

การพัฒนาพอลิไวนิลดีนฟลูออไรด์พอลิเมอร์
เป็นไฟโรอิเล็กทริกและการประยุกต์



นางสาวชุศรี อุทัยสิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2537

ISBN 974-584-337-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF POLYVINYLIDENE FLUORIDE
AS PYROELECTRIC POLYMER AND ITS APPLICATION



Miss Choosri Utaiwasin

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis is Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1994

ISBN 974-584-337-7

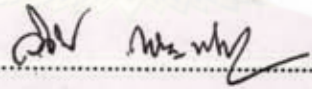
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาพอลิไวนิลดีนฟลูออไรด์พอลิเมอร์เป็นไฟโรอิเล็กทริก
โดย นางสาวชุศรี อุทัยวดีน
ภาควิชา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพูน



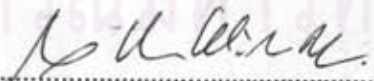
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

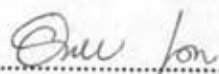

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ดattare วัชรากิจ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร เส็งทะพันธ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์)


..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. โอวาท นิตินันท์ประกาศ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพูน)



ชุกรี อุทัยวดีน : การพัฒนาพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์พอลิเมอร์เป็นไพโรอิเล็กทริกและการประยุกต์ (DEVELOPMENT OF POLYVINYLIDENE FLUORIDE AS PYROELECTRIC POLYMER AND ITS APPLICATION) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. อนันตสิน เตชะกำพุช, 84 หน้า. ISBN 974-584-337-7

ในการวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกของฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) โดยหุ้มฟิล์ม PVDF ด้วยแผ่นพลาสติกบางจากนั้นจุ่มฟิล์มลงในน้ำมันซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง การวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ΔT ของฟิล์มโดยใช้เทอร์มิสเตอร์ซึ่งให้ความละเอียดถึง 0.1°C จากนั้นวัดประจุไฟฟ้า (Q) ที่คายออกจากฟิล์มโดยอิเล็กโตรมิเตอร์ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Q และ ΔT เป็นกราฟเส้นตรง ถ้า $\Delta T \leq 4^\circ\text{C}$ สัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกหาได้จากความชันของกราฟต่อพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโตรด ขนาดของสัมประสิทธิ์ที่หาได้อยู่ในช่วง $0.34 - 1.91 \text{ nC/cm}^2\text{K}$ ขึ้นอยู่กับฟิล์มที่ใช้วัด กราฟระหว่างสัมประสิทธิ์ไพโร-เพียสโซอิเล็กทริกมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงสองคล้องกับทฤษฎีไพโร-เพียสโซอิเล็กทริก ในแบบจำลองต่าง ๆ

นอกจากนี้ยังได้มีการนำแผ่นฟิล์มดังกล่าวไปประดิษฐ์เป็นสวิทช์สัมผัสประเภทต่าง ๆ และเครื่องวัดรังสีอินฟราเรด โดยอาศัยคุณสมบัติของฟิล์มที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เช่น ฟิล์มที่มีสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก $2 \text{ nC/cm}^2\text{K}$ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป 0.2 K จะเกิดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองถึง 1 V ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะนำไปกระตุ้นการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ พบว่าฟิล์มที่มีอยู่สามารถประดิษฐ์เป็นสวิทช์สัมผัสและเครื่องวัดรังสีอินฟราเรดที่ใช้งานได้ดีและมีความไวสูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วัสดุศาสตร์
สาขาวิชา วัสดุศาสตร์
ปีการศึกษา 2536

ลายมือชื่อนิสิต ชุกรี อุทัยวดีน
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อนันตสิน เตชะกำพุช
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม —

C225360 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: PVDF / PYROELECTRIC POLYMER / PYROELECTRIC COEFFICIENT / INFRARED DETECTOR

CHOSRI UTAIWASIN : DEVELOPMENT OF POLYVINYLIDENE FLUORIDE AS PYROELECTRIC POLYMER AND ITS APPLICATION. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. ANUNTASIN TECHAGUMPUGH, Ph.D. 84 PP. ISBN 974-584-337-7



In this research work, a method for determining the pyroelectric coefficient of PVDF has been developed. A film completely covered with thin plastic was dipped in warm oil. The temperature increase (ΔT) of the film was measured by a thermistor which has an accuracy of about 0.1°C . The charge transferred between electrodes of the film (Q) has been determined using an electrometer. It was found that the relation between Q and ΔT is linear when $\Delta T \lesssim 4^\circ\text{C}$. The pyroelectric coefficients (p_3) of available PVDF films obtained from $Q/\Delta T$ are found to be between $0.34-1.91 \text{ nC/cm}^2\text{K}$. The plot between the pyroelectric (p_3) and piezoelectric coefficients (d_{31}) of each film tended to be a straight line, as was predicted by various theoretical models of piezo-pyroelectricity of PVDF films.

For the films of high p_3 , a temperature increase of 0.2°C in these films produced a voltage of about 1 Volt between their electrodes, which is enough to trigger many devices. From this principle various kinds of electronic switches and also highly sensitive infrared detectors have been developed.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....ฟิสิกส์
สาขาวิชา.....ฟิสิกส์
ปีการศึกษา..... 2536

ลายมือชื่อนิสิต..... ชัย คุ้มดี
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... Anuntasin
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... -



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพูน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาให้คำแนะนำและแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการวิจัยนี้ รวมทั้งช่วยตรวจแก้ข้อเขียนในวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาบางประการแก่ผู้วิจัย นอกจากนี้ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณ คุณอภิรัตน์ บุญเปี่ยม ผู้ให้คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งยังช่วยประกอบวงจรให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบคุณ คุณรสสุคนธ์ จารยะพันธ์ เพื่อนผู้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีไฟโรอิเล็กทริก	3
2.1 ทฤษฎีไฟโรอิเล็กทริกทั่วไป *	3
2.2 สภาพไฟโรอิเล็กทริกในสารพอลิเมอร์	5
2.2.1 วิธีวัดสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริก	5
2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริกทุติยภูมิ และสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก	7
2.2.3 สภาพไฟโรอิเล็กทริกเนื่องจากสภาพวิวิธพันธ์และประจุที่ฝังตัวใน พอลิเมอร์	8
2.3 ทฤษฎีไฟโรอิเล็กทริกในสารพอลิเมอร์อสัณฐาน	15
2.4 ทฤษฎีไฟโรอิเล็กทริกในสารพอลิเมอร์กึ่งผลึก	21
- แบบจำลองขั้วคู่เกร็งของบรอดเฮิร์ท	22
- แบบจำลองของวาคะ	23
2.5 ทฤษฎีไฟโรอิเล็กทริกของ PVDF	25
บทที่ 3 การพัฒนาแผ่นฟิล์ม PVDF และการวัดสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริก	32
3.1 การพัฒนาแผ่นฟิล์ม PVDF	32
3.2 ผลของการจัดขั้ว	39
3.3 การวัดสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริก	43
3.4 การวัดสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริกโดยวิธีประยุกต์	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การนำแผ่นฟิล์ม PVDF มาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์	69
4.1 สวิตช์สัมผัสแบบทำงานค้าง	70
4.2 สัญญาณกันขโมย	72
4.3 สวิตช์สัมผัสแบบปิด-เปิดได้	72
4.4 สวิตช์สัมผัสแบบทำงานชั่วขณะหนึ่ง	73
4.5 เครื่องวัดรังสีอินฟราเรด	74
เอกสารอ้างอิง	77
ภาคผนวก ก	79
ภาคผนวก ข	80
ภาคผนวก ค	81
ประวัติผู้เขียน	84



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1	แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์โพโรเล็กตริกของสารพอลิเมอร์ และสารอนินทรีย์ 2
ตารางที่ 2.5.1	แสดงค่าคงที่ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหา สัมประสิทธิ์โพโรเล็กตริกของ PVDF 30
ตารางที่ 2.5.2	แสดงสัมประสิทธิ์โพโรเล็กตริกเนื่องจากผลของเทอมต่าง ๆ 31
ตารางที่ 3.4.1	แสดงความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 53
ตารางที่ 3.4.2	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองของแผ่นฟิล์ม E_7 54
ตารางที่ 3.4.3	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองของแผ่นฟิล์ม E_8 55
ตารางที่ 3.4.4	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองของแผ่นฟิล์ม m_6 56
ตารางที่ 3.4.5	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองของแผ่นฟิล์ม k_{11} 57
ตารางที่ 3.4.6	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองของแผ่นฟิล์ม D_1 58
ตารางที่ 3.4.7	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองของแผ่นฟิล์ม D_8 58
ตารางที่ 3.4.8	แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์เพียโซ-โพโรเล็กตริกของ แผ่นฟิล์ม PVDF ต่าง ๆ กัน 67

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1.1	แสดงฮิสเตอร์ซีสของสารเฟอร์โรอิเล็กทริก 4
รูปที่ 2.2.1	แสดงประจุที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า 6
รูปที่ 2.2.2	แสดงประจุเหนี่ยวนำที่เกิดจากประจุ q ฝังตัวอยู่ในพอลิเมอร์ 8
รูปที่ 2.2.3	แสดงประจุภายในเนื้อสารพอลิเมอร์ PQRS 10
รูปที่ 2.2.4	แสดงฟิล์มที่อุณหภูมิ T_0 และ T 11
รูปที่ 2.2.5	แสดงการประกบกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน 15
รูปที่ 2.3.1	แสดงโมเมนต์ขั้วคู่ที่ฝังตัวอยู่ในเนื้อสาร 16
รูปที่ 2.3.2	แสดงการแกว่งของโมเมนต์ขั้วคู่และมุมออยเลอร์ 19
รูปที่ 2.4.1	แสดงลักษณะกิ่งผลึกของ PVDF ในแบบจำลองของวาดะ 23
รูปที่ 2.5.1	แสดงแผ่นผลึกของพอลิเมอร์กิ่งผลึก 25
รูปที่ 2.5.2	แสดงโมเมนต์ขั้วคู่และประจุอิสระบนแผ่นผลึก 26
รูปที่ 3.1.1	แผ่นภาพแสดงการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกแบบต่าง ๆ ของ PVDF 32
รูปที่ 3.1.2	แสดงการหล่อฟิล์มโดยใช้เครื่องสล็อต-ตาย 33
รูปที่ 3.1.3	แสดงค่าสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริกของพอลิเมอร์ PVDF ที่ผ่านการยัด Δ และที่ไม่ได้ผ่านการยัด O ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 34
รูปที่ 3.1.4	แสดงสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริกของ PVDF ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยสนามไฟฟ้า 5 kV, 4 kV, 3.5 kV, 2 kV 35
รูปที่ 3.1.5	แสดงลักษณะของเครื่องยัดฟิล์ม 37
รูปที่ 3.1.6	แสดงลักษณะของฟิล์มที่ทำขั้วไฟฟ้าเสร็จแล้ว 38
รูปที่ 3.1.7	แสดงการจัดขั้วให้แก่แผ่นฟิล์ม 39
รูปที่ 3.2.1	แสดงประจุที่วัดได้จาก PVDF ที่ผ่านการจัดขั้วด้วยสนามไฟฟ้า 41
รูปที่ 3.2.2	กราฟแสดงประจุที่ผันกลับได้ Q_3 กับสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้ว E_p^* ที่ $T_p = 110^\circ\text{C}$ และ 135°C , $t_p = 2$ นาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $4^\circ\text{C}/\text{นาที}$ 42
รูปที่ 3.3.1	กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ที่ความถี่ต่าง ๆ ของฟิล์ม PVDF ณ อุณหภูมิห้อง 44
รูปที่ 3.3.2	แสดงวงจรวัดสัญญาณเอาร์ทพุทของฟิล์ม PVDF ที่ได้รับคลื่นวิทยุ 46
รูปที่ 3.3.3ก	กราฟแสดงกระแสที่ได้จากพอลิเมอร์ที่ได้รับการเพิ่มอุณหภูมิด้วยฟังก์ชันรูปไซน์ 49

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.3.3ข	กราฟแสดงเฟสของกระแสและอุณหภูมิของพอลิเมอร์ที่ได้รับการเพิ่มอุณหภูมิด้วยฟังก์ชันรูปไซน์	50
รูปที่ 3.4.1	แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มที่อยู่ในถุงพลาสติก	52
รูปที่ 3.4.2	แสดงการจัดเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	52
รูปที่ 3.4.3	แสดงลักษณะไดโพลภายในแผ่นพอลิเมอร์และทิศทางการไหลของประจุเมื่อแผ่นฟิล์มได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น	59
รูปที่ 3.4.4	กราฟแสดงประจุที่วัดได้จากการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม E_7	60
รูปที่ 3.4.5	กราฟแสดงประจุที่วัดได้จากการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม E_8	61
รูปที่ 3.4.6	กราฟแสดงประจุที่วัดได้จากการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม m_6	62
รูปที่ 3.4.7	กราฟแสดงประจุที่วัดได้จากการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม k_{11}	63
รูปที่ 3.4.8	กราฟแสดงประจุที่วัดได้จากการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม D_1	64
รูปที่ 3.4.9	กราฟแสดงประจุที่วัดได้จากการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม D_8	65
รูปที่ 3.4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กตริก p และสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กตริก d_{31} ของแผ่นฟิล์มแต่ละแผ่นที่ได้จากการทดลอง	66
รูปที่ 4.1.1ก	สัญลักษณ์ของ SCR	69
รูปที่ 4.1.1ข	แสดงขาของออปแอมป์ TL 061	69
รูปที่ 4.1.2	แสดงวงจรสวิตช์สัมผัสแบบทำงานค้าง	70
รูปที่ 4.3.1	แสดงวงจรสวิตช์สัมผัสแบบปิด-เปิดได้	72
รูปที่ 4.4.1	แสดงวงจรสวิตช์สัมผัสแบบทำงานหนึ่งขณะหนึ่งโดยใช้ SCR	73
รูปที่ 4.4.2	แสดงวงจรสวิตช์สัมผัสแบบทำงานชั่วขณะหนึ่งโดยใช้ทรานซิสเตอร์	74
รูปที่ 4.5.1	แสดงวงจรเครื่องวัดรังสีอินฟราเรด	75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



คำอธิบายสัญลักษณ์

อักษรพิมพ์ใหญ่

- D = การกระจัดทางไฟฟ้า
 P = โพลาริเซชัน
 P_s = $P(E = 0, T = T_0)$ คือ สปอนเตเนียสโพลาริเซชัน
 P_r = $P(E = 0, T = T_0, X = 0)$ คือ เรซิวดวลโพลาริเซชัน
 P_{sc} = โพลาริเซชันของผลึก
 N = จำนวนโมเมนต์ขั้วคู่ในแผ่นฟิล์ม
 N' = N/v คือ จำนวนโมเมนต์ขั้วคู่ต่อ 1 หน่วยปริมาตร
 T = อุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม (เคลวิน)
 T_m = อุณหภูมิหลอมเหลว
 T_g = อุณหภูมิแก้ว
 T_c = อุณหภูมิคูรี
 T_p = อุณหภูมิที่ใช้ในการจัดขั้ว
 E = สนามไฟฟ้า
 E_p = สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้ว
 E_{loc} = สนามไฟฟ้าที่ผลึกในเนื้อสาร
 A = พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม
 V = ศักย์ไฟฟ้า
 S = ความเครียดเชิงปริมาตร ($\Delta v/v$)
 S^* = ความเครียดเชิงเส้น ($\Delta l/l_0$)
 C_{ij} = $\frac{\partial X_j}{\partial S_i}$ คือ สัมประสิทธิ์ความแข็ง
 C = ความจุไฟฟ้า

อักษรพิมพ์เล็ก

- p = สัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กตริก
 $p^{(1)}$ = สัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กตริกปฐมภูมิ
 $p^{(2)}$ = สัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กตริกทุติยภูมิ
 q = ประจุที่ตกค้างอยู่ในพอลิเมอร์
 d_{3j} = $\frac{1}{A} \frac{\partial Q_3}{\partial X_j}$ คือ สัมประสิทธิ์เพียสโซอิเล็กตริก
 v = ปริมาตรของแผ่นพอลิเมอร์
 v_c = ปริมาตรของผลึกที่อยู่ภายในพอลิเมอร์
 n = จำนวนโมเมนต์ขั้วคู่ในผลึก
 b = อัตราการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิให้แก่ฟิล์ม
 c = ความจุความร้อนจำเพาะ
 k_B = ค่านิจโบลต์ซมันน์
 l_s = ความหนาของแผ่นฟิล์ม
 l_c = ความยาวของผลึกโดยเฉลี่ย

อักษรกรีก

- μ_0 = โมเมนต์ขั้วคู่ในสูญญากาศ
 μ = โมเมนต์ขั้วคู่ต่อหน่วยในผลึก
 μ_d = โมเมนต์รวมในผลึกเนื่องจากโมเมนต์ขั้วคู่ μ
 μ_q = โมเมนต์รวมเนื่องจากประจุอิสระ $\pm q$ ในผลึก
 μ_c = โมเมนต์รวมของผลึกรูปทรงทั่วไป
 μ_s = โมเมนต์รวมของผลึกรูปร่างเป็นแผ่น
 M_s = โมเมนต์รวมของแผ่นพอลิเมอร์
 χ = สภาพซึมซับได้ของสาร (electric susceptibility)
 ϵ_0 = สภาพยอมของสูญญากาศ (permittivity)
 ϵ_s, ϵ = $(\chi + 1)\epsilon_0$ คือ สภาพยอมของสาร
 ϵ' = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสาร
 ϵ'_∞ = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่สูง ๆ
 ϵ_a = สภาพยอมของเฟสอสัณฐาน
 ϵ_c = สภาพยอมของผลึก
 ϵ'_c = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของผลึก

- ϵ'_L = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในสถานะของเหลว
 λ = $-\frac{\partial e}{\partial T}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของสภาพยอมต่ออุณหภูมิ
 β_i^* = $\frac{\partial S_i^*}{\partial T}$ คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น
 β = $\frac{\partial S}{\partial T}$ คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร
 β_c = $\frac{\partial \ln v_c}{\partial T}$ คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของผลึก
 α = สภาพโพลาริเซชัน
 ρ_t = ความหนาแน่นของประจุจริงในเนื้อสาร
 ρ = ความหนาแน่นของประจุรวมในเนื้อสาร
 Φ = $\frac{Nv_c}{A\epsilon_0}$ คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของผลึก/ปริมาตรของแผ่นฟิล์ม
 τ_m = ค่าคงที่ทางเวลาของแมกซ์เวลล์
 τ = ค่าคงที่ทางเวลาของกระแส TSC
 Γ = Grüneisen constant

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย