

1. กรอบแนวคิดเชิงทฤษฎี

บทนำ

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวด้วยวิธีไดโพลโทรฟอเรซิสจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลบางส่วนเพื่อคำนวณค่าส่วนจริงของฟังก์ชันความถี่ ($\text{Re}[f(\omega)]$) จากแบบจำลองทางไฟฟ้าที่เหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพของเซลล์ที่จะศึกษา อาทิ แบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกหนึ่งชั้น(Spherical Single Shell Model,SSM) เหมาะสมกับเซลล์สัตว์และโพรโทพลาสต์พืช(Gimsa *et al.*,1991 และ Kaler and Jones,1990) แบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกสองชั้น(Spherical Double Shell Model, SDM) เหมาะสมกับเซลล์สัตว์บางชนิดและเซลล์พืชที่มีผนังเซลล์(Asami and Irimajiri,1984 และ Asami *et al.*,1996) แบบจำลองแรกทีกล่าวถึงได้ว่าเป็นแบบจำลองพื้นฐาน มีจำนวนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายค่าได้แก่ ค่าไดโพลทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ ไซโทพลาสซึมและสารละลายที่แขวนลอยเซลล์ รัศมีเซลล์และความเข้มข้นไฟฟ้า ยังผลให้เกิดความยุ่งยากในการคำนวณค่า ($\text{Re}[f(\omega)]$) จึงถูกนำมาพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดย Bunthawin *et al.*(2003) เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ แต่อย่างไรก็ดี โปรแกรมดังกล่าวใช้ได้กับเซลล์ที่มีลักษณะเข้ากับแบบจำลอง อาทิ โพรโทพลาสต์สัปปะรดกึ่งเกิด จึงไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเซลล์อื่นทั่วไปได้

งานวิจัยนี้จะพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกสองชั้นและสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณค่าสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ตามแบบจำลอง SDM ด้วยวิธีเปรียบเทียบค่า ($\text{Re}[f(\omega)]$) ที่คำนวณจากแบบจำลอง($\text{Re}[f(\omega)]_{TDS}$) กับค่าที่คำนวณจากความเร็วของเซลล์เมื่อเกิดไดโพลโทรฟอเรซิส($\text{Re}[f(\omega)]_{EDS}$) แล้วทำซ้ำจนกระทั่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่เหมาะสม ค่าที่จะคำนวณได้แก่ ความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์และของผนังเซลล์ ค่าไดโพลทริกและสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายแขวนลอย ของไซโทพลาสซึม ของเยื่อหุ้มเซลล์และของผนังเซลล์ ตามลำดับ

โครงการวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลอง SDM เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วย 3 เทอมหลักได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของเซลล์(รูปร่างและปริมาตร) ความเข้มข้นไฟฟ้าภายในและภายนอกเซลล์ และไดโพลโมเมนต์ของเซลล์(Pohl,1978) เทอมแรกคำนวณจากรูปร่างเรขาคณิตของเซลล์ สองเทอมหลังคำนวณจากสมการลาปลาซ (Laplace 's equation) ตามระบบพิกัดทรงกลมใช้เงื่อนไขขอบ(boundary conditions) หาค่าคงที่ต่างๆ ณ บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์และผนังเซลล์ ค่าคงที่เหล่านี้ขึ้นกับค่าไดโพลทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์ ถูกเขียนรวมในเทอมไดโพล

โมเมนต์และใช้อธิบายการเกิดขั้วทางไฟฟ้าของเซลล์ขณะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดไดอิเล็กโทรฟอเรซิส โดยปกติเทอมดังกล่าวเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงซ้อนคือมีทั้งส่วนจริงและส่วนจินตภาพ เรียกส่วนจริงดังกล่าวว่า ค่าส่วนจริงของฟังก์ชันความถี่ ($\text{Re}[f(\omega)]$) และถูกนำไปใช้คำนวณแรงไดอิเล็กโทรฟอเรติก

Asami and Irimajiri (1984) อาศัยค่าเชิงซ้อนดังกล่าวคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์ไมโตคอนเดรียที่สกัดจากตับหนูตามแบบจำลอง SDM เพื่อศึกษาการกระเจิงของค่าไดอิเล็กทริกตามความถี่สนามไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า ไดอิเล็กทริกดิสเพอซัน (dielectric dispersion) ยังผลให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับองค์ประกอบและกลไกการทำงานของไมโตคอนเดรียมากยิ่งขึ้น นับได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นในการนำแบบจำลอง SDM มาประยุกต์ใช้กับเซลล์สัตว์ แต่แบบจำลองที่ Asami และ Irimajiri เสนอขึ้นนี้ไม่สามารถนำไปคำนวณแรงไดอิเล็กโทรฟอเรติกได้ เพราะยังไม่ครบทั้ง 3 เทอมหลักดังที่ได้อธิบายไว้ในตอนต้น

สำหรับในงานวิจัยอื่นที่ทำในเชิงพาณิชย์ อาทิ Asami *et al.* (1996) ได้พัฒนาอุปกรณ์วัดค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของกลุ่มเซลล์แขวนลอย เรียกว่า สแกนนิ่งไดอิเล็กทริกไมโครสโคป (scanning dielectric microscope) ชุดอุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วย หัววัดไดอิเล็กทริก อิมพีแดนซ์มิเตอร์ และชุดไมโครคอมพิวเตอร์พร้อมซอฟต์แวร์ ค่าต่างๆที่ได้จากการวัดจะถูกนำไปคำนวณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์ตามแบบจำลอง SDM เพื่อใช้เป็นดัชนีบ่งชี้สถานะและสุขภาพของเซลล์ยีสต์ในถังหมักเบียร์ เป็นต้น

ด้วยเหตุที่ชุดอุปกรณ์ดังกล่าวใช้เทคโนโลยีสูงและราคาค่อนข้างแพง อาจไม่เหมาะสมกับการศึกษาเริ่มต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดจะนำองค์ความรู้ที่มีอยู่เดิมจากงานที่ได้ศึกษากับโพรโทพลาสต์สืบประดภูเกิดตามแบบจำลองSSM(สรุณิและคณะ,2546) เพื่อจะพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณค่าสมบัติทางไฟฟ้าตามแบบจำลองSDM โดยจะประยุกต์แบบจำลองที่ Asami and Irimajiri (1984) เสนอไว้ ปรับให้อยู่ในรูปสมการแรงไดอิเล็กโทรฟอเรซิสตามPohl(1978) แล้วใช้หลักแรงลากของสต็อกส์และกฎการเคลื่อนที่ข้อที่หนึ่งของนิวตันคำนวณความเร็วไดอิเล็กโทรฟอเรติกและค่า($\text{Re}[f(\omega)]$) ด้วยวิธีเดียวกับ Mahaworasilpa *et al.*,(1994) เพื่อนำไปสู่การคำนวณค่าสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะสร้างขึ้นนี้ จำเป็นต้องอาศัยสมการหลายๆ ส่วนจากทฤษฎีแบบจำลองของเซลล์พื้นฐานตามที่ได้อธิบายไว้ในตอนต้น ถ้าทราบความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างสนามไฟฟ้าที่แต่ละอาณาบริเวณภายในและนอกเซลล์อย่างชัดเจน อาจนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองรูปแบบทั่วไปเพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์ชีวภาพที่มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันได้ในวงกว้าง