

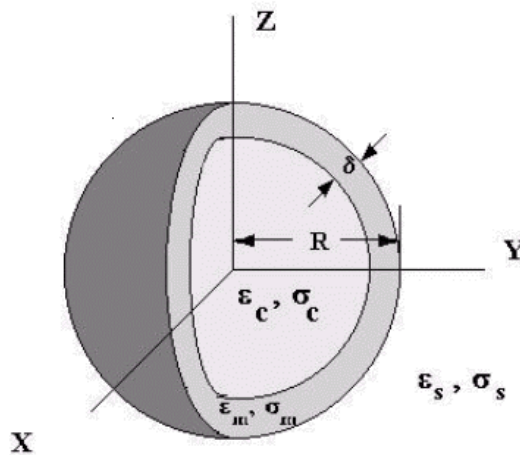
บทที่ 2

ทฤษฎี

สำหรับการทดลองการหมุนของเซลล์ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับนั้นต้องทำความเข้าใจถึงหลักการเกี่ยวกับการหมุนของเซลล์โดยมีทฤษฎีสำคัญที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 แบบจำลองเซลล์ทรงกลมเปลือกชั้นเดียว

นักวิจัยจำนวนมาก(Turco and Lucia, 1989 ; Washizu nad Janes, 1996 ; Marszalek et al,1991; Fuhr et al, 1996 ; Kurschner et al,1998) ได้จำลองโครงสร้างของเซลล์ไว้ลักษณะของทรงกลมเปลือกชั้นเดียว ซึ่งมีเยื่อหุ้มเซลล์แยกระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ดังภาพประกอบ 2.1



ภาพประกอบ 2.1 แบบจำลองของทรงกลมเปลือกชั้นเดียว(Spherical single shell model) โดยมีค่าคงที่ต่างๆคือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของไซโตพลาสซึม(ϵ_c) สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม(σ_c) สภาพยอมทางไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ (ϵ_m) สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์(σ_m) ความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์(δ) สภาพยอมทางไฟฟ้าของสารละลายภายนอก(ϵ_s) สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายภายนอก(σ_s) และรัศมีของเซลล์(R) ตามลำดับ

แบบจำลองดังกล่าวมีค่าคงที่ทางไฟฟ้าแบ่งเป็นสามส่วนได้แก่สภาพยอมทางไฟฟ้า(ϵ) และสภาพนำไฟฟ้า(σ) ของ ไซโทพลาสซึม(c) เยื่อหุ้มเซลล์ (m) และสารละลายภายนอก(s) จากค่าคง

ที่ต่างๆเหล่านี้ Wang (1994) ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างสภาพยอมทางไฟฟ้าของแต่ละส่วนกับสภาพยอมรวมของอนุภาค(ϵ_p^*) ดังนี้

$$\epsilon_p^* = \frac{\left[\frac{R}{R-\delta} \right]^3 + 2 \left[\frac{\epsilon_c^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_c^* + 2\epsilon_m^*} \right]}{\left[\frac{R}{R-\delta} \right]^3 - \left[\frac{\epsilon_c^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_c^* + 2\epsilon_m^*} \right]} \quad (1)$$

เมื่อ ϵ_c^* คือ สภาพยอมเชิงซ้อนของไซโทพลาสซึม ϵ_m^* คือ สภาพยอมเชิงซ้อนของเยื่อหุ้มเซลล์ เมื่อพิจารณาเซลล์ขณะแขวนลอยอยู่ในสารละลายค่าสภาพยอมทางไฟฟ้ายังผล (Effective complex permittivity, ϵ_{eff}^*) หาจากสมการ (2) ตาม Mahaworasilpa และคณะ (1994)

$$\epsilon_{eff}^* = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_s^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_s^*} \quad (2)$$

โดย ϵ_s^* คือ สภาพยอมเชิงซ้อนของสารละลาย ตามปกติ $\epsilon^* = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega}$ จึงเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับความถี่เมื่อแทน ϵ_{eff}^* ด้วย $f(\omega)$ จึงเขียนสมการ (2) ได้ใหม่เป็น

$$f(\omega) = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_s^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_s^*} \quad (3)$$

โดย $f(\omega)$ เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนดังนั้นสามารถเขียนได้ใหม่ดังสมการ (4) คือ

$$\begin{aligned} f(\omega) &= \text{Re}[f(\omega)] + j \text{Im}[f(\omega)] \\ &= \text{Re} \left[\frac{\epsilon_p^* - \epsilon_s^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_s^*} \right] + j \text{Im} \left[\frac{\epsilon_p^* - \epsilon_s^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_s^*} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

