สารบาญ

		หน้า
บทคัดย่อ		(3)
Abstract		(4)
กิตติกรรมประกาศ		(4)
สารบาญ		(4)
รายการตาราง		(7)
รายการภาพประกอบ		(9)
บทที่		
1 บทนำ		1
	1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
	1.2 การตรวจเอกสาร	9
	1.3 วัตถุประสงค์	13
2 ทฤษฎี		14
	2.1 แบบจำลองเซลล์ทรงกลมเปลือกชั้นเดียว	14
	2.2 การโพลาไรซ์และไดโพลโมเมนต์ของเซลล์เดี่ยวแขวนลอยในสนามไฟฟ้า	16
	2.3 การหมุนเชิงไฟฟ้า (Electrorotation)	18
3 วิธีการวิจัย		19
	3.1 วัสดุ	21
	3.2 อุปกรณ์	26
	3.3 วิธีการวิจัย	26
4 ผลและการอภิปรายผล		27
5 สรุปและวิจารณ์		59
6 เอกสารอ้างอิง		67
7 ภาคผนวก		73
8 ประวัติผู้เขียน		96

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	สูตรเอนไซม์สำหรับย่อยโพรโทพลาสต์จากใบกล้วยไม้และลิลลี่	31
4.1	จำนวนโพรโทพลาสต์ของ *Lillium longiflorum* ที่แขวนลอยในสารละลายน้ำตาลแมนนิทอลที่ค่าความเข้มข้นต่างๆเมื่อเวลาเปลี่ยนไป รวมทั้งค่าความดันออสโมติกของโพรโทพลาสต์ที่ความเข้มข้นแต่ละค่า	38
4.2	จำนวนเซลล์เม็ดเลือดแดงที่แขวนลอยในสารละลาย ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.001M โซเดียมไฮด-รอกไซด์ 0.001 M และ น้ำตาลซูโครสที่ค่าความเข้มข้นต่างๆเมื่อเวลาเปลี่ยนไป รวมทั้งค่าความดันออสโมติกของเซลล์	39
4.3	ค่าความหนืดของสารละลายแมนนิทอล	40
4.4	ค่าความหนืดของสารละลายที่มีความเข้มข้นของซูโครสต่างกัน แต่ประกอบด้วยส่วนประกอบอื่นเท่ากันคือ MOPS 0.001 M	41
4.5	ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์ที่ได้จากการทดลองแบบ 2 ขั้วโดยใช้เซลล์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50μm , δ= 7 nm ทั้ง *Lillium longiflorum*และ *Dendrobium* sp	47
4.6	ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์ที่ได้จากการทดลองแบบ 4 ขั้วโดยใช้ค่าคงที่ k =1/80 เซลล์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50μm , δ= 7 nm ทั้ง *Lillium longiflorum* และสับปะรด	58
5.1	ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์ที่ได้จากการทดลองแบบสองขั้วเปรียบเทียบกับการทดลองแบบสี่ขั้ว	65
5.2	เปรียบเทียบข้อเด่นและข้อด้อยของการทดลองเหนี่ยวแบบ2 ขั้วและ 4 ขั้ว	66
7.1	สูตรอาหารสำหรับใช้เพาะเลี้ยง *Dendrobium sp.* ที่ใช้ในการทดลอง	73
7.2	สูตรอาหารสำหรับใช้เพาะเลี้ยง *Lillium longiflorum* ที่ใช้ในการทดลอง	74
7.3	ความต่างศักย์ที่วัดได้จากอุปกรณ์ PSU เมื่อกำหนดค่า V_{rms}= 2.09 V	83
7.4	ความต่างศักย์ที่วัดได้จากอุปกรณ์ PSU เมื่อกำหนดค่า V_{rms}= 2.75	85
7.5	ค่าอัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* ที่ค่าความถี่ต่างๆค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายแมนนิทอล 3.7 $mS.m^{-1}$ ความเข้ม	87

รายการตาราง(ต่อ)

ตาราง		หน้า
7.6	อัตราเร็วการหมุนและค่ามุมระหว่างแนวจุดศูนย์กลางของโพรโทพลาสต์ของ *Lillium longiflorum* ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 14 $kV.m^{-1}$ ค่าสภาพนำไฟฟ้าเปรียบเทียบกันสองค่า	88
7.7	อัตราเร็วการหมุนและค่ามุมระหว่างแนวจุดศูนย์กลางของโพรโทพลาสต์ของ *Dendrobium sp.*เปรียบเทียบกับโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 14 $kV.m^{-1}$	89
7.8	อัตราเร็วการหมุนและค่ามุมระหว่างแนวจุดศูนย์กลางของโพรโทพลาสต์ของ *Dendrobium sp.*เปรียบเทียบกับโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 14 $kV.m^{-1}$ ค่าสภาพ	90
7.9	ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์เม็ดเลือดแดงได้จากการทดลองแบบ 4 ขั้วโดยใช้ค่าตัวแปรตาม Jan Gimsa (1998)ใช้เซลล์ขนาดเส้นผ่านย์กลาง 7 μm	91
7.10	ความเร็วของการหมุนของเซลล์เม็ดเลือดแดง ที่ค่าความถี่ต่างๆ จากการทดลองแบบ 4 ขั้ว สภาพนำไฟฟ้า20.7 $mS.m^{-1}$ เซลล์ขนาด 3.5 μm	91
7.11	ความเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ของใบ *Lilium longiflorum*ที่ สภาพนำไฟฟ้า 16.0 $mS.m^{-1}$	92
7.12	อัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ของ *Lilium longiflorum* เมื่อกำหนดให้ค่าความคงที่ แล้วเปลี่ยนค่าความเข้มสนามไฟฟ้า	92
7.13	อัตราเร็วการหมุนของเซลล์เม็ดเลือดแดงที่สภาพนำไฟฟ้า 20.7 $mS.m^{-1}$ เมื่อค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็น 18 $kV.m^{-1}$ และ 22 $kV.m^{-1}$	93
7.14	แสดงตัวอย่างความเร็วของการหมุนของโพรโทพลาสต์ของ *Lilium longiflorum* ที่ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็น 12.06 $kV.m^{-1}$ เมื่อสภาพนำไฟฟ้าเป็น 0.016 $S.m^{-1}$ และ 0.0207 $S.m^{-1}$	94
7.15	อัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ *Lilium longiflorum* โพรโทพลาสต์ของใบสับปะรด และเซลล์เม็ดเลือดแดง ที่ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็น 22 $kV.m^{-1}$	95

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ		หน้า
1.1	สภาพยอมทางไฟฟ้า และค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ค่าความถี่ต่างกัน	5
1.2	ลักษณะของเส้นแรงสนามไฟฟ้าที่ผ่านเข้าสู่เซลล์ในช่วงความถี่ที่ต่างกัน	6
1.3	เซลล์ของสิ่งมีชีวิตที่มีเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นเดียวสามารถจำลองไว้ลักษณะของตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน	8
1.4	แบบจำลองของเซลล์เมื่อจำลองไว้ในลักษณะของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุตามแบบของ Gimsa และ Wacher (1998) โดย ψ คือศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตามส่วนต่างๆ M คือ เยื่อหุ้มเซลล์ C คือ ไซโตพลาสซึม	8
2.1	แบบจำลองเซลล์ที่เป็นแบบ Spherical single shell model	14
2.2	ก) ลักษณะการกระจายของไอออนที่กระจายกันอยู่ทั่วไปภายในเซลล์ก่อนการโพลาไรซ์ ข) หลังจากถูกเหนี่ยวนำไอออนที่กระจายกันอยู่ภายใน จะเกิดการแยกจากกันระหว่างไอออนบวก และไอออนลบ	16
2.3	หลักการหมุนของเซลล์เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า ก) ลักษณะและทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว ข) ไดโพลที่เกิดจากการโพลาไรซ์ เมื่อเกิดอันตรกิริยากับ สนามไฟฟ้าจะเกิดการหมุน	18
2.4	ลักษณะของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในการทดลองเหนี่ยวนำแบบ 2 ขั้วซึ่งเป็นสัญญาณแบบคลื่นไซน์ (Sine wave)	19
2.5	การจัดวางเซลล์สำหรับการทดลองเหนี่ยวนำแบบ 2 ขั้ว รวมทั้งลักษณะของไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในเซลล์ทั้งสอง	21
2.6	ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าที่หมุนอย่างต่อเนื่อง	22
2.7	ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา เมื่อพิจารณาอย่างต่อเนื่องจะเห็นว่าสนามไฟฟ้าเกิดการหมุน	23
2.8	ก) ภาพขณะทดลองเหนี่ยวนำแบบ 4 ขั้ว แสดงให้เห็นว่าจุดที่วางเซลล์จะต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ ข) การคำนวณสนามไฟฟ้า	24
3.1	ชุดอุปกรณ์การทดลองการเหนี่ยวนำเซลล์ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ	29

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
3.2	การเตรียมขั้วไฟฟ้าแบบ 2 ขั้วจากลวดนิกเกิลอัลลอยด์	33
3.3	แผนภาพแสดงการจัดอุปกรณ์สำหรับการทดลองเหนี่ยวนำแบบ 2 ขั้ว	34
3.4	การจัดเรียงตัวของโพรโทพลาสต์ขณะทดลองเหนี่ยวนำแบบ 2 ขั้ว	35
3.5	ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้า ก และ ข ลักษณะและขนาดของแผ่นพลาสติกที่ใช้เป็นฐานและตรึงขั้วไฟฟ้า ค และ ง นำลวดนิกเกิลอัลลอยด์ที่เตรียมไว้ติดลงไปบนฐานที่เตรียมไว้	36
3.6	ไดอะแกรมแสดงอุปกรณ์การทดลองการเหนี่ยวนำแบบ 4 ขั้ว	37
4.1	มุมระหว่างโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum*ทั้งสองจะเปลี่ยนไปเมื่อค่าความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำเปลี่ยน	42
4.2	ความถี่ต่างกันมุมที่โพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* ทั้งสองทำกับขั้วไฟฟ้าหรือสนามไฟฟ้าจะต่างกัน และถ้าหากมุมที่โพรโทพลาสต์ทำกับขั้วไฟฟ้ามีค่า 45^0 จะเป็นมุมที่ทำให้โพรโทพลาสต์หมุนได้เร็วที่สุดโดย $\sigma_S = 3.7$ mS.m^{-1} E= 4.2 kV.m^{-1}	43
4.3	กราฟความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงมุมของการหมุนของโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* กับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำทดลองที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 14 kV.m^{-1} เปรียบเทียบกับอัตราเร็วการหมุนที่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 12 kV.m^{-1}	44
4.4	อัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* เมื่อกำหนดให้ความถี่คงที่ สี่ค่าคือ 10 kHz 20 kHz 24 kHz และ 30 kHz	44
4.5	กราฟความสัมพันธ์ของอัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ ของใบลิลลี่กับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำทดลองที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 14 kV.m^{-1}	45
4.6	กราฟอัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ของกล้วยไม้สกุลหวานกับของลิลลี่เมื่อเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้า 14 kV.m^{-1} สภาพนำไฟฟ้าของสารละลาย	46

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
4.7	กราฟแสดงการประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์ *Dendrobrium sp.* และ โพรโทพลาสต์*Lilium longiflorum*	46
4.8	วงจรแสดงการทำงานของ PSU เริ่มจากรับสัญญาณแบบคลื่นสี่เหลี่ยมมาจาก Function generator หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกแยกออกเป็น 4 ช่องที่มีเฟสต่างกัน 90^0 และใช้ส่วนขยายสัญญาณช่วยปรับค่าความต่างศักย์	49
4.9	อุปกรณ์ PSU ที่สร้างเสร็จเรียวร้อยประกอบด้วยช่องสำหรับรับสัญญาณเข้า 1 ช่อง ช่องจ่ายสัญญาณ 4 ช่อง พร้อมทั้งปุ่มปรับค่าความต่างศักย์	50
4.10	กราฟแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จาก PSU ที่ค่าความถี่ต่างๆ	50
4.11	ภาพสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับจาก PSU	51
4.12	อัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ของ *Lillium longiflorum* sp.ที่ค่าความถี่ 10kHz – 1MHz	52
4.13	อัตราเร็วสูงสุดการหมุนของโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* sp. จะอยู่ที่ความถี่เดิมแต่ค่าอัตราเร็วจะมากขึ้นเมื่อสนามมากขึ้น	53
4.14	a)อัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ของ *Lillium longiflorum* sp. เปรียบระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลาย 0.016 $S.m^{-1}$ กับ 0.0207 $S.m^{-1}$ ส่วนภาพ b) เป็นของเซลล์เม็ดเลือดแดง	54
4.15	อัตราเร็วการหมุนของโพรโทพลาสต์ *Lillium longiflorum* sp. โพรโทพลาสต์สับปะรด และเซลล์เม็ดเลือดแดง เทียบกับค่าลอกการิทึมของความถี่ที่ใช้เหนี่ยวนำ	55
4.16	แสดงอัตราเร็วการหมุนของเซลล์เม็ดเลือดแดง เมื่อ δ = 8 nm, ε_C= $80\varepsilon_0$, ε_m= $8.50\varepsilon_0$, σ_C=0.53 $S.m^{-1}$, σ_m=1 $\mu S.m^{-1}$ โดยใช้ค่าคงที่ K=1/75, K=1/75, K=1/75	57
4.17	เปรียบเทียบผลจากการทดลองกับทฤษฎีของเซลล์ทั้ง 3 ชนิดโดยให้ค่า K คือ 1/80	58

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
5.1	ก) ความต่างเฟสระหว่างสนามไฟฟ้ากับไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 180^0 จึงทำให้ทิศการหมุนของไดโพลตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า ข) ความต่างเฟสระหว่างสนามไฟฟ้ากับไดโพลโมเมนต์มีค่าอยู่ระหว่าง 180^0- 360^0 จึงทำให้ไดโพลโมเมนต์หมุนไปทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า	64
6.1	ก) หลอดบรรจุสารละลายซูโครส 0.7 M และมีเอนไซม์ที่ย่อยโพรโทพลาสต์ ใส่ไว้ส่วนบนโดยไม่ให้ละลายปนกัน ข) หลังจากเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง โพรโทพลาสต์จะถูกแรงเหวี่ยงให้ไปรวมกันอยู่ที่ระหว่างรอยต่อการสารละลายซูโครสกับเอนไซม์ ส่วนเศษเซลล์ซึ่งจะมีความหนาแน่นมากกว่าโพรโทพลาสต์จะถูกเหวี่ยงไปกองอยู่ที่ก้นหลอด	79
6.2	ลักษณะของสไลด์นับเซลล์ ส่วนภาพ ข) เป็นภาพขยายของช่องเล็กทั้ง 25 ช่องของกริดที่อยู่ตรงกลาง และแสดงเซลล์ที่ต้องนับและไม่นับเมื่อตำแหน่งของเซลล์อยู่ตรงเส้นของพอดี	80
6.3	อุปกรณ์สำหรับวัดค่าความหนืด	81