บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

5.1 ข้อวิจารณ์ผลการทดลองความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสมต่อการแขวนลอยเซลล์

1) สำหรับการทดลองหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการแขวนลอยของโพรโทพลาสต์ *Lilium longiflorum* ใช้สารละลายน้ำตาลแมนนิทอลในการแขวนลอยเซลล์เนื่องจากเป็นสารละลายที่เฉื่อยต่อปฏิกริยาภายในเซลล์ (คำนูณ, 2537) และจากผลการทดลองในสารละลายเข้มข้นแตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 0.3 M 0.4 M 0.5 M 0.6 M และ 0.7 M พบว่าบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์มีค่าความดันออสโมติกเป็น 49.55 MPa, 24.78 MPa, 0, -24.78 MPa และ –49.55 MPa ตามลำดับ ที่สารละลายความเข้มข้น 0.5 M จำนวนโพรโทพลาสต์ที่นับได้ที่เวลา 10 ชั่วโมง มีเหลืออยู่ร้อยละ 85.85 ของจำนวนโพรโทพลาสต์ขณะเริ่มการทดลองซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของโพรโทพลาสต์ *Dendrobrium sp.* (กนกกาณต์, 2542) และจากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นสูงกว่า 0.5 M โพรโทพลาสต์จะมีขนาดเล็กลงหลังจากแขวนลอยอยู่ในสารละลายเป็นเวลา 10 ชั่วโมง และในทางกลับกันโพรโทพลาสต์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อแขวนลอยในสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.5 M ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากผลต่างของความดันออสโมติกที่เยื่อหุ้มเซลล์ (Hoppe *et al*, 1983) งานวิจัยนี้จึงใช้สารละลายน้ำตาลแมนนิทอล 0.5 M แขวนลอยโพรโทพลาสต์ขณะทดลองการเหนี่ยวนำเซลล์ในสนามไฟฟ้า

2) สำหรับเซลล์เม็ดเลือดแดงจากการทดลองแขวนลอยในสารละลายน้ำซูโครสความเข้มข้น 0.1 M 0.2 M 0.3 M และ 0.4 M พบว่าบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์มีค่าความดันออสโมติก เป็น24.78 MPa, 0, -24.78 MPa และ –49.55 MPa ตามลำดับ เมื่อนับจำนวนของเซลล์ที่เหลืออยู่เมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมงพบว่าค่าความเข้มข้น 0.2 M ทำให้เซลล์เหลืออยู่ในสารละลายร้อยละ 86.32 เมื่อเทียบกับจำนวนเซลล์เมื่อเริ่มการทดลอง อย่างไรก็ดีที่ความเข้มข้น 0.1 M และ 0.2 M พบว่า เซลล์จะมีขนาดเพิ่มขึ้นภายหลัง 2.5 ชั่วโมงนั่นแสดงว่าภายในเซลล์มีค่าความดันออสโมติกมากกว่าภายนอกเซลล์น้ำจึงแพร่จากภายนอกเซลล์เข้าสู่ภายใน ส่วนที่ความเข้มข้น 0. 3 M 0.4 M และ 0.5 M พบว่าขนาดเซลล์เล็กลง เมื่อพิจารณาจากร้อยของเซลล์ที่เหลืออยู่โดยเฉลี่ยเมื่อเวลาผ่านไปจึงใช้สารละลายซูโครสเข้มข้น 0.2 M เพื่อแขวนลอยเซลล์ขณะทดลองเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้า

5.2 ข้อวิจารณ์ผลการทดลองการเหนี่ยวนำเซลล์ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ (2 ขั้ว)

