

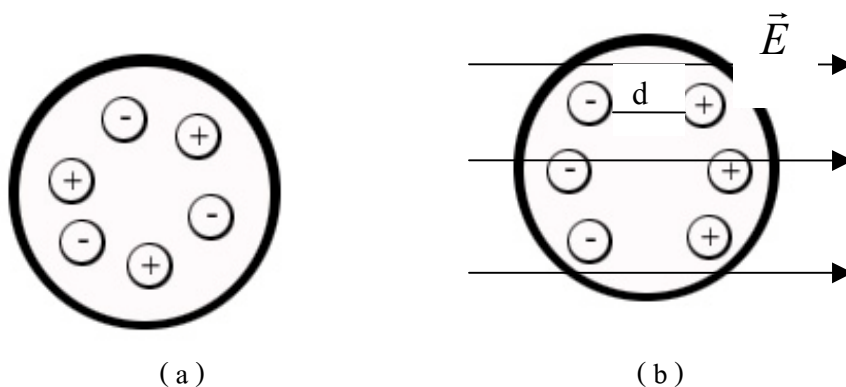
บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้ จะอธิบายสาเหตุการหมุนเชิงไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวในสนามไฟฟ้า AC โดยใช้ 4 ขั้วไฟฟ้า และสมการที่เกี่ยวข้องสำหรับการประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์ ดังต่อไปนี้

2.1 การเกิดโพลาริเซชัน และ ไดโพลโมเมนต์ของเซลล์เดี่ยวในสนามไฟฟ้า

เซลล์เดี่ยวมีโมเลกุลของสารประกอบต่างๆทั้งที่มีขั้วและไม่มีขั้วอยู่ใน และถูกห่อหุ้มด้วยเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งประกอบด้วย ไขมัน โปรตีน และอื่นๆ เมื่อแขวนลอยเซลล์ในสารละลายที่มีสภาพการนำไฟฟ้าต่ำ แล้วเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ความถี่สนามไฟฟ้าและความถี่ที่เหมาะสม ก่อให้เกิดไดโพลชั่วครว ดังภาพประกอบ 2.1 โดยขั้วบวกและลบภายในเซลล์เรียงกันอย่างมีระเบียบ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า โพลาริเซชันของเซลล์



ภาพประกอบ 2.1 แสดงการจัดเรียงตัวของอนุภาคหรือสารประกอบที่มีประจุที่กระจายในเซลล์ ก่อนการเหนี่ยวนำ (a) และหลังจากถูกเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้า (b)

ประจุบวกและประจุลบ 1 คู่ (q) ที่ถูกแยกจะมีการกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) เป็นระยะ d มีค่าไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำ $\vec{p} = q\vec{d}$ แทนไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำรวมของประจุแต่ละคู่ภายในเซลล์ด้วยสัญลักษณ์ $\vec{\mu}(\omega)$ ซึ่งแปรผันโดยตรงกับปริมาตรของเซลล์ (V) และค่าโพลาไรซ์เซชัน $\vec{P}(\omega)$ คือ

$$\vec{\mu}(\omega) = V\vec{P}(\omega) \quad (2.1)$$

Mahaworasilpa และคณะ (1994) เสนอค่า $\vec{\mu}(\omega)$ ของเซลล์ทรงกลมสัมพัทธ์กับค่าคงที่ต่างๆ ดังนี้

$$\vec{\mu}(\omega) = 4\pi\epsilon_s r^3 f(\omega)\vec{E} \quad (2.2)$$

เมื่อ r คือ รัศมีเซลล์
 ϵ_s คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของสารละลาย
 \vec{E} คือ สนามไฟฟ้า
 $f(\omega)$ คือ ฟังก์ชันที่ขึ้นกับความถี่เชิงซ้อนของสนามไฟฟ้า

Glaser and Fuhr (1987) และ Gimsa และ คณะ (1988) เสนอค่า $f(\omega)$ สำหรับขั้วไฟฟ้าแบบ 4 ขั้วที่สัมพันธ์กับค่าคงที่ทางไฟฟ้าต่างๆภายในเซลล์ดังนี้

$$f(\omega) = \frac{\omega^2 \epsilon_0^2 A_1 + j\omega \epsilon_0 B_1 + C_1}{\omega^2 \epsilon_0^2 A_2 + j\omega \epsilon_0 B_2 + C_2} \quad (2.3)$$

