6. วิเคราะห์และสรุปผล

6.1 การพัฒนาแบบจำลอง

ผลจากการพัฒนาแบบจำลองพบว่า สามารถใช้สมการลาปลาซพิกัดทรงกลมวิเคราะห์หาศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่แต่ละบริเวณภายในเซลล์ คำนวณค่าไดอิเล็กทริกเชิงซ้อนของเซลล์และค่าส่วนจริงของฟังก์ชั่นความถี่ $\mathrm{Re}[f(\omega)]$ โดยแสดงผลในรูปของสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิส ดังตัวอย่างกราฟในบทที่ 4 ผลการวิเคราะห์เป็นดังนี้

จากกราฟที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะทางวัดจากจุดศูนย์กลางของเซลล์ พลอตเทียบกับมุม θ ในลักษณะภาพ 3 มิติ พบว่า ศักย์ไฟฟ้าภายในไซโทพลาสซึมบริเวณใกล้เยื่อหุ้มเซลล์แนวมุม 0° จะมีค่าสูงสุด และจะน้อยลงตามลำดับถ้ามุมมากขึ้น โดยเฉพาะที่มุม 180° ค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าตรงข้ามกับมุม 0° ผลจากการคำนวณนี้ทำให้ทราบว่าที่จุดศูนย์กลางเซลล์จะมีศักย์เป็นศูนย์และจะมีค่าเพิ่มขึ้นถ้าระยะทางมากขึ้น และเมื่อพลอตกราฟในลักษณะเดียวกันกับที่บริเวณอื่นๆของเซลล์ (กราฟที่ 2) พบว่า มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน แต่ขนาดของศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าสูงกว่าบริเวณภายในไซโทพลาสซึม

เมื่อพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่แต่ละบริเวณภายในเซลล์เทียบกับกับระยะทาง 1 มิติ ที่มุม 0° พบว่า บริเวณไซโทพลาสซึม เยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน ไซโทพลาสซึมชั้นนอก และเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก มีลักษณะสอดคล้องกัน กล่าวคือ ยิ่งระยะทางมากขึ้น ศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น (แบบติดลบ) เรียงลำดับจากน้อยไปหามาก จากบริเวณชั้นในสุดไล่จนไปถึงชั้นนอกสุด ดังกราฟที่ 3 4 5 และ 6 ตามลำดับ แต่หากสังเกตุอัตราการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าเทียบกับระยะทาง(ความเข้มสนามไฟฟ้า) โดยคำนวณจากความชันกราฟ พบว่ามีค่าแตกต่างกัน กล่าวคือ ที่บริเวณไซโทพลาสซึมชั้นในมีค่า 12.5 กิโลโวลต์เมตร $^{-1}$ ที่เยื่อหุ้มเซลล์ชั้นในมีค่า 70 กิโลโวลต์ เมตร $^{-1}$ และที่ไซโทพลาสซึมชั้นนอกมีค่า 25 กิโลโวลต์ เมตร $^{-1}$ ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงเช่นนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายในเยื่อหุ้มเซลล์ น่าจะแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่เด่น และสมบัติไดอิเล็กทริกที่แตกต่างกันของแต่ละองค์ประกอบ

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิส ที่พลอตจากทุกค่า $\mathrm{Re}[f(\omega)]$ ในช่วงความถี่ 10 เฮิรตซ์ ถึง 100 เมกกะเฮิรตซ์ พบว่า ลักษณะโดยรวมของสเปกตรัมมีความคล้ายคลึงกับสเปกตรัมที่พลอตจากแบบจำลอง SSM กล่าวคือ เหมือนกันในเรื่องของรูปทรงกราฟเพราะมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ มีฐานกราฟ 2 บริเวณ บริเวณหนึ่งอยู่ที่ความถี่ย่านต่ำมักมีค่าติดลบ (ฐานกราฟความถี่ต่ำ) และอีกบริเวณอยู่ที่ความถี่ย่านสูง(ฐานกราฟความถี่สูง) จุดสูงสุดของกราฟ(ยอดกราฟ)มีจุดวกกลับอยู่ที่บริเวณความถี่สนามไฟฟ้าย่านกลาง (ดูกราฟที่ 14)