1) ผลของความถี่ต่อการหมุนของเซลล์

จากผลการทดลองเหนี่ยวโพรโทพลาสต์ของ *Lilium longiflorum* ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่าค่าอัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์จะมีค่าขึ้นกับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำ แต่จะไม่เป็นสัดส่วนโดยตรง เมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 4.2 จะเห็นว่ามีการเพิ่ม และลดลงของอัตราเร็วการหมุนเมื่อค่าความถี่เปลี่ยนไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วการหมุนพบว่าเป็นไปตามสมการของ Mahaworasilpa และคณะ(1996) ขณะทดลองโพรโทพลาสต์แขวนลอยในสารละลายที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้า 3.7 $mS.m^{-1}$ ความเข้มสนามไฟฟ้า 12 $kV.m^{-1}$ ในช่วงความถี่ 1Hz ถึง 30 MHz ปรากฏว่าโพรโทพลาสต์เริ่มหมุนที่ความถี่ 12 $kV.m^{-1}$ ด้วยอัตราเร็ว 0.567 ± 0.03 $rad.s^{-1}$ โดยมุมที่เซลล์ทั้งสองทำกับสนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 35^0 และเมื่อเพิ่มความถี่ขึ้นเรื่อยปรากฏว่าเซลล์หมุนเร็วขึ้นด้วย และมุมที่เซลล์ทำกับสนามไฟฟ้าก็เปลี่ยนไปด้วย จนความถี่ 24 kHz เซลล์จึงหมุนด้วยอัตราเร็วสูงที่สุดคือ 0.928 ± 0.006 $rad.s^{-1}$ และมุมที่เซลล์ทั้งสองทำกับสนามไฟฟ้ามีค่าประมาณ 45^0 หลังจากนั้นอัตราเร็วจึงลดลง นั่นแสดงว่าที่ความถี่ 24 kHz เป็นความถี่ที่เกิดการเรโซแนนซ์ระหว่างไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในเซลล์กับสนามไฟฟ้าภายนอก เพราะฉะนั้นที่ 24 kHz จึงถือว่าเป็นความถี่เรโซแนนซ์ (Zimmermann *et al*, 1981) ของโพรโทพลาสต์ของ *Lilium longiflorum* ที่แขวนลอยในสารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้า 3.7 $mS.m^{-1}$ เมื่อเพิ่มความถี่มากกว่า 24 kHz พบว่าอัตราเร็วการหมุนจะลดลงและมุมที่เซลล์ทำกับกับสนามไฟฟ้าก็ลดลงด้วยจนหยุดหมุนที่ความถี่มากกว่า 40 kHz และ เริ่มหมุนอีกครั้งที่ความถี่ 25 MHz ไปจนถึง 30 MHz (ความถี่สูงสุดที่ Function generator สามารถผลิตได้) และหมุนด้วยอัตราเร็วสูงสุดที่ความถี่ 30 MHz โดยมุม $\theta = 45^0$ จากผลการทดลองพบว่าลักษณะของกราฟสอดคล้องกับการทดลองของ Mahaworasilpa และคณะ(1996) ที่ทดลองกับเซลล์คน (K562) และเซลล์หนู (SP2)

2) ผลของสนามไฟฟ้าต่อการหมุนของเซลล์

จากผลการทดลองพบว่าอัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ของ *Lilium longiflorum* จะแปรผันตรงกับกำลังสองของค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำ ดังที่แสดงในภาพประกอบ 4.3 และ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้ากับอัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์พบว่าจะได้กราฟเป็นเส้นตรง มีค่าความชัน(Slope) เป็นบวกและสม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Mahaworasilpa และคณะ (1996) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของสนามไฟฟ้ากับอัตราเร็วการหมุนของเซลล์พบว่าลักษณะของกราฟจะมีค่าสูงสุดของการหมุนตรงที่

ความถี่เฉพาะตัวค่าเดียวกัน แต่ค่าอัตราเร็วการหมุนจะเพิ่มขึ้นเมื่อให้ค่าสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มมากกว่าเดิม ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการทดลองในเซลล์ K562 ของ Mahaworasilpa และคณะ (1996) สาเหตุที่อัตราเร็วการหมุนของเซลล์แปรผันตรงกับค่าสนามไฟฟ้ากำลังเป็นผลเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าจะเข้าไปมีผลต่อการหมุนของเซลล์ถึงสองครั้งจึงจะเกิดการหมุนขึ้น ประการแรกเมื่อเซลล์เริ่มโดนเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้าประจุภายในเซลล์จะเกิดการโพลาไรซ์ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งผลจากการโพลาไรซ์ ดังกล่าวทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ขึ้นภายในเซลล์ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสนามไฟฟ้า จากนั้นประการที่สองไดโพลโมเมนต์ที่เกิดก็เกิดอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งจนส่งผลให้เกิดทอร์กและเกิดการหมุนของเซลล์ ดังนั้นอัตราเร็วการหมุนของเซลล์จึงแปรผันตรงกับค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำ

3) ผลของสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายภายนอกต่อการหมุนของเซลล์

