

# บทที่ 1

## บทนำ

แบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์ คือทฤษฎีที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ขณะที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า ตั้งอยู่บนแนวคิดพื้นฐานว่า เยื่อหุ้มเซลล์ ไซโทพลาสซึมและออร์แกเนลต่างๆ ภายในเซลล์มีคุณลักษณะเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก(Scher, 1968; Pohl, 1978) เมื่อองค์ประกอบเหล่านี้อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าจากภายนอกในสภาวะที่เหมาะสมจะส่งผลให้เซลล์ตอบสนองในรูปแบบต่างๆ อาทิเช่น ทำให้เซลล์เคลื่อนที่ หากเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่มีความเข้มสนามสูงกว่าเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ไดอิเล็กโทรโฟเรซิส(Dielectrophoresis) (Pohl, 1978) ทำให้เซลล์หมุน (Fuhr and Kuzmin, 1986) ทำให้รูเปิดของเยื่อหุ้มเซลล์กว้างขึ้น และการเชื่อมเซลล์ 2 เซลล์เพื่อสร้างเซลล์ใหม่โดยวิธีกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูง(Chang, 1989) ปรากฏการณ์สองประการหลังมีประโยชน์ต่อการพัฒนาด้านเทคโนโลยีชีวภาพ อย่างไรก็ตามก็จะต้องอาศัยความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับค่าคงที่ทางไฟฟ้าที่จำเป็นก่อน ซึ่งจะทราบได้หากศึกษาผลกระทบที่ทำให้เซลล์เคลื่อนที่และหมุนขณะถูกเหนี่ยวนำ(Mahaworasilpa et.al.1994 ,1996) เพราะจะนำไปสู่การคำนวณหาค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์ ได้แก่ สภาพนำไฟฟ้า(conductivity) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) นอกจากนี้ประโยชน์ดังกล่าว Asami et.al. 1996 ได้ใช้ข้อมูลเหล่านี้ในการติดตามการเจริญเติบโตของกลุ่มเซลล์ที่เพาะเลี้ยงในเชิงอุตสาหกรรมซึ่งชี้วัดจากค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของกลุ่มเซลล์ที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้พอสรุปได้ว่าเซลล์ต่างชนิดกันหรือเซลล์ชนิดเดียวกันแต่มีอายุต่างกันจะมีสมบัติไดอิเล็กทริกที่ต่างกันด้วย (Gheorghiu, 1995)

การหาพารามิเตอร์ไดอิเล็กทริกของเซลล์ชีวภาพในทางปฏิบัติค่อนข้างมีข้อจำกัด ด้วยเหตุที่เซลล์ส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก ประกอบกับต้องศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์ ซึ่งเป็นเรื่องที่อาศัยคณิตศาสตร์ค่อนข้างมาก ทั้งนี้ขึ้นกับจำนวนพารามิเตอร์ในแบบจำลองนั้น แม้แต่แบบจำลองพื้นฐานสำหรับเซลล์เดี่ยวทรงกลมที่ไม่มีผนังเซลล์ (Spherical Single Shell Model, SSM) (Pohl, 1978) จะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องถึง 8 ตัว ได้แก่ สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม( $\sigma_c$ ) สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์( $\sigma_m$ ) สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายภายนอกที่ใช้แขวนลอยเซลล์ ( $\sigma_s$ ) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึม( $\epsilon_c$ ) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์( $\epsilon_m$ ) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารละลายภายนอก( $\epsilon_s$ ) รัศมีเซลล์ ( $R$ ) และความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์( $\delta$ ) พารามิเตอร์เหล่านี้เกี่ยวข้องสัมพันธ์กันแบบไม่เชิงเส้นตามที่ Mahaworasilpa et. al. (1994) ได้แสดงไว้ สำหรับแบบจำลองอื่น อาทิ แบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมผนังเซลล์สองชั้น(Spherical Double Shell Model, SDM)(Asami and Irimajiri, 1984) แบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงรีผนังเซลล์หนึ่งชั้น (Ellipsoidal Single Shell Model, ESM) (Watanabe et.al.1991) และแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงรีผนังเซลล์สองชั้น (Ellipsoidal Double Shell Model, EDM) (Radu et. al. 1996) จะมีจำนวนพารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนั้น

ปัญหาสำคัญประการหนึ่งจึงอยู่ที่การประมวลค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ออกมา โดยปกติหาก  
คำนวณมือ จะใช้เวลานาน

เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีเครื่องมือวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสภาพนำไฟฟ้าของ  
เซลล์เดี่ยวได้โดยตรง เว้นแต่จะกระทำโดยวิธีอ้อม ซึ่งแบ่งเป็นสองวิธีหลักคือ อินวาซีฟ เทค  
นิก (invasive technique) และ นอน-อินวาซีฟ เทคนิก (non-invasive technique) วิธีแรกเป็น  
วิธีที่ใช้ขั้วอิเล็กโทรดสอดเข็มเข้าไปในเซลล์หรือเนื้อเยื่อจัดเป็นวิธีวัดภายในเซลล์ สำหรับวิธีที่  
สองเป็นวิธีวัดภายนอกเซลล์ เหมาะกับเซลล์ชีวภาพที่มีชีวิตอยู่ เป็นวิธีที่ทำให้เซลล์ไม่รับบาดเจ็บ  
เสียหาย ในปัจจุบันมีผู้ทำการศึกษาแบบวิธีหลังแตกต่างกันไป อาทิ ไดอิเล็กทริกสเปกโทร  
สโคปี (dielectric spectroscopy) วิธีไดอิเล็กโทรฟอเรซิส และวิธีหมุนเซลล์ ทั้งสองวิธีหลังสุดมี  
ข้อดีข้อด้อยต่างกัน กล่าวคือ วิธีไดอิเล็กโทรฟอเรซิสเป็นวิธีศึกษาการเคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้า  
ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเซลล์ขณะเข้าเกาะขั้วขึ้นกับหลายปัจจัย อาทิ สมบัติไดอิเล็กทริก  
ของเซลล์และของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์ ลักษณะทางกายภาพรูปทรงของเซลล์ ความ  
หนืดของสารละลาย ความเข้มข้นและความถี่ของสนามไฟฟ้า สำหรับวิธีหมุนเซลล์อาศัยการ  
เหนี่ยวนำให้เซลล์ 2 เซลล์เคลื่อนที่เข้าสัมผัสกันตามปรากฏการณ์โซ่เซลล์ (pearl chain)  
ความเร็วเชิงมุมในการหมุนของเซลล์เป็นผลจากอันตรกิริยาระหว่างไดโพลโมเมนต์ของเซลล์ทั้ง  
สอง ซึ่งขึ้นกับหลายปัจจัยเช่นเดียวกับวิธีไดอิเล็กโทรฟอเรซิส แต่วิธีไดอิเล็กโทรฟอเรซิส มี  
ความสะดวกต่อการปฏิบัติมากกว่าวิธีหมุนเซลล์ เคยมีผู้ศึกษาวิจัยใช้สองวิธีดังกล่าว อาทิ Radu  
et.al. 1996 เลือกวิธีศึกษาการหมุนกับเซลล์ยีสต์ ประเมินค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์  
ตามแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงรีผนังเซลล์สองชั้นโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว Mahaworasilpa  
et.al., 1994, 1996 ใช้วิธีศึกษาไดอิเล็กโทรฟอเรซิสและวิธีหมุนเซลล์เม็ดเลือดแดงของคนและหนู  
ตามแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมผนังเซลล์หนึ่งชั้นโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบทรงกระบอกคู่ขนาน  
เป็นต้น จากที่กล่าวมาพบว่า วิธีการวัดความเร็วขณะเซลล์เกิดไดอิเล็กโทรฟอเรซิส เป็นวิธีที่  
สะดวกต่อการปฏิบัติเหมาะสำหรับการศึกษาวิจัยเริ่มต้นอีกทั้งนำศึกษาในเชิงทฤษฎี

งานวิจัยนี้ใช้วิธีประมวลค่าพารามิเตอร์ไดอิเล็กทริกแบบนอน-อินวาซีฟ เทคนิก กับ  
โพโรโทพลาสติกที่สกัดได้จากไบโอมของสับปะรดภูเก็ตที่เพาะเลี้ยงในห้องทดลอง โดยวิธีการใช้  
เอนไซม์ย่อยผนังเซลล์ เหนี่ยวนำให้โพโรโทพลาสติกเกิดไดอิเล็กโทรฟอเรซิสแล้ววัดความเร็วขณะ  
เคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้าแบบทรงกระบอกคู่ขนานที่ให้กำเนิดสนามไฟฟ้าแบบกระแสสลับ นำ  
ข้อมูลที่ไดวิเคราะห์ตามทฤษฎีแบบจำลองไฟฟ้าของเซลล์ คณะผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรมคำนวณ  
ค่าพารามิเตอร์ตามแบบจำลอง SSM ลงบนไมโครคอมพิวเตอร์รวมทั้งได้สร้างแบบจำลอง SDM  
เป็นที่สำเร็จ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ประมวลได้ตามสองแบบจำลองนี้แสดงไว้ในผลการทดลอง

## การตรวจเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 1. สมบัติไดอิเล็กทริกของเซลล์

องค์ประกอบหลักของเซลล์ชีวภาพที่แสดงสมบัติทางไฟฟ้าเด่นชัดคือเยื่อหุ้มเซลล์และไซโทพลาสซึม ด้วยเหตุเพราะเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) มีหน้าที่คัดเลือกสารที่แพร่ผ่านเข้าออกจากรวมทั้งทำหน้าที่เป็นผนังกันของเหลวภายในและภายนอกเซลล์ จึงเป็นองค์ประกอบแรกของเซลล์ที่ประจุและไอออนจะเคลื่อนที่ผ่าน ในสภาวะปกติของเหลวภายในเซลล์(ไซโทพลาสซึม)จะมีสภาพนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสภาพแวดล้อมภายนอกเซลล์ (Bernstien, 1902) เนื่องจากภายในเซลล์มีกลไกที่จะพยายามรักษาระดับความเข้มข้นของโพแทสเซียมไอออน รวมทั้งไอออนชนิดอื่นๆ อาทิ โซเดียมและคลอไรด์ไอออน ในปริมาณที่สูงพอเพียงพอต่อการดำรงชีวิตของเซลล์ ความแตกต่างของปริมาณไอออนดังกล่าวส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น เรียกว่า ศักย์เมมเบรน(membrane potential) ในสภาวะที่ไม่มีสิ่งรบกวนภายนอกมารบกวนเซลล์ ศักย์ไฟฟ้างกล่าวจะมีค่าอยู่ในระดับมิลลิโวลต์และจะมีค่าติดลบเมื่อเทียบกับภายนอกเซลล์ (Heinz, 1981)

หากพิจารณาองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์พบว่าประกอบขึ้นจากธาตุหลักทางเคมี 4 ธาตุคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ประกอบขึ้นเป็นกรดไขมัน (fatty acid) อาทิเช่น กรดพาลมิติก (palmitic acid) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างประกอบด้วยสองส่วน กล่าวคือ ส่วนหางมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบสายไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon chain) ที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี และไม่สามารถแตกตัวในน้ำ (ไม่ละลายน้ำ) จึงเรียกส่วนนี้ว่าส่วนที่กลัวน้ำหรือไม่ชอบน้ำ (ไฮโดรโฟบิก, hydrophobic) สำหรับส่วนหัว มีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบขึ้นเป็นกลุ่มของกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid group) สามารถแตกตัวในน้ำได้โดยเฉพาอย่างยิ่ง น้ำ จึงเรียกส่วนนี้ว่า ส่วนที่ชอบน้ำ (ไฮโดรฟิลิก, hydrophilic) โดยทั่วไป โมเลกุลของกรดไขมันที่อยู่ในเซลล์จะใช้ส่วนหัวเชื่อมพันธะโควาเลนต์กับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้เคียง ด้วยเหตุนี้ กรดไขมันจึงมีความหลากหลายในรูปแบบ ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของโมเลกุลที่มันเข้ากลุ่มด้วย แต่โดยทั่วไป กรดไขมันที่พบในเยื่อหุ้มเซลล์มักจะรวมกลุ่มกับกลีเซอรอล (glycerol) ในลักษณะส่วนหัวสองหัวของกรดไขมันต่อเข้ากับกลีเซอรอล เรียกทั้งหมดว่า ฟอสโฟไลปิด (phospholipid) ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของฟอสโฟไลปิดจะประกอบด้วย 2 ทางที่ไม่มีขั้วของไฮโดรโฟบิก และ 1 หัวที่มีขั้วของไฮโดรฟิลิก โดยส่วนหัวจะหันเข้าจับกลุ่มกับโมเลกุลของน้ำ ส่วนหางจะพยายามอัดตัวและหันเข้าสู่บริเวณที่เป็นอากาศหรือสุญญากาศ หรือในลักษณะทางต่อหางลักษณะการจัดวางโครงสร้างของกลุ่มโมเลกุลเช่นนี้ จะเกิดสภาพที่เสถียรที่สุดและใช้พลังงานในการจัดเรียงต่ำสุด ซึ่งเรียกว่าชั้นลิปิดไบเลเยอร์ (lipid bilayer) จากที่กล่าวมา จัดว่าโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก ในสภาพปกติเมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้าไหลผ่านเข้าออกเยื่อหุ้มเซลล์ มันจะแสดงพฤติกรรมเป็นฉนวน แต่ในทางกลับกันถ้ามีกระแสไฟฟ้า

หรือสนามไฟฟ้าไหลผ่านเข้าออกเยื่อหุ้มเซลล์ในระดับที่เหมาะสมมันจะแสดงพฤติกรรมเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า(capacitor) (Pohl, 1978)

สำหรับไซโทพลาสซึมซึ่งเป็นของเหลวที่อยู่ภายในเซลล์มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก กินเนื้อที่เกือบทั้งหมดของเซลล์พืชชีวภาพ จัดว่าเป็นวัสดุไดอิเล็กทริกเช่นกัน เนื่องจากน้ำเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก ในปี 1980 Grant (อ้างตาม Wyard,1989)พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้วัดตามเทคนิคการทดลองแบบวิธีบริดจ์ กล่าวคือที่ความถี่ย่านต่ำกว่ากิโกลเฮิร์ตซ์มากๆ น้ำจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประมาณ 5 และที่ความถี่ย่านสูงน้ำจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น มีค่าอยู่ที่ประมาณ 80 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เรียกการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกตามความถี่สนามไฟฟ้าเช่นนี้ว่า "ดิสเพอชัน" (dispersion) โดยปกติ วัสดุไดอิเล็กทริกเกือบทุกชนิดมีคุณสมบัติดิสเพอชัน (Bottcher and Bordewijk,1978) ในกรณีสารละลายโปรตีน เปปไทด์ และกรดอะมิโน ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เป็นสารละลายที่มีขั้ว ประจุของโมเลกุลเหล่านี้มีลักษณะการกระจายตัวซับซ้อนเพราะมีขนาดโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ ในปี 1964 Haggis (อ้างตาม Grant,1980) ทดลองพบว่า เมื่อความถี่สูงขึ้น การดิสเพอชันของโมเลกุลอะมิโนที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย จะเกิดในลักษณะลดลงคล้ายขั้นบันได 2 ขั้น กล่าวคือขั้นแรกเกิดขึ้นในช่วงความถี่ย่านต่ำ มีการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจากที่ประมาณ 100 ลดลงเหลือ 70 และขั้นที่สองเกิดขึ้นที่ย่านความถี่สูงระดับกิกะเฮิร์ตซ์ (พันล้านเฮิร์ตซ์) มีการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจากที่ประมาณ 70 ลดลงเหลือประมาณ 10 กรณีนี้ต่างจากกรณีของโมเลกุลน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าในลักษณะเพียงขั้นเดียว

งานวิจัยของ Schwan(1985) บ่งชี้ให้เห็นว่าเซลล์ชีวภาพจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้ากระแสสลับได้จนถึงช่วงความถี่ระดับกิกะเฮิร์ตซ์ เป็นผลสืบเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างไดอิเล็กทริกกับสนามไฟฟ้าที่แต่ละช่วงความถี่ก่อให้เกิดการโพลาไรซ์(polarize)ที่ต่างกัน ส่งผลให้เกิดการดิสเพอชันที่มีลักษณะคล้ายขั้นบันได แบ่งเป็น 3 ขั้น ขั้นที่หนึ่งเกิดที่ความถี่ย่านต่ำกว่าระดับกิโกลเฮิร์ตซ์ เรียกแอลฟา-ดิสเพอชัน ขั้นที่สองเกิดที่ความถี่ย่านกลางระดับกิโกลเฮิร์ตซ์ถึงเมกะเฮิร์ตซ์โดยประมาณ เรียก เบต้า-ดิสเพอชัน ขั้นที่สามเกิดที่ความถี่ย่านสูงกว่าระดับเมกะเฮิร์ตซ์ขึ้นไป เรียก แกมมา-ดิสเพอชัน นอกจากนี้ Schwan ยังได้แบ่งดิสเพอชันที่ช่วงรอยต่อระหว่าง แอลฟากับเบต้า ดิสเพอชัน เรียก เทลต้า-ดิสเพอชัน อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีกฎเกณฑ์แน่นอนตายตัวสำหรับการแบ่งขอบเขตช่วงความถี่เหล่านี้ ทั้งนี้ขึ้นกับคุณลักษณะและองค์ประกอบของเซลล์แต่ละชนิด (Schwan,1988)