เป็นที่สังเกตว่า ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน แอมพลิจูดของสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิสของแบบจำลอง SSM จะมีค่าสูงกว่าของแบบจำลอง SDM อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง แต่ลักษณะอื่นโดย

รวมมีลักษณะคล้ายกัน (ดูกราฟที่ 11) พอจะอนุมานได้ว่า ไดอิเล็กโทรฟอเรซิสเป็นผลจากอันตรกริยาระหว่างเซลล์กับสนามไฟฟ้า จะเกิดมากหรือน้อยขึ้นกับขนาดของไดโพลโมเมนต์ที่ถูกเหนี่ยวนำภายในเซลล์ หรือพิจารณาจากค่า $\mathrm{Re}[f(\omega)]$ นั่นหมายความว่า แอมพลิจูดของสเปกตรัมที่แตกต่างดังกล่าวน่าจะสัมพันธ์กับขนาดของไดโพลโมเมนต์ของเซลล์

เมื่อลองเปลี่ยนค่าความหนาของไซโทพลาสซึมชั้นนอก d_{oc} พบว่ามีผลกระทบต่อสเปกตรัมเฉพาะที่จุดวกกลับของฐานกราฟความถี่ต่ำเท่านั้น กล่าวคือ ถ้าความหนามีค่ามาก จะส่งผลให้สเปกตรัมขยับเลื่อนไปที่ความถี่สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น(เล็กน้อย) และเมื่อทดลองปรับเปลี่ยนค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึมชั้นนอก(ε_{oc}) ในช่วง 50 – 70 เท่าของไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ พบว่า ไม่ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมอย่างเด่นชัด แสดงว่า ε_{oc} เป็นพารามิเตอร์ที่มีความไวต่ำและไม่ค่อยมีผลต่อการเกิดไดโพลโมเมนต์ (ดูกราฟที่ 8)

หากปรับค่าสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมชั้นใน (σ_{ic}) ในช่วง 0.1 – 1 S/m พบว่า จะส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิสที่ช่วงความถี่ย่านสูง(บริเวณไหล่กราฟ) กล่าวคือ ถ้า σ_{ic} มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้สปกตรับขยับตัวเลื่อนไปที่ความถี่สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น ทำให้ขอบเขตความถี่สนามไฟฟ้าย่านสูง $f_\infty(EDS)$ (ใช้สัญลักษณ์ตาม Bunthawin *et al.*,2003) ขยับตามเลื่อนไปที่ความถี่ย่านสูงด้วยเช่นกัน(ดังกราฟที่ 9) และในทำนองคล้ายกัน เมื่อทดลองปรับเปลี่ยนค่าสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมชั้นนอก (σ_{om})ในช่วง 0.1 – 10 μS/m พบว่า ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิสที่ช่วงความถี่ย่านต่ำ(บริเวณฐานกราฟ) กล่าวคือ ถ้า σ_{om} มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ฐานของสปกตรับขยับตัวเลื่อนไปที่ความถี่สนามไฟฟ้าที่สูงขึ้นรวมทั้งทำให้ขนาดของ $\mathrm{Re}[f(\omega)]$ ขยับตัวให้ค่าบวกสูงขึ้น ส่งผลให้ขอบเขตความถี่สนามไฟฟ้าย่านต่ำ $f_0(EDS)$ ขยับตามเลื่อนไปที่ความถี่ย่านสูงด้วยเช่นกัน (ดูกราฟที่ 10)

เมื่อทดลองปรับเปลี่ยนความหนาเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน (d_{im}) พบว่า ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิสที่ช่วงความถี่ย่านต่ำ(บริเวณฐานกราฟ) กล่าวคือ ถ้า d_{im} มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ไหล่ของสปกตรับที่ความถี่ย่านต่ำขยับตัวเลื่อนไปที่ความถี่สนามไฟฟ้าที่ต่ำลง ทำให้ขนาดของ $\mathrm{Re}[f(\omega)]$ ขยับตัวให้ค่าบวกสูงขึ้น ส่งผลให้ขอบเขตความถี่สนามไฟฟ้าย่านต่ำ ขยับตามเลื่อนไปที่ความถี่ย่านต่ำลงด้วยเช่นกัน (ดูกราฟที่ 12)