จากผลการทดลองที่แสดงดังภาพประกอบ 4.5 และ 4.6 พบว่าสอดคล้องกับผลการทดลองของ Mahaworasilpa และคณะ (1996) คือเมื่อเพิ่มค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์สำหรับทดลอง ค่าความถี่เฉพาะตัวของเซลล์ที่ได้จากกราฟของความถี่กับอัตราเร็วการหมุน จะเลื่อนไปทางบริเวณความถี่ที่สูงขึ้น รวมทั้งงานวิจัยของ Kurschner และคณะ (1998) ได้อธิบายไว้ว่าค่าความถี่เฉพาะตัวของการหมุนของเซลล์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากเมื่อค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเปลี่ยนไปนั่นหมายถึงจำนวนประจุที่มีอยู่ในสารละเปลี่ยนไปด้วยดังนั้นจึงทำให้ค่า เวลาของการคืนสภาพเดิม (Relaxation time) ของเซลล์จะเปลี่ยนไป (Grosse, 1988. ; Garcia *et al*, 1985 : Bonincontro *et al*, 1980) รวมทั้งสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายยังส่งผลให้ค่าคงที่ของการโพลาไรซ์ของเซลล์เปลี่ยนไปเช่นกัน (Gimsa and Wachner, 1998) จึงส่งผลให้การเกิดเรโซแนนซ์ระหว่างไดโพลโมเมนต์กับสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไปดังผลการทดลอง

4) ผลจากเซลล์ต่างชนิดกัน

จากผลการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างโพรโทพลาสต์ของกล้วยไม้สกุลกับโพรโทพลาสต์ของลิลลี่โดยใช้เงื่อนไขเดียวกันคือค่าสนามไฟฟ้า 14 $kV.m^{-1}$ และค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์ 5.0 $mS.m^{-1}$ พบว่าค่าความถี่เฉพาะตัวที่ได้จากเซลล์ทั้งสองจะแตกต่างกันคือกล้วยไม้สกุลหวายจะได้ค่าความถี่ประมาณ 500 kHz และหมุนด้วยอัตราเร็ว 17.36 ± 0.021 $rad.s^{-1}$ ส่วน ลิลลี่จะได้ประมาณ 280 kHz และหมุนด้วยอัตราเร็ว 1.50 ± 0.029 $rad.s^{-1}$ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zimmermann และคณะ (1981) ที่รายงานไว้ว่าค่าความถี่เฉพาะที่ได้จากการทดลองโดยเทคนิคการหมุนเชิงไฟฟ้า ของเซลล์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันนั่นแสดงให้เห็นว่าเซลล์ต่างชนิดกันจะมีสมบัติ

ไดอิเล็กตริกต่างกันด้วย เช่นงานวิจัยของ Mahaworasilpa และคณะ(1996) ที่รายงานไว้ว่า ค่าความจุไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ K562 และ SP2 คือ 2.7±0.8 $mF.m^{-1}$ และ 9.8±0.6 $mF.m^{-1}$ ตามลำดับ

5.3 ข้อวิจารณ์ผลการทดลองการเหนี่ยวนำเซลล์ในสนามไฟฟ้าหมุน (4 ขั้ว)

1) สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ที่ผลิตได้จาก PSU

ก) ความถี่

ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จาก PSU จะมีค่าลดลงครึ่งหนึ่งของความถี่ที่จ่ายเข้าไป เนื่องจากในการทดลองต้องใช้สัญญาณไฟฟ้าสี่สัญญาณที่มีเฟสต่างกัน 90^0 ดังนั้นจึงต้องอาศัยไอซีที่สามารถหน่วงเวลาได้ โดยอาศัยหลักการทำงานเมื่อไอซีได้รับสัญญาณไฟฟ้า (In put) ซึ่งเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมลูกแรก ไอซีจะยังไม่ปล่อยสัญญาณ (Out put) ออกไปในทันทีแต่เก็บเอาไว้จนกว่าจะได้รับการกระตุ้นครั้งที่สองจึงจะมีการปล่อยสัญญาณออก ซึ่งจะทำให้เวลาหรือคาบเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่านั่นคือจะทำให้ความถี่ลดลงครึ่งหนึ่งดังเช่นผลที่ได้จากการทดลอง

ข) ความต่างศักย์

จากผลการวัดค่าความต่างศักย์ที่จ่ายจาก PSU ทั้งสี่ช่องพบว่าค่าที่ได้จะมีค่าสม่ำเสมอเท่ากันทั้งสี่ช่องสัญญาณแต่เมื่อเพิ่มความถี่จนถึง 1 MHz พบว่าความต่างของทั้งสี่ขั้วจะมีค่าลดลงดังภาพประกอบ 4.10 เมื่อนำภาพที่บันทึกด้วยออสซิลสโคบแบบดิจิตอลสี่ชิองสัญญาณจะได้ลักษณะของสัญญาณตามภาพประกอบ 4.11 คือสัญญาณไฟฟ้าแบบคลื่นสี่เหลี่ยมจะมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากเดิม ซึ่งค่า V_{rms} ของคลื่นสัญญาณใดๆจะมีค่าเป็นไปตามสมการ