โดยค่า $j = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$ และค่า A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 และ C_2 หาค่าได้ดังนี้

$$A_1 = \epsilon_s \epsilon_c / r + C_m (\epsilon_s - \epsilon_c) / \epsilon_0 \quad (2.4)$$

$$A_2 = -2\epsilon_s \epsilon_c / r - C_m (2\epsilon_s + \epsilon_c) / \epsilon_0 \quad (2.5)$$

$$B_1 = C_m (\sigma_c - \sigma_s) / \epsilon_0 \quad (2.6)$$

$$B_2 = C_m (\sigma_c + 2\sigma_s) / \epsilon_0 \quad (2.7)$$

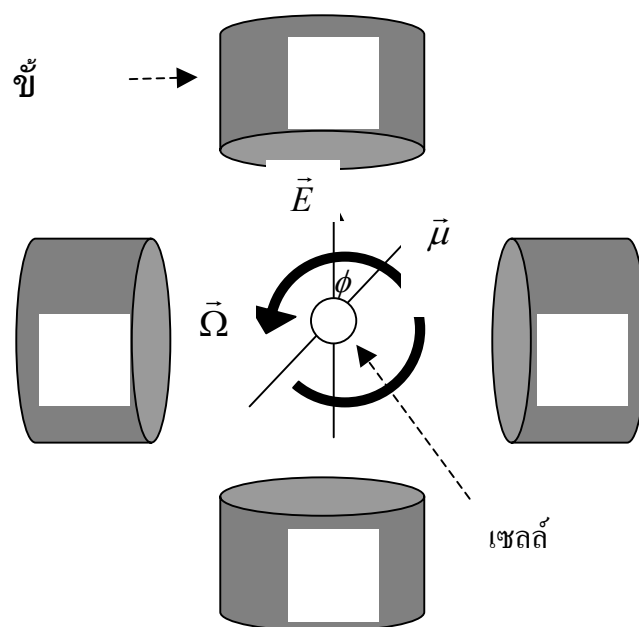
$$C_1 = G_m (\sigma_c - \sigma_s) - \sigma_c \sigma_s / r \quad (2.8)$$

$$C_2 = G_m(\sigma_i + 2\sigma_s) + 2\sigma_c\sigma_s / r \quad (2.9)$$

2.2 การหมุนเซลล์ในสนามไฟฟ้า 4 ขั้ว

เมื่อวางเซลล์ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับเอกรูป (uniform alternating electric field) ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เซลล์จะเกิดไดโพลโมเมนต์รวมขึ้นดังที่กล่าวข้างต้น โดยทิศของไดโพลโมเมนต์รวมนั้นมีทิศไม่ขนานกับสนามไฟฟ้าภายนอก (\vec{E}) เนื่องจากภายในเซลล์มีไดอิเล็กทริกที่ไม่ใช่เนื้อเดียว ไดโพลโมเมนต์จึงไม่ได้เกิดขึ้นทันทีทันใดขณะถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าภายนอก ไดโพลโมเมนต์และสนามไฟฟ้าภายนอกจึงทำมุมเฟส (ϕ) ต่อกันดังภาพประกอบ 2.2 ผลคูณแบบครอส (cross product) ของไดโพลโมเมนต์รวมและสนามไฟฟ้าภายนอกทำให้เกิดทอร์ก ($\vec{\tau}$) ดังสมการ 2.10 กระทำต่อเซลล์ส่งผลให้เซลล์เกิดการหมุนขึ้น โดยให้ความเร็วเชิงมุมของเซลล์ มีสัญลักษณ์ $\vec{\Omega}$

$$\vec{\tau} = \vec{\mu}(\omega) \times \vec{E} \quad (2.10)$$



ภาพประกอบ 2.2 แสดงเวกเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของเซลล์ ในสนามไฟฟ้า

ที่หมุนตามเวลาในขั้วไฟฟ้าแบบ 4 ขั้ว

เนื่องด้วยเซลล์ถูกเหนี่ยวนำด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นไดโพลโมเมนต์จึงอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับด้วย ไดโพลโมเมนต์จะมีทั้งส่วนจริง ($\text{Re}[f(\omega)]$) และส่วนจินตภาพ ($\text{Im}[f(\omega)]$) ซึ่งการหมุนของเซลล์นั้นจะสอดคล้องกับส่วนจินตภาพ ในขณะที่การเคลื่อนที่ของเซลล์ในสนามไฟฟ้าจะสอดคล้องกับส่วนจริง (Schwan, 1988) ดังนั้นการศึกษาการหมุนของเซลล์จึงใช้ส่วนจินตภาพเท่านั้น ดังนั้นจากสมการ 2.2 และ 2.10 จะได้

$$\vec{\tau} = 4\pi\epsilon_s r^3 \text{Im}[f(\omega)]E^2 \hat{a}_n \quad (2.11)$$

เมื่อ \hat{a}_n คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศตั้งฉากกับระนาบ $\vec{\mu}(\omega)$ และ \vec{E}

การหมุนของเซลล์จะมีการหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาขึ้นอยู่กับเวลาเคลื่อนตัวของเซลล์ หากเวลาเคลื่อนตัวของเซลล์เร็วจนทำให้ $\vec{\mu}$ นำ \vec{E} เป็นมุม $\phi = 0$ ถึง π การหมุนของเซลล์จะมีทิศทวนเข็มนาฬิกา และหากเวลาเคลื่อนตัวของเซลล์ช้าจนทำให้ $\vec{\mu}$ ตามหลัง \vec{E} เป็นมุม $\phi = 0$ ถึง π การหมุนของเซลล์จะมีทิศตามเข็มนาฬิกา (Arnold and Zimmermann, 1988)

การหมุนของเซลล์ในสนามไฟฟ้าซึ่งแวนลอยในสารละลายที่มีความหนืด(η) จะมีทอร์กที่เกิดจากแรงหนืด ($\vec{\tau}_f$) เพื่อด้านการหมุนของเซลล์ ซึ่ง Glaser และ Fuhr (1987) ได้เสนอคือ

$$\vec{\tau}_f = -8\pi\eta\Omega r^3 \hat{a}_n \quad (2.12)$$

ที่ภาวะสมดุลการหมุน $\vec{\tau}_f = \vec{\tau}$

$$\text{หรือ} \quad |\vec{\tau}_f| = |\vec{\tau}| \quad (2.13)$$

แทนค่าสมการ 2.11 และ 2.12 ในสมการ 2.13 จะได้

$$8\pi\eta\Omega r^3 = 4\pi\epsilon_s r^3 \text{Im}[f(\omega)]E^2$$

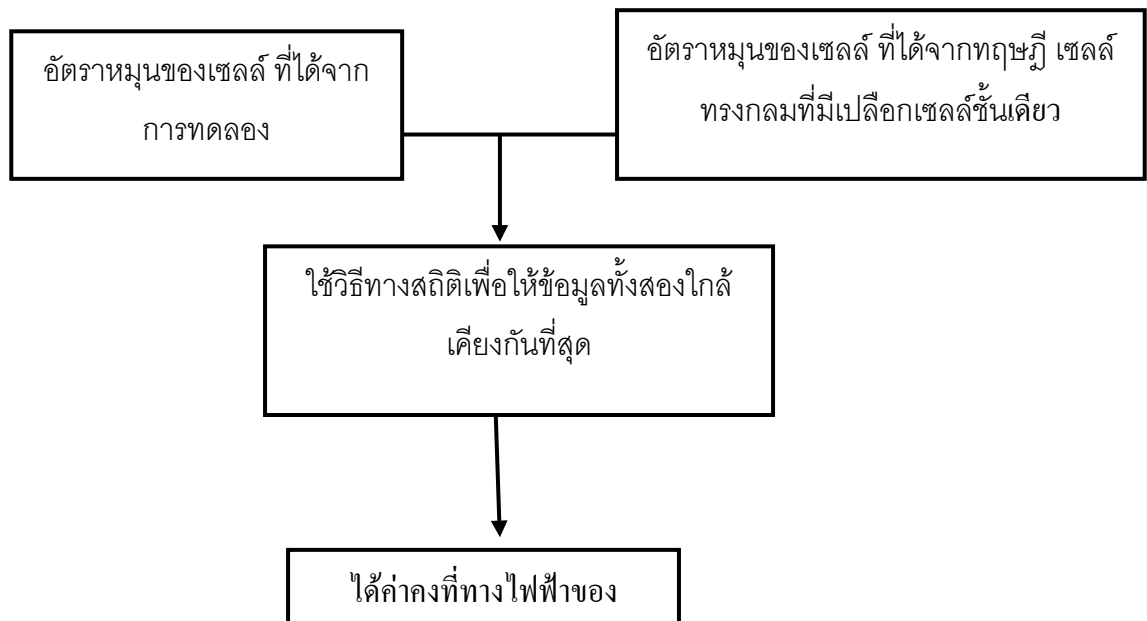
$$\Omega = \frac{4\pi\varepsilon_s r^3 \operatorname{Im}[f(\omega)]E^2}{8\pi\eta r^3}$$

$$\Omega = \frac{\varepsilon_s \operatorname{Im}[f(\omega)]E^2}{2\eta} \quad (2.14)$$

สมการ 2.14 เป็นสมการที่ใช้สำหรับหาอัตราหมุนของเซลล์แขวนลอยที่ถูกเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้าหมุน

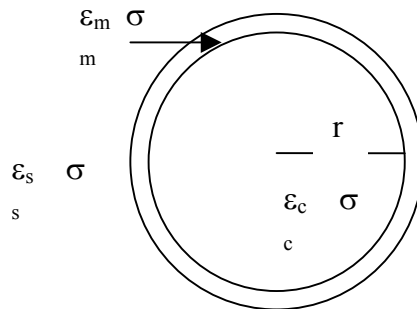
2.3 การประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์ทรงกลมเปลือกชั้นเดียว

จากสมการ 2.14 เมื่อเหนี่ยวนำเซลล์ให้หมุน ในสนามไฟฟ้าที่ผันแปรตามความถี่ จะสามารถ วัดค่า Ω ได้ เพื่อใช้ประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ใช้แบบจำลองเซลล์ทรงกลมเปลือกเซลล์ชั้นเดียว โดยใช้ วิธีทางสถิติเพื่อให้ข้อมูลที่ได้น่าเชื่อถือ ดังภาพประกอบ 2.3



ภาพประกอบ 2.3 ไคอะแกรมการประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์

นักวิจัยจำนวนหนึ่ง (Glaser and Fuhr, 1987, Gimsa *et al.* 1988) ใช้แบบจำลองเซลล์ทรงกลมเปลือกเซลล์ชั้นเดียว เพื่อหาค่าคงที่ทางไฟฟ้า ε และ σ ของเยื่อหุ้มเซลล์ และไซโทพลาสซึม ดังภาพประกอบ 2.4

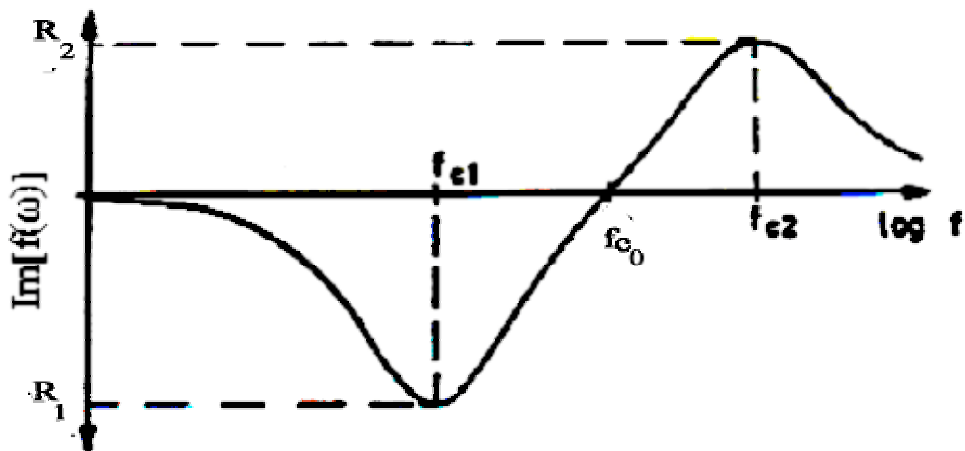


ภาพประกอบ 2.4 แบบจำลองของเซลล์ทรงกลมเปลือกชั้นเดียวรัศมี r ซึ่งประกอบด้วย สภาพยอมทางไฟฟ้า (ϵ) และสภาพนำไฟฟ้า (σ) ของไซโทพลาสซึม (c) สารละลายภายนอก (s) เยื่อหุ้มเซลล์ (m)

Gimsa และคณะ (1988,1991,1995) ได้ทดลองกับ 4 ขั้วไฟฟ้าแล้วเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Im}[f(\omega)]$ กับค่าคงที่ที่สังเกตได้จากการทดลอง ดังนี้

$$\text{Im}[f(\omega)] = \left(\frac{2R_1 f / f_{c1}}{1 + (f / f_{c1})^2} + \frac{2R_2 f / f_{c2}}{1 + (f / f_{c2})^2} \right) \quad (2.15)$$