แอลฟา-ดิสเพอชัน เกิดจากชั้นประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวเซลล์ส่งอิทธิพลดึงดูดไอออนของสารละลายภายนอกที่มีขั้วตรงข้ามบริเวณใกล้เคียงให้มาออกัน เสมือนหนึ่งได้สร้างชั้นของค่าความนำไฟฟ้า(conductance) ห่อหุ้มเซลล์ โดยที่ชั้นประจุดังกล่าวจะมีความหนาสัมพันธ์กับความเข้มข้นและชนิดของไอออนของสารละลายที่อยู่ล้อมรอบเซลล์ เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า ความสัมพันธ์ของ Debye และเรียกความหนาของชั้นประจุดังกล่าวนี้ว่า Debye length โดยปกติค่าความนำไฟฟ้าของชั้นประจุที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าอยู่ประมาณนาโนซีเมนส์ และสามารถแปร

เปลี่ยนค่าได้ตามความถี่ของสนามไฟฟ้าเรียกว่า ค่าแอดมิตแตนซ์ (admittance) จากสมมติฐานที่กล่าวมานี้คาดว่าสาเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เกิดการดิสเพอซันแบบแอลฟา มีผู้คิดทฤษฎีขึ้นมารองรับไว้อาทิ Schwarz(1962) และทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับเป็นของ Grosse and Foster(1987)

**เบต้า-ดิสเพอซัน** ทฤษฎีแรกเริ่มศึกษาโดย Maxwell(1873) ใช้ในกรณีสนามไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นในปี 1914 Wagner ได้พัฒนาทฤษฎีสำหรับใช้กับกรณีสนามไฟฟ้ากระแสสลับ และพัฒนาต่อมาโดย Schwan(1957) และ Pauly and Schwan (1959) (อ้างตาม Coster et al.1996) ทฤษฎีตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างชั้นของเหลวภายในเซลล์กับสารละลายภายนอกเซลล์ เยื่อหุ้มเซลล์ที่คั่นอยู่ระหว่างสารละลายทั้งสองทำหน้าที่เสมือนตัวเก็บประจุไฟฟ้าและในขณะเดียวกันจะเป็นตัวต้านทานไฟฟ้า ลักษณะเช่นนี้สมมูลกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบตัวเก็บประจุต่อขนานกับตัวต้านทานไฟฟ้า ในกรณีที่เซลล์อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าแบบกระแสสลับค่าความต้านทานของเยื่อหุ้มเซลล์จะเปลี่ยนตามความถี่ของสนามไฟฟ้า เรียก ค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) เกิดการ ดิสเพอซันอิมพีแดนซ์ขึ้น ส่งผลให้สนามไฟฟ้าแพร่ผ่านเข้าสู่เซลล์ยากง่ายต่างกัน ในปัจจุบันทฤษฎีของ Maxwell-Wagner ยังเป็นที่ยอมรับและใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์ที่ความถี่สนามไฟฟ้าปานกลาง

**แกมมา-ดิสเพอซัน** Schwan (1988) เสนอว่า การดิสเพอซันที่ความถี่ย่านสูงนี้น่าจะเกิดจากอันตรกิริยาทางไฟฟ้าระหว่างน้ำในไซโทพลาสซึมกับสนามไฟฟ้า โดยปกติน้ำเป็นสารที่มีสมบัติไดอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กทริกตามความถี่ ภายใต้วงความถี่ต่ำกว่าระดับจิกะเฮิร์ตซ์ น้ำจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงกว่าที่ช่วงความถี่มากกว่าจิกะเฮิร์ตซ์ขึ้นไป ส่งผลให้ความสามารถในการแยกประจุในการเกิดไดโพลโมเมนต์ลดลง ผลที่ตามมาคือ มีความล้าช้าเกิดขึ้นกับการสลับทิศของไดโพลโมเมนต์ ก่อให้เกิดความไม่สอดคล้องตามทิศของสนามไฟฟ้ากระแสสลับ การศึกษาดิสเพอซันกรณีนี้มีทฤษฎีมารองรับน้อยและไม่สะดวกในทางปฏิบัติเพราะต้องอาศัยสนามไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมาก

## 2. ไดอิเล็กโตรโฟเรซิส (Dielectrophoresis)

ไดอิเล็กโตรโฟเรซิสคือ การเคลื่อนที่ของวัสดุไดอิเล็กทริกหรือวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (neutral matter) ในสนามไฟฟ้าที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามไฟฟ้าต่อระยะทางแบบไม่เชิงเส้น หรือเรียกว่าสนามไฟฟ้าแบบไม่เอกรูป (non-uniform electric field) โดยทั่วไปมักเกิดในกรณีที่วัตถุนั้นถูกแขวนลอยในสารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำประมาณ มิลลิซีเมนส์ต่อเมตร  $mS.m^{-1}$  การเคลื่อนที่ของเซลล์ที่เกิดไดอิเล็กโตรโฟเรซิสจะมีทิศตามทิศของแรง เรียกแรงดังกล่าวว่า แรงไดอิเล็กโตรโฟเรติก (dielectrophoretic force)

เซลล์จัดเป็นวัตถุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ไม่มีขั้วและเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก โมเลกุลภายในเซลล์ที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแบบไดโพล-ไดโพล จะถูกแรงจากสนามไฟฟ้าจัดเรียงทิศไดโพลใหม่ให้มีทิศตามสนามไฟฟ้า หากโมเลกุลใดยังไม่มีไดโพลอยู่ก่อนจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดไดโพลขึ้น หากมองในภาพรวมเสมือนว่าภายในเซลล์เกิดขั้วทางไฟฟ้าขึ้น พฤติกรรมนี้ก่อให้เกิดได

โพลีเมอร์ขึ้น เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอก ไดโพลโพลีเมอร์จะตั้งกล่าวจะหายไป ในกรณีสนามไฟฟ้าภายนอกเป็นแบบกระแสตรง ทิศของไดโพลโพลีเมอร์จะขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์ แต่สำหรับกรณีสนามไฟฟ้าภายนอกเป็นแบบกระแสสลับ ไดโพลโพลีเมอร์จะมีการกลับสลับทิศตามทิศสนามไฟฟ้าภายนอกด้วยความถี่ในการกลับทิศเท่ากัน มีบางกรณีที่ความถี่ในการกลับทิศไดโพลไม่สอดคล้องกับความถี่สนามไฟฟ้า นั่นคือที่ความถี่ย่านสูงแบบแกมมา-ดิสเพอซัน

Pohl(1978) อธิบายว่า ความเข้มสนามไฟฟ้าที่มากไดโพลจะมีค่าสูง ในกรณีที่แรงภายนอกมีค่าสูงเกินกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุในอะตอม จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดเป็นอิสระและไดอิเล็กทริกนั้นจะนำไฟฟ้าได้ เรียกพฤติกรรมนี้ว่า ไดอิเล็กทริกเบรคดาวน์(dielectric breakdown) ซึ่งไม่ก่อให้เกิดไดอิเล็กโทรโพเรซิส นอกเหนือจากที่กล่าวมา ยังมีการเกิดไดโพลในลักษณะอื่นอีกแบ่งได้ตามตำแหน่งที่เกิด โดยส่วนใหญ่นิยมแบ่งตามการเกิดโพลาริเซชัน (ไดโพลโพลีเมอร์ต่อหน่วยปริมาตร) หากเกิดที่ระดับอิเล็กตรอน(ดังที่ไดกล่าวไปแล้ว)เรียกว่า อิเล็กตรอนิกส์ โพลาริเซชัน (electronic polarization) หากเกิดขึ้นที่ระดับอะตอม จะเรียกอะตอมมิก โพลาริเซชัน (atomic polarization) และหากเกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลในสารชนิดนั้นมีขั้วอยู่ก่อนแล้ววางตัวตามทิศสนามไฟฟ้าภายนอก เรียก ไดโพลาร์ โพลาริเซชัน (dipolar polarization) หรือหากเกิดขึ้นในโมเลกุลที่เป็นสายโซ่ยาวจำพวกโพลีเมอร์หรือในโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นโครงผลึก (lattice)จะเรียกว่า นอมาดิก โพลาริเซชัน (nomadic polarization) และแบบสุดท้ายเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อของชั้นไดอิเล็กทริกต่างชนิดกัน เรียก อินเตอร์เฟเชียล โพลาริเซชัน (interfacial polarization) หรือเรียกว่า การโพลาริเซชันแบบ แมกซ์เวล-แวกเนอร์ (Maxwell-Wagner polarization) Pohl เสนอว่าการโพลาริเซชันแบบสุดท้ายมีอิทธิพลที่สุดต่อการเกิดไดโพลโพลีเมอร์ภายในเซลล์และเป็นพื้นฐานทฤษฎีของแรงไดอิเล็กโทรโพเรติก