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^t V(t)^2 dt} \qquad (37)$$

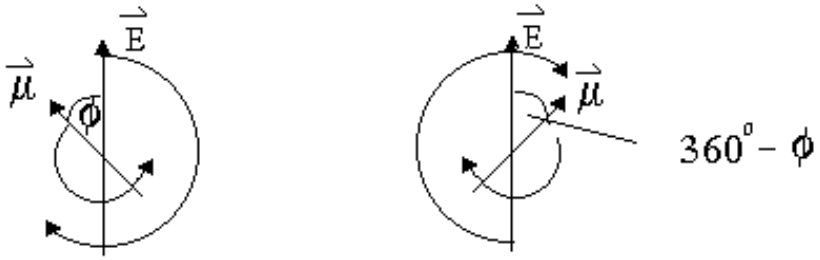
เมื่อ T คือ คาบซึ่งเป็นส่วนกลับของความถี่ หน่วยเป็นวินาที ส่วน t คือช่วงเวลาที่พิจารณา และพบว่าจะได้ค่าที่ได้จากค่าอินทิเกรตคือค่าพื้นที่ใต้กราฟซึ่งจะมีค่ามากที่สุดเมื่อกราฟมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมและค่าจะเปลี่ยนไปเมื่อรูปลักษณ์ของภาพสัญญาณเปลี่ยนไป ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณที่จ่ายจาก PSU ที่ความถี่มากกว่า 1 MHz จะมีค่าลดลงและจะลดลงเรื่อยๆเมื่อความถี่สูงขึ้นซึ่งจากผลการทดลองที่ความถี่ตั้งแต่ 8.5 MHz ขึ้นไปสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากช่องสัญญาณที่ 2 กับ 4 จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นในการทดลองแบบสี่ขั้วจึงใช้ความถี่สูงสุดเพียง 1 MHz

2) ผลของขั้วไฟฟ้า

จากการทดลองพบว่าเมื่อเหนี่ยวนำเซลล์เม็ดเลือดแดงในสนามไฟฟ้าอัตราเร็วการหมุนของเม็ดลือดแดงที่ได้จากการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณจากทฤษฎีมากดังนั้นจึงนำค่าที่ได้จากทฤษฎีหารด้วย 80 จึงได้ค่าที่พอดีกันซึ่งสอดคล้องกับ Archer และคณะ (1999) และงานวิจัยของ Gimsa (1982) ที่กล่าวว่าผลกระทบที่มีต่อการหมุนของเซลล์ในสนามไฟฟ้าส่วนหนึ่งมาจากขั้วไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำ

3) ผลของความถี่ต่อการหมุนของเซลล์

ผลของความถี่จะคล้ายกับผลของการทดลองในการเหนี่ยวนำแบบสองขั้วแต่จะต่างกันตรงที่การหมุนของเซลล์ในการทดลองแบบสี่ขั้วมีค่าเป็นลบและเป็นบวกซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงทิศทางการหมุนของเซลล์ว่าทิศตรงข้ามหรือเหมือนกับทิศการหมุนของสนามไฟฟ้าซึ่งในงายวิจัยนี้กำหนดให้เซลล์ที่หมุนในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า (Antifield rotation) มีทิศเป็นลบ และทิศเดียวกับสนามไฟฟ้าเป็นบวก (Cofield rotation) จากผลการทดลองทั้งในเซลล์เม็ดเลือดแดง และเซลล์โพรโทพลาสต์ในช่วงความถี่ 1 Hz ถึง 1 MHz พบว่าการหมุนของเซลล์เป็นแบบที่มีทิศตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ไม่พบการหมุนที่มีทิศเหมือนกับสนามไฟฟ้า แต่ถ้าอุปกรณ์ที่ใช้กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายแก่ขั้วไฟฟ้าผลิตความถี่ได้มากกว่า 1 MHz –1 GHz จะสามารถพบการหมุนของเซลล์ที่มีทิศเดียวกับสนามไฟฟ้า (Arnold and Zimmermann, 1988) สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วและทิศทางการหมุน มาจากความต่างเฟส (ϕ) ของสนามไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำกับ ไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ดังภาพประกอบ 5.1 เมื่อพิจารณาจากบทนำและภาพประกอบ 1.1 พบว่าการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้จะทดลองอยู่ในช่วงความถี่ β-dispersion ดังนั้นไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีทิศเหมือนกับทิศของสนามไฟฟ้า (Schwan, 1988 ; Arnold and Zimmermann, 1988 ; Mahaworasilpa et al, 1994) เพราะฉะนั้น ไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำเมื่อเกิดอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าจะเกิดการผลักกันดังภาพประกอบ 5.1 ก. ถ้าความต่างเฟสมีค่าอยู่ระหว่าง0^0 – 180^0 แรงผลักจะทำให้ไดโพลหมุนไปในทิศตามเข็มนาฬิกาและเมื่อการทดลองกำหนดให้สนามไฟฟ้าหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาจึงทำให้มีทิศตรงข้ามกัน ส่วนภาพประกอบ 5.1 ข. ค่าความต่างเฟสจะอยู่ระหว่าง 180^0 - 360^0 หลังจากเกิดอันตรกิริยาไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำภายในเซลล์จะถูกผลักให้มีทิศหมุนตามเข็มนาฬิกาซึ่งเป็นทิศเดียวกับสนามไฟฟ้า



