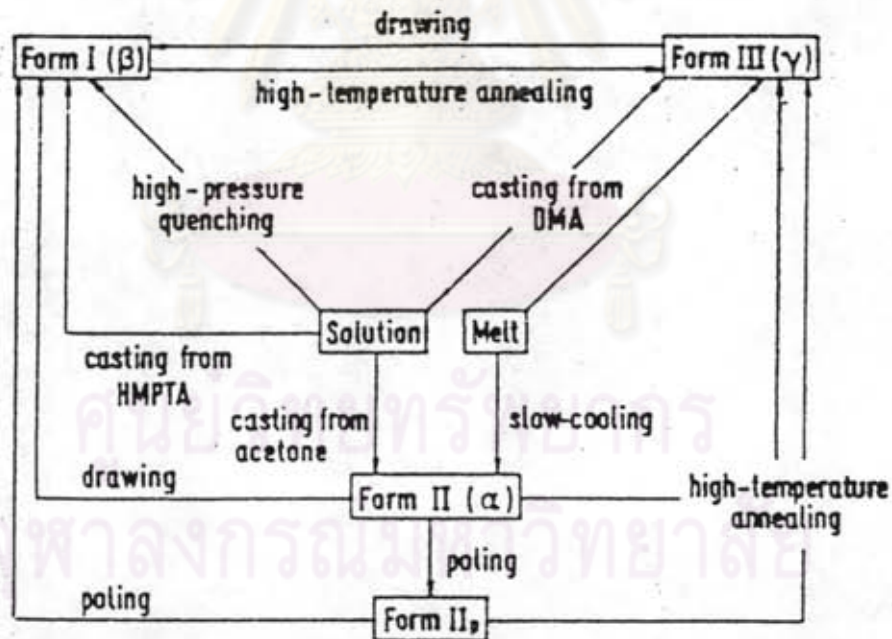


การพัฒนาและการวัดสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กตริก

3.1 การพัฒนาแผ่นฟิล์ม

สารพอลิเมอร์ที่นำมาใช้เป็นสารโพโรอิเล็กตริกคือ พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึก ประกอบด้วยโมโนเมอร์ CF_2CH_2 ต่อกันเป็นโซ่ยาว

PVDF มีโครงสร้างผลึก 4 แบบ คือ แบบ I (β - phase), แบบ II (α - phase), แบบ III (Γ - phase), และแบบ II_β (α_β - phase) โครงสร้างผลึกแบบที่ I, III และ II_β ผลึกแต่ละหน่วยจะมีโมเมนต์ขั้วคู่สุทธิและแบบที่ I จะมีขั้วคู่สุทธิสูงที่สุด ส่วนแบบที่ II จะไม่มีขั้วคู่สุทธิ [ภาคผนวก ข] นับเป็นโครงสร้างผลึกแบบไม่มีขั้ว โครงสร้างผลึกแต่ละแบบสามารถเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างกันได้ โดยการยืด การจัดขั้ว การอบที่อุณหภูมิสูง และการหล่อฟิล์มในสารละลายต่างชนิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1.1



รูปที่ 3.1.1 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกแบบต่าง ๆ ของ PVDF [Sessler, 1981]

แผ่นฟิล์ม PVDF ที่ผลิตได้ในตอนแรกไม่สามารถแสดงสภาพโพโรอิเล็กตริกได้ จะต้องผ่านกระบวนการบางอย่างเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างผลึกแบบไม่มีขั้วหรือมีขั้วน้อยให้เป็นโครงสร้างผลึกแบบที่มีขั้วสูงสุด คือ โครงสร้างผลึกแบบเบตา (β - phase) หลังจากนั้นจึงจัดขั้วให้โมเมนต์ขั้วคู่สุทธิของผลึกเรียงตัวในทิศทางเดียวกันเพื่อให้ได้โพลาไรเซชันสุทธิ จากแผนภาพ 3.1.1 จะเห็นว่าถ้านำแผ่นฟิล์มมายืด และจัดขั้ว

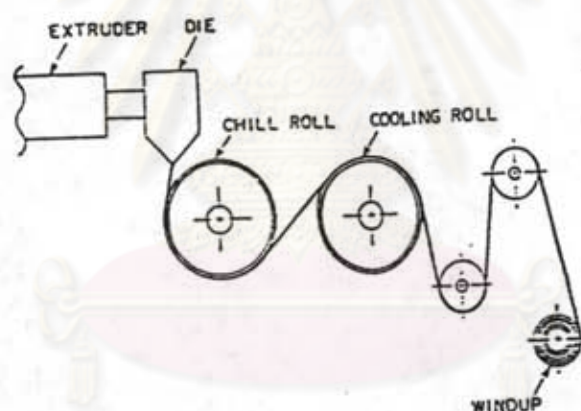
โครงสร้างทั้ง 3 แบบ ก็จะเปลี่ยนเป็นแบบ β ได้ ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทำฟิล์ม การยืด และการจัดชั้นเท่านั้น ส่วนวิธีการอื่น ๆ จะไม่กล่าวถึง