แรงไดอิเล็กโทรโพเรติก มีค่าได้ทั้ง บวก ลบ หรือศูนย์ Pohl(1978) สรุปว่าแรงดังกล่าวมีค่าขึ้นกับ การเกิดโพลาริเซชัน ปริมาตรของไดอิเล็กทริก(ปริมาตรเซลล์) และความเข้มสนามไฟฟ้า เทอมโพลาริเซชันเป็นฟังก์ชันขึ้นกับ ค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้า(ของเซลล์) หากสนามไฟฟ้าเป็นแบบกระแสสลับ ค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าจะเป็นค่าเชิงซ้อน (complex number) โดยทั่วไปไดอิเล็กทริกแต่ละชนิดจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าภายนอกได้ไม่เท่ากันขึ้นกับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้

เมื่อสนามไฟฟ้าภายนอกผ่านทะลุชั้นเยื่อหุ้มเซลล์เข้าสู่ภายในเซลล์จะเหนี่ยวนำให้องค์ประกอบทุกส่วนภายในเซลล์เกิดการโพลาริเซชัน ทิศของไดโพลโพลีเมอร์ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวกำหนดทิศการเคลื่อนที่ของเซลล์ ถ้าไดโพลมีค่ามากย่อมแสดงว่าเซลล์มีอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าได้ดี ในทางกลับกันถ้าไดโพลมีค่าน้อยย่อมแสดงว่าเซลล์มีอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าได้ไม่ดี ดังนั้นอาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ขนาดของไดโพลโพลีเมอร์ย่อมแสดงถึงความสามารถในการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าของเซลล์

### 3.แบบจำลองไฟฟ้าของเซลล์ชีวภาพ

ในการหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์ จำเป็นต้องอาศัยสมการคณิตศาสตร์ที่จำลองกลไกการแลกเปลี่ยนพลังงาน แลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้ารวมถึงกลไกการกักเก็บประจุไฟฟ้าที่เยื่อหุ้มเซลล์ ความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า แบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์แบบจำลองพื้นฐานเริ่มต้นที่แบบจำลองวัตถุไดอิเล็กทริกทรงกลมตัน ต่อมาถูกพัฒนาให้ประยุกต์ใช้กับเซลล์ชีวภาพเป็นแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมที่มีเยื่อหุ้มเซลล์หนึ่งชั้นไม่มีผนังเซลล์(เปลือกชั้นเดียว) ความซับซ้อนของแบบจำลองขึ้นกับรูปร่างของเซลล์รวมถึงจำนวนชั้นของเปลือกเซลล์ ถึงแม้ว่าแบบจำลองต่าง ๆ ที่กล่าวในบทนำจะมีจำนวนตัวแปรต่างกัน แต่อาศัยหลักการเดียวกันคือนำทฤษฎีของแมกซ์เวลล์-แวกเนอร์ มาใช้วิเคราะห์การไหลไรซ์ของกลุ่มประจุที่บริเวณชั้นรอยต่อระหว่างชั้นไดอิเล็กทริกที่อยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับช่วงความถี่ตั้งแต่ระดับกิโลเฮิร์ตซ์จนถึงเมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเรียกช่วงความถี่นี้ว่า ช่วงเบต้าดีสเพชัน ( $\beta$ -dispersion) เป็นช่วงความถี่สนามไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ในปี 1996 Asami และคณะ รายงานว่า พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์เม็ดเลือดขาว เซลล์น้ำเหลืองและโพรโทพลาสต์พืชภายในช่วงความถี่สนามไฟฟ้า 1 kHz ถึง 1 GHz ตามแบบจำลอง SSM SDM และแบบจำลองSDM(ประยุกต์)ตามลำดับ มีค่าอยู่ในช่วงหนึ่งถึงประมาณพันเท่าของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสุญญากาศ นอกจากนี้ในปีเดียวกัน Radu et.al. ได้ประมาณค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์และไซโทพลาสซึมของเซลล์ยีสต์ ศึกษาภายในช่วงความถี่สนามไฟฟ้า 1 kHz ถึง 10 MHz โดยอาศัยแบบจำลองทางไฟฟ้า EDM ได้ค่าในระดับประมาณ 6 เท่าของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ และ  $1\mu S.m^{-1}$   $0.2 S.m^{-1}$  และตามลำดับ สำหรับงานวิจัยในเซลล์สัตว์พบว่าในปี 1996 Asami และคณะ ได้ทดลองหาค่าความเก็บประจุและค่าความนำไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวจากไตสุนัขด้วยอุปกรณ์สแกนนิ่งไดอิเล็กทริกไมโครสโคป(Scanning Dielectric Microscope) ได้ผลอยู่ในช่วงเฟมโตฟารัด และนาโนซีเมนต์ ตามลำดับ ขณะที่ในปี 1994 Mahaworasilpa et. al. ได้รายงานค่าเซลล์เม็ดเลือดแดงของคนและหนูมีสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมของเยื่อหุ้มเซลล์ประมาณ  $0.1S.m^{-1}$  และ  $1\mu S.m^{-1}$  ตามลำดับ สรรุฉิ (วิทยานิพนธ์,2541)ได้ทดลองหาค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้าของเซลล์แพลงก์ตอนพืชน้ำเค็มสองชนิด ได้แก่ *Chlorella sp.* *Tetraselmis sp.* และ โพรโทพลาสต์ *Dendrobium sp.* ด้วยวิธีไดอิเล็กโตรฟอเรซิส ขณะเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่กำเนิดจากอิเล็กโตรดทรงกระบอกคู่ขนาน โดยอาศัยแบบจำลองทางไฟฟ้า SSM ได้ค่าสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์และของไซโทพลาสซึม ค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์และของไซโทพลาสซึมของเซลล์ *Chlorella sp.* ต่างๆดังนี้  $80-200 \mu S.m^{-1}$   $11-17 mS.m^{-1}$   $100 \epsilon_0$  และ  $110 \epsilon_0 - 117 \epsilon_0$  ตามลำดับ และสำหรับของเซลล์ *Tetraselmis sp.* ได้ค่าดังนี้  $10-80 \mu S.m^{-1}$   $15-42 mS.m^{-1}$   $14-40 \epsilon_0$  และ  $79 \epsilon_0 - 110 \epsilon_0$  ตามลำดับ และสำหรับของโพรโทพลาสต์ *Dendrobium sp.* ได้ค่าดังนี้  $3-80 \mu S.m^{-1}$   $1-21 mS.m^{-1}$   $4-22 \epsilon_0$  และ  $80 \epsilon_0 - 84 \epsilon_0$  ตามลำดับ

#### 4. คณิตศาสตร์ของแบบจำลองไฟฟ้าเซลล์เดี่ยว

งานวิจัยนี้ได้ประมวลค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้แก่ค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์สับปรตฎุเกิดตามแบบจำลอง SSM และ SDM แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนทฤษฎีวิเคราะห์แบบจำลอง และส่วนการทดลองให้เซลล์เกิดไดอิเล็กโทรโพเรซิส

##### 4.1 วิเคราะห์ตามแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมผนังเซลล์หนึ่งชั้น(Spherical Single Shell Model, SSM)

ประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยสมมติฐานว่าเซลล์(หรือโพรโทพลาสต์)ประพฤติตัวเป็นไดอิเล็กทริกแบบไม่อุดมคติ กล่าวคือ สามารถนำไฟฟ้าได้ตามแบบจำลองไฟฟ้าเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกเซลล์หนึ่งชั้นดังที่ Pohl(1978) ได้แสดงไว้ ขณะที่โพรโทพลาสต์เกิดไดอิเล็กโทรโพเรซิส จะเคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้าด้วยความเร็วไดอิเล็กโทรโพเรติก วัตความเร็วดังกล่าวแล้วนำมาวิเคราะห์หาส่วนจริงของฟังก์ชันความถี่ ( $Re\{f(w)\}$ ) ตามวิธี Mahaworasilpa et al.1996 ประมาณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าด้วยกระบวนการกระทำซ้ำเลือกค่าพารามิเตอร์ที่สอดคล้องที่สุด โดยวิธีวิเคราะห์ความสัมพันธ์ถดถอยร่วมกับวิธีกำลังสองน้อยสุด

ทฤษฎี ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่างๆได้แก่ สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม( $\sigma_c$ ) ของผนังเซลล์ ( $\sigma_m$ ) และของสารละลายที่แขวนลอยเซลล์( $\sigma_s$ ) , ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึม ( $\epsilon_c$ ) ,ของผนังเซลล์( $\epsilon_m$ ) และของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์ ( $\epsilon_s$ ) รัศมีเซลล์ (R) รวมถึงความหนาของเปลือกเซลล์ ( $\delta$ ) จะถูกทำการประมาณค่าด้วยเทคนิคไดอิเล็กโทรโพเรซิส โดยอาศัยหลักการการเคลื่อนที่ตามกฎข้อที่หนึ่งของนิวตัน อาศัยแรงตามแบบจำลองวิเคราะห์หาความเร็วไดอิเล็กโทรโพเรติกที่สัมพันธ์กับกับแรงลากหนืดในสารละลายตามกฎของสโตกส์ ความเร็วจะขึ้นกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ชนิดนั้นๆ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือขึ้นกับพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทั้ง 8 ตัวดังที่กล่าวในตอนต้น พารามิเตอร์เหล่านี้สัมพันธ์กันแบบไม่เชิงเส้น เขียนรวมให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ของไดโพลโมเมนต์กับสนามไฟฟ้าภายนอก ในรูปของแรงไดอิเล็กโทรโพเรติกได้ดังสมการ

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

เมื่อ  $\vec{F}_{DEP}$  คือแรงไดอิเล็กโทรโพเรติก  $\vec{F}_{DE}$  คือสนามไฟฟ้าภายนอกและ  $\vec{\mu}(\omega)$  คือไดโพลโมเมนต์ที่เป็นฟังก์ชันขึ้นกับความถี่เชิงมุม( $\omega$ )ของสนามไฟฟ้า



ไดโพลโมเมนต์มีค่าตามสมการ

$$\bar{\mu}(\omega) = 4\pi R^3 \epsilon_s f(\omega) \bar{E} \quad (2)$$

เมื่อ  $f(\omega)$  คือ ฟังก์ชันที่ขึ้นกับความถี่ของสนามไฟฟ้าและพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทั้ง 8 ตัวตั้งที่กล่าวข้างต้น และ  $R$  คือรัศมีเซลล์ จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงลากของสโตกส์ (Stokes' drag force,  $\bar{F}_\eta$ ) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับความเร็วของวัตถุทรงกลมกับแรงไดโพลเล็กโทรฟอเรติก (สมการที่ 1) เซลล์ที่เคลื่อนที่ภายใต้สารละลายที่มีความหนืด  $\eta$  จะมีความเร็วไดโพลเล็กโทรฟอเรติกตามสมการ

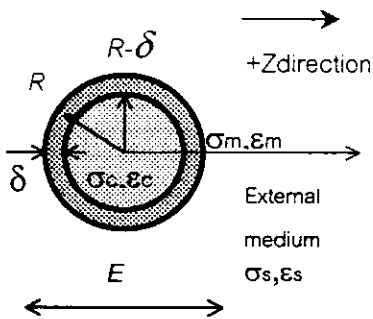
$$\bar{v} = \frac{\text{Re}[(\bar{\mu}(\omega) \cdot \bar{\nabla}) \bar{E}]}{k} = \frac{\epsilon_s R^2 \text{Re}[f(\omega)] \bar{\nabla}(\bar{E}^2)}{3\eta} \quad (3)$$

เรียกสมการนี้ว่าความเร็วไดโพลเล็กโทรฟอเรติกตามแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกเซลล์หนึ่งชั้น เมื่อ  $\bar{\nabla}(\bar{E}^2)$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามไฟฟ้ากำลังสองเทียบกับระยะทาง

$k = 6\pi\eta R$  และ  $\text{Re}[f(\omega)]$  คือส่วนจริงของฟังก์ชันความถี่ มีค่าตามสมการ

$$\text{Re}[f(\omega)] = -\left[ \frac{AB + CD\omega^2}{B^2 + D^2\omega^2} \right] \quad (4)$$

ค่า  $A$   $B$   $C$  และ  $D$  มีค่าตาม Mahaworasilpa และคณะ(1994)



รูปที่ 1. แสดงแบบจำลองทางไฟฟ้าเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกเซลล์หนึ่งชั้น  $\delta$  คือความหนาของเปลือกเซลล์ (เยื่อเซลล์)  $R$  คือรัศมีเซลล์  $\epsilon_m$ ,  $\epsilon_c$  และ  $\epsilon_s$  คือ สภาพยอมของเยื่อเซลล์ ไซโทพลาสซึม และของสารละลายภายนอกตามลำดับ  $\sigma_m$ ,  $\sigma_c$  และ  $\sigma_s$  คือ สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อเซลล์ ไซโทพลาสซึม และสารละลายภายนอกตามลำดับ  $E$  คือสนามไฟฟ้าที่มีทิศทางตามรูป

ความเร็วไดโพลเล็กโทรฟอเรติกมีค่าคงที่ภายใต้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มสนามไฟฟ้ากำลังสองเทียบกับระยะทางที่ต่ำจะได้ว่า

$$\text{Re}[f(\omega)] = \frac{3\eta \bar{v}}{\epsilon_s R^2 \bar{\nabla}(\bar{E}^2)} \quad (5)$$

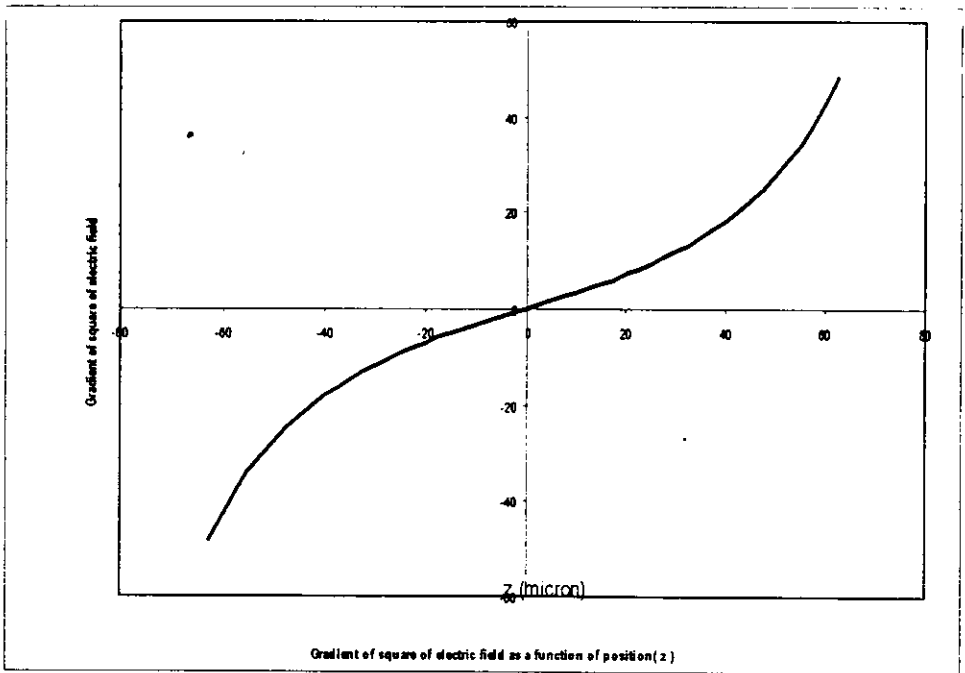
วัตร์ศมีเซลล์ คำนวณความเร็วไดอิเล็กโทรฟอเรติก และหาความหนืดของสารละลายที่ใช้  
 แขนงลอยเซลล์แล้วแทนค่ากลับลงในสมการ 5 สำหรับเทอม  $\nabla(\bar{E}^2)$  มีค่าขึ้นกับรูปทรงขั้วไฟ  
 ฟ้า งานวิจัยนี้ใช้ขั้วไฟฟ้าแบบทรงกระบอกคู่ขนานวางห่างกันตามแนว Z มีค่า

$$\nabla(\bar{E}^2) = \left[ \frac{Vd}{\ln\left(\frac{d-a}{a}\right)} \right]^2 \left[ \frac{z}{\left(\frac{d^2}{4} - z^2\right)^3} \hat{a}_z \right] \quad (6)$$