กราฟที่ 13 แสดงการดิสเพอชั่นของค่าไดอิเล็กทริกของเซลล์เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้า เมื่อพิจารณารูปทรงของกราฟ พบว่า มีลักษณะลดหลั่นเป็น 2 ระดับตามความถี่สนามไฟฟ้า กล่าวคือ ค่าไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดน้อยลงถ้าความถี่สนามไฟฟ้าสูงขึ้น ระดับแรกเกิดขึ้นที่ความถี่สนามไฟฟ้าย่านต่ำ และระดับสองเกิดขึ้นที่ความถี่สนามไฟฟ้าย่านสูง จำนวนระดับขั้นดังกล่าวน่าจะมีส่วนเกี่ยวข้องกับจำนวนชั้นเยื่อหุ้มเซลล์ (Schwan,1988) ซึ่งแตกต่างจากกรณีของแบบจำลอง SSM (ดูกราฟที่ 20)

เมื่อทดลองปรับเปลี่ยนรัศมีเซลล์ พบว่า ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิสที่ช่วงความถี่ย่านต่ำ(บริเวณฐานกราฟและไหล่กราฟ) กล่าวคือ รัศมีเซลล์มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ไหล่ของสปกตรับที่ความถี่ย่านต่ำขยับตัวเลื่อนไปที่ความถี่สนามไฟฟ้าที่ต่ำลง ทำให้ขนาดของ

$\mathrm{Re}[f(\omega)]$ ขยับตัวให้ค่าบวกสูงขึ้น ส่งผลให้ขอบเขตความถี่สนามไฟฟ้าย่านต่ำ ขยับตามเลื่อนไปที่ความถี่ย่านต่ำลงด้วยเช่นกัน เป็นที่สังเกตว่า รัศมีเซลล์ส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมบริเวณฐานกราฟความถี่ย่านต่ำเช่นกัน แต่ไม่ค่อยมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกับการปรับเปลี่ยนความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์ภายนอก ค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นนอก(ε_{oc}) และสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ภายนอก(σ_{im}) แต่กรณีของรัศมีเซลล์มีผลกระทบที่เด่นชัดกว่าสามกรณีหลัง ดังกราฟที่ 15 16 17 และ 18 ตามลำดับ

สำหรับผลกระทบของค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึมชั้นใน (ε_{ic}) จะส่งผลเฉพาะที่บริเวณฐานสเปกตรัมความถี่ย่านสูง กล่าวคือถ้า ε_{ic} มีค่ามากขึ้น จะทำให้ฐานสเปกตรัมขยับตัวเพิ่มแอมพลิจูดเป็นบวกเพิ่มขึ้น และในกรณีท้ายสุด ถ้าเพิ่มค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน จะทำให้แอมพลิจูดของสเปกตรัมมีค่าเพิ่มขึ้นและส่งผลต่อ $f_0(EDS)$ เพียงเล็กน้อย

จากที่กล่าวมาพบว่า ผลจากการพัฒนาแบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวตามแบบจำลอง SDM ทำให้ทราบศักย์และสนามไฟฟ้าที่แต่ละชั้นองค์ประกอบของเซลล์ และได้สมการคำนวณที่มีตัวแปรมากถึง 18 ตัว แต่ละตัวล้วนส่งผลกระทบต่อสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิสมากน้อยแตกต่างกันตามความสำคัญ ผลกระทบต่างๆเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กทริกและพัฒนาไปสู่กระบวนการเขียนโปรแกรมคำนวณ

