

## บทที่ 4

### ผลและการอภิปรายผล

#### 4.1 ความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสมต่อเซลล์แขวนลอย

##### 4.1.1 โพรโทพลาสต์ของ *Lillium longiflorum*

โพรโทพลาสต์ของ *Lillium longiflorum* ถูกแขวนลอยในสารละลายน้ำตาลแมนนิทอลที่ค่าความเข้มข้นต่างกันทั้งหมด 6 ค่าได้แก่ 0.3 M, 0.4 M, 0.5 M, 0.6 M, และ 0.7 เมื่อศึกษาจากจำนวนโพรโทพลาสต์ที่นับได้เมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการแขวนลอย ได้ผลดังตาราง 2 พบว่าโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* สามารถแขวนลอยในสารละลายแมนนิทอลความเข้มข้น 0.5 M ได้นานที่สุดโดยมีการแตกและเหี่ยวของเซลล์น้อยที่สุดจึงใช้ความเข้มข้นดังกล่าวสำหรับแขวนลอยโพรโทพลาสต์ขณะทดลอง

ตาราง 4.1 จำนวนโพรโทพลาสต์ของ *Lillium longiflorum* ที่แขวนลอยในสารละลายน้ำตาลแมนนิทอลที่ค่าความเข้มข้นต่างๆเมื่อเวลาเปลี่ยนไป รวมทั้งค่าความดันออสโมติกของโพรโทพลาสต์ที่ความเข้มข้นแต่ละค่า

ความเข้มข้นของสารละลาย (M)	จำนวนโพรโทพลาสต์ ( $10^7$ Cells.m <sup>-3</sup> )				ร้อยละของเซลล์ที่ปกติที่ 10 ชั่วโมง	ลักษณะการผิดปกติของเซลล์	ความดันออสโมติก (Mpa)
	0 ชั่วโมง	2.5 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	10 ชั่วโมง			
0.3	8.96±0.16	8.72±0.25	7.60±0.53	6.48±0.44	72.32	ขยายตัว	49.55
0.4	10.72±0.48	10.16±0.38	9.68±0.10	8.64±0.26	80.60	ขยายตัว	24.78
0.5	8.48±0.48	8.24±0.25	7.60±0.19	7.28±0.38	85.85	ขยายตัว	-
0.6	12.08±0.88	11.52±0.94	10.96±0.58	9.84±0.29	81.46	หดตัว	-24.78
0.7	6.72±0.43	6.48±0.38	5.84±0.52	5.28±0.26	78.57	หดตัว	-49.55

เมื่อพิจารณาความดันออสโมติกของโพรโทพลาสต์ที่แขวนลอยในสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.5 M พบว่าเป็นความเข้มข้นที่โพรโทพลาสต์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดนั่นหมายความว่าความเข้มข้นของสารละลายภายในเซลล์มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นของสารละลายภายนอกเซลล์ดังนั้น

ค่าความดันออสโมติกเนื่องจากการแพร่ของโมเลกุลของน้ำที่ความเข้มข้นของสารละลายภายนอกมีค่าเข้าใกล้ศูนย์จึงกำหนดให้เท่ากับดั่งนั้นจึงหาความดันออสโมติกของโพทโทพลาสติกแขวนลอยที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้ค่าดังตาราง 4.1 ค่าที่เป็นบวกแสดงว่าน้ำแพร่เข้าสู่เซลล์ส่วนค่าลบแพร่ออกจากเซลล์

#### 4.1.2 เซลล์เม็ดเลือดแดง

เซลล์เม็ดเลือดแดงแขวนลอยในสารละลายที่ประกอบด้วย ฟอสเฟตบัฟเฟอร์(MOPS) 0.001 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 M ซูโครส 0.1 M, 0.2 M, 0.3 M และ 0.4 M เมื่อนับจำนวนเซลล์ที่ยังเป็นปกติที่เวลาต่างๆ ได้ผลดังตาราง 2 คือเมื่อเซลล์เพิ่มมากขึ้น จำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่แขวนลอยจะลดลง เพราะเซลล์แตกและมีรูปร่างผิดปกติ ผลที่ได้พบว่าที่ความเข้มข้นของซูโครส 0.2 M จำนวนเซลล์ที่นับได้เมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมงจะเหลือน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้นคือเหลืออยู่ร้อยละ 86.32 เมื่อพิจารณาจากขนาดของเซลล์ประกอบด้วยพบว่าที่ความเข้มข้นของซูโครส 0.2 M เมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมงขนาดของเซลล์เปลี่ยนไปน้อยที่สุด คือร้อยละ 7.45 เมื่อเทียบกับตอนเริ่มต้นดังตาราง 3 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้น 0.1 M ขนาดของเซลล์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นส่วนที่ความเข้มข้นของซูโครส 0.3 M และ 0.4 M ขนาดของเซลล์จะลดลงมากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ้าแขวนลอยเซลล์ในความเข้มข้นดังกล่าวโอกาสที่เซลล์จะผิดปกติไปจากความเป็นจริงจะมีมาก ดังนั้นจึงใช้ค่าความเข้มข้น 0.2 M ในการเตรียมสารละลายซูโครสเข้มข้นเพื่อแขวนลอยเซลล์เม็ดเลือดแดงสำหรับทดลองเหนี่ยวนำในขั้นต่อไป

ตาราง 4.2 จำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่แขวนลอยในสารละลาย ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.001M โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 M และ น้ำตาลซูโครสที่ค่าความเข้มข้นต่างๆเมื่อเวลาเปลี่ยนไป รวมทั้งค่าความดันออสโมติกของเซลล์

ความเข้มข้นของซูโครส (M)	จำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดง ( $\times 10^{10}$ Cells.m <sup>-3</sup> )				ร้อยละของเซลล์ที่ปกติที่ 10 ชั่วโมง	ลักษณะของเซลล์ที่ผิดปกติ	ความดันออสโมติก (MPa)
	0 ชั่วโมง	2.5 ชั่วโมง	5 ชั่วโมง	10 ชั่วโมง			
0.1	8.24±0.42	6.86±0.22	5.60±0.42	5.20±0.54	63.07	ขยายตัว	24.78
0.2	17.87±1.25	14.80±0.87	16.33±0.28	15.42±0.21	86.32	ขยายตัว	-
0.3	10.40±0.13	10.44±0.70	8.42±0.47	6.33±0.22	60.90	หดตัว	-24.78
0.4	7.28±0.16	5.91±0.26	5.68±0.23	2.57±0.55	35.37	หดตัว	-49.55

จากการทดลองหาค่าความดันออสโมติกของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่แขวนลอยในสารละลายแมนนิทอลพบว่าที่ค่าความเข้มข้นของซูโครส 0.2 M เซลล์เม็ดเลือดแดงสามารถแขวนลอยได้นานที่สุด และมีขนาดเปลี่ยนไปน้อยที่สุดนั่นคือ สภาวะที่ค่อนข้างจะสมดุล และความเข้มข้นของสารละลายภายในเซลล์มีค่าใกล้เคียงกับสารละลายภายนอกเซลล์ และมีค่าความดันออสโมติกเป็นศูนย์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันออสโมติกที่สารละลายต่างได้ผลดังตาราง 4.2

#### 4.2 ความหนืดของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์

เนื่องจากการทดลองเหนี่ยวนำเซลล์ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป ต้องใช้ค่าความหนืดของสารละลายที่ใช้ในการแขวนลอยเซลล์สำหรับคำนวณค่าอัตราเร็วการหมุนของเซลล์ด้วยดังนั้นจึงต้องทดลองหาค่าความหนืดของสารละลายต่างๆที่ใช้แขวนลอยเซลล์ได้ผลดังต่อไปนี้

##### 1) ความหนืดของสารละลายสำหรับแขวนลอยโพรโทพลาสต์

จากการทดลองวัดค่าความหนืดของสารละลายแมนนิทอลที่มีความเข้มข้นต่างกัน พบว่าค่าความหนืดของสารละลาย มีค่าแปรผันตรงกับค่าความเข้มข้นของสารละลาย โดยได้ผลการทดลองดังตาราง 4.3 และจากผลการทดลองที่ได้จะใช้สำหรับคำนวณอัตราเร็วการหมุนของเซลล์ ที่จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไปโดยโพรโทพลาสต์ที่แขวนลอยในสารละลายแมนนิทอลความเข้มข้น 0.6 M ใช้ค่าความหนืดเท่ากับ  $1.24 \times 10^{-3} \text{ N.s.m}^{-2}$

ตาราง 4.3 ค่าความหนืดของสารละลายแมนนิทอลที่มีความเข้มข้นและส่วนผสมต่างกัน

ความเข้มข้นของแมนนิทอล (M)	ความหนืด ( $\times 10^{-3} \text{ N.s.m}^{-2}$ )	
	Mannitol	Mannitol+0.3%BSA
0.5	$1.19 \pm 0.04$	$1.29 \pm 0.02$
0.6	$1.24 \pm 0.02$	$1.30 \pm 0.05$
0.7	$1.27 \pm 0.03$	$1.33 \pm 0.08$