ค่า $\text{Im}[f(\omega)]$ มีความสัมพันธ์กับการหมุนของเซลล์ ดังภาพประกอบ 2.6 เมื่อเพิ่มความถี่ของสนามไฟฟ้าจากต่ำไปสูง เซลล์มีทิศการหมุนทวนเข็มนาฬิกา อัตราหมุนของเซลล์จะเพิ่มขึ้นจนสูงสุดที่ R_1 (อัตราหมุนสูงสุดอันดับหนึ่ง) ที่ความถี่ f_{c1} (ความถี่เฉพาะอันดับหนึ่ง) และจะค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งหยุดนิ่ง ที่จุดนี้เรียก f_{c0} (ความถี่เฉพาะที่อัตราหมุนของเซลล์เป็นศูนย์) และเซลล์จะเริ่มหมุนตามเข็มนาฬิกา และเพิ่มขึ้นจนสูงสุดเรียก R_2 (อัตราหมุนสูงสุดอันดับสอง) ที่ความถี่ f_{c2} (ความถี่เฉพาะอันดับสอง) และการหมุนจะค่อย ๆ ลดลงจนหยุดนิ่ง



ภาพประกอบ 2.5 กราฟอัตราหมุมของเซลล์กับความถี่ของสนามไฟฟ้า ซึ่งแสดง

$$f_{c1}, f_{c2}, f_{c0}, R_1 \text{ และ } R_2$$

ที่มา : Glaser และ Fuhr (1987)

เมื่อนำสมการ 2.15 แทนค่า ในสมการ 2.14 จะได้

$$\Omega = \frac{\epsilon_s E^2}{\eta} \left(R_1 \frac{f/f_{c1}}{1+(f/f_{c1})^2} + R_2 \frac{f/f_{c2}}{1+(f/f_{c2})^2} \right) \quad (2.16)$$

โดยค่า Ω คืออัตราหมุมของเซลล์ เนื่องจากเซลล์มีทิศการหมุมทวนเข็มและตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นในการประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าจึงกำหนดทิศการหมุมของเซลล์คือ หากเซลล์มีทิศการหมุมตามเข็มนาฬิกาให้อัตราหมุมของเซลล์มีค่าเป็นบวก และหากการหมุมมีทิศทวนเข็มนาฬิกา อัตราหมุมจะมีค่าเป็นลบ

ค่า $f_{c1}, f_{c2}, f_{c0}, R_1$ และ R_2 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเซลล์ดังสมการ 2.17 ถึง 2.21

$$R_1 = \frac{-1.5\sigma_c}{(\sigma_c + 2\sigma_s)[G_m r(1/\sigma_s + 2/\sigma_c) + 2]} \quad (2.17)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_c}{\varepsilon_c + 2\varepsilon_s} + \frac{\sigma_c - \sigma_s}{\sigma_c + 2\sigma_s} \right) \quad (2.18)$$

$$f_{C1} = \frac{1}{2\pi r C_m} \left(\frac{1}{1/2\sigma_s + 1/\sigma_c} + r G_m \right) \quad (2.19)$$

$$f_{C2} = (\sigma_c + 2\sigma_s) / [2\pi\varepsilon_0(\varepsilon_c + 2\varepsilon_s)] \quad (2.20)$$

$$f_{C0} = 1/2\pi \sqrt{\sigma_c / [\varepsilon_0 r C_m (\varepsilon_s / \sigma_s - 2\varepsilon_c / 3\sigma_c)]} \quad (2.21)$$

ค่า G_m และ C_m จากสมการ 2.17, 2.19 และ 2.21 คือค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะของเชื้อหุ้มเซลล์ และ ค่าความจุทางไฟฟ้าจำเพาะของเชื้อหุ้มเซลล์ตามลำดับ ซึ่งมีค่า $G_m = \frac{\sigma_m}{\delta}$ และ $C_m = \frac{\varepsilon_m}{\delta}$ โดย δ คือความหนาของเชื้อหุ้มเซลล์

2.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient)

เพื่อเปรียบเทียบกราฟเชิงทฤษฎีให้เข้ากับกราฟผลการทดลอง จึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (ดังสมการ 2.22) เป็นดัชนีบอกความเหมาะสม ซึ่งค่าที่ได้ควรมีค่าเข้าใกล้ 1

$$\rho = 1 - \frac{\sum_i (\Omega_{est}(\omega_i) - \Omega_{exp}(\omega_i))^2}{\sum_i \Omega_{exp}(\omega_i)^2} \quad (2.22)$$

ρ คือ Regression Coefficient

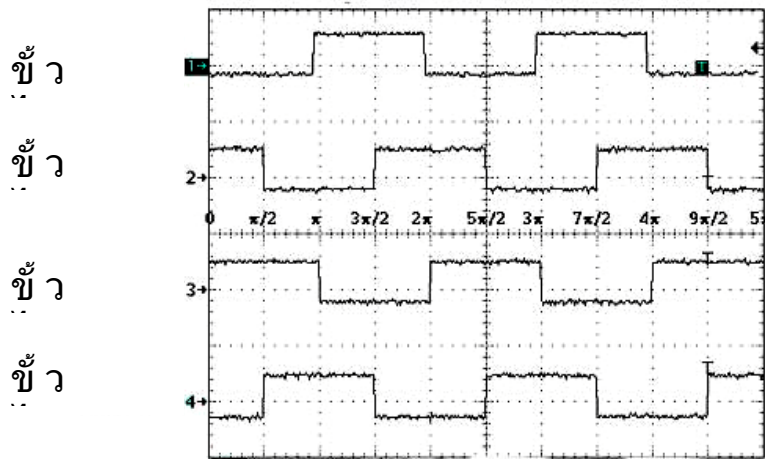
$\Omega_{est}(\omega_i)$ คือ อัตราหมุนของเซลล์ที่ถูกเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้า
ที่ได้จากการประมาณค่า

$\Omega_{exp}(\omega)$ คือ อัตราหมุนของเซลล์ที่ถูกเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้า
ที่ได้จากการทดลอง

ใช้ ค่า ρ ในบทที่ 3 ในหัวข้อ 3.3.6 เพื่อช่วยในการประมาณค่าคงที่ทางไฟฟ้าให้ถูกต้องมากขึ้น

2.5 สนามไฟฟ้าจาก 4 ขั้วไฟฟ้า

การคำนวณสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ เริ่มจากการพิจารณาสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จาก PSU2 ซึ่งเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม (square wave) จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ แต่ละขั้วมีเฟสต่างกันขั้วละ $\frac{\pi}{2}$



ภาพประกอบ 2.6 ลักษณะสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสี่

จากภาพประกอบ 2.6 เมื่อพิจารณา สัญญาณไฟฟ้าภายใน 1 คาบ ($0-2\pi$) โดยแบ่งสัญญาณออกเป็น 4 ช่วงคือ $0-\frac{\pi}{2}$, $\frac{\pi}{2}-\pi$, $\pi-\frac{3\pi}{2}$ และ $\frac{3\pi}{2}-2\pi$ สัญญาณที่ส่งให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ มีศักย์ไฟฟ้างดังนี้

ช่วง $0-\frac{\pi}{2}$

สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 1 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ

สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 2 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก

สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 3 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก

สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 4 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ

ช่วง $\frac{\pi}{2}-\pi$

สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 1 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ
 สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 2 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ
 สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 3 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก
 สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 4 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก

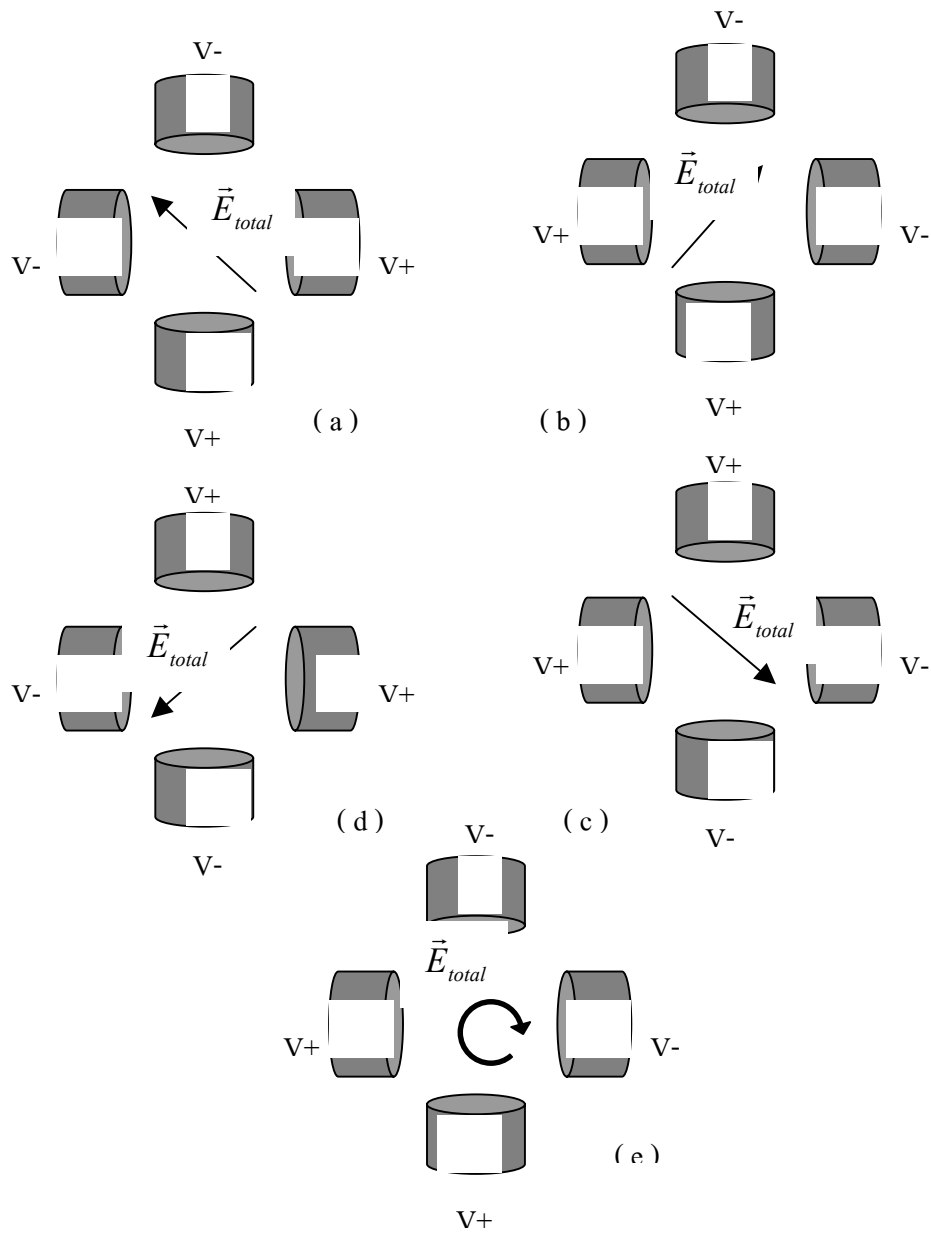
$$\text{ช่วง } \pi - \frac{3\pi}{2}$$

สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 1 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก
 สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 2 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ
 สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 3 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ
 สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 4 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก

$$\text{ช่วง } \frac{3\pi}{2} - 2\pi$$

สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 1 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก
 สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 2 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก
 สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 3 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ
 สัญญาณ ที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าที่ 4 มีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ

ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากลวดแพลตตินัม โดยมีหน้าตัดเป็นระนาบวงกลม พบว่า ศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ 1 และ 3 มีศักย์ตรงข้ามกัน เช่นเดียวกับ ขั้วไฟฟ้าที่ 2 และ 4 ดังนั้น สามารถเขียนทิศของสนามไฟฟ้ารวม (\vec{E}_{total}) ของแต่ละช่วงสัญญาณ ได้ดังภาพประกอบ 2.7

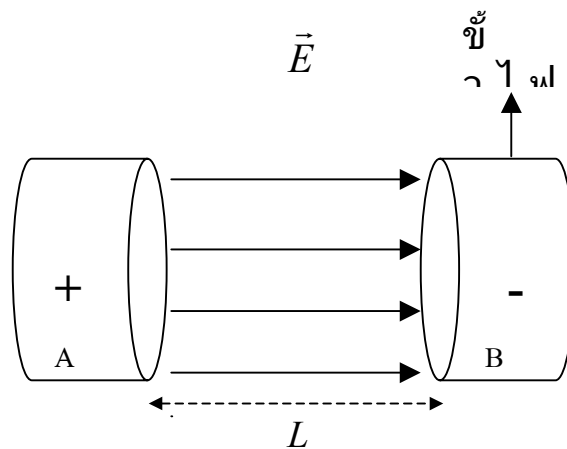


ภาพประกอบ 2.7 สนามไฟฟ้ารวมระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ ที่ช่วงสัญญาณ $0 - \frac{\pi}{2}$ (a), $\frac{\pi}{2} - \pi$ (b), $\pi - \frac{3\pi}{2}$ (c) และ $\frac{3\pi}{2} - 2\pi$ (d) เมื่อครบ 1 คาบ สนามไฟฟ้ามีทิศหมุน

ตามเข็มนาฬิกา ดังรูป e

2.6 การคำนวณขนาดของสนามไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาขั้วไฟฟ้า 1 คู่ ในภาพประกอบ 2.8 จากความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองสามารถหาได้จากสมการ 2.23



ภาพประกอบ 2.8 ทิศของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบระนาบ 2 ขั้ว

$$V_{AB} = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{L} \quad (2.23)$$

เมื่อ V_{AB} คือความต่างศักย์ระหว่างจุด A และ B , \vec{E} คือ สนามไฟฟ้าเอกรูป และ $d\vec{L}$ คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า จากสมการที่ 2.23

$$V_{AB} = -\vec{E} \cdot \int_A^B d\vec{L}$$

$$V_{AB} = -\vec{E} \cdot \vec{L}_{BA}$$

$$V_{AB} = \vec{E} \cdot \vec{L}_{AB}$$

$$V_{AB} = EL \cos \theta \quad (2.24)$$

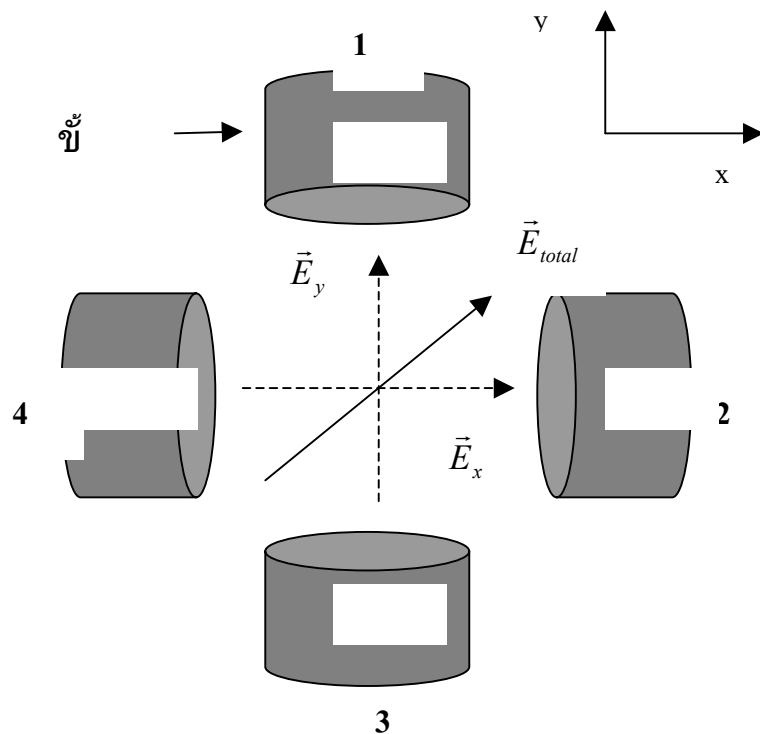
จุดทั้งสองอยู่ในแนวทิศของสนามไฟฟ้าเพราะฉะนั้น $\cos \theta = 1$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการ 2.24 ใหม่ได้คือ

$$V_{AB} = EL \quad (2.25)$$

จากสมการ 2.26 จะได้สนามไฟฟ้าคือ

$$E = \frac{V_{AB}}{L} \quad (2.26)$$

สมการ 2.26 สามารถนำไปใช้ประมาณค่าขนาดของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง และในการคำนวณสนามไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ได้ดังภาพประกอบ 2.9 ทั้งนี้ ขั้วไฟฟ้าทั้งสี่มีขนาดของศักย์ไฟฟ้าและมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากัน ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ เป็นการรวมสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 และ 3 (\vec{E}_y) และระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 และ 4 (\vec{E}_x)



ภาพประกอบ 2.9 แสดงทิศของสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งคู่

สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 และ 3 คือ

$$\vec{E}_x = \frac{V_{AB}}{L} \vec{e}_x \quad (2.27)$$

สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 และ 4 คือ

$$\vec{E}_y = \frac{V_{AB}}{L} \vec{e}_y \quad (2.28)$$

ผลรวมระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งคู่คือ

$$\begin{aligned} \vec{E}_{Total} &= \vec{E}_x + \vec{E}_y \\ \vec{E}_{Total} &= \frac{V_{AB}}{L} \vec{e}_x + \frac{V_{AB}}{L} \vec{e}_y \\ \vec{E}_{Total} &= \frac{V_{AB}}{L} (\vec{e}_x + \vec{e}_y) \end{aligned} \quad (2.29)$$

ดังนั้นขนาดของสนามไฟฟ้ารวม คือ

$$|E_{Total}| = \frac{V_{AB}}{L} \sqrt{(1)^2 e_x + (1)^2 e_y + 2e_x e_y \cos \theta}$$

สนามไฟฟ้า \vec{E}_x และ \vec{E}_y ตั้งฉากกันดังนั้น $\cos \theta = 0$ จะได้สนามไฟฟ้ารวมดังสมการ 2.30

$$E_{Total} = \sqrt{2} \left(\frac{V_{AB}}{L} \right) \quad (2.30)$$

ดังนั้น E_{Total} ตามสมการ 2.30 จึงเป็นความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการโพลาไรซ์ และการหมุนของเซลล์ที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าทั้งสอง