โดยค่า $\text{Re}[f(\omega)]$ และ $\text{Im}[f(\omega)]$ กำหนดไว้โดย Mahaworasilpa (1994) คือ

$$\text{Re}[f(\omega)] = - \left[\frac{AB + CD^2}{B^2 + D^2\omega^2} \right] \quad (5)$$

$$\text{Im}[f(\omega)] = -\omega \left[\frac{BC - AD}{B^2 + D^2\omega^2} \right] \quad (6)$$

เมื่อ A, B, C และ D มีค่าสัมพันธ์กับค่าคงที่ไฟฟ้าต่างๆดังนี้

$$\begin{aligned} A &= (2k - 1)(\sigma_c \sigma_m - \epsilon_c \epsilon_m \omega^2) + (1 - k)(\sigma_s \sigma_m - \epsilon_s \epsilon_m \omega^2) \\ &\quad + k[\sigma_s \sigma_c - 2\sigma_m^2 + \omega^2(2\epsilon_m^2 - \epsilon_s \epsilon_c)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} B &= (1 - 2k)(\sigma_c \sigma_m - \epsilon_c \epsilon_m \omega^2) + 2(1 - k)(\sigma_s \sigma_m - \epsilon_s \epsilon_m \omega^2) \\ &\quad + 2k[\sigma_s \sigma_c + \sigma_m^2 - \omega^2(\epsilon_m^2 + \epsilon_s \epsilon_c)] \end{aligned} \quad (8)$$

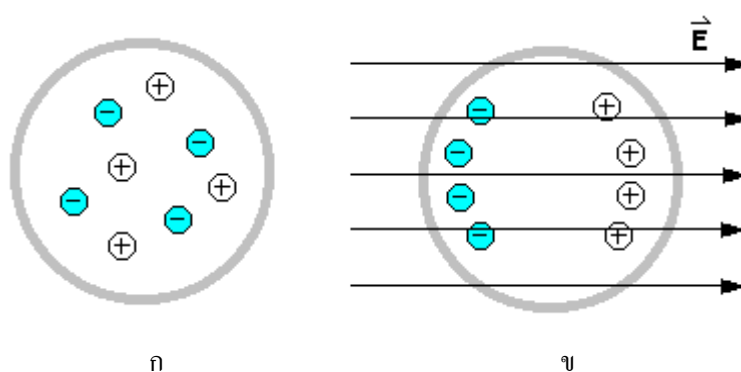
$$C = (2k - 1)(\sigma_m \varepsilon_c + \sigma_c \varepsilon_m) + (1 - k)(\sigma_m \varepsilon_s + \sigma_s \varepsilon_m) + k[\sigma_c \varepsilon_s + \sigma_s \varepsilon_c - 4\sigma_m \varepsilon_m] \quad (9)$$

$$D = (1 - 2k)(\sigma_m \varepsilon_c + \sigma_c \varepsilon_m) + 2(1 - k)(\sigma_m \varepsilon_s + \sigma_s \varepsilon_m) + 2k[\sigma_c \varepsilon_s + \sigma_s \varepsilon_c + 2\sigma_m \varepsilon_m] \quad (10)$$

กำหนดให้ k ในสมการ (7), (8), (9) และ (10) คือ $\frac{\delta}{R}$

2.2 การโพลาริซ์และไดโพลโมเมนต์ของเซลล์เดี่ยวแขวนลอยในสนามไฟฟ้า

เมื่อแขวนลอยเซลล์เดี่ยวในสารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ (σ_s) และถูกเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเซลล์จะเกิดการโพลาริซ์ ดังที่กล่าวไว้ในเรื่องสมบัติไดอิเล็กตริกของเซลล์ในบทที่ 1 โมเลกุลของสารประกอบต่างๆที่มีขั้วรวมทั้งรวมทั้งไอออนของธาตุต่างๆที่อยู่ในเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ จะเกิดอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าทำให้ประจุจัดเรียงตัวตามทิศของสนามไฟฟ้า(คือประจุที่มีค่าเป็นบวกจะพยายามเคลื่อนตัวไปยังบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนประจุที่มีค่าเป็นลบจะพยายามเคลื่อนตัวไปยังบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก)ตามภาพประกอบ 2.2 ทำให้เกิดการแยกแยะระหว่างขั้วบวกกับลบภายในเซลล์เรียกว่า เซลล์เกิดการโพลาริซ์