##### 2) ความหนืดสารละลายสำหรับแขวนลอยเซลล์เม็ดเลือดแดง

สารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์เม็ดเลือดแดงประกอบด้วย ซูโครส 0.2 M ฟอสเฟสบัฟเฟอร์ 0.001 M และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.001 M แต่สำหรับในการทดลองได้ทดลองให้เห็นความแตกต่างกันที่ความเข้มข้น 4 ค่า คือ ซูโครส 0.1 M 0.2 M 0.3 M และ 0.4 M ส่วน ความเข้มข้น

ของฟอสเฟสบัฟเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ 0.001 M ได้ผลดังตาราง 4.4 ดังนั้นจึงใช้ค่าความหนืด  $1.082 \times 10^{-3} \text{ Ns.m}^{-2}$  ในการคำนวณค่าอัตราเร็วการหมุนของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ทดลองในขั้นต่อไป

ตาราง 4.4 ค่าความหนืดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของซูโครสต่างกัน แต่ประกอบด้วยส่วนประกอบอื่นเท่ากัน คือ MOPS 0.001 M และ NaOH 0.001 M

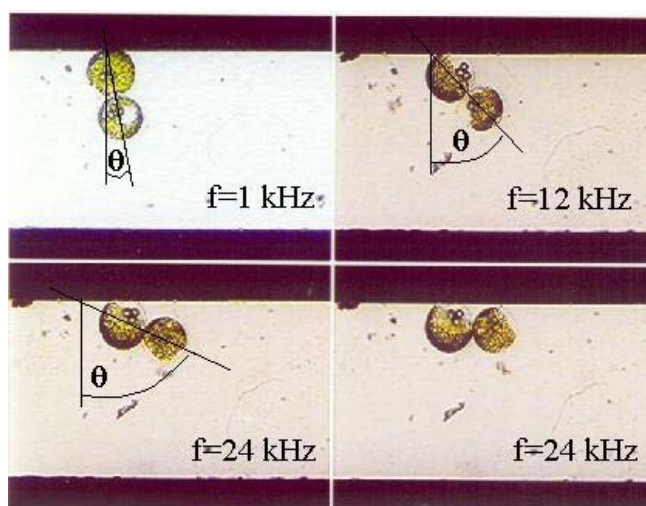
ความเข้มข้นสารละลายซูโครส (M)	ความหนืด ( $\times 10^{-3} \text{ Ns.m}^{-2}$ )
0.1	$1.036 \pm 0.018$
0.2	$1.082 \pm 0.002$
0.3	$1.196 \pm 0.010$
0.4	$1.318 \pm 0.009$

### 4.3 การเหนี่ยวนำเซลล์ในสนามไฟฟ้า

#### 4.3.1 การศึกษาแบบสองขั้ว หรือการเหนี่ยวนำเซลล์ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ

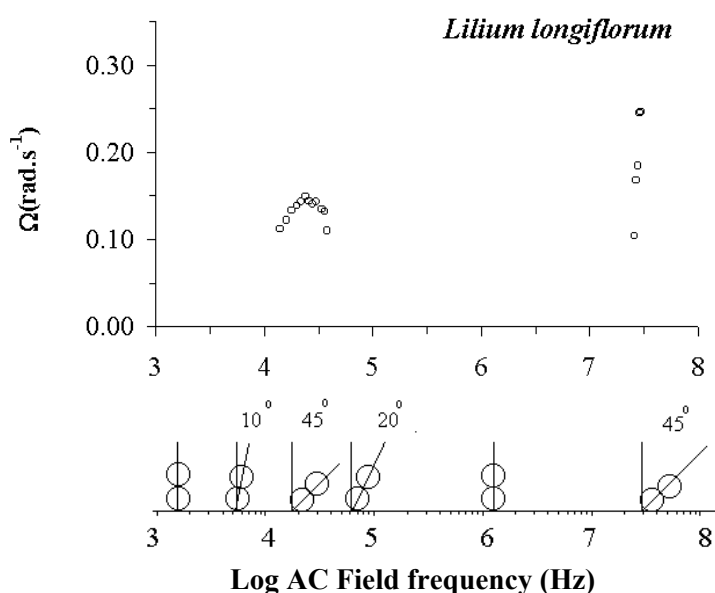
##### 1) ผลเนื่องจากความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำ

การทดลองกับโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* ที่ความเข้มของสนามไฟฟ้า  $12 \text{ kV.m}^{-1}$  ค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายภายนอก  $3.7 \text{ mS.m}^{-1}$  หลังจากที่ตั้งวางเซลล์จนมีเซลล์สองเซลล์เกาะติดกันและเกาะติดอยู่ที่ขั้วไฟฟ้า การทดลองเงื่อนไขแรกจะให้ความเข้มสนามไฟฟ้าคงที่แล้วค่อยๆ เปลี่ยนค่าของความถี่ ตั้งแต่  $1 \text{ Hz}$  จนถึง  $30 \text{ MHz}$  (Function generator ให้กำเนิดสัญญาณสูงสุดได้  $30 \text{ MHz}$ ) ผลที่ได้คือในช่วงแรกคือความถี่ประมาณ  $1 \text{ Hz}$  ถึง  $10 \text{ kHz}$ . โพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* จะไม่หมุนโดยเกาะติดอยู่กับขั้วไฟฟ้าทำมุมในแนวขนานหรือทำมุมน้อยกับสนามไฟฟ้า ดังแสดงในภาพประกอบ 4.1 ก เมื่อเพิ่มความถี่ไปเรื่อยๆ มุมที่เซลล์ทั้งสองกระทำกับขั้วไฟฟ้าก็จะเปลี่ยนไปด้วย และเซลล์ที่ไม่อยู่ติดกับขั้วไฟฟ้าจะเริ่มหมุนช้าๆ ในการทดลองจะเริ่มจับเวลาในการหมุนต่อรอบได้ที่ความถี่ประมาณ  $10 \text{ kHz}$  มุม  $\theta$  วัดค่าได้ประมาณ  $30^\circ$  ภาพประกอบ 4.1 ข อัตราเร็วการหมุนวัดค่าได้  $0.799 \pm 0.01 \text{ rad.s}^{-1}$  เมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้นเรื่อยๆ มุมที่เซลล์ทั้งสองกระทำกับขั้วไฟฟ้าก็จะเปลี่ยนไปและอัตราเร็วการหมุนจะเปลี่ยนตามไปด้วย โดยจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แต่ถ้ามุมดังกล่าวมีค่าเกิน  $45^\circ$  ดังภาพประกอบ 4.1 ค เมื่อโพรโทพลาสต์หมุนไปได้ระยะหนึ่งจะหลุดออกจากกันและเคลื่อนที่ไปเกาะที่ขั้วไฟฟ้าเหมือนกันทั้งสองเซลล์ดังภาพประกอบ 4.1 ง สำหรับการทดลองที่ค่าสภาพนำไฟฟ้า  $3.7 \text{ mS.m}^{-1}$  และค่าความเข้มสนามไฟฟ้า  $14 \text{ kV.m}^{-1}$  โพรโทพลาสต์จะหมุนด้วยความเร็วสูงสุดที่



ภาพประกอบ 4.1 มุมระหว่างโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* ทั้งสองจะเปลี่ยนไปเมื่อค่าความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำเปลี่ยน

ความถี่ประมาณ 24 kHz ถึง 26 kHz และมุมที่เซลล์ทั้งสองกระทำกับขั้วไฟฟ้าจะมีค่าประมาณ  $45^\circ$  ซึ่งจะเป็นมุมที่เซลล์หมุนได้เร็วที่สุดเช่นกัน ตามสมการที่ 24 จะพบว่าในสมการจะคูณอยู่ด้วย ค่าของ  $\sin(2\theta)$  ซึ่งสมการจะมีค่ามากที่สุดเมื่อ  $2\theta=90^\circ$  นั่นคือ  $\theta=45^\circ$  นั่นเอง โดยที่เซลล์จะหมุนด้วยความเร็วสูงสุด  $0.22 \text{ rad.s}^{-1}$  จากนั้นเมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้นอีกความเร็วของการหมุนจะลดลงอีกครั้งและมุมที่เซลล์กระทำกับขั้วไฟฟ้า จะลดลงด้วยเช่นกัน จนกลับมาตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้าอีกครั้ง และเซลล์จะหยุดหมุน แต่เมื่อเพิ่มความถี่ขึ้นไปจนมีค่า 25 MHz. เซลล์จะเริ่มเอียงทำมุมและหมุนอีกครั้งและจะหมุนแล้วมากขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ไปจนถึง 30 MHz. จึงหยุดเนื่องจาก Function generator ที่ใช้ในการทดลองสามารถผลิตสัญญาณที่มีความถี่สูงสุด 30 MHz. ในช่วงความถี่สูงนี้เซลล์หมุนด้วยอัตราเร็วสูงสุด  $2.78 \pm 0.197 \text{ rad.s}^{-1}$ . ดังภาพประกอบ 4.2

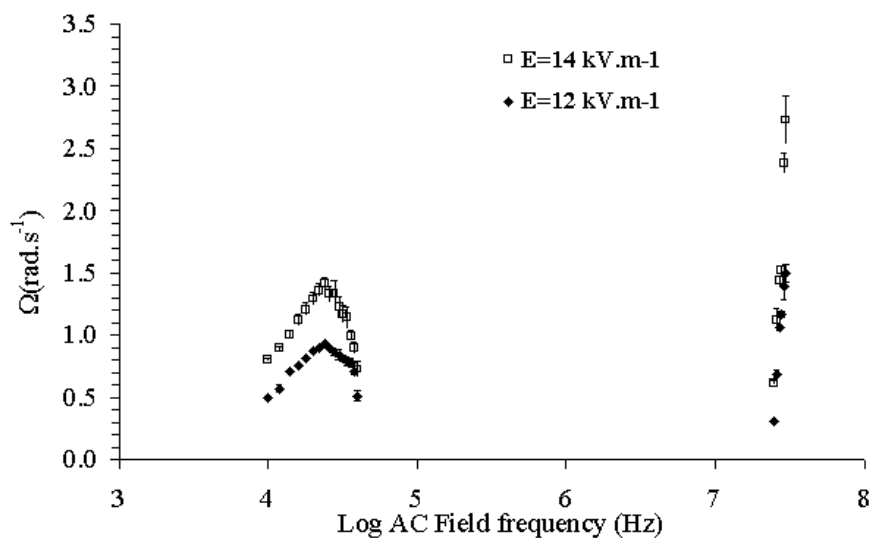


ภาพประกอบ 4.2 ให้เห็นว่าที่ความถี่ต่างกันมุมที่โพโรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* ทั้งสองทำกับขั้วไฟฟ้า หรือสนามไฟฟ้าจะต่างกัน และถ้าหากมุมที่โพโรโทพลาสต์ทำกับขั้วไฟฟ้ามีค่า  $45^\circ$  จะเป็นมุมที่ทำให้โพโรโทพลาสต์หมุนได้เร็วที่สุดโดย  $\sigma_s = 3.7 \text{ mS.m}^{-1}$   $E = 4.2 \text{ kV.m}^{-1}$

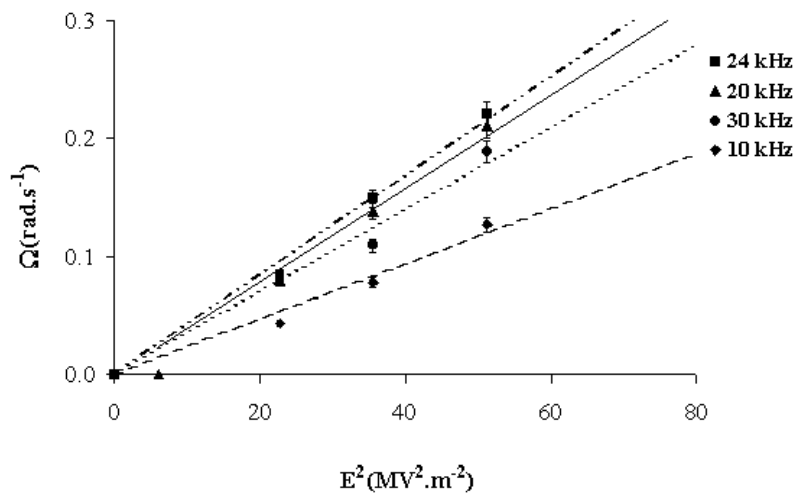
## 2) ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามไฟฟ้า

เมื่อเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็น  $14 \text{ kV.m}^{-1}$  อัตราเร็วในการหมุนจะเพิ่มตามโดยค่าอัตราเร็วสูงสุดที่ค่าความถี่ 24 kHz จะเพิ่มจาก  $0.928 \pm 0.006 \text{ rad.s}^{-1}$  เปลี่ยนไปเป็น  $1.416 \text{ rad.s}^{-1}$  แต่ความเร็วสูงสุดในการหมุนจะยังคงอยู่ที่ความถี่เดิม ถ้าเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างสนามไฟฟ้ายก

กำลังสองกับอัตราเร็วการหมุนในแต่ละค่าความถี่จะได้กราฟเป็นเส้นตรงและเพิ่มมากขึ้นตามค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 4.3 และ 4.4



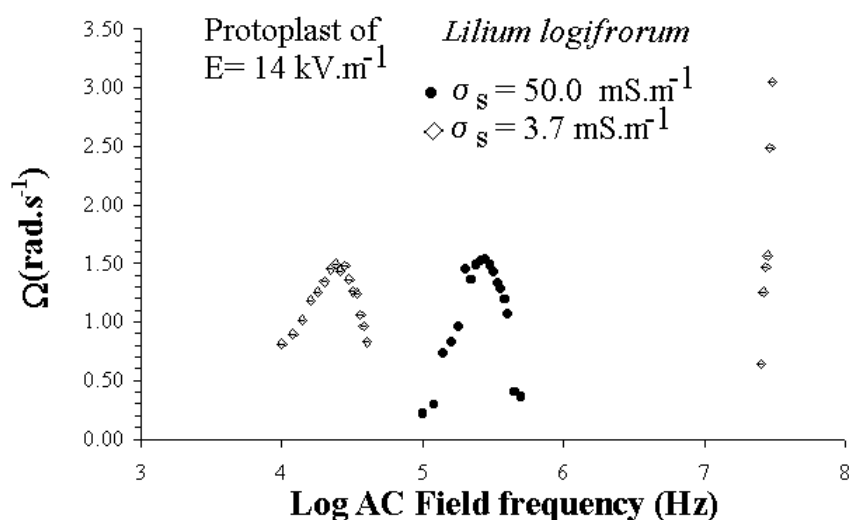
ภาพประกอบ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมของการหมุนของโปรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* กับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้า ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 2 ค่า



ภาพประกอบ 4.4 อัตราการหมุนของโปรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* เมื่อกำหนดให้ความถี่ที่สี่ค่าคือ 10 kHz 20 kHz 24 kHz และ 30 kHz เปรียบเทียบกับกำลังสองของสนามไฟฟ้า

### 3) ผลจากการเปลี่ยนค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์

เมื่อเปลี่ยนค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์จาก  $3.7 \text{ mS.m}^{-1}$  เป็น  $50 \text{ mS.m}^{-1}$  พบว่าอัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ของ *Lilium longiflorum* ที่ถูกเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้ากระแสสลับจะเปลี่ยนไป คืออัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นส่วนค่าสูงสุดของการหมุนจะเลื่อนไปทางค่าความถี่ที่สูงขึ้น(ภาพประกอบ 4.5) และจากการทดลองนี้พบว่าค่าของมุม  $\theta$  ที่ได้จากการทดลองที่สภาพนำไฟฟ้าทั้งสองค่านั้นจะมีค่าแตกต่างกันคือเมื่อทดลองในสารละลายน้ำตาลแมนนิทอลความเข้มข้น  $0.5 \text{ M}$  ที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้า  $3.7 \text{ mS.m}^{-1}$  ที่อัตราเร็วสูงสุดของการหมุนของโพรโทพลาสต์จะได้ค่า  $\theta$  ที่ประมาณ  $45^\circ$  ส่วนที่ทดลองเหนี่ยวนำในสารละลาย น้ำตาลแมนนิทอล ที่มีสภาพนำไฟฟ้า  $50 \text{ mS.m}^{-1}$  เมื่อโพรโทพลาสต์หมุนด้วยอัตราเร็วสูงสุดจะได้ค่า  $\theta$  ที่  $30^\circ$

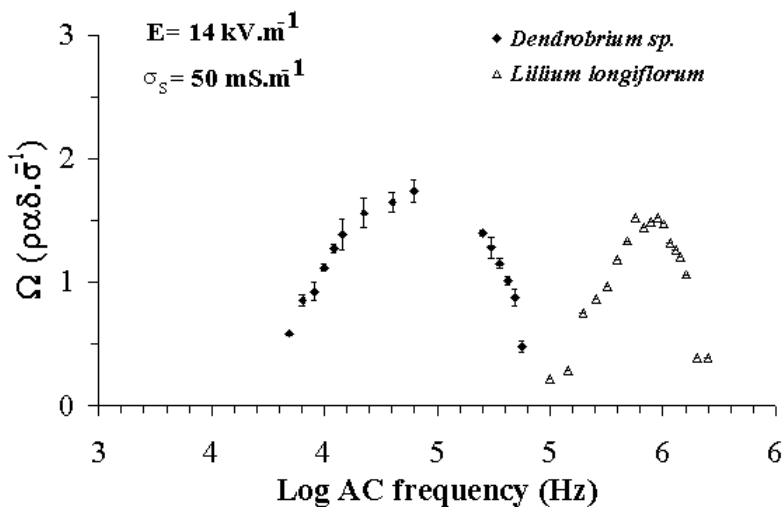


ภาพประกอบ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ ของไบลิลี่กับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำทดลองที่ความเข้มข้นสนามไฟฟ้า  $14 \text{ kV.m}^{-1}$  เมื่อใช้สารละลายที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้า  $3.7 \text{ mS.m}^{-1}$  กับ  $50.0 \text{ mS.m}^{-1}$

### 4) ผลจากเซลล์ต่างชนิดกัน

เปลี่ยนเซลล์ที่ใช้ทดลองเป็นโพรโทพลาสต์ของ *Dendrobium sp* แต่เงื่อนไขต่างๆ เหมือนกับขณะทดลองด้วยโพรโทพลาสต์ของ *Lilium longiflorum* คือสภาพนำไฟฟ้าของสารละลาย  $50 \text{ mS.m}^{-1}$  สนามไฟฟ้าเป็น  $14 \text{ kV.m}^{-1}$  พบว่าค่าอัตราเร็วการหมุนมีค่าแตกต่างกันดังภาพประกอบ 4.6

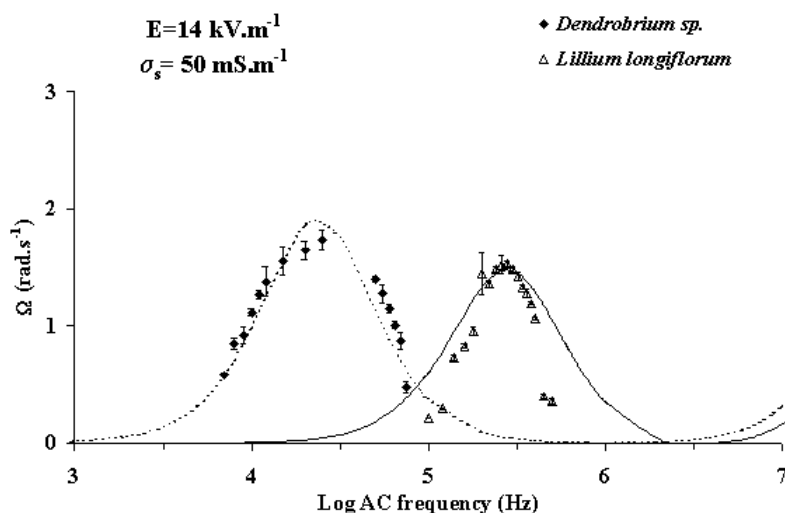




ภาพประกอบ 4.6 กราฟอัตราเร็วการหมุนของโพโรโทพลาสติกของกล้วยไม้สกุลหวายกับของลิลลี่เมื่อเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้า  $14 \text{ kV.m}^{-1}$  สภาพนำไฟฟ้าของสารละลาย  $50 \text{ mS.m}^{-1}$

5) ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้จากการทดลองแบบ 2 ขั้ว

การประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์ทำได้โดยการเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราเร็วการหมุนจากการทดลองกับทฤษฎีโดยอาศัยแบบจำลองทรงกลมเปลือกชั้นเดียวแขวนลอยในสารละลายดังแสดงในภาพประกอบ 4.7



ภาพประกอบ 4.7 กราฟแสดงการประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าของโพโรโทพลาสติก *Dendrobium sp.* และ โพโรโทพลาสติก *Lilium longiflorum* โดยการเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราเร็วการหมุนของเซลล์จากทฤษฎีที่เป็นกราฟเส้นให้เข้ากับการทดลองมีเป็นจุดในกราฟนี้ใช้ค่าคงที่ทางไฟฟ้าดังนี้

*Dendrobium sp.*  $\epsilon_m = 3.5\epsilon_0, \epsilon_c = 60\epsilon_0, \sigma_m = 2.4 \mu\text{S.m}^{-1}, \sigma_c = 0.9 \text{ S.m}^{-1}, \delta = 7 \text{ nm}, R = 0.9467$

*Lilium longiflorum*  $\epsilon_m = 2.5\epsilon_0, \epsilon_c = 60\epsilon_0, \sigma_m = 16 \mu\text{S.m}^{-1}, \sigma_c = 0.73 \text{ S.m}^{-1}, \delta = 7 \text{ nm}, R = 0.9532$

จากการทดลองทั้งหมดสามารถประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์ของ *Lillium longiflorum* และ *Dendrobium sp* ได้ดังแสดงในตาราง 4.5

ตาราง 4.5 ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์ที่ได้จากการทดลองแบบ 2 ขั้วโดยใช้เซลล์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $50\mu\text{m}$ ,  $\delta=7\text{ nm}$  ทั้ง *Lillium longiflorum* และ *Dendrobium sp*

เซลล์	$\epsilon_c$ ( $\times\epsilon_0$ )	$\epsilon_m$ ( $\times\epsilon_0$ )	$\sigma_c$ ( $\text{S.m}^{-1}$ )	$\sigma_m$ ( $\mu\text{S.m}^{-1}$ )	$C_m$ ( $\mu\text{F.m}^{-1}$ )
โพรโทพลาสต์					
<i>Lillium longiflorum</i>	60	$2.44\pm 0.16$	0.73	$3.60\pm 1.52$	$3.03\pm 0.25$
<i>Dendrobium sp</i>	60	3.5	0.90	2.4	5.0

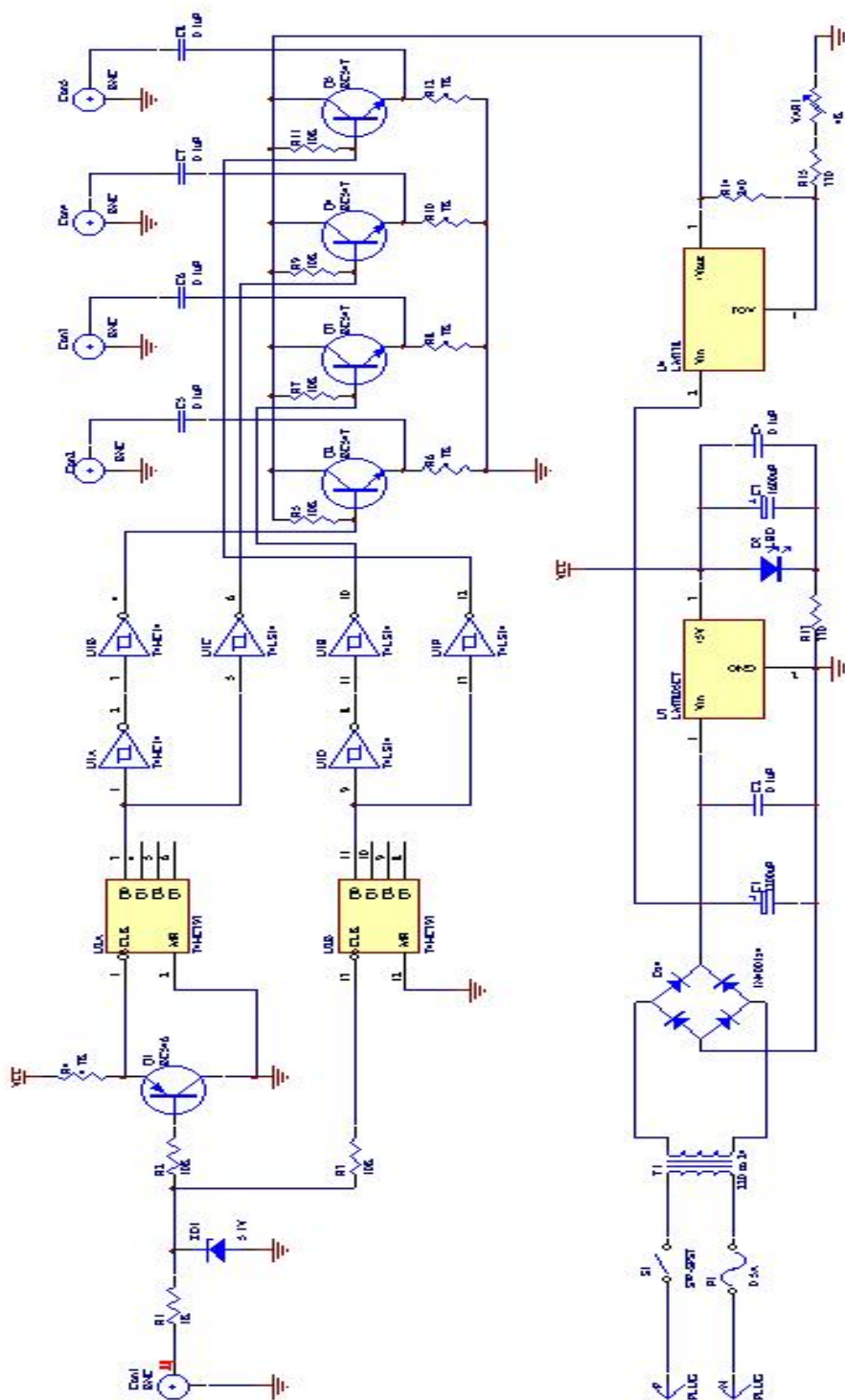
### 4.3.2 การศึกษาโดยการเหนี่ยวนำแบบสี่ขั้ว

มีสองขั้นตอนคือ การพัฒนาอุปกรณ์ กับการทดลองเหนี่ยวนำ

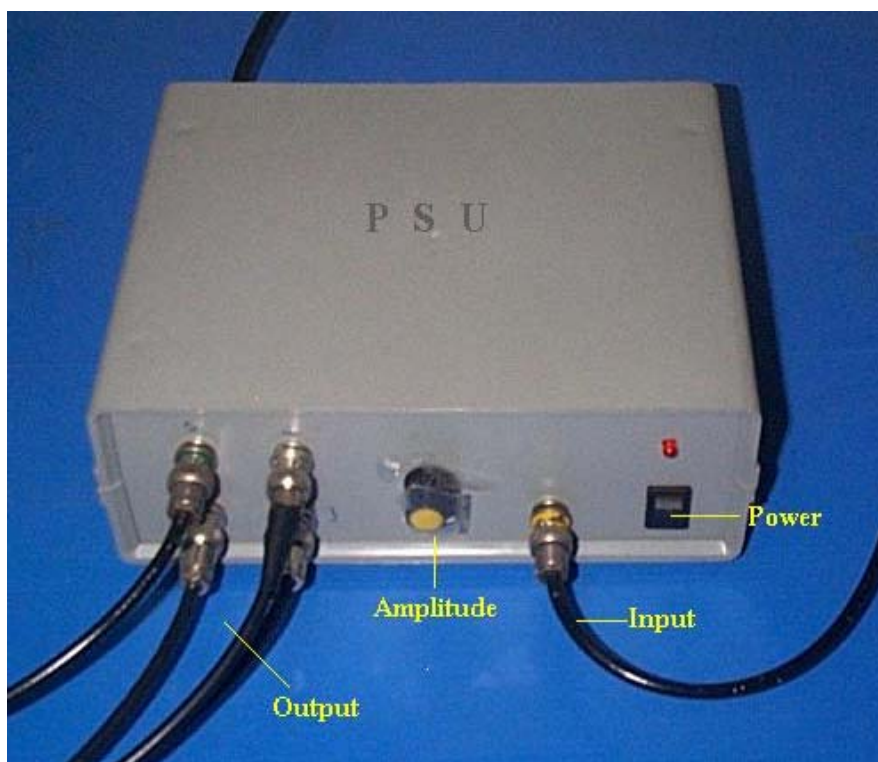
#### 1) การพัฒนาอุปกรณ์เพื่อใช้กำเนิดสนามไฟฟ้าหมุน

สร้างชุดทดลองการเหนี่ยวนำแบบสี่ขั้วมีสองส่วน คือส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้า และส่วนที่เป็นแหล่งจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

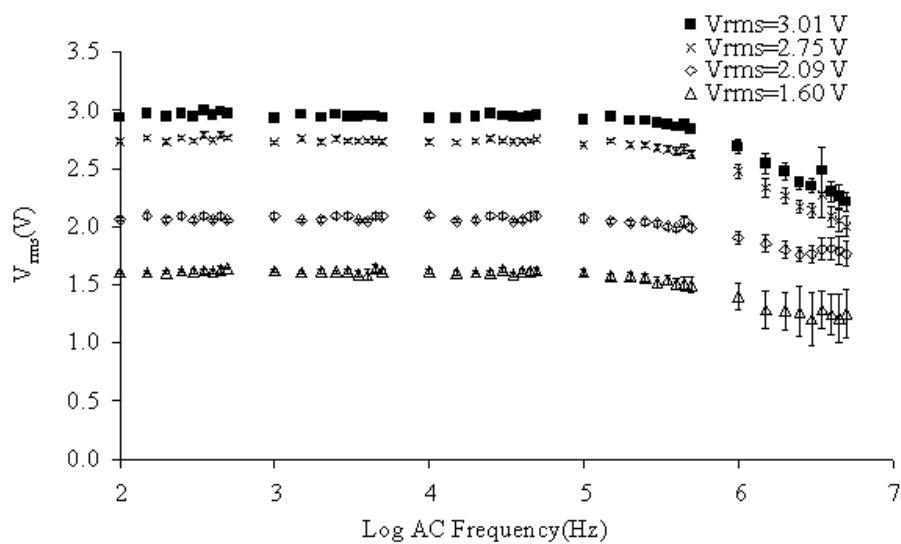
1.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับแบบปรับค่าความต่างศักย์และความถี่ได้ กับ ชุดอุปกรณ์สำหรับแยกช่องสัญญาณออกเป็น 4 ช่องสัญญาณและมีเฟสต่างกัน  $90^\circ$  (Phase Shift Unit หรือ PSU) เนื่องจากการสร้างสนามไฟฟ้าหมุนเพื่อใช้ในการทดลองการเหนี่ยวนำเซลล์ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว นั้นจะต้องให้สัญญาณของแต่ละขั้วมีเฟสต่าง  $90^\circ$  ดังนั้นจึงต้องสร้างอุปกรณ์เพื่อผลิตสัญญาณในลักษณะดังกล่าว อุปกรณ์ที่สร้างขึ้น ใช้ชื่อ Phase shift unit ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ทำหน้าที่แยกสัญญาณและปรับให้มีเฟสต่างกัน  $90^\circ$  (Phase shift unit) และ ส่วนที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ (Amplifier) โดยแสดงวงจรไว้ดังภาพประกอบ 4.8 การทำงานของ PSU เริ่มจากสัญญาณ Input เป็นคลื่นสี่เหลี่ยมค่าความต่างศักย์  $1 V_{p-p}$  ถึง  $2 V_{p-p}$  ที่สามารถปรับความถี่ได้ โดยใช้ค่าความถี่ระหว่าง 1 Hz ถึง 6 MHz ถ้าความถี่สูงกว่า 6 MHz สัญญาณ Output ที่ออกจาก PSU จะเกิดความผิดและไม่มีความสม่ำเสมอในแต่ละช่องสัญญาณ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.10 และภาพประกอบ 4.11 กล่าวคือเมื่อค่าความถี่มากกว่า 1MHz ค่าความต่างศักย์จะลดลงอย่างชัดเจนทำให้ไม่สามารถที่จะสร้างเป็นสนามไฟฟ้าที่หมุนอย่างต่อเนื่องได้ สัญญาณที่เข้ามาจะถูกแยกออกเป็นสองช่องสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน  $90^\circ$  โดยใช้ไอซีเบอร์ 74HC393 แต่ความถี่ที่ได้จะลดลงจากสัญญาณ Input ครึ่งหนึ่ง โดยกำหนดให้สัญญาณทั้งสองมีเฟสเป็น  $0^\circ$  และ  $90^\circ$  เมื่อเทียบกับที่รับเข้ามา หลังจากนั้นนำไปแยกเป็นสี่ช่องโดยใช้ไอซีเบอร์ 74LS14 ซึ่งจะทำหน้าที่ให้สัญญาณที่รับเข้าไปเปลี่ยนเฟสไป  $180^\circ$  นั่นคือสัญญาณที่มีเฟส  $0^\circ$  จะออกมาเป็น  $0^\circ$  กับ  $180^\circ$  และ สัญญาณ  $90^\circ$  จะออกมาเป็น  $90^\circ$  กับ  $270^\circ$  แต่สัญญาณที่ได้ออกมาจะมีความต่างศักย์คงที่ จึงจำเป็นต้องมีวงจรในส่วนที่สองเพื่อช่วยในการขยายและปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ของสัญญาณ Output โดยที่ความถี่และเฟสไม่เปลี่ยนแปลงในที่นี้จะกล่าวถึงการทดลองวัดค่าความต่างศักย์ที่ได้จาก PSU ซึ่งวัดโดยใช้ออสซิลโลสโคปแบบดิจิทัล 4 ช่องสัญญาณ โดยจ่ายความต่างศักย์ 3.01 V 2.75 V และ 2.09 V และ 1.60 V ช่วงความถี่ 50 Hz ถึง 5 MHz ได้ผลดังตาราง 7.2 และ ตาราง 7.3 (ภาคผนวก 3)ซึ่งพบว่าค่าความต่างศักย์ที่ได้จาก PSU จะมีการลดทอนลงที่ค่าความถี่สูงๆ ดังภาพประกอบ 4.10 ดังนั้นเพื่อให้ค่าความต่างศักย์ที่ใช้คำนวณค่าสนามไฟฟ้าขณะทำการทดลองมีค่าถูกต้องที่สุดจึงทดลองที่ค่าความถี่ต่ำกว่า 1 MHz