การเอ็กซ์ทรูดฟิล์ม (Film extrusion)

เป็นขั้นแรกของการทำฟิล์ม สารเริ่มต้นที่ใช้อยู่ในรูปเรซิน (เม็ดพลาสติก) จะถูกส่งเข้าไปยังเครื่องหลอม (extruder) สกรูจะหมุนและส่งเม็ดพลาสติกเข้าไปยังท่อร้อน ที่บริเวณตอนปลายของสกรู จะได้พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวทั้งหมด จากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังดาย (die)

การคาสต์ฟิล์ม (Cast film)

การหล่อฟิล์ม คือ การทำให้พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวเย็นตัวลงกลายเป็นแผ่นฟิล์ม การหล่อฟิล์ม มีหลายวิธี เช่น การหล่อโดยสล็อต-ดาย (Slot-die) การเป่า (Blow) การหล่อในสารละลาย (Solvent Casting) ในที่นี้จะกล่าวถึงการหล่อโดยสล็อต-ดาย ดังแสดงในรูปที่ 3.1.2



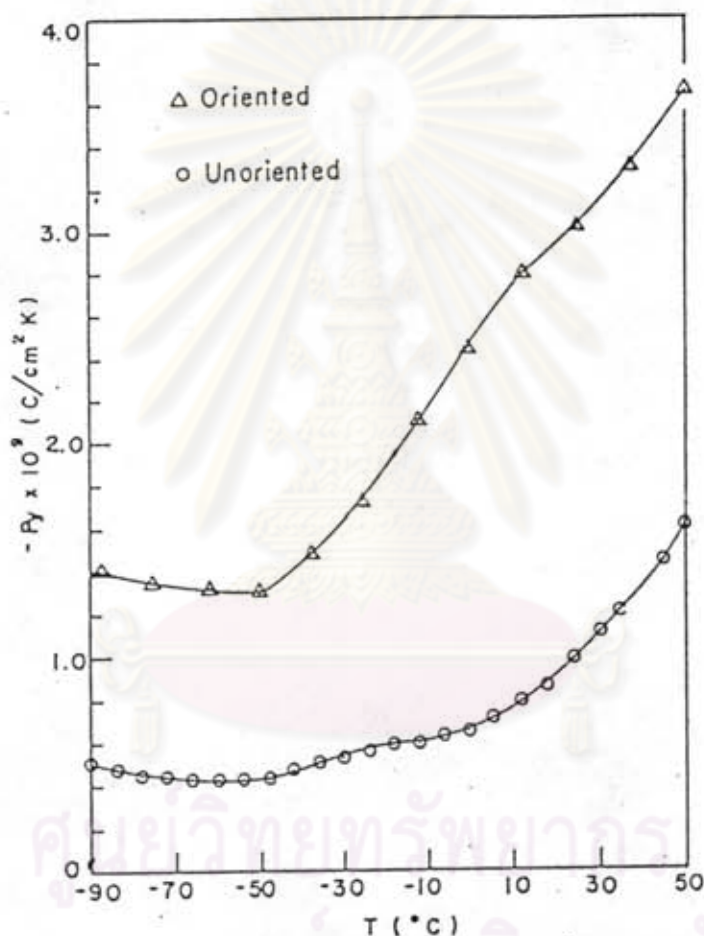
รูปที่ 3.1.2 แสดงการหล่อฟิล์มโดยใช้เครื่องสล็อต-ดาย

พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวจะถูกส่งจากดายมายังลูกกลิ้งเย็น ทำให้พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวถูกรีดเป็นแผ่นและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว จากนั้นแผ่นพอลิเมอร์จะถูกส่งต่อไปยังลูกกลิ้งถัดไปเพื่อรีดฟิล์มให้ได้ขนาด ความตึงเครียด อัตราเร็วของลูกกลิ้งต้องมีความสัมพันธ์กันทุก ๆ ลูกกลิ้ง เพราะมีผลโดยตรงต่อการจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์ในแผ่นฟิล์มนั้น

การยืดแผ่นฟิล์ม (Orientation)

แผ่นฟิล์ม PVDF หลังจากถูกรีดแล้ว จะเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก ประกอบด้วยผลึกปนอยู่ในส่วนอสัณฐาน สายโซ่โมเลกุลวางตัวอย่างไร้ระเบียบ โครงสร้างผลึกเป็นแบบ α ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบไม่มีขั้ว สารพอลิเมอร์ที่ได้จึงไม่มีสภาพไพโรอิเล็กตริก จำเป็นต้องผ่านกระบวนการยืดและการจัดชั้น

การยัดแผ่นฟิล์มเพื่อให้สายโซ่โมเลกุลเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ เนื่องจากพันธะภายในสายโซ่โมเลกุลเป็นพันธะโคเวเลนต์ และระหว่างสายโซ่โมเลกุลเป็นพันธะแวนเดอร์วาลส์ เมื่อแผ่นฟิล์มได้รับแรงดึงจึงเกิดการเรียงตัวให้สายโซ่โมเลกุลอยู่ในแนวเดียวกับแรงที่ดึง นอกจากนี้การยัดแผ่นฟิล์มยังทำให้โครงสร้างเปลี่ยนจาก $\alpha \rightarrow \beta$ การยัดแผ่นฟิล์มนับเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการพัฒนาแผ่นฟิล์ม จากการทดลองพบว่า แผ่นฟิล์ม PVDF ที่จัดซั้วโดยไม่ได้ผ่านการยัดจะมีสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กตริกต่ำมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.1.3



รูปที่ 3.1.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กตริกของพอลิเมอร์ PVDF ที่ผ่านการยัด Δ และที่ไม่ได้ผ่านการยัด \circ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ [Chung et al., 1982]

จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิขณะทำการยัดมีผลต่อคุณสมบัติของแผ่นฟิล์ม พอลิเมอร์ กึ่งผลึกจะถูกดึงที่อุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิแก้ว (T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) การจัดเรียงตัวโมเลกุลพอลิเมอร์จะดีเพียงใดขึ้นกับอุณหภูมิขณะยัด อัตราเร็วในการยัด และ อัตราส่วนความยาวที่ยัด การยัดในแนวเดียวนี้อาจมีหลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 2 วิธี

1. การยืดในเตาอบ (Oven Stretching)

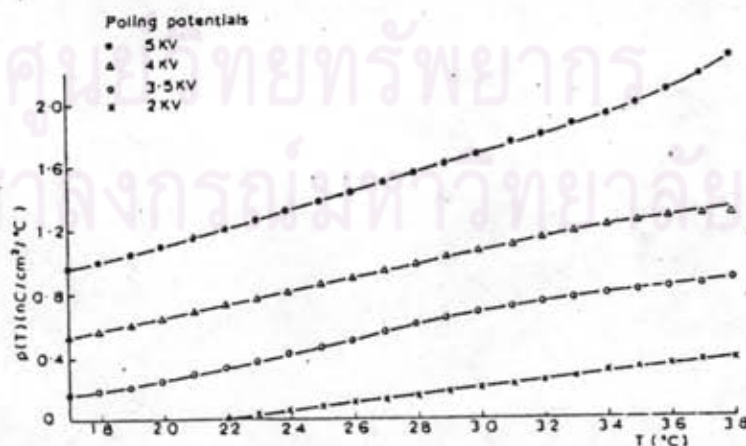
โดยการยืดแผ่นฟิล์มไว้ในเตาอบทั้ง 2 ข้างแล้วทำการยืดพร้อมกับควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมไว้ จากการทดลองพบว่า ถ้าทำการยืดที่อุณหภูมิ 80°C อัตราส่วนการยืดเป็น 3.5 เท่าของความยาวเดิม โครงผลึกแบบ α จะเปลี่ยนเป็นแบบ β เกือบ 100% และทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นด้วย

2. การยืดโดยลูกกลิ้ง (Roll Drafting)

อุปกรณ์ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ชุด ชุดแรกจะหมุนช้ากว่าชุดที่สอง แผ่นฟิล์มที่ถูกรีดแล้วจะถูกส่งมายังลูกกลิ้งชุดแรกก่อน แล้วจึงผ่านไปยังลูกกลิ้งชุดที่สอง ขณะเดียวกันก็ให้ความร้อนแก่แผ่นฟิล์มโดยใช้อินฟราเรด เพื่อให้ฟิล์มถูกรีดง่ายขึ้น ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถยืดฟิล์มออกได้ถึง 4.5 เท่าของความยาวเดิม โดยที่ความหนาของฟิล์มเปลี่ยนไปเล็กน้อย และแผ่นฟิล์มมีความสม่ำเสมอ อุณหภูมิขณะยืดจะอยู่ในช่วง $60^{\circ}\text{C} - 140^{\circ}\text{C}$

การจัดขั้ว (Polarization)

แม้ว่าแผ่นฟิล์มที่ผ่านการยืดแล้วจะมีโครงสร้างแบบ β และมีการจัดเรียงโมเลกุลที่เป็นระเบียบมากขึ้นแล้ว แต่ทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ในผลึกยังกระจายตัวในทุกทิศทางในทิศที่ตั้งฉากกับสายโซ่ แผ่นฟิล์มจึงไม่มีโพลาไรเซชันสุทธิ ดังนั้นจึงต้องมีการโพลาไรซ์โมเมนต์ขั้วคู่ให้ชี้ไปในทิศทางเดียวกัน โดยการจัดขั้วด้วยสนามไฟฟ้า [Wang et al., 1988] สภาพโพโรอิเล็กตริกขึ้นกับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้ว ดังแสดงในรูป 3.1.4



รูปที่ 3.1.4 แสดงสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กตริกของ PVDF ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยสนามไฟฟ้า 5 kV, 4 kV, 3.5 kV, 2 kV [Das-Gupta and Doughty, 1980]

การจัดขั้วมีหลายวิธีในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 3 วิธี

1. การจัดขั้วโดยให้ความร้อน (Thermal Poling)

โดยการให้สนามไฟฟ้ากระแสตรง ความเข้มประมาณ 30-120 MV/m แก่แผ่นฟิล์มในทิศเดียวกับความหนาของแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิประมาณ 80°C - 130°C เป็นเวลา 15-20 นาที หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงเหลือประมาณ 10°C - 40°C สุดท้ายนำสนามไฟฟ้าออก แล้วลัดวงจรระหว่างสองด้านของแผ่นฟิล์มทิ้งไว้ประมาณ 1-24 ชั่วโมง

ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้วมีหลายแบบ เช่น ขั้วไฟฟ้าโลหะที่ฉาบลงบนแผ่นฟิล์มในสุญญากาศ, ขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการระบายนสารละลายโลหะลงบนแผ่นฟิล์ม, ขั้วโลหะที่เป็นของไหลนำไฟฟ้า เช่น โปรท สารละลายไอออนิก หรือใช้โลหะแผ่นบางวางทับสองด้านของแผ่นฟิล์ม เป็นต้น

2. การจัดขั้วแบบโคโรนา (Corona Poling)

เป็นการจัดขั้วโดยการคายประจุโคโรนาที่ศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ ใช้เวลาในการจัดขั้วน้อยในหน่วยของวินาทีเท่านั้น แผ่นฟิล์มที่ใช้จัดขั้วจะถูกฉาบด้วยขั้วไฟฟ้าโลหะเพียงด้านเดียว อีกด้านหนึ่งจะมีขั้วโลหะมีลักษณะเป็นเข็มเลื่อนไปมาได้ เข็มนี้อยู่ห่างจากฟิล์ม 2-3 cm พบว่าถ้าจัดขั้วที่อุณหภูมิสูง แผ่นฟิล์มที่ได้จะมีเสถียรภาพดีขึ้น

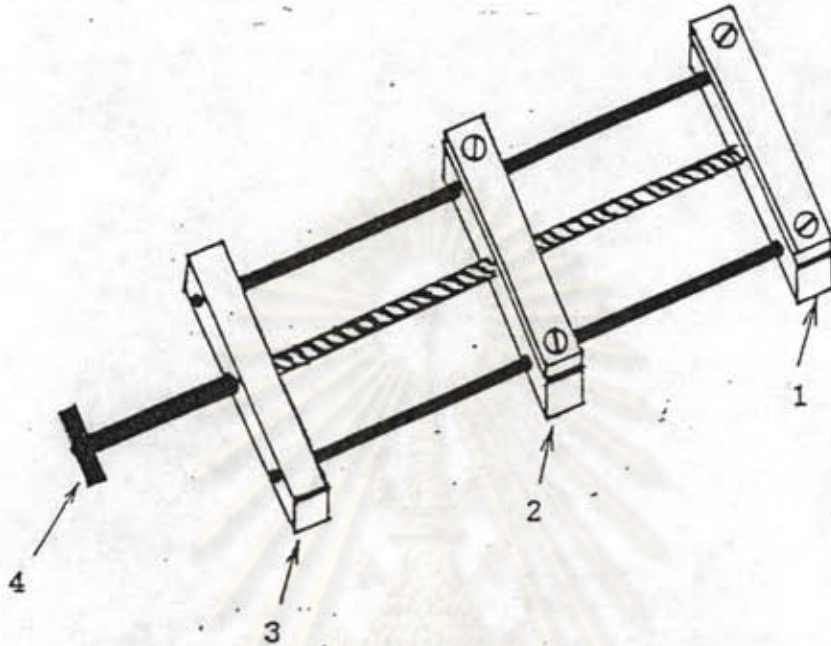
3. การจัดขั้วโดยใช้สนามไฟฟ้าความเข้มสูง ณ อุณหภูมิห้อง