ภาพประกอบ 2.2 ก) ลักษณะการกระจายของประจุที่กระจายทั่วไปในเซลล์หรือวัสดุทั่วไปก่อนการโพลาริซ์
ข) หลังจากถูกเหนี่ยวนำประจุที่กระจายกันอยู่ภายในเซลล์จะจัดเรียงตัวตามทิศของสนามไฟฟ้า

การที่ประจุบวกและประจุลบที่ถูกแยกให้มีระยะห่าง d ซึ่งเรียกอีกอย่างว่าการกระจัดทางไฟฟ้า(electric displacement)จะเกิดไดโพลโมเมนต์ เหนี่ยวนำ(\vec{p}) ระหว่างประจุหนึ่งคู่โดยสมการ(11) คือ

$$\bar{p} = q\bar{d} \quad (11)$$

สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดทางไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้า (\bar{E}) ที่ใช้เหนี่ยวนำได้เป็น

$$\bar{d} = \epsilon\bar{E} \quad (12)$$

จึงได้ว่าค่าไดโพลโมเมนต์จะแปรผันตรงกับค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าด้วยเช่นกัน นั่นคือ

$$\bar{p} = q\bar{d} = q\epsilon\bar{E}$$

หรือ

$$\bar{p} = \alpha\bar{E} \quad (13)$$

ค่าคงที่ $\alpha=q\epsilon$ ในที่นี้คือค่าที่แสดงสมบัติของการโพลาไรซ์ (Particle polarizability) เซลล์แขวนลอยซึ่งหมายถึงจำนวนไดโพลต่อหน่วยปริมาตร ดังนั้นไดโพลโมเมนต์รวม ($\bar{\mu}$) ของทั้งเซลล์ต้องหาจากจำนวนไดโพลทั้งหมดของเซลล์ดังสมการ(13)

$$\bar{\mu} = N\bar{p} = N\alpha\bar{E} \quad (13)$$

เมื่อ N คือจำนวนไดโพลภายในเซลล์ และให้ $N\alpha = P$ เมื่อ P คือค่าสมบัตินิการโพลาไรซ์ของทั้งเซลล์ โดย $P = 4\pi\epsilon R^3$ (Gimsa et al,1991)

$$\text{จะได้ว่า } \bar{\mu} = 4\pi R^3\epsilon\bar{E} \quad (14)$$

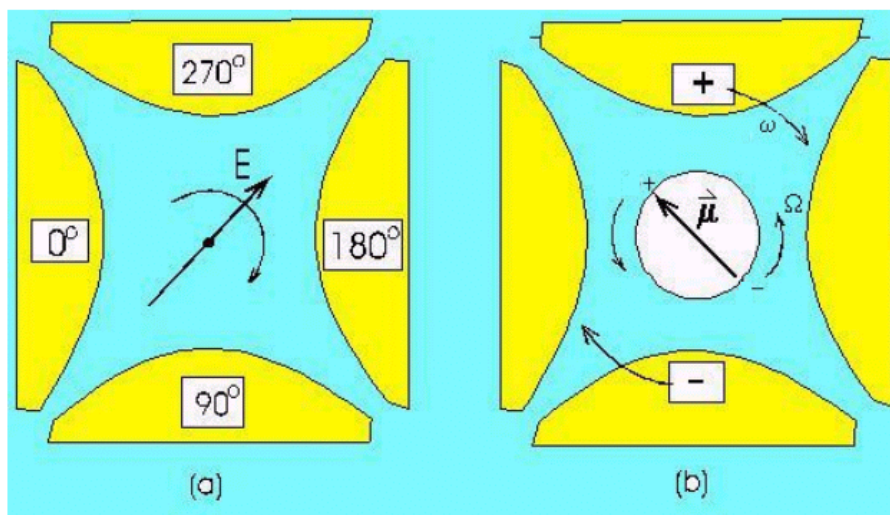
จากความสัมพันธ์ดังกล่าวรวมกับแบบจำลองทรงกลมเปลือกหุ้มชั้นเดียว Mahaworasilpa (1994) ได้เสนอสมการของการคำนวณค่าไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำที่เกิดกับเซลล์ดังสมการ (15)

$$\bar{\mu} = 4\pi R^3\epsilon_s f(\omega)\bar{E} \quad (15)$$

จะเห็นว่า $\bar{\mu}$ ขึ้นกับฟังก์ชันของสภาพยอมทางไฟฟ้า(สมการ 3) ซึ่งแปรตามความถี่ และขึ้นกับทิศและขนาดของสนามไฟฟ้าด้วย

2.3 การหมุนเชิงไฟฟ้า (Electrorotation)