เมื่อ  $V$  คือศักย์ไฟฟ้าแบบกำลังสองเฉลี่ย (root mean square) (โวลต์)  $d$  คือระยะห่างระหว่างขั้ว  
 ไฟฟ้าวัดจากจุดศูนย์กลางขั้ว (เมตร)  $a$  คือรัศมีขั้ว (เมตร) งานวิจัยนี้ใช้เงื่อนไขดังนี้

$V = 4.9$  โวลต์  $d = 250$  ไมครอน และ  $a = 62.5$  ไมครอน ตลอดจนการทดลอง

พลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเทอม  $\nabla(E^2)$  กับระยะในแนวแกน  $z$  ได้ดังนี้



ดังนั้นไม่ว่าเซลล์จะเคลื่อนที่ไปในทิศทาง  $+z$  หรือ  $-z$  ก็จะมีความเร็วเท่ากัน และจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นขณะที่เคลื่อนที่เข้าใกล้ขั้วไฟฟ้าโดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า  $\nabla(E^2)$  ต่อหน่วยระยะทาง  $z$  (หรือความชันกราฟ) เป็นฟังก์ชันของ

$$\text{slope of } \nabla(E^2) = \left( \frac{V \cdot d}{\ln\left(\frac{d-a}{a}\right)} \right)^2 \left( \frac{\left(\frac{d^2}{4} - z^2\right) + 6z^2}{\left(\frac{d^2}{4} - z^2\right)^4} \right) \quad (7)$$

จากสมการที่ 3) พบว่า ความเร็วไดโพลีเล็กโทรฟอเรติกมีค่าขึ้นกับเทอม  $\nabla(E^2)$  โดยถือว่าพารามิเตอร์ต่างๆ อันได้แก่  $\epsilon_s, R^2, \text{Re}[f(\omega)]$  และ  $\eta$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้นความเร็วจะมีค่าคงที่ถ้าเทอม  $\nabla(E^2)$  มีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่ำเมื่อเทียบตามระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้า

ความเร็วไดโพลีเล็กโทรฟอเรติกใน 2 มิติ ระนาบ zy มีค่า

$$DEP = \frac{\epsilon_s R^2 \text{Re}[f(\omega)]}{3i} \left[ \frac{Vd}{\ln\left(\frac{d-a}{a}\right)} \right]^2 \left[ \frac{z}{\left(\frac{d^2}{4} - z^2\right)^3} \hat{a}_z - \frac{y}{\left(\frac{d^2}{4} + y^2\right)^3} \hat{a}_y \right] \quad 8)$$

เมื่อ  $\text{Re}[f(\omega)] = - \left[ \frac{AB + CD\omega^2}{B^2 + D^2\omega^2} \right]$  ตามที่ Mahaworasilpa et al.1996 ได้แสดงไว้

$$A = (2k - 1)(\sigma_c \sigma_m - \epsilon_c \epsilon_m \omega^2) + (1 - k)(\sigma_s \sigma_m - \epsilon_s \epsilon_m \omega^2) + k[\sigma_s \sigma_c - 2\sigma_m^2 + \omega^2(2\epsilon_m^2 - \epsilon_s \epsilon_c)]$$

$$B = (1 - 2k)(\sigma_c \sigma_m - \epsilon_c \epsilon_m \omega^2) + 2(1 - k)(\sigma_s \sigma_m - \epsilon_s \epsilon_m \omega^2) + 2k[\sigma_s \sigma_c + \sigma_m^2 - \omega^2(\epsilon_m^2 + \epsilon_s \epsilon_c)]$$

$$C = (2k - 1)(\sigma_m \epsilon_c + \sigma_c \epsilon_m) + (1 - k)(\sigma_m \epsilon_s + \sigma_s \epsilon_m) + k(\sigma_c \epsilon_s + \sigma_s \epsilon_c - 4\sigma_m \epsilon_m)$$

$$D = (1 - 2k)(\sigma_m \epsilon_c + \sigma_c \epsilon_m) + 2(1 - k)(\sigma_m \epsilon_s + \sigma_s \epsilon_m) + 2k(\sigma_c \epsilon_s + \sigma_s \epsilon_c + 2\sigma_m \epsilon_m)$$

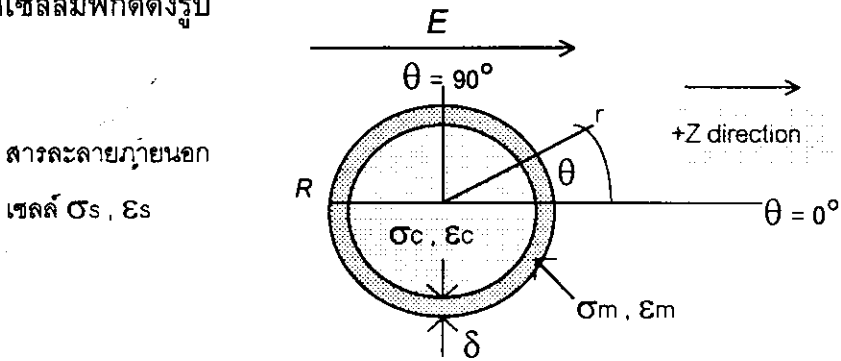
### สมการที่ 9

สมการเหล่านี้คือสมการทั้งหมดที่ต้องใช้ในงานวิจัยสำหรับนำไปใช้ประมวลหาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้แก่  $\epsilon_c, \epsilon_s, \epsilon_m, \sigma_c, \sigma_m$  และ  $\delta$  โดยจะเสนอผลการวิจัยในบทต่อไป

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

สนามไฟฟ้าที่แต่ละบริเวณดังกล่าวสามารถหาได้จากผลเฉลยของสมการลาปลาซพิกัดทรงกลม ดังต่อไปนี้

กำหนดให้เซลล์มีพิกัดดังรูป



สารละลายภายนอก  
เซลล์  $\sigma_s, \epsilon_s$

รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกเดี่ยวเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าภายนอก  $E$  โดยที่พารามิเตอร์ที่อธิบายในภาพมีความหมายดังต่อไปนี้

$\delta$  คือความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์(เปลือก)

$R$  คือรัศมีเซลล์

$\sigma_s, \sigma_c, \sigma_m$  คือส่วนจริงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงซ้อน ( in-phase conductivity ) ของสารละลายภายนอก ไซโทพลาสซึม และของเปลือกเซลล์ตามลำดับ

$\epsilon_s, \epsilon_c, \epsilon_m$  คือส่วนจริงของสภาพยอมเชิงซ้อน ( in-phase permittivity ) (หรือค่าไดอิเล็กทริก) ของสารละลายภายนอก ไซโทพลาสซึม และของเปลือกเซลล์ตามลำดับ

ศักย์ไฟฟ้าที่แต่ละบริเวณมีค่าดังนี้

ภายในไซโทพลาสซึม  $r < R - \delta$  :

$$\Psi_1 = Cr \cos \theta + Lr^2 (3 \cos^2 \theta - 1) \quad (10)$$

ภายในเปลือก  $R - \delta < r < R$  :

$$\Psi_2 = \left( Ar - \frac{B}{r^2} \right) \cos \theta + \left( Mr^2 - \frac{N}{r^3} \right) (3 \cos^2 \theta - 1) \quad (11)$$

ภายในสารละลายภายนอก  $r > R$  :

$$\Psi_3 = \left( -E_s r + \frac{D}{r^2} \right) \cos \theta + \left( \frac{1}{2} Gr^2 - \frac{K}{r^3} \right) (3 \cos^2 \theta - 1) \quad (12)$$

เมื่อ  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3$  คือศักย์ไฟฟ้า ภายในเซลล์ ที่เปลือก และที่ภายนอกเซลล์

$E_s$  คือสนามไฟฟ้าภายนอกเซลล์

และ  $A, B, C, D, G, K, L, M$  และ  $N$  คือค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าต้องทำการหา

เริ่มพิจารณาหาค่าคงที่  $D, G, K$  ในสมการที่ 12 ก่อน โดยพิจารณาว่าที่บริเวณภายนอกเซลล์ ที่ห่างจากเซลล์มากๆ นั่นคือที่  $r$  มากๆ เทอม  $\frac{D}{r^2}, \frac{K}{r^3}$  ในสมการที่ 12 จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอมอื่น ดังนั้นสมการ 12 จะลดรูปเหลือ

$$\begin{aligned} \Psi_3 &= -E_s r \cos \theta + \frac{1}{2} G r^2 (3 \cos^2 \theta - 1) \\ &= -E_0 z + \frac{1}{2} G (3z^2 - (x^2 + y^2)) \end{aligned} \quad (13)$$

เมื่ออาศัยการแปลงพิกัดจากความสัมพันธ์เหล่านี้คือ  $z = r \cos \theta, r^2 = x^2 + y^2$

$$\text{ดังนั้นสนามไฟฟ้าภายนอกเซลล์มีค่า } E_z = -\frac{\partial \Psi_3}{\partial z} = E_s - 3Gz \quad (14)$$

$$\text{และค่า } G = -\frac{\partial E_z}{\partial z} = -\frac{1}{2} \nabla(E_z)$$

ขั้นต่อไปหาค่าคงที่ที่เหลือโดยใช้เงื่อนไขขอบดังนี้

1. ที่ขอบเขตระหว่างเปลือกเซลล์และสารละลายภายนอก  $r = R$ , ผลรวมของกระแสจัด (displacement current) และกระแสไอออน (ionic current) จะต้องมีค่าต่อเนื่องที่ทุกๆมุม  $\theta$  หรือทั่วทั้งเปลือก นั่นคือ

$$\varepsilon'_s E_{r(R^+)} = \varepsilon'_m E_{r(R^-)} \quad (15)$$

$$\text{หรือ} \quad \varepsilon'_s \frac{\partial \Psi_{r(R^+)}}{\partial r} = \varepsilon'_m \frac{\partial \Psi_{r(R^-)}}{\partial r} \quad (16)$$

เมื่อ  $\varepsilon'_s, \varepsilon'_m$  คือสภาพยอมเชิงซ้อนของสารละลายภายนอกเซลล์และของเปลือกเซลล์ ตาม

ลำดับและสัญลักษณ์  $R^+, R^-$  คือบริเวณด้านนอกและในเปลือก

จัดรูปสมการที่ 16 ใหม่จะได้ว่า

$$\frac{E_{r(R^+)}}{E_{r(R^-)}} = \frac{\epsilon'_m}{\epsilon'_s} = \frac{\sigma_m + j\omega\epsilon_m}{\sigma_s + j\omega\epsilon_s} = \alpha_s \quad (17)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับที่ผิวสัมผัสด้านในของเปลือกเซลล์กับไซโทพลาสซึม  $r = R - \delta$  จะได้ว่า,

$$\frac{E_{r(R-\delta)^-}}{E_{r(R-\delta)^+}} = \frac{\epsilon'_m}{\epsilon'_c} = \frac{\sigma_m + j\omega\epsilon_m}{\sigma_c + j\omega\epsilon_c} = \alpha_c \quad (18)$$

และเงื่อนไขที่สองคือ

2. สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส  $E_\theta$  ต้องมีค่าต่อเนื่อง นั่นคือ  
ที่  $r = R$  จะได้ว่า

$$E_{\theta(R^+)} = E_{\theta(R^-)} \quad (19)$$

เมื่อ  $E_{\theta(r)} = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta}$  ดังนั้น

$$\left( \frac{-1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right)_{R^+} = \left( \frac{-1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right)_{R^-} \quad (20)$$

และที่  $r = R - \delta$  จะได้ว่า

$$E_{\theta(R^-)} = E_{\theta(R-\delta)^-} \quad (21)$$

$$\left( \frac{-1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right)_{(R-\delta)^+} = \left( \frac{-1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right)_{(R-\delta)^-} \quad (22)$$

จากเงื่อนไขขอบเหล่านี้จะนำไปหาค่าคงที่ที่ที่เหลือได้ผลดังนี้

$$A = \frac{-3E_s(1+2\alpha_c)}{(2+\alpha_s)(1+2\alpha_c) - 2(1-\alpha_s)(1-\alpha_c) \left(\frac{R-\delta}{R}\right)^3}$$

$$B = \frac{-3E_s(1-\alpha_c)(R-\delta)^3}{(2+\alpha_s)(1+2\alpha_c) - 2(1-\alpha_s)(1-\alpha_c)\left(\frac{R-\delta}{R}\right)^3}$$

$$C = \frac{-9E_s\alpha_c}{(2+\alpha_s)(1+2\alpha_c) - 2(1-\alpha_s)(1-\alpha_c)\left(\frac{R-\delta}{R}\right)^3}$$

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

$$M = \frac{2.5G(2+3\alpha_c)}{(3+2\alpha_s)(2+3\alpha_c) - 6(1-\alpha_s)(1-\alpha_c)\left(\frac{R-\delta}{R}\right)^5}$$

$$N = \frac{5G(1-\alpha_c)(R-\delta)^5}{(3+2\alpha_s)(2+3\alpha_c) - 6(1-\alpha_s)(1-\alpha_c)\left(\frac{R-\delta}{R}\right)^5}$$

$$L = \frac{25G\alpha_c}{(3+2\alpha_s)(2+3\alpha_c) - 6(1-\alpha_s)(1-\alpha_c)\left(\frac{R-\delta}{R}\right)^5}$$

$$K = \frac{-GR^5 \left\{ (2+3\alpha_c)(1-\alpha_s) + (1-\alpha_c)(2+3\alpha_s)\left(\frac{R-\delta}{R}\right)^5 \right\}}{(3+2\alpha_s)(2+3\alpha_c) - 6(1-\alpha_s)(1-\alpha_c)\left(\frac{R-\delta}{R}\right)^5}$$

และ

$$G = -\frac{\partial E_z}{2\alpha} = -\frac{1}{2} \nabla(E_z) \quad \text{เมื่อ } E_z \text{ คือสนามไฟฟ้าภายนอกเซลล์}$$

หากเราพิจารณาว่า ศักย์ไฟฟ้าที่ภายในเซลล์ ( สมการที่ 10 ) และศักย์ไฟฟ้าภายในเปลือกเซลล์ ( สมการที่ 11 ) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าภายนอกเซลล์ ( สมการที่ 12 ) ดังนั้นเราจะถือว่าศักย์ไฟฟ้าภายนอกเซลล์เท่านั้นที่มีผลต่อการเหนี่ยวนำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ภายในเซลล์ ( อื่นๆ แหล่งกำเนิดของศักย์ไฟฟ้าภายนอกเซลล์คือขั้วอิเล็กโทรด ) จากสมการที่ 12

เทอมที่มีนัยสำคัญคือ

$$\Psi_3 = (-E_s r + \frac{D}{r^2}) \cos \theta \quad (23)$$

และเมื่อเทียบกับสมการศักย์ไฟฟ้าของไดโพล  $\Psi_\mu$  ซึ่งนิยามไว้คือ

$$\Psi_\mu = \frac{\mu \cos \theta}{4\pi \epsilon_s r^2} \quad (24)$$

(ดูที่มาสมการภาคผนวกที่ )

เราจะพบว่า เทอม  $-E_s r$  ต้องมีค่าเป็นศูนย์ นั่นหมายความว่าศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าบวกเท่านั้น หรือสนามไฟฟ้าต้องมีทิศเดียวกับไดโพลเท่านั้น ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$\mu = 4\pi \epsilon_s D \quad (25)$$

$$\mu = 4\pi R^3 \epsilon_s f(\omega) E_z \quad (26)$$

เมื่อ

$$f(\omega) = - \frac{\left[ (1 - \alpha_s)(1 + 2\alpha_c) - (1 + 2\alpha_s)(1 - \alpha_c) \left( \frac{R - \delta}{R} \right)^3 \right]}{(2 + \alpha_s)(1 + 2\alpha_c) - 2(1 - \alpha_s)(1 - \alpha_c) \left( \frac{R - \delta}{R} \right)^3} \quad (27)$$

เมื่อทำการกระจายทุกเทอมในสมการที่ 27 ให้แยกเป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพโดยจัดกลุ่มพารามิเตอร์  $\epsilon'_m$  และ  $\epsilon'_c$  ไว้ด้วยกัน และแยก  $\epsilon'_s$  ไว้ต่างหากเราจะได้ว่าท้ายที่สุดแล้ว

$$\sigma'_{eff} = - \frac{\sigma'_m [2(R - \delta)^3 (\sigma'_c - \sigma'_m) + R^3 (\sigma'_c + 2\sigma'_m)]}{[(R - \delta)^3 (\sigma'_c - \sigma'_m) - R^3 (\sigma'_c + 2\sigma'_m)]} \quad (28)$$

และเมื่อใช้ความสัมพันธ์  $\sigma'_i = j\omega \epsilon'_i$  จะได้ว่า

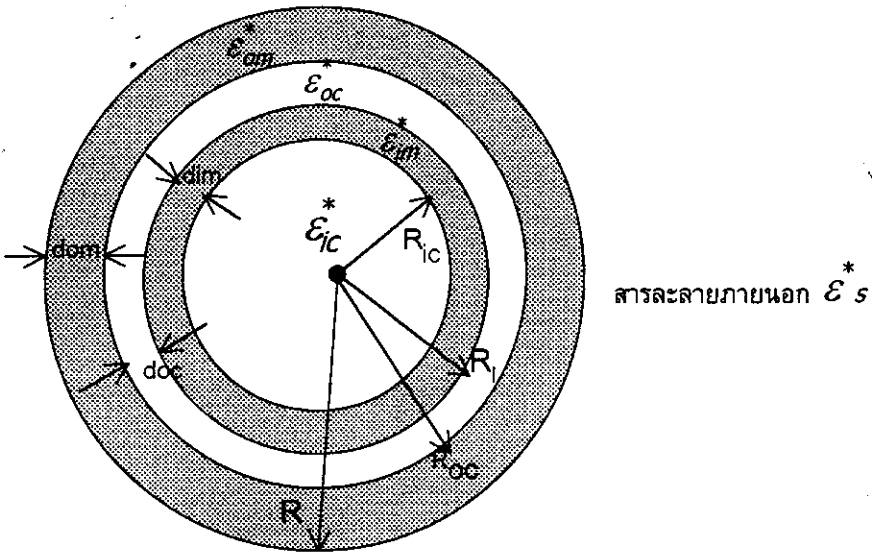
$$\epsilon'_{eff} = - \frac{\epsilon'_m [2(R - \delta)^3 (\epsilon'_c - \epsilon'_m) + R^3 (\epsilon'_c + 2\epsilon'_m)]}{[(R - \delta)^3 (\epsilon'_c - \epsilon'_m) - R^3 (\epsilon'_c + 2\epsilon'_m)]} \quad (29)$$

โดยที่

$$\text{Re}[f(\omega)] = \text{Re} \left[ \left( \frac{\epsilon'_{eff} - \epsilon'_s}{\epsilon'_{eff} + 2\epsilon'_s} \right) \right] \quad (30)$$



4.2วิเคราะห์ตามแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมผนังเซลล์สองชั้น(Spherical Double Shell Model,DSM)



รูปที่ 3.แสดงแบบจำลอง SDM

เมื่อ  $\epsilon_{ic}^*$  คือค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของไซโทพลาสซึม(complex permittivity of inner cytoplasm)

$\epsilon_{im}^*$  คือค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเมมเบรนชั้นใน(complex permittivity of inner membrane)

$\epsilon_{oc}^*$  คือค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของไซโทพลาสซึมชั้นนอก(complex permittivity of outer cytoplasm)

$\epsilon_{om}^*$  คือค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเมมเบรนชั้นนอก(complex permittivity of outer membrane)

$\epsilon_s^*$  คือค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของสารละลายภายนอก(complex permittivity of solution)

$R_i$  คือรัศมีเซลล์วัดถึงจุดต่างๆตามรูป  $R$  คือรัศมีเซลล์

$d_i$  คือความหนาแต่ละชั้นตามรูป

เมื่อ  $\epsilon_i^* = \epsilon_i - j \frac{\sigma_i}{\omega}$   $\epsilon_i$  คือ ค่าไดอิเล็กทริกที่ชั้น  $i$  มีหน่วยเป็น ฟาร์ด/เมตร และ  $\sigma_i$  คือ สภาพนำไฟฟ้าของไดอิเล็กทริกที่ชั้น  $i$  มีหน่วยเป็น ซีเมนส์/เมตร

ด้วยวิธีการวิเคราะห์คล้ายกับแบบจำลองเซลล์ทรงกลมผนังเซลล์หนึ่งชั้น โดยเพิ่มผนังเข้าไปอีก  
หนึ่งชั้นทำให้ได้ค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเซลล์ทรงกลมตันที่มีเปลือกสองชั้นตามรูปที่ 3 ดัง  
สมการ

$$\epsilon_{eff}^* = \epsilon_{om}^* \left[ \frac{2(1-v_1) + (1+2v_1)E_1}{(2+v_1) + (1-v_1)E_1} \right] \quad (31)$$

ตัวแปรที่ปรากฏในสมการที่ 31 มีค่าดังนี้

$$V_1 = \left( 1 - \frac{d_{om}}{R} \right)^3 \quad (32)$$

และ

$$E_1 = \left( \frac{\epsilon_{oc}^*}{\epsilon_{om}^*} \right) \left( \frac{2(1-v_2) + (1+2v_2)E_2}{(2+v_2) + (1-v_2)E_2} \right) \quad (33)$$

เมื่อ

$$V_2 = \left( 1 + \frac{d_{oc}}{R_i} \right)^{-3} \quad (34)$$

และ

$$E_2 = \left( \frac{\epsilon_{im}^*}{\epsilon_{oc}^*} \right) \left( \frac{2(1-v_3) + (1+2v_3)E_3}{(2+v_3) + (1-v_3)E_3} \right) \quad (35)$$

เมื่อ

$$V_3 = \left( 1 - \frac{d_{im}}{R_i} \right)^3 \quad (36)$$

และ

$$E_3 = \frac{\epsilon_{ic}^*}{\epsilon_{im}^*} \quad (37)$$

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

เทอม  $V_2 = \left( 1 + \frac{d_{oc}}{R_i} \right)^{-3} \approx \left( \frac{R_i}{R_i + 3d_{oc}} \right)$  และเทอม  $V_3 = \left( 1 - 3\frac{d_{im}}{R_i} \right)$  เพื่อวิเคราะห์หา

เทอมต่างๆดังนี้

ส่วนจริงของฟังก์ชัน  $f(\omega)$  มีค่าเป็น

$$\operatorname{Re}[f(\omega)] = \operatorname{Re}\left[\phi\left(\frac{\varepsilon'_{\text{eff}} - \varepsilon'_s}{\varepsilon'_{\text{eff}} + 2\varepsilon'_s}\right)\right] \quad (38)$$

เมื่อ  $\phi$  คือ *volume fraction* เป็นเทอมที่ขึ้นกับรูปทรงและปริมาตรเซลล์ ในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 0.3

แทนสมการที่ 31 ลงในสมการที่ 38 จะได้

$$\operatorname{Re}[f(\omega)] = \operatorname{Re}\left[\phi\left(\frac{Z_1 Z_3 + Z_2 Z_4}{Z_3^2 + Z_4^2}\right)\right] \quad (39)$$

ตัวแปรที่ปรากฏในสมการที่ 40 มีค่าขึ้นกับฟังก์ชันต่างๆเป็นลำดับขั้นดังนี้

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

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

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

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

$$W = ST - RU$$

เมื่อ  $V = RT + SU$

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

และ

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

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

$$T = \omega P$$

$$U = \omega^2 Q$$

และ

$$N = 2c_1 L + c_2 J$$

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

$$P = c_3 L + c_1 J$$

$$Q = c_3 M + c_1 K$$

และ

$$c_1 = 1 - v_1$$

$$c_2 = 1 + 2v_1$$

$$c_3 = 2 + v_1$$

เมื่อ  $v_1$  เป็นไปตามสมการที่ 32

และ

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

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

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

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

เมื่อ

$$F = 2b_1 C + b_2 A$$

$$G = 2b_1 D + b_2 B$$

$$H = b_3 C + b_1 A$$

$$I = b_3 D + b_1 B$$

และ

$$b_1 = 1 - v_2$$

$$b_2 = 1 + 2v_2$$

$$b_3 = 2 + v_2$$

เมื่อ  $V_2$  มีค่าตามสมการที่ 34

และ

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

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

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

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

และ

$$a_1 = 1 - v_3$$

$$a_2 = 1 + 2v_3$$

$$a_3 = 2 + v_3$$

เมื่อ  $V_3$  มีค่าตามสมการที่ 36

ใช้สมการทั้งหมดเหล่านี้คำนวณหาค่า  $\text{Re}[f(\omega)]$  เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์ ดังรายละเอียดในบทที่ 2