การจัดขั้วไฟฟ้าวิธีนี้ใช้สนามไฟฟ้าความเข้ม 100 - 800 MV/m ที่อุณหภูมิห้อง โดยให้สนามไฟฟ้าแก่ฟิล์มในช่วงเวลาสั้นมากน้อยกว่า 1 วินาที เมื่อแผ่นฟิล์มได้รับสนามไฟฟ้า จะทำให้โมเมนต์ขั้วคู่ในผลึกจัดเรียงตัวในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้าทันที

ในประเทศไทยได้เคยมีผู้ทำการวิจัย วิธีการพัฒนาแผ่นฟิล์ม PVDF ด้วยเครื่องมือที่ไม่ยุ่งยาก ผลที่ได้พบว่าแผ่นฟิล์มที่พัฒนาได้มีคุณสมบัติทัดเทียมกับฟิล์มมาตรฐาน สามารถนำไปประยุกต์ทำเครื่องมือต่าง ๆ ได้ ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการเหล่านั้นพอสังเขป รายละเอียดศึกษาได้จาก [วัฒนา เชนะ, 2536] ขั้นตอนการพัฒนาแผ่นฟิล์มแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือ การยัด การอบ การทำขั้วไฟฟ้า และการจัดขั้ว รายละเอียดจะกล่าวถึงต่อไปนี้



ขั้นตอนการยัด



รูปที่ 3.1.5 แสดงลักษณะของเครื่องยัด

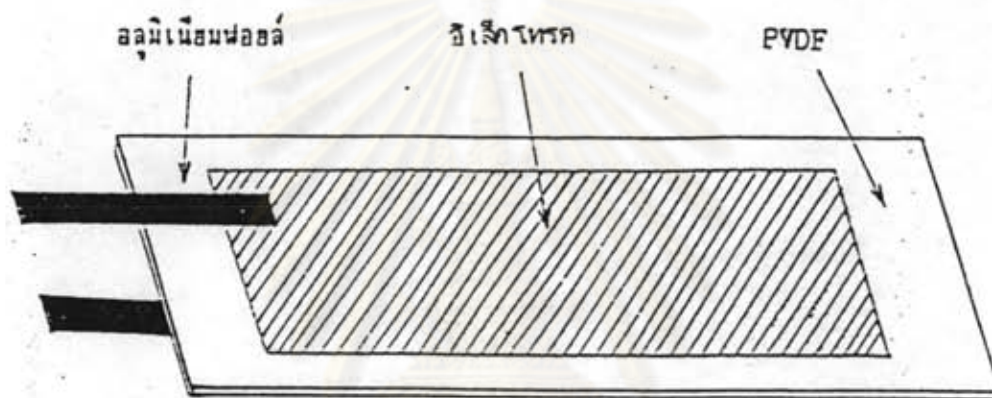
หนีบแผ่นฟิล์มเข้ากับเครื่องยัด ดังแสดงในรูป 3.1.5 แล้วทำการยัดแผ่นฟิล์มในน้ำร้อน อุณหภูมิ $70^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$ เพราะที่อุณหภูมิห้องแผ่นฟิล์มมีความแข็งมาก การยัดจะทำให้แผ่นฟิล์ม ฉีกขาดได้ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 80°C มาก แผ่นฟิล์มก็จะยุบ อัตราส่วนการยัดใช้ 4-6 เท่าของความยาวเดิม

ขั้นตอนการอบ

เนื่องจากแผ่นฟิล์มที่ยัดแล้วมีความไม่สม่ำเสมอของเนื้อสาร เช่น มีความเครียดเฉพาะแห่ง ในแผ่นฟิล์ม และผลึกบางส่วนกระจายไม่สม่ำเสมอ การอบจะทำให้ผลึกและสายโซ่โมเลกุลเกิดการสั่นไหว ทำให้ผลึกเลื่อนตำแหน่งไป ผลึกจะกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอมากขึ้น ความเครียดเฉพาะแห่งลดลง ข้อบกพร่องที่เกิดในขั้นตอนในการยัดลดลง ดังนั้นการอบต้องทำในขณะที่แผ่นฟิล์มยังขึงตึงอยู่กับเครื่อง ยัด อุณหภูมิที่ใช้อบต้องสูงกว่าอุณหภูมิขณะยัด แต่ไม่สูงจนเกินไป ซึ่งในการวิจัยนั้นใช้อุณหภูมิ $100^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$ ถ้าอุณหภูมิที่ใช้อบสูงเกินไป อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากเฟส β ไปเป็นเฟส α ได้ ช่วงเวลาในการอบไม่ได้กำหนดแน่นอน เช่น อาจอยู่ในช่วง 3-5 นาที