เซลล์ที่เกิดการโพลาไรซ์เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ไดโพลโมเมนต์ ($\vec{\mu}$) ของเซลล์ที่เกิดขึ้นจะพยายามที่จะจัดเรียงตัวให้ขนานกับทิศของสนามไฟฟ้าตลอดเวลา (Turco and Lucaciu, 1989 ; Gimsa et al, 1991; Maworasilpa, 1994.) ดังนั้นเมื่อทิศของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไป ทิศของไดโพลโมเมนต์ภายในเซลล์ก็จะเปลี่ยนตามไปด้วยดังแสดงในภาพประกอบ 2.3



ภาพประกอบ 2.3 หลักการการหมุนของเซลล์เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าหมุนความถี่เชิงมุม Ω a) ทิศทางของสนามไฟฟ้ารวม ที่เกิดจากขั้วไฟฟ้าทั้งสอง b) ไดโพลที่เกิดจากการโพลาไรซ์เมื่อเกิดอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าจะเกิดการหมุน

จากภาพประกอบ 2.3 Ω คือ อัตราเร็วเชิงมุมของเซลล์ที่กำลังหมุน ในกรณีนี้สามารถหาทอร์ก (τ) ได้จากผลคูณของไดโพลโมเมนต์กับสนามไฟฟ้าดังสมการสมการ (16) (Gimmsa, 1991)

$$\tau = \vec{\mu} \times \vec{E} \quad (16)$$

ที่สภาวะสมดุลทางการหมุนนั้นแรงที่กระทำกับเซลล์ในแนวตั้งฉากกับรัศมีเซลล์จะต้องมีค่าเท่ากับแรง (\vec{F}) เนื่องจากความหนืด ดังนั้นสามารถหาทอร์กของการหมุนได้จากรัศมีของเซลล์คูณกับแรงในแนวตั้งฉากกับรัศมีดังสมการ (18)

$$\tau = R \times \vec{F} \quad (17)$$

จากสมการ (16) และ (17) จะได้

$$\vec{\mu} \times \vec{E} = R\vec{F} \sin 90$$

$$\vec{F} = \frac{\vec{\mu} \times \vec{E}}{R} \quad (18)$$

ขณะที่หลอดเซลล์ถูกแขวนลอยอยู่ในสารละลายที่มีค่าความหนืด (η) ดังนั้นเมื่อเซลล์ที่มีลักษณะทรงกลมหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ จะมีแรงลากหนืดต้านการหมุนตามกฎของสโตก (Stoke's law) สำหรับเซลล์ที่มีรัศมี R จะมีแรงลากหนืดดังนี้

$$\vec{F} = -8\pi\eta R^2\Omega \quad (19)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการ (18) และ (19)

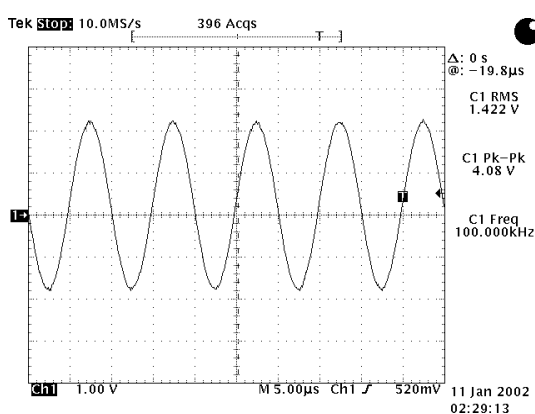
$$-8\pi\eta R^2\Omega = \frac{\vec{\mu} \times \vec{E}}{R}$$

สามารถเขียนรูปสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของอัตราเร็วเชิงมุมได้ดังสมการ (20)

$$\Omega = -\frac{\vec{\mu} \times \vec{E}}{8\pi\eta R^3} \quad (20)$$

สมการ (20) เป็นสมการที่ใช้สำหรับหาค่าอัตราเร็วเชิงมุมของการหมุนของเซลล์แขวนลอยโดยทั่วไป เมื่อถูกเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้า แต่รายละเอียดของสมการอาจจะแตกต่างกันไปตามแต่ลักษณะของสนามไฟฟ้าที่ใช้เหนี่ยวนำ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การทดลองสองแบบเพื่อเปรียบเทียบกันคือใช้แบบ 2 ขั้วกับ 4 ขั้ว ดังนั้นสมการที่ใช้จะแตกต่างกัน โดยจะกล่าวถึงในหัวข้อของการเหนี่ยวนำแบบ 2 ขั้ว และแบบ 4 ขั้ว

