i^4 &= \sum t_i Z_i \\ b_0 \sum t_i^2 + b_1 \sum t_i^3 + b_2 \sum t_i^4 + b_3 \sum t_i^5 &= \sum t_i^2 Z_i \\ b_0 \sum t_i^3 + b_1 \sum t_i^4 + b_2 \sum t_i^5 + b_3 \sum t_i^6 &= \sum t_i^3 Z_i \end{aligned} \quad (11)$$

แทนค่า t_i และ z_i (จากข้อมูลผลการทดลอง) ลงในสมการเหล่านี้ แล้วใช้วิธีทางเมตริกซ์ที่เรียกว่า Gauss's elimination method หาค่าสัมประสิทธิ์จากชุดของสมการเหล่านี้ ค่าสัมประสิทธิ์แต่ละตัวจะนำไปแทนค่ากลับลงในสมการ 8 อีกครั้ง จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ถดถอยของสองตัวแปรดังกล่าว

ภาคผนวก 5

สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกคู่ขนาน

เมื่อขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกคู่ขนานจุ่มอยู่ในสารละลายที่นำไฟฟ้าต่ำ (ในการทดลองนี้ใช้สารละลายซูโครสและแมนนิทอล) และจัดวางเส้นลวดแต่ละเส้นในทิศทางขนานกันตามยาวแนวแกน y ดังภาพประกอบ 6 เมื่อ a คือรัศมีของขั้ว เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาขอบ (end effect) บริเวณปลายลวด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณดังกล่าว(และใกล้เคียง) ให้มีค่าผิดไปจากที่คำนวณไว้ ด้วยเหตุผลทางทฤษฎี ความยาวของเส้นลวดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าควรมากกว่ารัศมีลวดมากๆ นั่นคือ $a \ll$ แนวตามยาวเส้นลวด กำหนดให้ระยะห่างของเส้นลวดทั้งสองมีค่า d และจ่ายศักย์ไฟฟ้าแบบกระแสสลับครบรอบขั้วไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของ $V(t) = V_0 \sin \omega t$ เมื่อ V_0 คือขนาดของศักย์ไฟฟ้า ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่แต่ละจุดตำแหน่งระหว่างขั้วไฟฟ้าคำนวณได้โดยอาศัยผลเฉลยของสมการลาปลาซพิกัดทรงกระบอก (เนื่องจากขั้วไฟฟ้าเป็นทรงกระบอก) และใช้ความสัมพันธ์ที่ว่า สนามไฟฟ้าเท่ากับลบเกรเดียนต์ของศักย์ไฟฟ้า ดังการพิสูจน์ต่อไปนี้

เมื่อพิจารณาว่าสนามไฟฟ้ามีทิศพุ่งออกจากขั้วขั้วไฟฟ้าทั้งสองเส้น ในแนวแกน Z และแกน Y เท่านั้น ส่วนสนามในแนวแกนตามยาวของเส้นลวดหรือแกน X ไม่มีเนื่องจากเป็นทิศของกระแสที่ไหลในเส้นลวด สมการลาปลาซทรงกระบอก เขียนได้เป็น

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} \right) + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad 1)$$

เมื่อ V คือศักย์ไฟฟ้าแต่ละจุดระหว่างขั้วไฟฟ้า

r, θ และ y คือพิกัดตามที่ระบุไว้ในพิกัดทรงกระบอกตามภาพประกอบที่ 15

เพื่อให้การวิเคราะห์ปัญหาง่ายขึ้น จะพิจารณาเฉพาะสนามไฟฟ้าในแนวรัศมีขั้วไฟฟ้า (r) ที่อยู่ในระนาบศูนย์กลางขั้วไฟฟ้าเท่านั้น นั่นคือ $\theta = 0$ และ y คงที่(ที่ศูนย์)

สมการที่ 1 จะลดรูปเหลือ

$$\nabla^2 V = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0$$

หรือ

$$\nabla^2 V = \frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} = 0 \quad 2)$$

ผลเฉลยของสมการ 2 มีค่าเป็น

$$V = A \ln r + B \quad 3)$$

เมื่อ A, B คือค่าคงที่ที่ต้องทำการหาจากเงื่อนไขขอบซึ่งมีดังนี้

พิจารณาที่ขั้วไฟฟ้าเส้นที่ 1

$$\text{เมื่อ } r_1 = a; V = V_{rms} \text{ ดังนั้น } A \ln a + B = V_{rms} \quad 4)$$

$$\text{เมื่อ } r_1 = d - a; V = 0 \text{ ดังนั้น } A \ln(d - a) + B = 0 \quad 5)$$

เมื่อ V_{rms} คือ ค่ากำลังสองเฉลี่ยของ V_0 นั่นคือ $V_{rms} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$ และเมื่อพิจารณาจากรูปจะพบว่า

$$z = r_1 - \frac{d}{2} \text{ ดังนั้น } r_1 = \frac{d}{2} + z \quad 6)$$

จากสมการที่ 4 และ 5 เราจะได้ว่า

$$A = -\frac{V_{rms}}{\ln\left(\frac{d-a}{a}\right)} \quad 7)$$

$$B = V_{rms} \frac{\ln(d-a)}{\ln\left(\frac{d-a}{a}\right)} \quad 8)$$

แทนค่า A และ B ลงในสมการที่ 3 เราจะได้รูปสมการศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าอันที่ 1 มีค่าเป็น

$$V_1(r_1) = -\frac{V_{rms}}{\ln\left(\frac{d-a}{a}\right)} \{\ln r_1 - \ln(d-a)\} \quad 9)$$

แทนค่า r_1 จากสมการที่ 6 ลงในสมการ 9 เราได้สมการศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าอันที่ 1 ที่เป็นฟังก์ชันขึ้นกับตำแหน่ง z คือ

$$V_1(z) = -\frac{V_{rms}}{\ln\left(\frac{d-a}{a}\right)} \left\{ \ln\left(\frac{d}{2} + z\right) - \ln(d-a) \right\} \quad (10)$$

สำหรับการหาสมการศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าอันที่ 2 ที่เป็นฟังก์ชันขึ้นกับตำแหน่ง z ก็หาในทำนองเดียวกันโดยอาศัยเงื่อนไขขอบเหล่านี้สำหรับขั้วไฟฟ้าอันที่ 2

$$\text{เมื่อ } r_2 = a ; V = 0$$

$$\text{และเมื่อ } r_2 = d-a ; V = V_{rms}$$

$$\text{โดยที่ } r_2 = \frac{d}{2} - z$$

ในที่สุดเราได้ว่า

$$V_2(z) = -\frac{V_{rms}}{\ln\left(\frac{d-a}{a}\right)} \left\{ \ln\left(\frac{d}{2} - z\right) - \ln a \right\} \quad (11)$$

ศักย์ไฟฟารวมที่ดกคร่อมขั้วไฟฟ้าสามารถหาจากการรวมแบบพีชคณิต (เพราะศักย์ไฟฟ้าเป็นปริมาณสเกลลาร์) ตรงไปตรงมาระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากขั้ว 1 และ 2 นั่นคือ

$$\begin{aligned} V(z) &= \frac{V_1(z) + V_2(z)}{2} \\ &= -\frac{V_{rms}}{2 \ln\left(\frac{d-a}{a}\right)} \left\{ \ln\left(\frac{\frac{d}{2} + z}{\frac{d}{2} - z}\right) - \ln\left(\frac{a}{d-a}\right) \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

และสนามไฟฟ้ามีค่าตามสมการ

$$E_z = -\frac{\partial V(z)}{\partial z} = \frac{V_{rms}}{2 \ln\left(\frac{d-a}{a}\right)} \left[\frac{d}{\frac{d^2}{4} - z^2} \right] \quad (13)$$

สำหรับสนามไฟฟ้าในแนวแกน y ก็หาด้วยวิธีทำนองเดียวกันนั่นคือ

$$E_y = -\frac{\partial V(y)}{\partial y} = \frac{V_{rms}}{2 \ln\left(\frac{d-a}{a}\right)} \left[\frac{d}{\frac{d^2}{4} + y^2} \right] \quad 14)$$

ภาคผนวก 6

สูตรและวิธีเตรียมน้ำทะเลเทียมสำหรับเพาะเลี้ยงแพลงก์ตอน *Chlorella* sp. และ *Tetraselmis* sp. และวิธีเตรียมน้ำเลี้ยงสำหรับยอยผนังเซลล์ไบกัลวีย์ไม้สายพันธุ์ *Dendrobium* sp.

น้ำทะเลเทียมเตรียมไว้สำหรับเพาะเลี้ยงเซลล์แพลงก์ตอนในห้องปฏิบัติการมีสูตรส่วนผสมโดยเรียงตามลำดับหมายเลขดังนี้

ขั้นที่

1. นำน้ำทะเลจริงที่มีค่าความเค็มประมาณ 25 ppt ปริมาณใดๆ ผสมกับ...
2. สารละลาย NaNO_3 ปริมาณ 2 ml ต่อน้ำทะเล 1 l (2 ml / 1 l)
3. สารละลาย Na_2SiO_3 (2 ml / 1 l)
4. สารละลาย $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. (2 ml / 1 l)
5. สารละลาย NaHCO_3 (10 ml / 1 l)
6. สารละลายที่มีส่วนผสมของ $\text{Na}_2\text{EDTA} + \text{FeCl}_3 + \text{ZnCl}_2 + \text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{CuSO}_4 \cdot \text{SH}_2\text{O} + \text{H}_3\text{BO}_3$

เมื่อผสมสารดังกล่าวทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกัน จะเรียกสารละลายผสมนี้ว่า น้ำทะเลเทียม นำน้ำทะเลเทียมที่เตรียมได้ไปทำการอบฆ่าเชื้อด้วยหม้อไอน้ำที่ความดันประมาณ $1 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ที่อุณหภูมิ 250°F นานประมาณ 15 นาที เป็นอันเสร็จวิธีการเตรียม

วิธีเตรียมน้ำเลี้ยงสำหรับยอยเปลือกเซลล์ไบกัลวีย์ไม้สายพันธุ์ *Dendrobium* sp.

เอนไซม์ที่ใช้ยอยเปลือกเซลล์ของเซลล์จากไบกัลวีย์ไม้มีอัตราส่วนผสมระหว่างเอนไซม์ Cellulase 1% Dricelase 0.5 % และ Macerozyme 0.5 % โดยน้ำหนักของเอนไซม์ต่อปริมาตรรวมของสารละลายที่จะนำมาใช้ละลายเอนไซม์ ในการทดลองนี้เลือกใช้สารละลายแมนนิทอล เข้มข้น 0.5 M ตัวอย่างเช่น หากต้องการเตรียมน้ำเลี้ยง 10 ml ให้ใช้สารละลายแมนนิทอล 10 ml ผสมกับผงเอนไซม์ Cellulase หนัก 0.1 g Dricelase และ Macerozyme หนักอย่างละ 0.05 g คนละลายให้เข้ากันด้วยแมกเนติกสเตอร์เรอร์ โดยไม่ต้องให้ความร้อน จากนั้นนำสารผสมดังกล่าวไปทำการปั่นแยกตะกอนที่ความเร็วรอบประมาณ 3000 รอบต่อนาที นานประมาณ 5 นาที เพื่อดูเอาเฉพาะสารละลายซึ่งมีลักษณะใสมาใช้ และทำการปรับค่าความเป็นกรดต่างให้มีค่าประมาณ 5.6 สารละลายใส่ดังกล่าวคือเอนไซม์ที่พร้อมจะใช้ยอยเปลือกเซลล์

ภาคผนวก 7

แสดงข้อมูลผลการคำนวณค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ ทุกชุดทดลอง*Chlorella sp.* ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 0.5 M สภาพนำไฟฟ้า 3 mS/m $\text{Re}[f(\omega)]$ of 9 cells

ความถี่ สนามไฟฟ้า (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20 Hz	0	0			0	0		0	
30 Hz									
40 Hz			0	0			0		
60 Hz	0.16	0.14	0.16	0.18	0.21	0.10	0.12	0.11	0.32
80 Hz									
100 Hz	0.18	0.14	0.16	0.21	0.18	0.10	0.20	0.30	0.26
200kHz	0.1	0.08	0.16	0.15	0.07	0.13	0.07	0.12	0.15
400 kHz	0.24	0.12	0.19	0.17	0.15	0.33	0.23	0.2	0.31
500 kHz									
600 kHz	0.25	0.18	0.24	0.19	0.21	0.36	0.33	0.35	0.39
800 kHz	0.21	0.14	0.23	0.17	0.21	0.33	0.29	0.34	0.3
1 MHz	0.33	0.22	0.27	0.18	0.23	0.36	0.35	0.39	0.37
2 MHz	0.22	0.21	0.19	0.17	0.2	0.32	0.32	0.31	0.3
4 MHz	0.19	0.15	0.18	0.17	0.21	0.33	0.32	0.31	0.3
6 MHz	0.12	0.08	0.14	0.09	0.19	0.16	0.2	0.13	0.07
8 MHz	0.08	0.06	0.07	0.05	0.09	0.15	0.21	0.12	0.06
10 MHz	0.08	0.07	0.08	0.1	0.12	0.15	0.23	0.38	0.09
15 MHz	0.08	0.05	0.06	0.09	0.11	0.13	0.2	0.21	0.01

Chlorella sp. ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 0.5 M สภาพนำไฟฟ้า 6 mS/m

Re[$f(\omega)$] of 9 cells

ความถี่ สนามไฟฟ้า (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20 Hz				0			0	0	0
30 Hz	0		0		0	0			
40 Hz									
60 Hz	0.15	0.13	0.15	0.11	0.18	0.16	0.16	0.17	0.15
80 Hz									
100 Hz	0.19	0.17	0.15	0.13	0.25	0.22	0.22	0.25	0.19
200kHz									
400 kHz	0.23	0.26	0.15	0.14	0.26	0.24	0.23	0.28	0.19
500 kHz									
600 kHz	0.29	0.3	0.18	0.16	0.31	0.29	0.33	0.32	0.34
800 kHz	0.25	0.29	0.17	0.15	0.28	0.25	0.31	0.25	0.3
1 MHz	0.3	0.35	0.21	0.23	0.35	0.31	0.33	0.34	0.35
2 MHz	0.24	0.24	0.2	0.19	0.3	0.26	0.24	0.3	0.29
4 MHz	0.23	0.21	0.19	0.18	0.25	0.27	0.24	0.29	0.3
6 MHz	0.1	0.11	0.14	0.13	0.16	0.15	0.14	0.15	0.09
8 MHz	0.08	0.09	0.1	0.11	0.14	0.13	0.12	0.13	0.08
10 MHz	0.13	0.12	0.14	0.15	0.16	0.14	0.17	0.16	0.14
15 MHz	0.05	0.08	0.1	0.12	0.13	0.12	0.11	0.14	0.09

Chlorella sp. ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 0.5 M สภาพนำไฟฟ้า 12 mS/m

Re[$f(\omega)$] of 9 cells

ความถี่ สนามไฟฟ้า (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 kHz	0			0		0			0
3 kHz		0	0		0		0	0	
6 kHz	0.41	0.38	0.33	0.44	0.42	0.44	0.43	0.35	0.4
8 kHz	0.51	0.51	0.48	0.53	0.5	0.61	0.58	0.65	0.5
20 Hz									
30 Hz	0.6	0.63	0.5	0.55	0.51	0.63	0.59	0.66	0.56
40 Hz									
60 Hz	0.43	0.44	0.43	0.4	0.44	0.51	0.42	0.4	0.55
80 Hz									
100 Hz									
200 kHz	0.73	0.69	0.69	0.68	0.63	0.78	0.59	0.66	0.75
300 kHz	0.21	0.2	0.3	0.24	0.19	0.2	0.22	0.21	0.25
400 kHz	0.65	0.75	0.65	0.71	0.69	0.7	0.73	0.75	0.74
500 kHz	1.2	1.3	1.4	1.2	0.8	0.95	0.99	1	1.1
600 kHz	2.2	2.3	2	1.9	1.89	2.31	2.1	2.9	2.5
800 kHz	1.5	1.2	1.1	1.25	1.5	1.1	1.27	1.01	1.4
1 MHz	0.8	0.79	0.86	0.88	0.84	0.79	0.95	0.85	0.89
2 MHz									
4 MHz									
5 MHz	0.61	0.6	0.7	0.59	0.5	0.59	0.63	0.6	0.62
6 MHz									
7 MHz	0.46	0.5	0.42	0.5	0.31	0.29	0.61	0.51	0.49
8 MHz	0.41	0.4	0.35	0.39	0.36	0.44	0.38	0.39	0.29
10 MHz	0.33	0.39	0.32	0.31	0.29	0.41	0.37	0.3	0.31
15 MHz	0.39	0.48	0.43	0.4	0.4	0.56	0.23	0.35	0.42

Chlorella sp. ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 0.5 M สภาพนำไฟฟ้า 24 mS/m

Re[$f(\omega)$] of 9 cells

ความถี่ สนามไฟฟ้า (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.1 kHz									
0.6 kHz	0		0	0	0	0	0		
20 Hz	0.46	0.53	0.55	0.31	0.29		0.54	0.53	0.43
30 Hz									
40 Hz	0.89	0.7	0.82	0.85	0.69	0.9	0.92	0.8	0.7
60 Hz									
80 Hz									
100 Hz	0.7	0.6	0.85	0.95	0.91	0.78	0.69	0.82	0.9
200 kHz									
300 kHz	1.45	1.56	1.3	1.26	1.4	1.35	1.34	1.42	1.56
400 kHz	1.85	1.7	1.63	1.15	2.1	1.8	1.96	1.99	2.13
500 kHz	1	1.36	1.44	1.42	1.38	1.45	1.34	2.21	1.98
600 kHz	0.96	0.95	0.9	1.15	1	0.98	0.965	0.97	0.95
800 kHz	0.91	0.93	0.85	1.1	0.9	0.97	0.96	0.8	0.9
1 MHz	0.95	1.1	0.92	0.91	0.86	0.91	0.94	0.93	0.96
2 MHz									
3 MHz	1.33	1.35	1.35	1.32	1.36	1.4	1.21	1.29	1.34
4 MHz									
5 MHz	2.1	1.7	1.6	1.59	1.6	1.58	1.49	1.63	1.1
6 MHz									
7 MHz									
8 MHz	1.1	1.26	1.32	1.29	1.4	1.42	1.43	1.12	1.4
10 MHz	0.9	0.98	0.5	1	1.01	1.3	1.2	0.86	1.6
15 MHz	0.8	0.94	0.8	0.71	0.72	0.75	0.6	0.5	0.6

Tetraselmis sp. ในสารละลายยูโครสเข้มข้น 0.5 M สภาพนำไฟฟ้า 6 mS/m

$\text{Re}[f(\omega)]$ of 9 cells

ความถี่ สนามไฟฟ้า (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4 kHz			0		0				
7 kHz	0	0		0		0	0	0	0
20 kHz	0.034	0.03	0.033	0.04	0.033	0.035	0.029	0.03	0.034
30 kHz	0.09	0.1	0.08	0.091	0.086	0.09	0.09	0.093	0.092
40 kHz	0.08	0.06	0.04	0.063	0.049	0.062	0.063	0.061	0.075
50 kHz	0.13	0.12	0.13	0.1	0.11	0.14	0.122	0.13	0.12
60 kHz	0.14	0.11	0.13	0.1	0.1	0.15	0.1	0.12	0.16
100k Hz	0.2	0.3		0.2	0.23	0.25	0.24	0.23	0.19
200kHz	0.19	0.31	0.21	0.2	0.2	0.3	0.21	0.25	0.18
400 kHz	0.15	0.3	0.19	0.17	0.16	0.28	0.23	0.24	0.28
500 kHz									
600 kHz	0.25	0.35	0.29	0.28	0.26	0.28	0.23	0.33	0.32
800 kHz	0.24	0.3	0.3	0.31	0.32	0.3	0.34	0.3	0.26
1 MHz	0.2	0.21	0.19	0.15	0.2	0.23	0.2	0.23	0.26
2 MHz	0.2	0.2	0.19	0.14	0.3	0.27	0.2	0.2	0.2
4 MHz	0.15	0.2	0.16	0.19	0.18	0.21	0.2	0.17	0.2
6 MHz	0.14	0.17	0.17	0.1	0.19	0.17	0.18	0.17	0.2
8 MHz	0.1	0.11	0.09	0.11	0.12	0.13	0.12	0.1	0.2
10 MHz	0.08	0.08	0.09	0.1	0.12	0.13	0.12	0.12	0.15
15 MHz	0.09	0.1	0.12	0.07	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07

Tetraselmis sp. ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 0.5 M สภาพนำไฟฟ้า 12 mS/m

Re[$f(\omega)$] of 9 cells

ความถี่ สนามไฟฟ้า (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10 kHz		0							
20 kHz	0		0	0	0				0
30 kHz									
40 kHz	0.015	0.014	0.015	0.014	0.016	0.014	0.017	0.012	0.013
50 kHz									
60 kHz	0.01	0.012	0.01	0.013	0.014	0.011	0.011	0.012	
80 kHz	0.03	0.027	0.025	0.025	0.023	0.024	0.027	0.028	0.02
100 kHz	0.06	0.065	0.063	0.06	0.06	0.065	0.066	0.0674	0.063
200 kHz	0.1			0.099	0.086	0.089	0.07	0.06	0.12
400 kHz									
500 kHz									
600 kHz	0.21	0.18	0.13	0.2	0.15	0.16	0.18	0.18	0.21
800 kHz	0.19	0.17	0.1	0.19	0.13	0.11	0.19	0.15	0.15
1 MHz	0.21	0.2	0.19	0.18	0.17	0.15	0.2	0.18	0.18
2 MHz	0.15	0.14	0.123	0.12	0.19	0.21	0.18	0.15	0.19
4 MHz	0.18	0.19	0.19	0.17	0.18	0.19	0.18	0.19	0.15
6 MHz	0.18	0.17	0.16	0.15	0.17	0.16	0.15	0.18	0.15
8 MHz	0.11	0.12	0.15	0.14	0.13	0.14	0.16	0.14	0.16
10 MHz	0.1	0.09	0.08	0.1	0.15	0.12	0.12	0.17	0.14
15 MHz	0.09	0.08	0.08	0.1	0.15	0.12	0.11	0.18	0.15

Tetraselmis sp. ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 0.5 M สภาพนำไฟฟ้า 24 mS/m

Re[$f(\omega)$] of 9 cells

ความถี่ สนามไฟฟ้า (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
60 kHz					0	0			
80 kHz	0	0	0	0				0	
100 kHz	0.018	0.016	0.016	0.015	0.016	0.017	0.014	0.016	0.017
200 kHz	0.07	0.067	0.065	0.068	0.065	0.056	0.069	0.073	0.077
400 kHz	0.073	0.077	0.077	0.066	0.073	0.069	0.078	0.075	0.06
500 kHz									
600 kHz	0.065	0.066	0.063	0.062	0.064	0.066	0.069	0.067	0.06
800 kHz	0.2	0.15	0.1	0.18	0.14	0.24	0.18	0.19	0.16
1 MHz	0.05	0.09	0.17	0.13	0.01	0.03	0.04	0.1	0.15
2 MHz	0.14	0.12	0.15	0.13	0.18	0.1	0.1	0.09	0.16
4 MHz	0.16	0.14	0.1	0.18	0.2	0.21	0.08	0.09	0.1
6 MHz	0.14	0.11	0.09	0.15	0.16	0.2	0.05	0.1	0.13
8 MHz	0.1	0.15	0.08	0.12	0.09	0.11	0.07	0.09	0.14
10 MHz	0.11	0.16	0.09	0.13	0.1	0.13	0.08	0.1	0.15
15 MHz	0.08		0.09		0.07	0.09	0.06		

Dendrobium sp. ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 0.5 M สภาพนำไฟฟ้า 1 mS/m

Re[$f(\omega)$] of 9 cells

ความถี่ สนามไฟฟ้า (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5 kHz							0		
10 kHz	0	0	0	0				0	
20 kHz	0.025	0.03	0.033	0.024	0.023	0.02	0.019	0.01	0.011
30 kHz									
40 kHz		0.021	0.033	0.02	0.025		0.039		0.043
50 kHz									
60 kHz									
80 kHz	0.04	0.03	0.029	0.036		0.041	0.04	0.01	0.036
100k Hz	0.045	0.05	0.06	0.032	0.043	0.043	0.052	0.044	0.04
200kHz	0.039	0.009	0.042	0.014	0.031	0.038	0.029	0.034	0.025
400 kHz	0.03	0.01	0.04		0.031		0.03	0.035	0.031
500 kHz									
600 kHz	0.04	0.056	0.04	0.05	0.036	0.04	0.044	0.041	0.038
800 kHz	0.039	0.05	0.036	0.05	0.038	0.041	0.043	0.039	0.035
1 MHz									
2 MHz	0.045	0.051	0.04	0.039	0.036	0.042	0.035	0.055	0.044
4 MHz	0.03	0.04	0.03	0.029	0.031	0.03	0.03	0.02	0.03
6 MHz	0.025	0.031	0.03	0.025	0.03	0.03	0.021	0.033	0.07
8 MHz	0.005	0.025	0.021	0.019	0.005	0.024	0.023	0.01	0.06
10 MHz	0.01	0.02	0.05		0.007	0.018	0.005	0.01	0.008
15 MHz	0.005	0.009	0.019	0.02	0.011	0.008	0.002	0.006	0.004

Dendrobium sp. ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 0.5 M สภาพนำไฟฟ้า 7 mS/m

Re[$f(\omega)$] of 9 cells

ความถี่ สนามไฟฟ้า (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10 kHz			0						0
20 kHz	0	0		0		0		0	
30 kHz	0.001	0.008	0.01	0.007	0.006	0.007	0.009	0.006	0.009
40 kHz	0.003	0.009	0.011	0.009	0.006	0.007	0.009	0.008	0.01
50 kHz									
60 kHz	0.004	0.01	0.02	0.07	0.005	0.006	0.003	0.008	0.01
80 kHz	0.003	0.01	0.02	0.007	0.004	0.003	0.005	0.008	0.01
100k Hz	0.015	0.016	0.015	0.012	0.014	0.014	0.01	0.016	0.01
200kHz	0.01	0.01	0.013	0.008	0.01	0.005	0.016	0.01	0.01
400 kHz	0.015	0.014	0.013	0.0008	0.01	0.005	0.016	0.01	0.01
500 kHz									
600 kHz	0.01	0.01	0.01	0.009	0.006	0.011	0.015	0.011	0.014
800 kHz	0.014	0.016	0.022	0.011	0.0008	0.017	0.015	0.015	0.017
1 MHz	0.011	0.011	0.01	0.015	0.01	0.012	0.018	0.011	0.013
2 MHz	0.01	0.01	0.01	0.01		0.005	0.01	0.015	0.019
4 MHz	0.015	0.02	0.007	0.015	0.011	0.012	0.009	0.008	0.017
6 MHz	0.013	0.012	0.015	0.014	0.009	0.001	0.011	0.012	0.03
8 MHz	0.0145	0.015	0.016	0.017	0.018	0.02	0.001	0.012	0.015
10 MHz	0.01	0.009	0.014	0.014	0.018	0.013	0.009	0.007	0.009
15 MHz	0.014	0.015	0.016	0.01	0.011	0.011	0.013	0.015	0.012

Dendrobium sp. ในสารละลายซูโครสเข้มข้น 0.5 M สภาพนำไฟฟ้า 20 mS/m

Re[$f(\omega)$] of 9 cells

ความถี่ สนามไฟฟ้า (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10 kHz				0					
20 kHz									
30 kHz	0		0		0	0	0		
40 kHz									
50 kHz									
60 kHz	0.005	0.001	0.002	0.009	0.0018	0.0015	0.0018	0.0012	0.001
80 kHz	0.006	0.007	0.001	0.008	0.01	0.002	0.007	0.003	0.005
100k Hz	0.004	0.006	0.005	0.0044	0.0041	0.0038	0.0041	0.004	0.0035
200kHz	0.01	0.007	0.008	0.0075	0.0065	0.004	0.0044	0.0053	0.005
400 kHz	0.01	0.0081	0.009	0.005	0.003	0.006	0.007	0.011	0.01
500 kHz									
600 kHz	0.01	0.007	0.005	0.004	0.0036	0.008	0.0079	0.011	0.01
700 kHz	0.01	0.02	0.01	0.01		0.01	0.01	0.009	0.006
800 kHz	0.01	0.03	0.009	0.01	0.01	0.016	0.026	0.015	0.02
1 MHz									
2 MHz	0.018	0.018	0.019	0.021	0.02	0.011	0.025	0.021	0.009
4 MHz	0.009	0.013	0.015	0.016	0.02	0.018	0.013	0.018	0.015
6 MHz									
8 MHz	0.005	0.013	0.01	0.015	0.021	0.01	0.01	0.038	0.01
10 MHz	0.014	0.016	0.017	0.018	0.015	0.015	0.015	0.014	0.014
15 MHz				0.019	0.018	0.018	0.016	0.018	0.021

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นาย สรวุฒิ บุญถวิล

วัน เดือน ปีเกิด 8 พฤศจิกายน 2516

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2539

ทุนการศึกษาและทุนวิจัย

- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ปีการศึกษา 2539
- บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ผลงานและประสบการณ์พิเศษ

- เคยได้รับรางวัลที่สามในการประกวดโครงงานทางวิทยาศาสตร์ระดับประเทศ ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น ชื่อโครงงาน "บันไดปลาโจน"
- เคยได้รับรางวัลชนะเลิศการประกวดดนตรีสากล ประเภทวงสตริง ของ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ซึ่งถ้วยพระราชทานรายการ *Coke Music Award* ประจำปี 2537
- ได้รับทุนโครงการแลกเปลี่ยนในการเดินทางไปศึกษาในส่วนของทฤษฎีทางด้านชีวฟิสิกส์ตามโครงการแลกเปลี่ยนนักศึกษาและบุคลากรไทยกับต่างประเทศประจำปี 2539 ระยะเวลา 4 เดือน ที่ UNESCO Centre for Membrane Science and Technology Department of Biophysics มหาวิทยาลัย New South Wales ออสเตรเลีย