ก ข

ภาพประกอบ 5.1 ก) ความต่างเฟสระหว่างสนามไฟฟ้ากับไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำมีค่าอยู่ระหว่าง $0 - 180^0$
ข) ความต่างเฟสระหว่างสนามไฟฟ้ากับไดโพลโมเมนต์มีค่าอยู่ระหว่าง $180^0 - 360^0$

4) ผลของสนามไฟฟ้าต่อการหมุนของเซลล์

อิทธิของสนามไฟฟ้าต่อการหมุนของเซลล์เป็นไปในลักษณะเดียวกับการทดลองแบบสองขั้ว นั่นคืออัตราเร็วการหมุนจแปรผันตรงกับค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำ

5) ผลของสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายภายนอกต่อการหมุนของเซลล์

ผลกระทบเนื่องจากค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์เป็นไปในทำนองเดียวกับการทดลองแบบสองขั้วคือเมื่อเพิ่มค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยมากขึ้นค่าความถี่เฉพาะตังที่ได้จะมีค่าเลื่อนไปทางความถี่ที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน

5.4 ผลจากแบบจำลองเซลล์ทรงกลมเปลือกหุ้มชั้นเดียว

ผลกระทบจากแบบจำลองทรงกลมเปลือกหุ้มชั้นเดียวพบว่าการปรับเทียบข้อมูลจากการทดลองกับทฤษฎีนั้นสำหรับโพรโทพลาสต์นั้นจะทำได้ดีกว่าในเซลล์เม็ดเลือดแดงซึ่งมีสาเหตุมาจากลักษณะทางกายภาพที่แท้จริงของเซลล์นั้นต่างกันคือโพรโทพลาสต์จะมีลักษณะเป็นทรงกลม ใกล้เคียงกับแบบจำลองมากกว่าเซลล์เม็ดเลือดแดงที่มีลักษณะไม่เป็นทรงกลม ดังนั้นการเทียบข้อมูลจากการทดลองกับจากทฤษฎีจึงมีความผิดพลาดอยู่สำหรับเซลล์เม็ดเลือดแดง ซึ่งสอดคล้องกับข้อวิจารณ์ของ Georgieva และคณะ (1998)

5.5 สรุปผลการทดลอง

เมื่อเซลล์มีชีวิตถูกเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้า เซลล์จะเกิดการโพลาไรซ์และส่งผลให้เกิดการหมุนขึ้น โดยความเร็วเชิงมุมของการหมุนของเซลล์จะมีค่าขึ้นกับความถี่ สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่แขวนลอย รวมทั้งค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า โดยความเร็วเชิงมุมของเซลล์จะแตกต่างกันเมื่อทดลองด้วยเซลล์ที่ต่างกัน แม้จะทดลองในเงื่อนไขเดียวกัน จากค่าความเร็วเชิงมุมสามารถทำนายค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์ได้ดังตาราง 5.1 ประกอบด้วย โพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* และ *Dendrobium* sp จากการทดลองแบบสองขั้ว กับ การทดลองแบบสี่ขั้ว ที่ใช้โพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* , *Ananas sp.* และเซลล์เม็ดเลือดแดง

ตาราง 5.1 ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์ที่ได้จากการทดลองแบบสองขั้วเปรียบเทียบกับการทดลองแบบสี่ขั้ว โดยใช้ค่าคงที่ k =1/80 เซลล์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50μm , δ= 7 nm ทั้ง *Lillium longiflorum* , *Dendrobium* sp. และ *Ananas sp.* ส่วนเซลล์เม็ดเลือดแดง δ= 8 nm

Cell	ε_C ($\times\varepsilon_0$)	ε_m ($\times\varepsilon_0$)	σ_c ($S.m^{-1}$)	σ_m ($\mu S.m^{-1}$)	C_m ($\mu F.m^{-1}$)
2 -electrodes					
Protoplast					
Lillium longiflorum	**60**	**2.44±0.16**	**0.73**	**3.60±1.52**	**3.03±0.25**
Dendrobium sp	60	3.5	0.90	2.4	5.0
4-electrodes					
Protoplast					
Lillium longiflorum	**60**	**2.5±0.22**	**0.73**	**10±2.83**	**3.16±0.28**
Ananas sp.	60	1.6	0.5	3	2.02
Red blood cell	50	9.04	0.53	1	0.12

เมื่อเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของเยื่อหุ้มเซลล์ ของโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* จากการทดลองแบบ 2 ขั้วกับ แบบ 4 ขั้วจะได้ค่าใกล้เคียงกันคือ 3.03$\pm$0.25 $\mu F.m^{-1}$ กับ 3.16$\pm$0.28 $\mu F.m^{-1}$ ตามลำดับ

แบบจำลองแบบเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกชั้นเดียวที่ใช้สำหรับประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์ในงานวิจัยนี้ น่าจะใช้ได้ดีกับเซลล์โพรโทพลาสต์ มากกว่าเซลล์เม็ดเลือดแดง เนื่องจาก ลักษณะ

ของโพรโทพลาสต์จะเป็นทรงกลม แต่เซลล์เม็ดเลือดแดงจะมีลักษณะคล้ายกับโดนัท ทำให้กราฟที่เขียนจากทฤษฎีกับข้อมูลจากการทดลองไม่ตรงกันอย่างชัดเจนเหมือนกับเซลล์โพรโทพลาสต์ นอกจากนี้ PSU ที่พัฒนาขึ้นยังข้อด้อย เนื่องจาก ที่ความถี่สูงกว่าระดับ 1 MHz.ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จะลดทอนลง และเมื่อเพิ่มความถี่ให้สูงกว่า 10 MHz. อุปกรณ์ PSU จะไม่สามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับได้ หากพัฒนาให้อุปกรณ์ PSU สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงกว่า 1 MHz ได้จะสามารถเก็บข้อมูลได้ในช่วงที่กว้างขึ้น และในการลากเส้นความเร็วเชิงมุมตรงบริเวณความถี่สูงจะถูกต้องแม่นยำขึ้น จึงเป็นอีกส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ควรจะมีการพัฒนาต่อไป

จากการพัฒนาระบบศึกษาจาก 2 ขั้วเป็น 4 ขั้วสามารถเสนอข้อดีและข้อด้อยของการศึกษาแบบ 2 ขั้วขนาน และ 4 ขั้วระนาบ ในงานวิจัยนี้ตามที่แสดงไว้ดังตาราง 5.2

ตาราง 5.2 เปรียบเทียบข้อเด่นและข้อด้อยของการทดลองเหนี่ยวแบบ 2 ขั้วและ 4 ขั้ว

การศึกษาแบบ 2 ขั้ว	การศึกษาแบบ 4 ขั้ว
1. การเตรียมขั้วไฟฟ้าง่าย	1. การเตรียมขั้วไฟฟ้าทำได้ยากกว่าแบบ 2ขั้ว
2. อุปกรณ์ที่ใช้กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ	2. ต้องมีเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับอุปกรณ์ที่สามารถให้กำเนิดสัญญาณไฟฟ้าที่มี 4 ช่องสัญญาณและเฟสต่างกัน 90^0(PSU)
3. การเก็บข้อมูลการทดลองทำได้ยากและช้าโอกาสผิดพลาดสูงเนื่องจากต้องให้การหมุนอยู่ในระนาบที่ต้องการพอดีและต้องวัดมุมระหว่างเซลล์กับสนามไฟฟ้าประกอบด้วย	3. การเก็บข้อมูลทำได้ง่ายเพราะเซลล์จะถูกบังคับให้หมุนอยู่ในระนาบของสนามไฟฟ้าและไม่ต้องมีค่ามุมระหว่างเซลล์กับสนามไฟฟ้า