6.2 โปรแกรม DSM

ผลจากการใช้โปรแกรมพบว่า ในการคำนวณสมบัติทางไฟฟ้าใช้เวลาน้อยมาก เฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 2 วินาที – 5 นาที (นับจากเวลาที่โปรแกรมเริ่มทำซ้ำ) ทั้งนี้ขึ้นกับ ความเร็วของหน่วยประมวลผลคอมพิวเตอร์ ค่า Range รวมถึงการกำหนดค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดและค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เริ่มต้น กล่าวเป็นลำดับดังนี้คือ ถ้ากำหนดค่า Range ให้มีค่าน้อยจะใช้เวลาคำนวณนาน ทั้งนี้เพราะในแต่ละรอบการทำซ้ำ ค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปทีละน้อยจะส่งผลให้โปรแกรมต้องทำซ้ำด้วยจำนวนรอบมากขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการคำนวณเพราะค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จะมีแนวโน้มให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยมากยิ่งขึ้น และในทางกลับกันจะเป็นไปในทางตรงกันข้าม ในกรณีที่กำหนดค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดน้อย จะใช้เวลาคำนวณนานเช่นกัน เพราะโดยปกติค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดเริ่มต้นก่อนที่การทำซ้ำจะเกิดขึ้นมักมีค่าสูงอยู่ก่อนแล้ว หากจะทำให้ค่าดังกล่าวลดน้อยลงต้องใช้เวลา เพราะโปรแกรมต้องทำซ้ำด้วยจำนวนรอบมากขึ้น ค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดที่น้อยเป็นผลดีเพราะผลการคำนวณจะมีความแม่นยำสูง นอกจากนี้ หากกำหนดค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เริ่มต้นที่มีค่าห่างจากความเป็นจริงมาก จะใช้เวลาคำนวณนานขึ้นเช่นกัน

โดยปกติการกำหนดค่า Range ของพารามิเตอร์แต่ละตัวมีค่าต่างกันและมีขีดจำกัด คำนึงตามความเหมาะสม อาทิ ค่า Range ของค่าไดอิเล็กทริกควรจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของค่าไดอิ

เล็กทริกของสุญญากาศ และค่า Range ของสภาพนำไฟฟ้าควรจะมีค่าที่เป็นจำนวนจุดทศนิยมน้อยจุดเป็นเลขลงตัว ทำนองเดียวกันกับการกำหนดค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดและค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เริ่มต้น โดยปกติควรกำหนดให้ค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดมีค่าน้อยไว้ก่อน หากผลการคำนวณไม่สอดคล้องกับค่าเปอร์เซนต์ที่กำหนด จึงค่อยเพิ่มค่าขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สามารถปรับเปลี่ยนค่า Range และค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดได้เป็นช่วงเปิดขึ้นกับผู้ทดลองใช้ หากกำหนดค่าเปอร์เซนต์ความผิดพลาดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ย่อมเป็นผลดี เพราะนั่นหมายถึงผลการคำนวณจะมีทั้งความแม่นยำและความเที่ยงตรงสูงในอุดมคติ แต่ในทางปฏิบัติ อาจทำให้โปรแกรมคำนวณซ้ำไม่รู้จบยังผลให้โปรแกรมหยุดการทำงาน นอกจากนี้การป้อนค่า $\mathrm{Re}[f(\omega)]$ ให้แก่โปรแกรมควรคำนึงถึงการกระจายของข้อมูลให้ครอบคลุมทุกย่านความถี่ที่ทดลองตั้งแต่ย่านความถี่ต่ำสุด ย่านกลางจนถึงย่านสูงสุด โดยเฉพาะที่ $f_0(EDS)$ และ $f_\infty(EDS)$ เพราะเป็นความถี่ที่กำหนดช่วงการเกิดไดอิเล็กโทรฟอเรซิสแบบบวก (Bunthawin *et al.*,2003) อย่างไรก็ดี ไม่ว่าผู้ทดลองใช้โปรแกรมจะคำนึงถึงหลักการดังกล่าวข้างต้นหรือไม่ จะไม่ส่งผลต่อความเที่ยงตรงของผลการคำนวณ แต่อาจส่งผลต่อเวลาที่ใช้คำนวณเพียงเล็กน้อย

<u>กล่าวโดยสรุป</u> โปรแกรมคำนวณที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถใช้คำนวณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวตามแบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกสองชั้นได้ ค่าสมบัติทางไฟฟ้าจะปรากฏเป็นตัวเลขเมื่อกระบวนการทำซ้ำสิ้นสุดลง โปรแกรมดังกล่าวมีความสะดวก รวดเร็วและแม่นยำ ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องมีความรู้ความชำนาญเกี่ยวกับแบบจำลองของเซลล์ สามารถติดตั้งโปรแกรมดังกล่าวได้กับไมโครคอมพิวเตอร์ที่มี CPU ตั้งแต่ 486 ขึ้นไป