

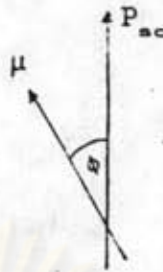
ทฤษฎีพหุขั้วอิเล็กตริกในสารโพลีเมอร์กิ่งผลึก

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงทฤษฎีทั่วไปของสารโพลีเมอร์พหุขั้วอิเล็กตริก โดยสมมติแบบจำลองว่ามีประจุอิสระถูกกักไว้ในสารโพลีเมอร์ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้ได้สำหรับสารโพลีเมอร์ทั่วไป ไม่เจาะจงว่าเป็นโพลีเมอร์ชนิดกิ่งผลึกหรือโพลีเมอร์อสัณฐาน และจะเห็นได้ว่า สภาพพหุขั้วอิเล็กตริกของสารโพลีเมอร์นั้นเกิดเนื่องมาจาก 2 สาเหตุ สาเหตุแรกเนื่องจากสภาพพหุขั้วอิเล็กตริกภายในโพลีเมอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและสมบัติทางกายภาพของโมเลกุลของสารโพลีเมอร์นั้น สาเหตุประการที่สอง เกิดเนื่องจากมีประจุอิสระถูกกักไว้ในสารโพลีเมอร์นั้น สำหรับในบทนี้จะพหุขั้วอิเล็กตริกที่มีหลักการพิจารณาแตกต่างจากบทที่ 2 โดยพิจารณาถึงลักษณะของโครงสร้างของโมเลกุล ความไม่สม่ำเสมอของเนื้อสาร และสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ที่มีผลต่อสภาพพหุขั้วอิเล็กตริกอย่างไรก็ตาม เนื่องจากลักษณะโครงสร้างและสมบัติต่างๆของโพลีเมอร์กิ่งผลึกมีความซับซ้อน และมีพารามิเตอร์หลายตัวที่ไม่สามารถคำนวณได้ ทำให้การคำนวณหาค่าคงตัวพหุขั้วอิเล็กตริก มีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองไปบ้าง แบบจำลองที่ใช้สำหรับการคำนวณหาค่าคงตัวพหุขั้วอิเล็กตริก สำหรับบทนี้มีอยู่ 3 แบบที่สำคัญ คือ แบบจำลองขั้วคู่เกร็งของบรอดเฮิร์ท แบบจำลองของทาชิโร และแบบจำลองของวาคะ. แบบจำลองแต่ละแบบจะได้ค่าคงตัวพหุขั้วอิเล็กตริกแตกต่างกัน เนื่องจากพิจารณาพารามิเตอร์ต่างกัน รายละเอียดของแบบจำลองแต่ละแบบมีดังนี้ [1]

แบบจำลองขั้วคู่เกร็งของบรอดเฮิร์ท (Broadhurst's Rigid Dipole Model)

เป็นทฤษฎีที่ใช้สำหรับสารโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบมีขั้ว ให้จำนวนของส่วนที่เป็นผลึกมีอยู่ N ส่วน แต่ละส่วนจะมีโมเมนต์ขั้วคู่ μ ซึ่งมีทิศทางทำมุม θ กับสπονเตเนียสโพลาริเซชัน P_{sc} ทิศทางของโพลาริเซชันสำหรับแบบจำลองนี้จะตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นฟิล์มที่พิจารณา ถ้าแผ่นฟิล์มโพลีเมอร์นั้นมีปริมาตร V ดังนั้นจะได้ว่าค่าสπονเตเนียสโพลาริเซชัน P_{sc} คือ

$$P_{sc} = (N/V)\mu\langle\cos\phi\rangle \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.1 แสดงเวกเตอร์ของโพลาริเซชัน

เนื่องจากมีแรงกระทำระหว่างขั้วคู่กับขั้วคู่ข้างเคียง ทำให้ขนาดของขั้วคู่ μ เปลี่ยนไป โดยที่โมเมนต์ขั้วคู่ μ จะได้จากผลรวมระหว่างโมเมนต์ขั้วคู่ภายใน μ_0 และโมเมนต์ขั้วคู่ภายนอกที่ถูกเหนี่ยวนำจากสนามภายนอก

$$\mu = \mu_0(\epsilon + 2\epsilon_0)/3\epsilon_0 \quad (5.2)$$

เมื่อ ϵ และ ϵ_0 เป็นค่าไดอิเล็กตริกของผลึกโพลีเมอร์ และของสูญญากาศ ตามลำดับ และในแบบจำลองนี้ พิจารณาว่ารูปร่างของหน่วยเซลล์ที่ทำให้ค่า μ_0 และ $\langle\cos\phi\rangle$ คงที่ด้วยดังนั้นค่าสปอนเตเนียสโพลาริเซชันคงที่เช่นกัน

สำหรับ PVDF จินตภาพที่มีผลึกแบบเบตา จะได้ $\epsilon/\epsilon_0 = 3.4$
 $\langle\cos\phi\rangle = 1$ จากสมการ (5.1) และ (5.2) จะได้

$$P_{sc} = 0.23 \text{ C/m}^2 \quad (5.3)$$

จากสมการของ เคลาส์-มอสส์โสลติ (Clausius-Mossotti equation)

$$(\epsilon - \epsilon_0)/(\epsilon + 2\epsilon_0) = N\alpha/3V\epsilon_0 \quad (5.4)$$

หาอนุพันธ์ของ ϵ และ v เทียบกับความเครียดเชิงปริมาตร (Volume strain) โดยที่ $\epsilon' = \partial\epsilon/\partial s$

$$(\epsilon - 2\epsilon_0 - \epsilon - \epsilon_0)\epsilon' / (\epsilon + 2\epsilon_0) = (N\alpha/3\epsilon_0)(-1/v^2)(dv/ds) \quad (5.5)$$

สำหรับค่า s น้อยๆจะได้

$$ds = dv/v \quad \text{หรือ} \quad dv/ds = v \quad (5.6)$$

จากสมการ (5.4), (5.5), (5.6)

$$\begin{aligned} 3\epsilon_0\epsilon' / (\epsilon + 2\epsilon_0)^2 &= -(\epsilon - \epsilon_0) / (\epsilon + 2\epsilon_0) \\ \text{หรือ} \quad \partial\epsilon/\partial s &= 1(\epsilon - \epsilon_0) / (\epsilon + 2\epsilon_0) / 3\epsilon_0 \end{aligned} \quad (5.7a)$$

ค่า $\partial\epsilon/\partial s$ คือ ค่าอิมพีเดียนสตรัคชัน K ดังนั้น

$$K = -(\epsilon - \epsilon_0) / (\epsilon + 2\epsilon_0) / 3\epsilon_0 \quad (5.7b)$$

จากสมการ (5.1), (5.2) จะได้

$$P_{sc} = (N/v) \{ (\epsilon + 2\epsilon_0) / 3\epsilon_0 \} \mu_0 \langle \cos\phi \rangle \quad (5.8)$$

เนื่องจากสภาพพหุขั้วไฟฟ้าคือการที่สารมีโพลาริเซชันเปลี่ยนไป เมื่อได้รับความเครียด s ดังนั้นจะหาค่าคงตัวพหุขั้วไฟฟ้า e ได้โดยการหาอนุพันธ์ของ P_{sc} เทียบกับความเครียด ดังนั้นจะได้

$$e = (1/v) (\partial v P_{sc} / \partial s) \quad (5.9)$$

จากสมการที่ 5.8 จะได้

$$\partial v P_{sc} / \partial s = (N/3\epsilon_0) (\partial\epsilon / \partial s) \mu_0 \langle \cos\phi \rangle \quad (5.10)$$

แทนค่า จากสมการ (5.7a) ลงในสมการ (5.10) จะได้

$$\partial v P_{sc} / \partial s = -N \mu_0 \langle \cos \phi \rangle (\epsilon - \epsilon_0) (\epsilon + 2\epsilon_0) / (3\epsilon_0)^2 \quad (5.11)$$

แต่จากสมการ (5.8) จะได้ว่า

$$v = N(\epsilon + 2\epsilon_0) \mu_0 \langle \cos \phi \rangle / 3\epsilon_0 P_{sc} \quad (5.12)$$

จากสมการ (5.11) หาค่าสมการ (5.12) จะได้

$$e = (1/v) (\partial v P_{sc} / \partial s) = -P_{sc} (\epsilon - \epsilon_0) / 3\epsilon_0 \quad (5.13)$$

จากแบบจำลองของบรอดเฮิร์ท จะเห็นว่าสภาพพหิซโซอิเล็กตริกของสารโพลีเมอร์ขึ้นอยู่กับ สภาพขั้ว และค่าสภาพไดอิเล็กตริกของผลึก ถ้าหากจะเปรียบเทียบกับทฤษฎีในบทที่ 2 จะเห็นว่าค่าคงตัวพหิซโซอิเล็กตริกที่คำนวณได้จากทฤษฎีของบรอดเฮิร์ทนั้น เป็นสภาพพหิซโซอิเล็กตริกภายในเท่านั้น ไม่ได้กล่าวถึงกรณีที่มีประจุอิสระอยู่ภายในสารโพลีเมอร์นั้นด้วย นอกจากนี้ทฤษฎีของบรอดเฮิร์ทยังใช้ได้เฉพาะกรณีที่รูปร่างของหน่วยเซลล์ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อได้รับความเค้นจากภายนอก

ทฤษฎีของทาชิโร (Tashiro's Theory)

ทาชิโร ได้หาค่า d และ e ของ PVDF ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเบตา โดยคำนวณจากลักษณะของโครงสร้างผลึกในหน่วยเซลล์ โดยคิดว่าสนามไฟฟ้าภายใน มีค่าเท่ากับสนามไฟฟ้าภายนอก และคำนวณหาระยะระหว่างอะตอมแต่ละตัวขณะได้รับความเค้นภายนอก รวมทั้งแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากพันธะเคมี แรงวันเตอวาลล์ และแรงคูลอมบ์ จากอะตอมที่อยู่ข้างเคียงในระยะ 4 \AA และได้ค่า d และ e ดังนี้ [3]

$$d(10^{-11} \text{ C/N}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -3.070 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.428 & 0 & 0 \\ -0.025 & -0.405 & -2.519 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

$$e(C/m^2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -0.14 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.01 & 0 & 0 \\ -0.13 & -0.14 & -0.28 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

อย่างไรก็ดี สำหรับสารพีซีไออิเล็กทริกที่มีผลึกแบบมีขั้ว จะพบว่า สนามไฟฟ้าภายในจะมีค่าไม่เท่ากันกับสนามไฟฟ้าภายนอก ทั้งนี้เนื่องจาก สนามไฟฟ้าจากขั้วคู่ที่อยู่ห่างออกไป จะส่งผลทำให้สนามไฟฟ้าภายในเปลี่ยนไปได้ แต่ทว่าชิโรไม่ได้กล่าวถึงผลกระทบจากส่วนนี้ ดังนั้น ถ้าหากคิดรวมถึงผลเนื่องจาก สนามของไดโพลนี้ด้วยจะทำให้ค่าที่ได้ถูกต้องขึ้น

แบบจำลองของวาคะ (Wada's Model)

แบบจำลองของวาคะนี้ เป็นแบบจำลองของสารโพลีเมอร์กึ่งผลึก ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบมีขั้ว [8] โดยสมมุติว่ามีผลึกทรงกลมจำนวน N มีค่า ไดอิเล็กตริก ϵ_c แต่ละทรงกลมมีปริมาตร v มีสปอนเตเนียสโพลาริเซชัน P_{sc} กระจายอยู่ในเฟสอสัณฐานที่มีค่าไดอิเล็กตริก ϵ_a P_{sc} ที่เกิดขึ้นอาจ จะเนื่องมาจากหลายสาเหตุ คือ เนื่องจากการจัดเรียงของขั้วคู่ในผลึก การจัด เรียงของขั้วคู่ในเฟสอสัณฐาน และขั้วคู่ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของประจุอิสระที่ถูก กักไว้ที่บริเวณผิวหน้าของชั้นผลึก [3, 6, 7] .