2.3.1 การหมุนของเซลล์ในสนามไฟฟ้าแบบ 2 ขั้วขนาน(สนามไฟฟ้ากระแสสลับ)



ภาพประกอบ 2.4 ลักษณะของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในการทดลองแบบ 2 ขั้ว ซึ่งเป็นสัญญาณแบบคลื่นไซน์ จาก Function generator

ก. ขนาดของสนามไฟฟ้า

การทดลองแบบสองขั้วใช้สัญญาณแบบคลื่นไซน์ (Mahaworasilpa, 1994) ดังภาพประกอบ 2.4 ดังนั้นค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าสามารถหาจากสมการ(21)

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{p-p}}}{2\sqrt{2}} \quad (21)$$

ขั้วไฟฟ้าเป็นลวดทรงกระบอกขนาน ขนาดของสนามที่มีผลต่อการหมุนของเซลล์เป็นสนามที่อยู่ในแนวแกน Z ($E_{(Z)}$)เท่านั้นดังภาพประกอบ 11 ดังนั้นค่าสนามในแนวอื่นจึงไม่มีผลต่อสนามไฟฟ้าในแนว Z

สามารถคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกสองขั้วที่วางอยู่อย่างขนานกันโดยค่านำมาคำนวณสำหรับการหมุนของเซลล์จะใช้ค่า $E_{(Z)}$ โดยคำนวณจากสมการ (22) ที่กำหนดไว้โดย Mahaworasilpa(1994)

$$E = E_{(Z)}$$

$$E = \frac{V_{\text{rms}} d}{\left[2 \ln \left(\frac{d-a}{a} \right) \right] \left[\frac{d^2}{4} - Z^2 \right]} \quad (22)$$

เมื่อ	$E_{(Z)}$	คือ	สนามไฟฟ้าในแนวแกน Z
	V_{rms}		ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง
	d		ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง
	a		รัศมีของขั้วไฟฟ้า
	Z		ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเซลล์กับขั้วไฟฟ้า

ข. การหมุนของเซลล์ในสนามไฟฟ้าของทรงกระบอก 2 ขั้วขนาน

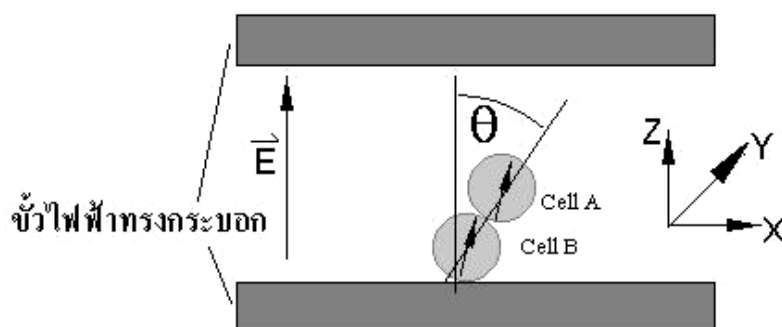
การทดลองทรงกระบอกขนานจะต้องจัดวางเซลล์ให้เป็นไปตามภาพประกอบ 11 การเกิดไดโพลโมเมนต์ของแต่ละเซลล์จะมีผลซึ่งกันและกัน กล่าวคือเซลล์ A จะเหนี่ยวนำเซลล์ B และในทางกลับกันเซลล์ B ก็เหนี่ยวนำเซลล์ A ด้วยเช่นกัน พิจารณาจากภาพเซลล์จะอยู่ในตำแหน่งที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าต่างกันดังนั้นการเกิดโพลาร์จึงต่างกันด้วย สำหรับการทดลองนี้เซลล์ที่หมุนคือเซลล์ A ส่วนเซลล์ B จะถูกตรึงติดไว้กับขั้วไฟฟ้าโดยแรงไดอิเล็กโตรโฟรีซิส (Dielectrophoresis force) ทอร์กของการหมุนสามารถหาได้จากสมการ (23) ซึ่งเสนอโดย Mahaworasilpa (1994)

$$\bar{\tau}_t = 3\pi\epsilon_s R^3 E^2 \sin 2\theta \left(\frac{\text{Im}^2[f(\omega)]}{4 - \text{Re}[f(\omega)]} \right) \quad (23)$$

เมื่อ τ_t คือ ทอร์กเฉลี่ยในหนึ่งหน่วยเวลา(time average torque) นำไปคำนวณอัตราเร็วการหมุนได้ดังสมการ (24)

$$\Omega = \frac{3\varepsilon_s}{8\eta} E^2 \sin 2\theta \left(\frac{\text{Im}^2 [f(\omega)]}{4 - \text{Re} [f(\omega)]} \right) \quad (24)$$

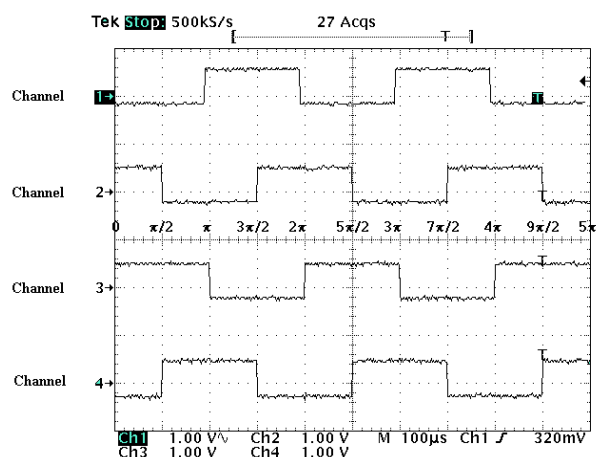
เมื่อ θ คือ มุมที่เส้นลากผ่านจุดศูนย์กลางของเซลล์ทั้งสองทำกับทิศของสนามไฟฟ้าดังแสดงในภาพประกอบ 2.5



ภาพประกอบ 2.5 ภาพการจัดวางขั้วไฟฟ้าและเซลล์สำหรับการทดลองแบบ 2 ขั้วขนาน รวมทั้งลักษณะทิศของไดโพลโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในเซลล์ทั้งสอง

2.3.2 การหมุนของเซลล์ในสนามไฟฟ้าแบบ 4 ขั้วระนาบ(สนามไฟฟ้าหมุน)

การทดลองแบบสี่ขั้วต้องแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นแบบ 4 ช่องสัญญาณโดยอุปกรณ์ PSU (Phase Shift Unit) ตามวิธีการของ สัญญาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก PSU(Phase Shift Unit) จะมีลักษณะเป็นแบบคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave) มีทั้งหมดสี่ช่องสัญญาณ โดยจะมีเฟส(Phase) ตามกัน 90 องศา(Fuhr., et al., 1986., Gimsa., et al., 1991.) พิจารณาได้จาก Channel 1, Channel 2, Channel 3 และ Channel 4 ในภาพประกอบ 2.6



ภาพประกอบ 2.6 ลักษณะของสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายให้ขั้วไฟฟ้าเพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าที่หมุน

สัญญาณทั้งสี่ช่องจะถูกนำไปจ่ายให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ขั้วในภาพประกอบ 15 เมื่อแบ่งสัญญาณใน 1 คาบ ออกเป็น 4 ช่วง คือ $0 - \pi/2$, $\pi/2 - \pi$, $\pi - 3\pi/2$, และ $3\pi/2 - 2\pi$ สัญญาณที่ส่งไปให้ขั้วไฟฟ้าทั้งสี่มีศักย์ไฟฟ้างดังนี้

ช่วงที่ 1 0 ถึง $\pi/2$

- Ch 1 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 1 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ
- Ch 2 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 2 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก
- Ch 3 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 3 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก
- Ch 4 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 4 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ

ช่วงที่ 2 $\pi/2$ ถึง π

- Ch 1 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 1 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ
- Ch 2 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 2 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ
- Ch 3 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 3 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก
- Ch 4 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 4 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก

ช่วงที่ 3 π ถึง $3\pi/2$

- Ch 1 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 1 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก
- Ch 2 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 2 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ

Ch 3 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 3 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ

Ch 4 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 4 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก

ช่วงที่ 4 $3\pi/2$ ถึง 2π

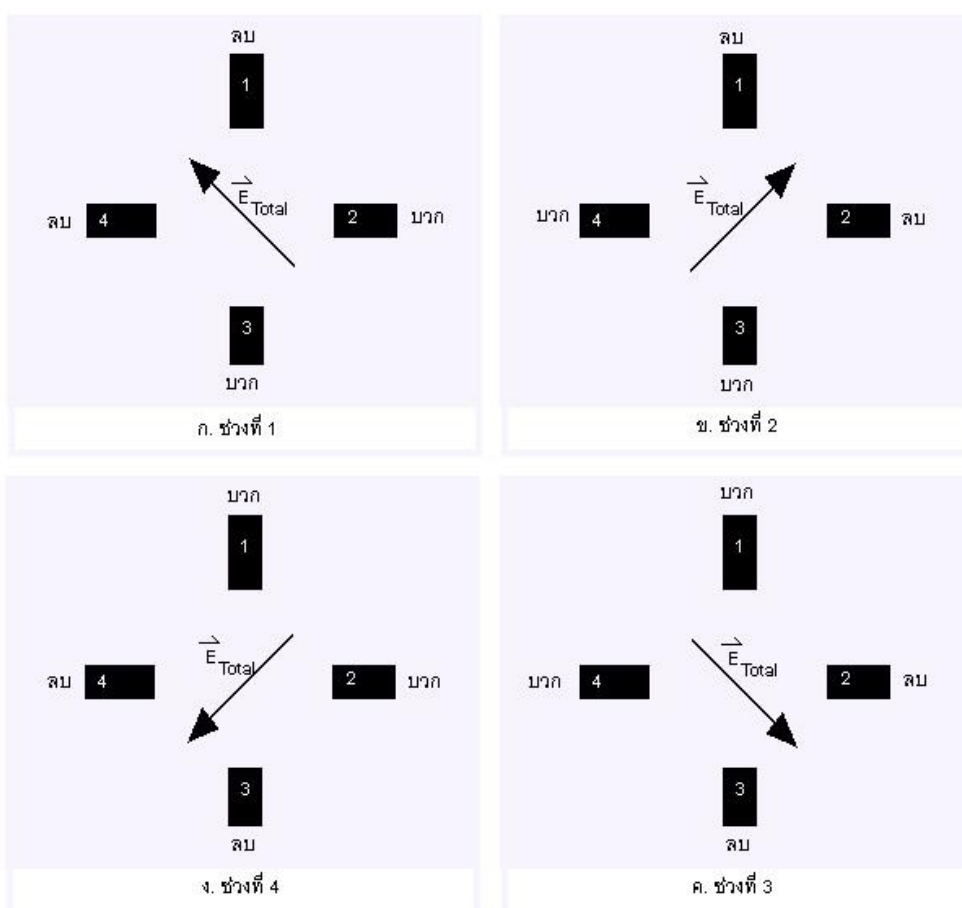
Ch 1 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 1 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก

Ch 2 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 2 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น บวก

Ch 3 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 3 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ

Ch 4 ซึ่งจ่ายกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าที่ 4 จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็น ลบ

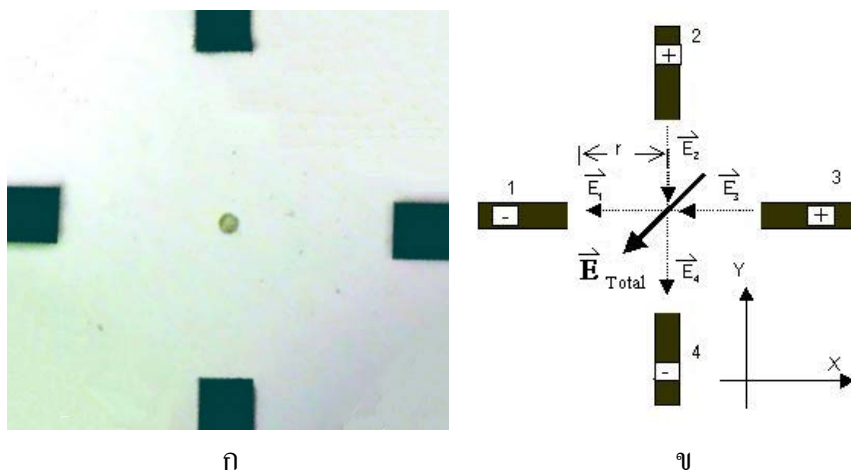
จะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วที่ 1 และ 3 จะตรงข้ามกันเสมอ เช่นเดียวกับกับ ขั้วที่ 2 และ 4 ดังแสดงในภาพประกอบ 2.7



ภาพประกอบ 2.7 ก, ข, ค, และ ง เป็นลักษณะของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา เมื่อดูจาก ก -> ข -> ค -> ง จะเห็นว่าสนามมีการหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา

การคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้า

ขณะทดลองจะจัดให้เซลล์ที่ต้องการเหนี่ยวนำอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของขั้วไฟฟ้าทั้งสองพอดี ดังภาพประกอบ 2.8 ก ดังนั้นค่าของสนามไฟฟ้าใช้ในการคำนวณความเร็วการหมุนของเซลล์ใช้ค่าสนามลัพท์ที่จุดกึ่งกลางเช่นกัน ดังภาพประกอบ 2.8 ข



ภาพประกอบ 2.8 ก.ภาพขณะทดลองเหนี่ยวนำแบบ 4 ขั้ว แสดงให้เห็นว่าจุดที่วางเซลล์จะต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลางของขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ข.การคำนวณสนามที่กระทำต่อเซลล์ต้องพิจารณาจากสนามลัพท์ที่จุดกึ่งกลางเช่นกัน

ในการทดลองเหนี่ยวนำแบบ 4 ขั้ว เซลล์ถูกวางให้อยู่ตรงกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ดังนั้นที่จุดกึ่งกลางให้มีระยะห่างจากขั้วไฟฟ้าเป็น r ซึ่งจะอยู่ห่างจากขั้วทั้งสองเท่ากัน จากสัญญาณที่จ่ายเข้าไปเป็นแบบคลื่นสี่เหลี่ยม (square waves) โดยขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะมีขนาดของศักย์ไฟฟ้าเท่ากันคือ

$$V_{rms} = \frac{V_{p-p}}{2} \quad (25)$$

พิจารณาจากภาพประกอบ 2.8 ข เซลล์ที่อยู่ตรงกลางพอดีจะได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าย่อยสี่ค่าคือ

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 & \text{ เป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากขั้วที่ 1 มีทิศไปทาง } -\hat{x} \\ \vec{E}_1 & = -\frac{V_{rms}}{r} \hat{x} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_2 & \text{ เป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากขั้วที่ 2 มีทิศไปทาง } -\hat{y} \\ \vec{E}_2 & = -\frac{V_{rms}}{r} \hat{y} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_3 & \text{ เป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากขั้วที่ 3 มีทิศไปทาง } -\hat{x} \\ \vec{E}_3 & = -\frac{V_{rms}}{r} \hat{x} \end{aligned} \quad (28)$$

\vec{E}_4 เป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากขั้วที่ 4 มีทิศไปทาง $-\hat{y}$

$$\vec{E}_4 = -\frac{V_{rms}}{r} \hat{y} \quad (29)$$

จากสมการ(26) และ (28) จะได้

$$\vec{E}_{13} = -\frac{2V_{rms}}{r} \hat{x} \quad (30)$$

จากสมการ(27) และ (29) จะได้

$$\vec{E}_{24} = -\frac{2V_{rms}}{r} \hat{y} \quad (31)$$

สนามไฟฟ้ารวมสามารถหาได้จากสมการ(30)ร่วมกับ(31)

$$\begin{aligned} \vec{E}_{Total} &= \vec{E}_{13} + \vec{E}_{24} \\ &= -\frac{2V_{rms}}{r} \hat{x} - \frac{2V_{rms}}{r} \hat{y} \\ &= \sqrt{2\left(\frac{2V_{rms}}{r}\right)^2} [-(\hat{x} + \hat{y})] \\ &= 2\sqrt{2} \frac{V_{rms}}{r} [-(\hat{x} + \hat{y})] \\ \vec{E}_{Total} &= 2\sqrt{2} \frac{V_{rms}}{r} [-(\hat{x} + \hat{y})] \end{aligned} \quad (32)$$

ดังนั้น \vec{E}_{Total} ตามสมการ(32) จึงเป็นค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการโพลาไรซ์และการหมุนของเซลล์ซึ่งเกิดจากขั้วไฟฟ้าทั้งสอง สามารถหาค่าไดโพลโมเมนต์เหนี่ยวนำที่เกิดที่ เกิดขึ้นกับเซลล์ได้จากสมการ (33) ซึ่งเสนอโดย Gimsa (1991)

$$\vec{\mu} = 4\pi\epsilon_s R^3 \vec{E}^2 \text{Im}[f(\omega)] \quad (33)$$

แทนค่า $\vec{\mu}$ ลงในสมการ (20) สามารถหาค่าอัตราเร็วการหมุนของเซลล์ได้ดังสมการ (34)

$$\Omega = -\frac{\epsilon_s \text{Im}[f(\omega)] E_{Total}^2 K}{2\eta} \quad (34)$$

ค่า K ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อแทนค่าคงที่ซึ่งเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตและชนิดของโลหะที่ทำเป็นขั้วไฟฟ้า รวมทั้งค่าการรบกวนของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (Archer, 1999) สำหรับงานวิจัยนี้หาค่า K โดยการเทียบเคียงจากผลการทดลองกับเซลล์เม็ดเลือดแดง โดยใช้ค่าคงที่ทางไฟฟ้าของเม็ดเลือดแดงตามที่มีการรายงานจากนักวิจัยอื่นๆ โดยการหาค่า K แสดงไว้ในหัวข้อผลการทดลองที่ 2.5