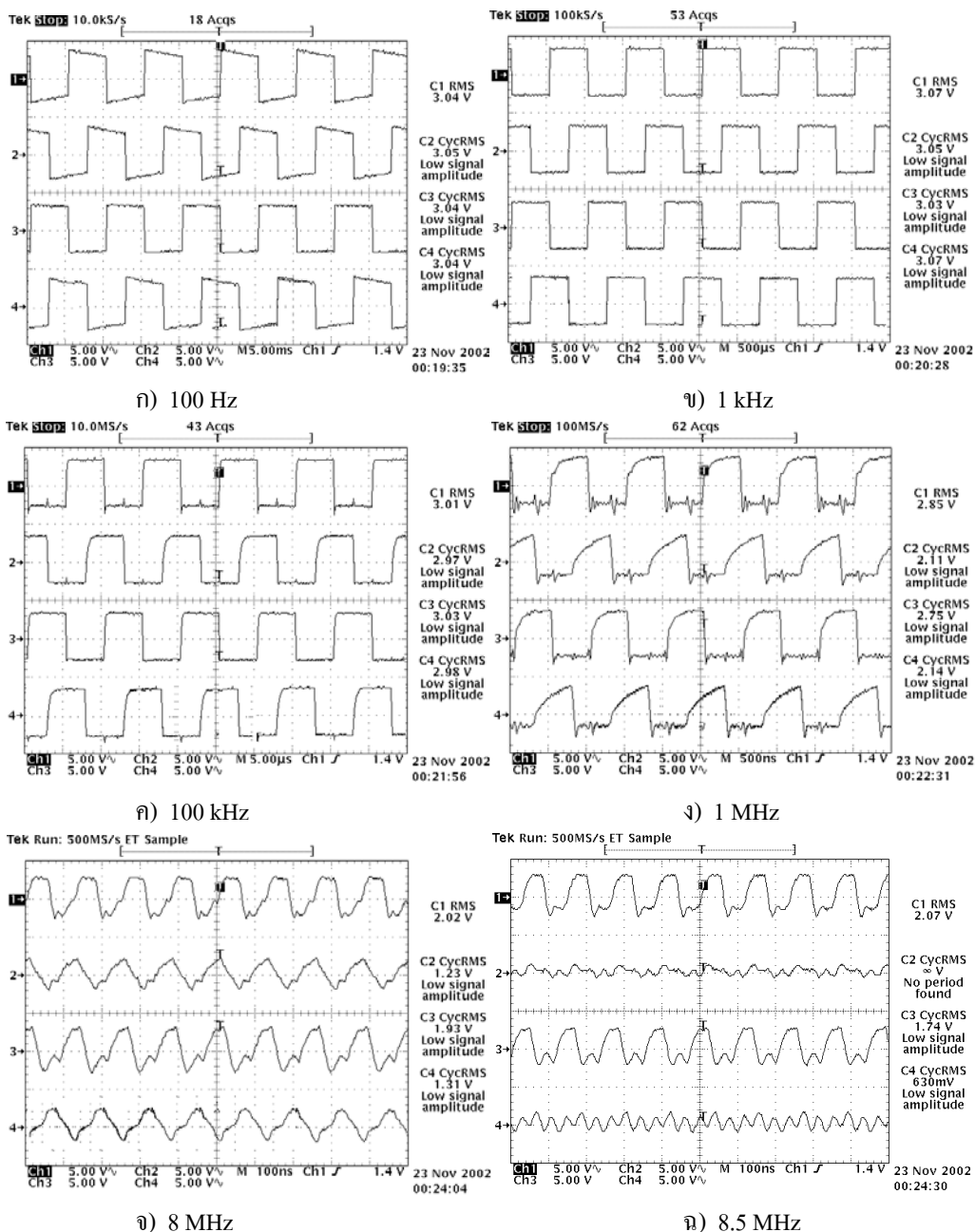
ภาพประกอบ 4.8 วงจรแสดงการทำงานของ PSU เริ่มจากรับสัญญาณแบบคลื่นสี่เหลี่ยมมาจาก Function generator หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกแยกออกเป็น 4 ช่องที่มีเฟสต่างกัน  $90^\circ$  และใช้ส่วนขยายสัญญาณช่วยปรับค่าความต่างศักย์



ภาพประกอบ 4.9 อุปกรณ์ PSU ที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วประกอบด้วยช่องสำหรับรับสัญญาณเข้า 1 ช่อง ช่องจ่ายสัญญาณ 4 ช่อง พร้อมทั้งปุ่มปรับค่าความถี่



ภาพประกอบ 4.10 กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้า out put ที่ได้จาก PSU ที่ค่าความถี่ต่างๆ



ภาพประกอบ 4.11 ภาพสัญญาณไฟฟ้ากระแสลับจากสี่ขั้วไฟฟ้าของ PSU สำหรับจ่ายให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ เมื่อพิจารณาที่ค่าความถี่ต่างกันตั้งแต่ 100 Hz ถึง 8.5 MHz.

### 1.2 การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบ 4 ขั้วระนาบ

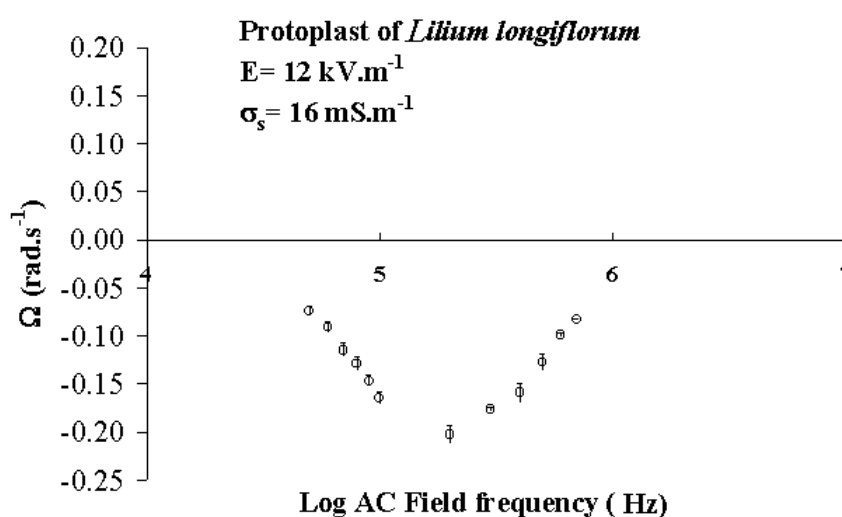
วิธีการทำขั้วไฟฟ้าแบบ 4 ขั้วระนาบได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.2 เรื่องการเหนี่ยวนำเซลล์ในสนามไฟฟ้าโดยอยู่ในหัวข้อย่อยเรื่องการเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบ 4 ขั้วระนาบ

## 2) การทดลองการเหนี่ยวนำ

การทดลองใช้เซลล์ของสิ่งมีชีวิต 3 ชนิดคือ โพรโทพลาสต์ของ *Lillium longiflorum* โพรโทพลาสต์ของ *Ananas sp.* และเซลล์เม็ดเลือดแดง เพื่อแสดงค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์ของสิ่งมีชีวิตที่มีค่าแตกต่างกันออกไปสำหรับสิ่งมีชีวิตที่ต่างชนิดกันออกไป

### 2.1 ผลของความถี่ของสนามไฟฟ้าต่อการหมุนของเซลล์

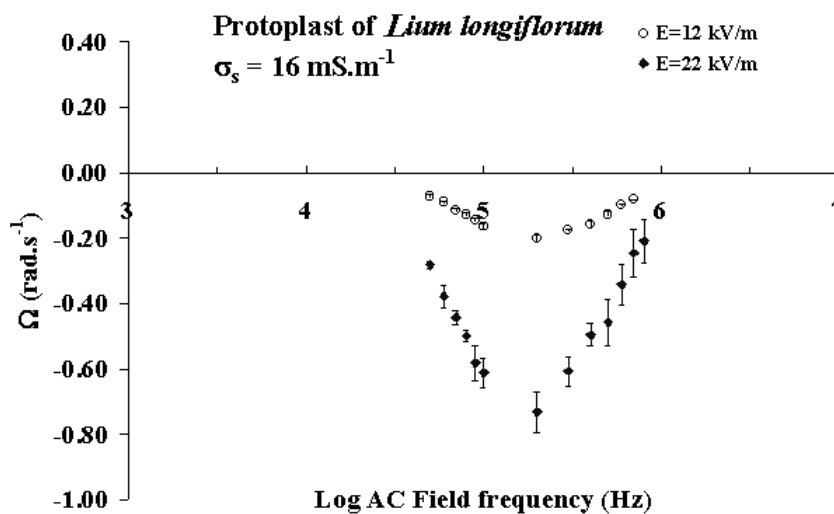
ผลการทดลองที่ได้จากโพรโทพลาสต์ของ *Lillium longiflorum* ที่ความเข้มข้นสนามไฟฟ้า  $12 \text{ kV.m}^{-1}$  สภาพนำไฟฟ้า  $0.016 \text{ S.m}^{-1}$  เมื่อเริ่มเหนี่ยวนำเซลล์ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับโดยเริ่มที่ความถี่  $10 \text{ Hz}$  หลังจากนั้นทำการเพิ่มความถี่ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งที่ความถี่ประมาณ  $40 \text{ kHz}$  เซลล์จะเริ่มหมุนเล็กน้อย เริ่มบันทึกข้อมูลที่ความถี่  $50 \text{ kHz}$  เซลล์เริ่มหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม  $0.074 \pm 0.012 \text{ rad.s}^{-1}$  โดยเซลล์จะหมุนอยู่ในระนาบเดียวกับระนาบการหมุนของสนามไฟฟ้าแต่จะมีทิศทางที่ตรงกันข้ามเลยใช้เป็นค่าลบ เมื่อเพิ่มความถี่มากขึ้นไปอีกความเร็วเชิงมุมของการหมุนจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยจนกระทั่งถึงความถี่  $200 \text{ kHz}$  ค่าความเร็วของการหมุนจะเริ่มลดลงอีกจนกระทั่งช้ามากๆ และหยุดหมุน ที่ความถี่มากกว่า  $700 \text{ kHz}$  ดังภาพประกอบ 4.12 การหมุนของโพรโทพลาสต์ที่เปลี่ยนค่าไปเมื่อความถี่เปลี่ยนเป็นผลมาจากความต่างเฟสของสนามไฟฟ้าที่ที่เหนี่ยวนำกับไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้น ช่วงที่มีอัตราเร็วการหมุนสูงสุดเป็นช่วงที่เกิดเรโซแนนซ์ นั่นคือค่าคงที่ของเวลา (Time constant) ในการโพลารีซของโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* มีค่าในช่วงของคาบของสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ คือมีค่าในช่วง  $10^{-5} \text{ s}$  ถึง  $10^{-6} \text{ s}$



ภาพประกอบ 4.12 อัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ของ *Lillium longiflorum* ที่ค่าความถี่  $10 \text{ kHz} - 1 \text{ MHz}$

## 2.2 ผลของความเข้มสนามไฟฟ้า

อัตราเร็วการหมุนของโปรโทพลาสต์ของ *Lillium longiflorum* จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้ามากขึ้น โดยค่าอัตราเร็วการหมุนสูงสุดที่ความถี่ 200 kHz ความเข้มสนามไฟฟ้า  $12 \text{ kV.m}^{-1}$  มีค่าเท่ากับ  $-0.202 \pm 0.020 \text{ rad.s}^{-1}$  และเปลี่ยนไปเป็น  $-0.732 \pm 0.062 \text{ rad.s}^{-1}$  เมื่อเพิ่มค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเป็น  $22 \text{ kV.m}^{-1}$  โดยค่าความถี่ยังคงเดิมดังแสดงในภาพประกอบ 4.13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราเร็วการหมุนของเซลล์เมื่อถูกเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำ เนื่องจากเมื่อค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไปจะมีผลทำให้ค่าของการโพลาไรซ์ของเซลล์เปลี่ยนไปด้วยดังสมการ (34) ส่งผลให้ไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้นมีค่าต่างกัน แรงที่เกิดขึ้นระหว่างไดโพลกับสนามไฟฟ้าจึงต่างกันด้วย แต่ค่าสูงสุดในการหมุนของเซลล์ทั้งโปรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* ยังอยู่ที่ค่าความถี่เดิมดังภาพประกอบ 4.13 นั่นแสดงว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้ามีผลต่อความเข้มของไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้นแต่ไม่มีผลต่อค่าคงที่ของเวลาในการโพลาไรซ์

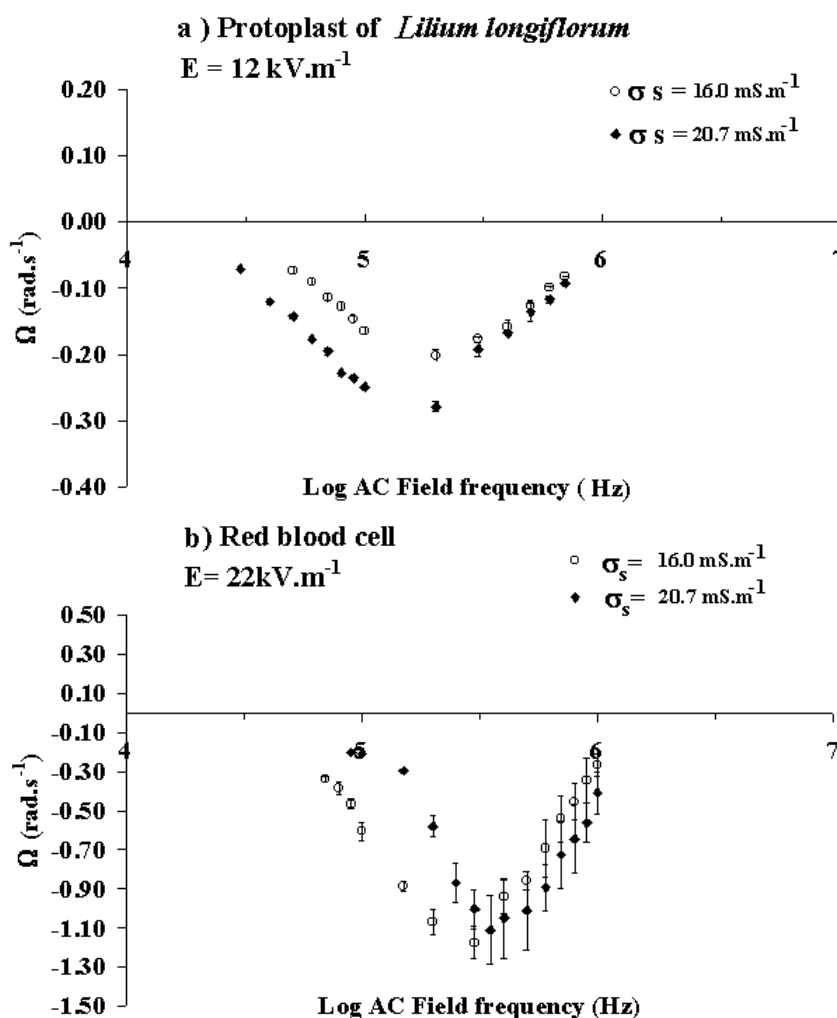


ภาพประกอบ 4.13 อัตราเร็วสูงสุดการหมุนของโปรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* เมื่อเปลี่ยนค่าสนามไฟฟ้า



### 2.3 ผลของค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอย

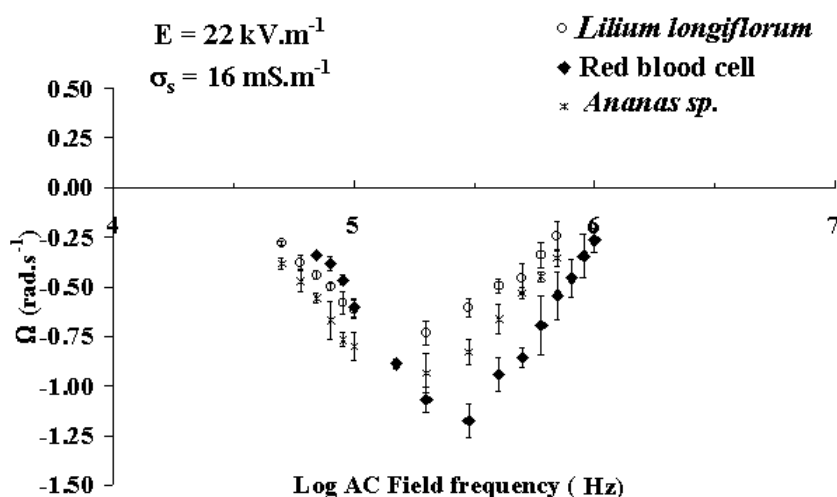
เมื่อทดลองโดยการเปลี่ยนค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยขณะทดลอง จาก  $0.016 \text{ S.m}^{-1}$  เป็น  $0.0207 \text{ S.m}^{-1}$  พบว่าทั้งค่าของอัตราการหมุนและจุดสูงสุดของการหมุนจะเปลี่ยนไป คือเมื่อเพิ่มค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายค่าอัตราเร็วจะลดลง ส่วนจุดสูงสุดของการหมุนจะเลื่อนไปทางค่าความถี่ที่สูงขึ้นดังภาพประกอบ 4.14 นั้นแสดงว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์มีผลให้ความเข้มของการโพลาไรซ์เปลี่ยนไปสังเกตจากอัตราเร็วที่เปลี่ยนไป ส่วนการเลื่อนของจุดสูงสุดของกราฟเป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบว่าค่าคงที่ของเวลาในการโพลาไรซ์ของเซลล์ เปลี่ยนไปเช่นกัน



ภาพประกอบ 4.14 อัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ของ *Lilium longiflorum* (a) มุจzyocxi ค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลาย ( $\sigma_s$ ) และ b) เซลล์เม็ดเลือดแดง

## 2.4 อัตราเร็วการหมุนของเซลล์ต่างชนิดกัน

เมื่อทดลองโดยใช้เซลล์ต่างชนิดกันคือ *Lillium longiflorum* โพรโทพลาสต์สับปะรด เซลล์เม็ดเลือดแดง ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันคือ ความเข้มสนามไฟฟ้า  $22 \text{ kV.m}^{-1}$  และ สภาพนำไฟฟ้า  $16 \text{ mS.m}^{-1}$  พบว่าลักษณะของกราฟที่ได้จากอัตราเร็วการหมุนเทียบกับความถี่จะมีค่าต่างกันในแต่ละเซลล์ ดังภาพประกอบ 4.15



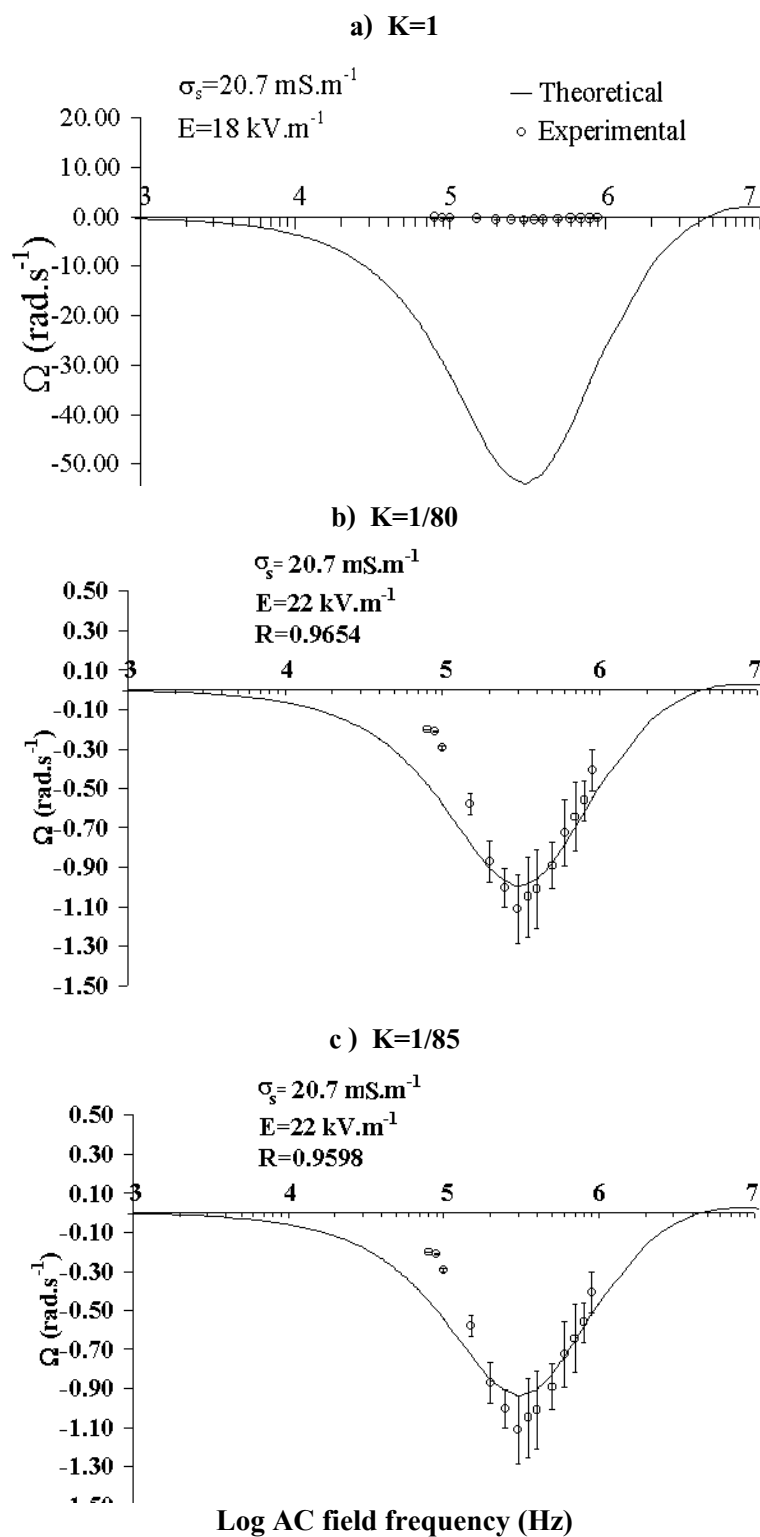
ภาพประกอบ 4.15 อัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* โพรโทพลาสต์สับปะรด และเซลล์เม็ด

เลือดแดง เทียบกับความถี่ที่ใช้เหนี่ยวนำ

## 2.5 การประมาณค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้า

ผลการทดลองเหนี่ยวนำแบบ 4 ขั้วโดยใช้เซลล์เม็ดเลือดแดงซึ่งเป็นเซลล์ที่ทราบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกคือ  $\epsilon = 8 \text{ nm}$ ,  $\epsilon_c = 80\epsilon_0$ ,  $\epsilon_m = 8.50\epsilon_0$ ,  $\sigma_c = 0.53 \text{ S.m}^{-1}$ ,  $\sigma_m = 1 \mu\text{S.m}^{-1}$  (Gimsa and Wachter, 1998) พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากทฤษฎีมีค่าต่างกันมากดังภาพประกอบ 4.16 a) ดังนั้นจึงนำอัตราเร็วการหมุนที่คำนวณจากทฤษฎีคูณด้วยค่าคงที่ K ตาม Archer และ คณะฯ (1999) ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าในที่นี้ทดลองใช้ค่า K เท่ากับ 1/80 และ 1/85 เปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าที่เป็นผลกระทบที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 4.16 b) และ 4.16 ร่วมกับค่า Regression coefficient พบว่าค่าคงที่  $K = 1/80$  เป็นค่าที่เหมาะสม

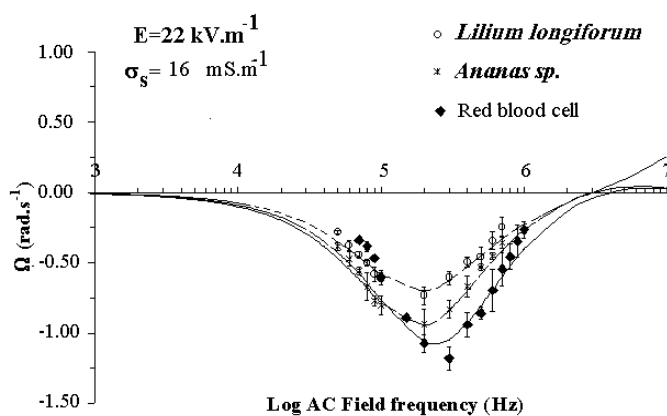
ดังนั้นจึงใช้ค่าดังกล่าวเป็นค่าคงที่ที่เกิดจากผลกระทบของขั้วไฟฟ้าในการเขียนกราฟเมื่อทดลองกับโพรโทพลาสต์



ภาพประกอบ 4.16 อัตราเร็วการหมุนของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่ได้จากทฤษฎีโดยอาศัยค่าคงที่  $\delta = 8 \text{ nm}$ ,  $\epsilon_c = 80\epsilon_0$ ,  $\epsilon_m = 8.50\epsilon_0$ ,  $\sigma_c = 0.53 \text{ S.m}^{-1}$ ,  $\sigma_m = 1 \text{ }\mu\text{S.m}^{-1}$  ตาม Gimsa และ Wachner(1998) และ a) **K=1**, b) **K=1/80** และ c) **K=1/85**

## 2.6 การประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าของ *Lillium longiflorum* และ *Ananas sp.*

อัตราเร็วการหมุนจากการทดลองของโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* และ *Ananas sp* และเซลล์เม็ดเลือดแดงเมื่อเขียนกราฟเทียบกับทฤษฎีได้ผลดังภาพประกอบ 4.17 โดยใช้แบบจำลองทรงกลมเปลือกชั้นเดียวได้ค่าคงที่ของโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* และโพรโทพลาสต์ *Ananas sp.* ดังตาราง 7 ส่วนค่าของเซลล์เม็ดเลือดแดงนั้นเป็นค่าที่อ้างอิงจาก Gimsa และ Wachner(1998) โดยใช้ค่า  $K=1/80$  และค่าคงที่ของโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* และ *Ananas sp*



ภาพประกอบ 4.17 เปรียบเทียบผลจากการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ทั้ง 3 ชนิดโดยให้ค่า K คือ 1/80 จะได้

$$\text{Lilium longiflorum. } \epsilon_m = 2.5\epsilon_0, \epsilon_c = 60\epsilon_0, \sigma_m = 12 \mu\text{S.m}^{-1}, \sigma_c = 0.73 \text{ S.m}^{-1}, \delta = 7 \text{ nm}, \\ R = 0.9383$$

$$\text{Ananas sp } \epsilon_m = 1.6\epsilon_0, \epsilon_c = 60\epsilon_0, \sigma_m = 3 \mu\text{S.m}^{-1}, \sigma_c = 0.5 \text{ S.m}^{-1}, \delta = 7 \text{ nm}, \\ R = 0.9296$$

$$\text{Red blood cell } \epsilon_m = 8.5\epsilon_0, \epsilon_c = 80\epsilon_0, \sigma_m = 1 \mu\text{S.m}^{-1}, \sigma_c = 0.53 \text{ S.m}^{-1}, \delta = 8 \text{ nm}, R = 0.9638$$

จากการทดลองทั้งหมดสามารถประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าของ *Lillium longiflorum* และ *Ananas sp.* และเซลล์เม็ดเลือดแดงได้ดังแสดงในตาราง 4.6

ตาราง 4.6 ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์ที่ได้จากการทดลองแบบ 4 ขั้วโดยใช้ค่าคงที่  $k = 1/80$  เซลล์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $50\mu\text{m}$ ,  $\delta = 7\text{ nm}$  ทั้ง *Lillium longiflorum* และ *Ananas sp.*

Cell	$\epsilon_c$ ( $\times\epsilon_0$ )	$\epsilon_m$ ( $\times\epsilon_0$ )	$\sigma_c$ ( $\text{S.m}^{-1}$ )	$\sigma_m$ ( $\mu\text{S.m}^{-1}$ )	$C_m$ ( $\mu\text{F.m}^{-1}$ )
Protoplast					
<i>Lillium longiflorum</i>	60	$2.5\pm 0.22$	0.73	$10\pm 2.83$	$3.16\pm 0.28$
<i>Ananas sp.</i>	60	1.6	0.5	3	2.02
Red blood cell	50	9.04	0.53	1	0.12