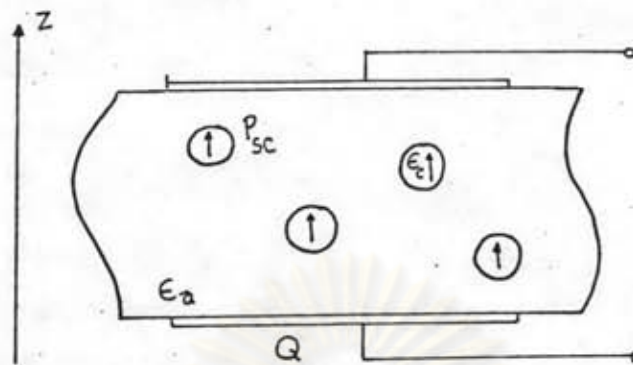
โมเมนต์ขั้วคู่ของผลึกอิสระ คือ vP_{sc} แต่เนื่องจากผลึกนี้วางตัวอยู่ ในตัวกลางอสัณฐาน ที่มีค่าไดอิเล็กตริก ϵ_a การเหนี่ยวนำระหว่างตัวกลาง ทั้งสองทำให้โมเมนต์ขั้วคู่ของผลึกกลายเป็น [8]

$$\mu = 3\epsilon_a v P_{sc} / (2\epsilon_a + \epsilon_c) \quad (5.16)$$

ดังนั้นโพลาริเซชันของทั้งแผ่นฟิล์ม P_s คือ

$$P_s = (N/A) (3\epsilon_a v P_{sc} / (2\epsilon_a + \epsilon_c)) = \phi 3\epsilon_a P_{sc} / (2\epsilon_a + \epsilon_c) \quad (5.17)$$

เมื่อ $d = Nv/A1$ หรืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรของผลึก
ต่อปริมาตรของแผ่นฟิล์ม



รูปที่ 5.2 แบบจำลองของวาคะแสดงลักษณะกึ่งผลึกของ PVDF

ค่าคงตัวพิซโซอิเล็กตริกของแผ่นฟิล์ม คือการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันเมื่อได้รับความเครียด และสภาพพิซโซอิเล็กตริกของ PVDF นี้ขึ้นอยู่กับกลไก 4 ประการคือ

1. ผลของอิเล็กโตรสตรักชัน (electrostriction effect) คือการที่ค่า เปลี่ยนไปเมื่อได้รับความเครียด
2. ผลของการเปลี่ยนรูปร่างของฟิล์ม (dimensional effect) คือการที่ฟิล์มมีขนาดเปลี่ยนไป เมื่อได้รับความเครียด
3. การเปลี่ยนแปลงของ v เมื่อได้รับความเครียด
4. สภาพพิซโซอิเล็กตริกภายในของผลึกเปลี่ยนไป (intrinsic piezoelectric) คือการที่ P_{sc} เปลี่ยนไปเมื่อได้รับเครียด

ดังนั้นค่า e ที่ได้คือ

$$e = (1/A) (\partial Q / \partial s)_{E=0} = (\partial P / \partial s)_{E=0}$$

โดย s คือ ความเครียดภายนอก

จากสมการที่ (5.17) ก็จะได้

$$e = P_s \left[\left(\frac{\epsilon_c}{2\epsilon_a + \epsilon_c} \right) \left(\frac{k_a}{\epsilon_a} - \frac{k_c}{\epsilon_c} g \right) - \frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial s} \right] + \phi \left(\frac{3\epsilon_a}{2\epsilon_a + \epsilon_c} \right) \left(\frac{P_{sc}}{V} \frac{\partial V}{\partial S_c} + \frac{\partial P_{sc}}{\partial S_c} \right) g \quad (5.18)$$

ค่า g สำหรับความเครียดของการดึงคือ

$$g = \partial s_c / \partial s = 5G_u / (3G_u + 2G_c) \quad (5.19)$$

เมื่อ G_u และ G_c คือค่ายังโมดูลัสของส่วนอัสฐาน และของผลึก ตามลำดับ

จากสมการที่ (5.18) พบว่าค่า e ขึ้นอยู่กับ 3 เทอม เทอมแรก เป็นผลเนื่องจากอิเลคโตรสตรีกชั้น เทอมที่ 2 เป็นผลเนื่องจากมิติของแผ่นฟิล์ม เปลี่ยนเทอมที่ 3 เนื่องจากสภาพพหิโซอิเล็กตริกของผลึกและปริมาตรของผลึก เปลี่ยนแปลง

เปรียบเทียบสมการที่ 5.18 กับสมการที่ (2.28) ในบทที่ 2 จะเห็นว่าในเทอม $\partial P_{sc} / \partial S_c$ เป็นผลของพหิโซอิเล็กตริกภายในผลึก ส่วนเทอมอื่น ๆ เป็นผลเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของเนื้อสาร และความยืดหยุ่นของแผ่นฟิล์ม

การคำนวณค่า e_{22} และ e_{31} ของ PVDF จากสมการที่ 5.18 ณ อุณหภูมิ 20 °c ใช้เงื่อนไขดังนี้ [3]

1. $\phi = 0.5$
2. ค่า ϵ_c และ K_c สำหรับเฟลอสัณฐานได้จากการประมาณ โดยการวัดจากทั้งแผ่นฟิล์ม โดยถือว่าส่วนที่เป็นผลึกตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า น้อยมาก เมื่อเทียบกับส่วนที่เป็นอสัณฐาน
3. P_{uc} ที่ได้มีค่าขึ้นอยู่กับ P_u ซึ่งเป็นสเปกตรัมความถี่ของผลึกออคทาคิ ($P_u = 0.23 \text{ C/m}^2$) โดยที่ $P_{uc} = OP_u$ เมื่อ O เป็นค่าที่ขึ้นกับการจัดตัว ในที่นี้ $O = 0.4$ สำหรับเงื่อนไขการจัดตัว $E_u = 70 \text{ MV/m}$ และ $T_u = 120 \text{ }^\circ\text{C}$
4. ค่า ϵ_c และ K_c ของส่วนผลึกที่อุณหภูมิ $20 \text{ }^\circ\text{C}$ จะเท่ากับค่า และ K ของแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิ $-100 \text{ }^\circ\text{C}$

จากเงื่อนไขข้างต้น และใช้ค่า $\epsilon_a/\epsilon_o = 12.9$ และ $\epsilon_c/\epsilon_o = 3.4$ จะได้ $P_u = 6.1 \times 10^{-2} \text{ C/m}^2$

พิจารณาค่าที่เกี่ยวข้องในการหาค่าคงตัวพีซีไออิเล็กทริกตามแนว x ได้ค่าง่ายโมดูลัสดังนี้

$$G_{e11} = 177 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$G_{e12} = 2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

ดังนั้นจากสมการ (5.20) ได้ $\epsilon = 3 \times 10^{-2}$ ซึ่งทำให้เทอมสุดท้ายในสมการที่ (5.18) มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเทอมอื่นๆ ดังนั้นสมการที่ (5.18) จึงลดรูปเหลือ

$$e_{31} = P_s \left[\left(\frac{\epsilon_c}{2\epsilon_a + \epsilon_c} \right) \frac{K_a}{\epsilon_a} + m_{31} \right] \quad (5.21)$$

สำหรับแผ่น PVDF ที่ถูกยึดแล้ว $m_{31} = 0.7$ และข้อมูลจากการทดลอง ได้ค่า $K_c = 22.2$, $\epsilon_a/\epsilon_o = 12.9$, $\epsilon_c/\epsilon_o = 3.4$ และ $P_u = 6.1 \times 10^{-2} \text{ C/m}^2$ ดังนั้น

$$e_{31} = 5.5 \times 10^{-2} \text{ C/m}^2 \quad (5.22)$$

จากสมการ (5.21) พบว่า ϵ_{33} มีผลต่อค่า e_{33} ถึง 78% เมื่อเทียบกับอีกเทอมหนึ่ง เนื่องจาก ϵ_{33} ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิทำให้ค่า e_{33} เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย

ส่วนค่า e_{33} นั้นพบว่าค่า $(\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial S})$ มีค่าเท่ากับ 1 และค่า ϵ ก็มีค่าไม่น้อยเช่นครั้งก่อน ส่วนเทอมอิเล็กโตรสตรีกชันมีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นค่า e_{33} จึงประมาณได้ว่า

$$e_{33} = -P_{33} + \phi e_{c33} g [3\epsilon_{33} / (2\epsilon_{33} + \epsilon_c)] \quad (5.23)$$

เมื่อ e_{c33} เป็นค่าคงตัวพีซีโออิเล็กทริกของส่วนผลึก ค่า ϵ คำนวณได้เท่ากับ 0.47 (โดยใช้ $G_c = 10 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ และ $G_{33} = 2.6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$) ถ้าไม่คิดถึงผลเนื่องจากประจุอิสระ และ ขั้วคู่ของส่วนอสัณฐาน จะได้ค่า $e_{c33} = -0.13 \times 10^{-2} \text{ C/m}^2$ ดังนั้นจากสมการ (5.23) จะได้

$$e_{33} = -6.9 \times 10^{-2} \text{ C/m}^2$$

ในตารางที่ 5.1 แสดงค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองของเคปเลอร์และแอนเดอร์สัน [1]

	Observed*	Calculated*	Fractional Contributions in Calculated Value (%)			
			$\partial \epsilon / \partial X$	$\partial l / \partial X$	$\partial v / \partial X$	$\partial P_{33} / \partial X$
$\epsilon_{31} (10^{-2} \text{ C/m}^2)$	5.5	5.5	22	78	0	0
$\epsilon_{32} (10^{-2} \text{ C/m}^2)$	0.6					
$-\epsilon_{33} (10^{-2} \text{ C/m}^2)$	8.7	>6.9	0	70	<0	>30
$-p_3 (10^{-2} \text{ C/m}^2 \text{ K})$	2.7	2.7	0	47	-38	91

*Reference 157.

Parameters used: $P_{33} = 9.2 \times 10^{-2} \text{ C/m}^2$, $\phi = 0.5$, $\epsilon_r / \epsilon_0 = 12.9$, $\kappa_{31} / \epsilon_0 = 22.2$, $G_c = 2.6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $\epsilon_c / \epsilon_0 = 3.4$, $m_{31} = 0.7$, $\lambda_r / \epsilon_c = \lambda_r / \epsilon_r$, $G_{r11} = 177 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $G_{r33} = 10 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, $e_{r33} = -2.6 \times 10^{-2} \text{ C/m}^2$, $\beta_3 = 2.1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, $\epsilon_c = 1.7 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, $\gamma_c = 5$, $\phi_0 = 16^\circ$.

X denotes strain and temperature for ϵ and p , respectively.

ตาราง 5.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบค่าคงตัวพีซีโออิเล็กทริกที่ได้จากการคำนวณและการวัด ที่อุณหภูมิ 20° C

จะเห็นว่าค่า e_{ss} ที่คำนวณได้ที่ค่าใกล้เคียงกับการทดลอง ส่วนค่า e_{ss} ยังแตกต่างกันอยู่มาก อย่างไรก็ตาม ถ้าคำนึงถึงผลเนื่องจากประจุอิสระและขั้วคู่ของส่วนอสัณฐานเข้าไปด้วย จะได้ค่า $e_{\text{ss}} = -8.4 \times 10^{-2} \text{ C/m}^2$ และเมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (5.23) แล้ว จะได้ $e_{\text{ss}} = -8.8 \times 10^{-2} \text{ C/m}^2$ ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลอง และจากสมการที่ (5.23) พบว่าไม่มีเทอมของอัตราส่วนของขั้วของปรากฏอยู่ในสมการ ซึ่งแสดงว่า อนุหภูมิไม่มีผลต่อค่า e_{ss} แต่อย่างไร และจากการทดลองก็พบว่าเป็นเช่นนั้นจริง



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย