# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| สารบัญ | (7) |
| รายการตาราง | (9) |
| รายการภาพประกอบ | (10) |
| สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ | (12) |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ | 1 |
| 1.1 บทนำต้นเรื่อง | 1 |
| 1.2 การตรวจเอกสาร | 3 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ | 14 |
| 2. ทฤษฎี | 15 |
| 2.1 การเกิดโพลาไรซ์เซชัน และ ไดโพลโมเมนต์ของเซลล์เดี่ยวในสนามไฟฟ้า | 15 |
| 2.2 การหมุนเซลล์ในสนามไฟฟ้า 4 ขั้ว | 17 |
| 2.3 การประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์ทรงกลมเปลือกชั้นเดียว | 19 |
| 2.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( Regression Coefficient ) | 22 |
| 2.5 สนามไฟฟ้าจาก 4 ขั้วไฟฟ้า | 23 |
| 2.6 การคำนวณขนาดสนามไฟฟ้า | 26 |
| 3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ | 29 |
| 3.1 วัสดุ | 29 |
| 3.2 อุปกรณ์ | 30 |
| 3.3 วิธีการวิจัย | 32 |
| 4. ผลการทดลองและอภิปรายผล | 44 |
| 4.1 อุปกรณ์แยกสัญญาณไฟฟ้า | 44 |
| 4.2 การเพาะเลี้ยงเซลล์แพลงก์ตอน *Tetraselmis* sp. | 46 |
| 4.3 การหมุนของเซลล์ แพลงก์ตอน *Tetraselmis* sp. ในสนามไฟฟ้า | 47 |
| 4.4 ผลของสารหนูต่อการหมุนของเซลล์ | 59 |
| 4.5 ทดสอบการมีชีวิตของเซลล์ *Tetraselmis* sp. | 63 |

# สารบัญ (ต่อ)


| | หน้า |
|---|---|
| 4.6 ผลของการผันแปรพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์ต่ออัตราการหมุน | 66 |
| 4.7 ประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์แพลงก์ตอน *Tetraselmis* sp. | 69 |
| 5. บทสรุป | 78 |
| 5.1 สรุป | 78 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 79 |
| เอกสารอ้างอิง | 80 |
| ภาคผนวก | 85 |
| ประวัติผู้เขียน | 125 |

# รายการตาราง


| ตาราง | หน้า |
|---|---|
| 4.1 แสดงค่า $R_1$ , $fc_1$, $fc_0$, $R_2$ และ $fc_2$ ของเซลล์ ที่สนามไฟฟ้าขนาดต่างๆ | 50 |
| 4.2 แสดงค่า $R_1$ , $fc_1$, $fc_0$, $R_2$ และ $fc_2$ ของเซลล์มีชีวิตโดยผันแปรค่า $\sigma_s$ ต่างๆ | 55 |
| 4.3 แสดงค่า $R_1$ , $fc_1$, $fc_0$, $R_2$ และ $fc_2$ ของเซลล์ตายโดยผันแปรค่า $\sigma_s$ ต่างๆ | 58 |
| 4.4 แสดงค่า $R_1$ , $fc_1$, $fc_0$, $R_2$ และ $fc_2$ ของเซลล์ที่เปื้อนสารหนูความเข้มต่างๆ | 63 |
| 4.5 ค่าคงที่ทางไฟฟ้าที่น่าจะเป็นของเซลล์ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ เปรียบเทียบกับเซลล์ชนิดอื่นๆ | 75 |
| 5.1 สรุปค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์แพลงก์ตอน *Tetraselmis* sp. | 78 |

# รายการภาพประกอบ


| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|---|
| 1.1 โครงสร้างเซลล์พืชและเยื่อหุ้มเซลล์ | 2 |
| 1.2 ค่าสภาพยอมและนำทางไฟฟ้าที่ค่าความถี่ของสนามไฟฟ้าต่างๆ | 4 |
| 1.3 วิธีหมุนเชิงไฟฟ้าแบบใช้สองขั้วไฟฟ้า | 5 |
| 1.4 แบบจำลองของเซลล์ทรงกลมเปลือกชั้นเดียว | 6 |
| 1.5 กราฟอัตราหมุนของเซลล์กับความถี่ของสนามไฟฟ้า | 7 |
| 1.6 ผลของค่าคงที่ทางไฟฟ้าต่ออัตราหมุนของเซลล์ | 8 |
| 1.7 แบบจำลองเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือกเซลล์ 3 ชั้น | 10 |
| 1.8 สัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆซึ่งได้จากขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ขั้วของ PSU1 | 13 |
| 1.9 ความต่างศักย์ไฟฟ้าเอาท์พุทที่ได้จาก PSU 1 ที่ความถี่ต่างๆ | 14 |
| 2.1 แสดงการจัดเรียงตัวของอนุภาค หรือสารประกอบที่มีประจุที่กระจายในเซลล์ก่อนการเหนี่ยวนำ | 15 |
| 2.2 แสดงเวคเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของเซลล์ ในสนามไฟฟ้าที่หมุนตามเวลา ในขั้วไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว | 17 |
| 2.3 ไดอะแกรมการประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์ | 19 |
| 2.4 แบบจำลองของเซลล์ทรงกลมเปลือกชั้นเดียว | 20 |
| 2.5 กราฟอัตราหมุนของเซลล์กับความถี่ของสนามไฟฟ้า | 21 |
| 2.6 ลักษณะสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ | 23 |
| 2.7 สนามไฟฟ้ารวมระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ ที่ช่วงสัญญาณต่างๆ | 25 |
| 2.8 ทิศของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบระนาบ 2 ขั้ว | 26 |
| 2.9 แสดงทิศของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ | 27 |
| 3.1 การจัดชุดอุปกรณ์สำหรับการเพาะเลี้ยง | 31 |
| 3.2 วงจรไฟฟ้าของ PSU 2 | 34 |
| 3.3 ลักษณะเครื่อง PSU2 และไดอะแกรมการแยกสัญญาณ | 35 |
| 3.4 ขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้า | 36 |

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)


| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|---|
| 3.5 ลักษณะแพลงก์ตอน *Tetraselmis* sp | 37 |
| 3.6 ไดอะแกรมการจัดวางอุปกรณ์ทดลอง | 39 |
| 3.7 แสดงการทำงานของโปรแกรม Cell RPM V.2 | 41 |
| 3.8 โปรแกรม Exel กำลังประมาณค่าคงที่ของเซลล์ | 43 |
| 4.1 สัญญาณไฟฟ้าเอาท์พุทของ PSU2 ที่ความถี่ต่างๆ | 45 |
| 4.2 ค่า $V_{rms}$ เอาท์พุทของ PSU2 เทียบกับความถี่สัญญาณไฟฟ้า | 46 |
| 4.3 การเพิ่มจำนวนของแพลงก์ตอน *Tetraselmis* sp. | 46 |
| 4.4 เปรียบเทียบอัตราหมุนของเซลล์แพลงก์ตอน *Tetraselmis* sp. โดยผันแปรความเข้มสนามไฟฟ้าเฉลี่ยจาก 5 การทดลอง | 50 |
| 4.5 การหมุนของเซลล์แพลงก์ตอนกับสนามไฟฟ้ากำลังสองเฉลี่ยจาก 5 การทดลอง | 51 |
| 4.6 เปรียบเทียบอัตราหมุนของเซลล์แพลงก์ตอน *Tetraselmis* sp.มีชีวิตโดยเปลี่ยนค่า $\sigma_s$ เฉลี่ยจาก 5 การทดลอง | 55 |
| 4.7 เปรียบเทียบ อัตราหมุนของเซลล์แพลงก์ตอน*Tetraselmis* sp. เซลล์ตายโดยเปลี่ยนค่า $\sigma_s$ เฉลี่ยจาก 5 การทดลอง | 58 |
| 4.8 เปรียบเทียบการหมุนของเซลล์แพลงก์ตอน *Tetraselmis* sp. ระหว่างชุด control และชุดที่ปนเปื้อนสารหนูในระดับต่างๆเฉลี่ยจาก 5 การทดลอง | 62 |
| 4.9 การตรวจสอบการมีชีวิต โดยใช้สีย้อม ของเซลล์ชนิดต่างๆ | 64 |
| 4.10 เปรียบเทียบการเพิ่มจำนวนของแพลงก์ตอน *Tetraselmis* sp. ที่มีชีวิต และไม่มีชีวิต | 65 |
| 4.11 การเพิ่มความหนาแน่นของแพลงก์ตอน *Tetraselmis* sp. ที่การปนเปื้อนสารหนูระดับความเข้มต่างๆ | 66 |
| 4.12 ผลของการเปลี่ยนค่าคงที่ทางไฟฟ้ากับอัตราหมุนของเซลล์ในเชิงทฤษฎี | 69 |
| 4.13 แสดงเส้นกราฟที่ได้จากการคำนวณเชิงทฤษฎี กับผลการทดลอง | 74 |

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

| | |
|---|---|
| $\sigma_c$, $G_i$, $\sigma_i$ | สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม |
| $G_e$ $\sigma_s$ | สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์ |
| $\sigma_m$ | สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ |
| $\sigma_{TM}$ | สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มแวคิวโอล |
| $\varepsilon_c$ , $\varepsilon_c^*$ | สภาพยอมทางไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม |
| $\varepsilon_m$, $\varepsilon_m^*$ | สภาพยอมทางไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ |
| $\varepsilon_i^*$ | สภาพยอมทางไฟฟ้าของสารละลายภายในแวคิวโอล |
| $\varepsilon_o^*$, $\varepsilon_s$ | สภาพยอมทางไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์ |
| $\varepsilon_0$ | สภาพยอมทางไฟฟ้าในสุญญากาศมีค่า $8.85 \times 10^{-12}$ $F.m^{-1}$ |
| $C_m$ | ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของเยื่อหุ้มเซลล์ |
| $G_m$ | ค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะของเยื่อหุ้มเซลล์ |
| $C_{TM}$ | ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของเยื่อหุ้มแวคิวโอล |
| r | รัศมีเซลล์ |
| $\delta$ | ความหนาเยื่อหุ้มเซลล์ |
| $R_1$ | อัตราหมุนสูงสุดอันดับหนึ่ง |
| $R_2$ | อัตราหมุนสูงสุดอันดับสอง |
| $fc_1$ | ความถี่เฉพาะอันดับหนึ่ง |
| $fc_2$ | ความถี่เฉพาะอันดับสอง |
| $fc_0$ | ความถี่เฉพาะที่อัตราหมุนของเซลล์เป็นศูนย์ |
| $\vec{p}$ | ไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำ |
| $\vec{\mu}(\omega)$ | ไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำรวม |
| $V$ | ปริมาตรของเซลล์ |
| $\vec{P}(\omega)$ | ค่าโพลาไรซ์เซชัน |
| $\vec{E}$ | สนามไฟฟ้า |
| $f(\omega)$ | ฟังก์ชันที่ขึ้นกับความถี่เชิงซ้อนของสนามไฟฟ้า |
| $\phi$ | มุมเฟสระหว่างไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำรวมกับสนามไฟฟ้า |
| $f$ | ความถี่สนามไฟฟ้า |

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

| | |
|---|---|
| $\vec{\tau}$ | ทอร์กระหว่างไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำรวมกับสนามไฟฟ้า |
| $\vec{\Omega}$ | ความเร็วเชิงมุมของเซลล์ |
| $\vec{\tau}_f$ | ทอร์กที่เกิดจากแรงหนืด |
| $\eta$ | ความหนืดของสารละลาย |
| $\rho$ | ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย |
| $\Omega_{est}(\omega_i)$ | อัตราหมุนของเซลล์ที่ถูกเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้าที่ได้จากการประมาณค่า |
| $\Omega_{exp}(\omega_i)$ | อัตราหมุนของเซลล์ที่ถูกเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง |
| L | ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า |
| RPM | จำนวนรอบที่เซลล์หมุน ภายใน 1 นาที |
| SPR | เวลาที่เซลล์หมุนรอบตัวเอง 1 รอบ |