การทำขั้วไฟฟ้า

แผ่นฟิล์มที่ผ่านการยึดและอบแล้ว จะต้องนำไปจัดขั้วเพื่อให้ทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ในแผ่นฟิล์มเป็นระเบียบมากขึ้น เพื่อความสะดวกในการจัดขั้วและเตรียมแผ่นฟิล์มสำหรับใช้งานต่อไป จึงต้องทำขั้วไฟฟ้าให้แก่แผ่นฟิล์ม ด้วยการฉาบผิวทั้งสองด้านของฟิล์มด้วยโลหะตัวนำ โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศ ซึ่งทำในครอบแก้ว (coating unit) หลักการทำงานคือ สูบอากาศออกจากครอบแก้วเพื่อให้เป็นสุญญากาศ จากนั้นให้ความร้อนแก่อลูมิเนียมด้วยอุณหภูมิสูงมาก จนกระทั่งหลอมเหลวและระเหยเป็นไอไปฉาบบนผิวฟิล์ม โดยเหลือพื้นที่รอบ ๆ แผ่นฟิล์มไว้เพื่อป้องกันการลัดวงจรขณะใช้งาน ดังแสดงในรูป 3.1.6 นอกจากนี้ในการฉาบต้องให้ความหนาของอลูมิเนียมพอเหมาะ



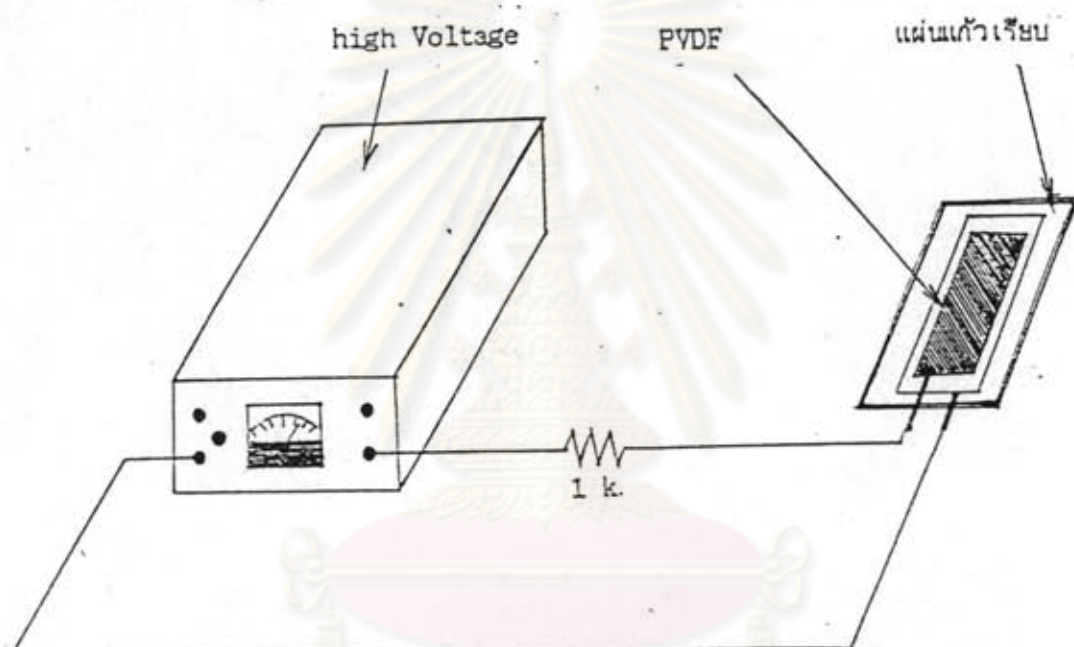
รูปที่ 3.1.6 แสดงลักษณะของฟิล์มที่ทำขั้วไฟฟ้าเสร็จแล้ว

ถ้าหากฉาบอลูมิเนียมหนาเกินไปจะทำให้แผ่นฟิล์มขาดความยืดหยุ่น แต่ถ้าฉาบมากเกินไปจะทำให้การนำไฟฟ้าไม่ดี หลังจากที่ได้ฉาบอลูมิเนียมลงบนผิวฟิล์มทั้งสองด้านแล้ว จะต้องนำแผ่นฟิล์มไปติดขั้วไฟฟ้า โดยติดแผ่นอลูมิเนียมที่ตัดเป็นเส้นเข้ากับแผ่น ฟิล์มทั้งสองด้านโดยใช้ซิลเวอร์เพส (silver paste) ทำหน้าที่เป็นกาวโลหะตัวนำ เส้นอลูมิเนียมจะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าที่ต่อออกมาจากขั้วไฟฟ้าของฟิล์มอีกที จากนั้นแผ่นฟิล์มก็จะมีสภาพพร้อมที่จะนำไปจัดขั้วไฟฟ้าได้

การจัดขั้วไฟฟ้า

ถึงแม้แผ่นฟิล์มที่ผ่านกระบวนการยึดแล้วจะมีโครงสร้างแบบ β ซึ่งมีสภาพขั้วคู่สูงสุด แต่ผลึกมีทิศของโมเมนต์ขั้วคู่อย่างสุ่ม จึงทำให้โพลาริเซชันรวมเป็นศูนย์ จำเป็นต้องผ่านการจัดขั้ว โดยการผ่านสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเข้าไปในเนื้อของฟิล์ม โมเมนต์ขั้วคู่เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าก็จะถูกแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ากระทำให้ชี้ไปในทิศของสนาม แผ่นฟิล์มจึงมีโพลาริเซชันไม่เป็นศูนย์ ซึ่งมีวิธีการจัดขั้วดังนี้

จัดวางแผ่นฟิล์ม PVDF ให้อนราบบนแผ่นแก้วเรียบ พยายามจัดวางให้แนบสนิทกับแผ่นแก้วให้มากที่สุด ต่อขั้วทั้งสองของฟิล์มเข้ากับเครื่องกำเนิดความต่างศักย์โวลต์สูง โดยมีความต้านทาน $1\text{ k}\Omega$ ต่ออนุกรมกับฟิล์ม ดังแสดงในรูป 3.1.7 เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดความต่างศักย์ ในกรณีที่เกิดการสปากขึ้นบนแผ่นฟิล์ม เพราะขณะเกิดการสปากจะมีกระแสไฟฟ้าสูงมาก เปิดสวิทซ์เครื่องกำเนิดความต่างศักย์โวลต์สูง ค่อย ๆ เพิ่มความต่างศักย์จนถึงค่าที่ต้องการ (ที่อุณหภูมิห้อง) สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้ว E_p ควรมีค่าน้อยกว่า 80 MV/m ทั้งค้างไว้ประมาณ 20 นาที แล้วลดความต่างศักย์ลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นลัดวงจรทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1.7 แสดงการจัดขั้วให้แก่แผ่นฟิล์ม

ในการจัดขั้วที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง เมื่อเพิ่มความต่างศักย์จนถึงค่าที่ต้องการทั้งค้างไว้ประมาณ 20 นาที แล้วลดอุณหภูมิลงในขณะที่ยังมีสนามไฟฟ้าอยู่ หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงให้เท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นลดความต่างศักย์ลงเป็นศูนย์ ลัดวงจรทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง ตัวแปรในการจัด ขั้วต่าง ๆ ที่มีผลต่อสภาพโพโรอิเล็กทริกจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.2 ผลของการจัดขั้ว

กระบวนการในการจัดขั้วที่กล่าวมาแล้วโดยให้สนามไฟฟ้าแรงสูงที่อุณหภูมิสูงภายในช่วงเวลาพอเหมาะ จากนั้นลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้องก่อนที่จะนำสนามไฟฟ้าออก เป็นวิธีการในการผลิตแท่งไฟฟ้า (thermoelectret) ไดโพลถาวรซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (dipole orientation) จะถูกแช่

แข็งค้างอยู่ ภายในแท่งไฟฟ้า นั้น และเหนี่ยวนำไดโพลข้างเคียงทำให้เกิดโพลาริเซชันจากการเหนี่ยวนำ (induced polarization)

เมื่อลัดวงจรระหว่างขั้วทั้งสองของสารไพโรอิเล็กทริกจะเกิดกระแส 2 ส่วนคือ กระแสไพโรอิเล็กทริก ซึ่งผันกลับได้ และกระแสที่มีอยู่ในแท่งไฟฟ้าทั่ว ๆ ไป เรียกกระแส TSC เป็นกระแสที่ผันกลับไม่ได้ (Thermally stimulated current) เกิดจากการหันเหทิศทางของไดโพลขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนไป [Martin, 1971] กระแส TSC คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันถาวร P ซึ่งจะลดลงในเทอมค่าคงที่ทางเวลา τ โดย

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} \quad (3.2.1)$$

โดยโพลาริเซชันเริ่มต้น P_0 หาได้จากอุณหภูมิขณะจัดขั้ว T_p และสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้ว

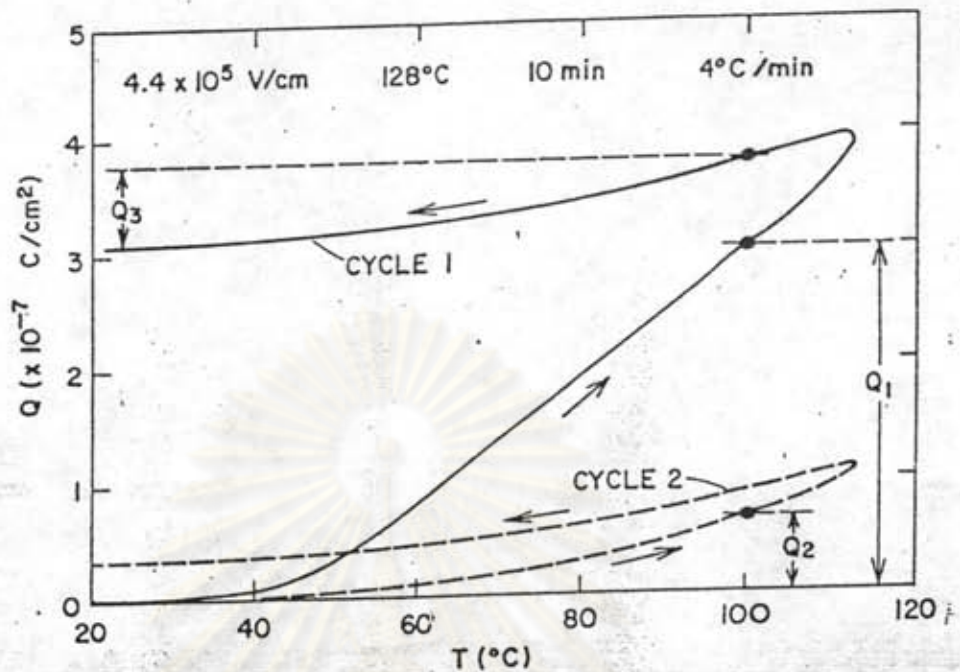
$$P_0 = \frac{N'\mu^2 E_p}{3k_B T_p}$$

การหันเหทิศทางของไดโพลเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของประจุจากตำแหน่งสมดุลงหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง โดยประจุจะต้องกระโดดผ่านกำแพงศักย์ ξ (potential barrier) ความน่าจะเป็นในการที่ประจุจะกระโดดต่อ 1 หน่วยเวลา แปรผันตรงกับ $\exp(-\xi/k_B T)$ ค่าคงที่ทางเวลา (τ) คือค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการกระโดดหรือส่วนกลับของความน่าจะเป็น ดังนั้น

$$\tau = \tau_0 \exp(\xi/k_B T) \quad (3.2.2)$$

โดย τ_0 คือ ค่าคงที่ ; k_B คือ ค่านิจโบลซมันน์

โพลาริเซชัน P และค่าคงที่ทางเวลา τ ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป สารไพโรอิเล็กทริกจะปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลใหม่ สารที่มีค่าคงที่ทางเวลามากจะต้องใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุลนานกว่าสารที่มีค่าคงที่ทางเวลาน้อย พบว่าในพอลิเมอร์หลาย ๆ ชนิดมีค่าคงที่ทางเวลาสูงมาก (หลายวัน) [Creswell, 1972] ทำให้กระแส TSC ผันกลับไม่ได้ กระแส TSC จะปรากฏในรอบแรกของการเพิ่มอุณหภูมิเท่านั้น ดังแสดงในรูป 3.2.1 ค่าคงที่ทางเวลาของกระแสไพโรอิเล็กทริกมีค่าต่ำในหน่วยมิลลิวินาทีเท่านั้น กระแสไพโรอิเล็กทริกจึงผันกลับได้และเกิดขึ้นทันทีที่สารได้รับการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.2.1 แสดงประจุที่วัดได้จาก PVDF ที่ผ่านการจัดขั้วด้วยสนามไฟฟ้า $E_p = 4.4 \times 10^5$ V/cm, $T_p = 128^\circ\text{C}$, $t_p = 10$ นาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $4^\circ\text{C}/\text{min}$, cycle 1, 2 คือประจุที่วัดได้ในรอบที่ 1, 2 ของการเพิ่มอุณหภูมิ [Creswell et al., 1972]

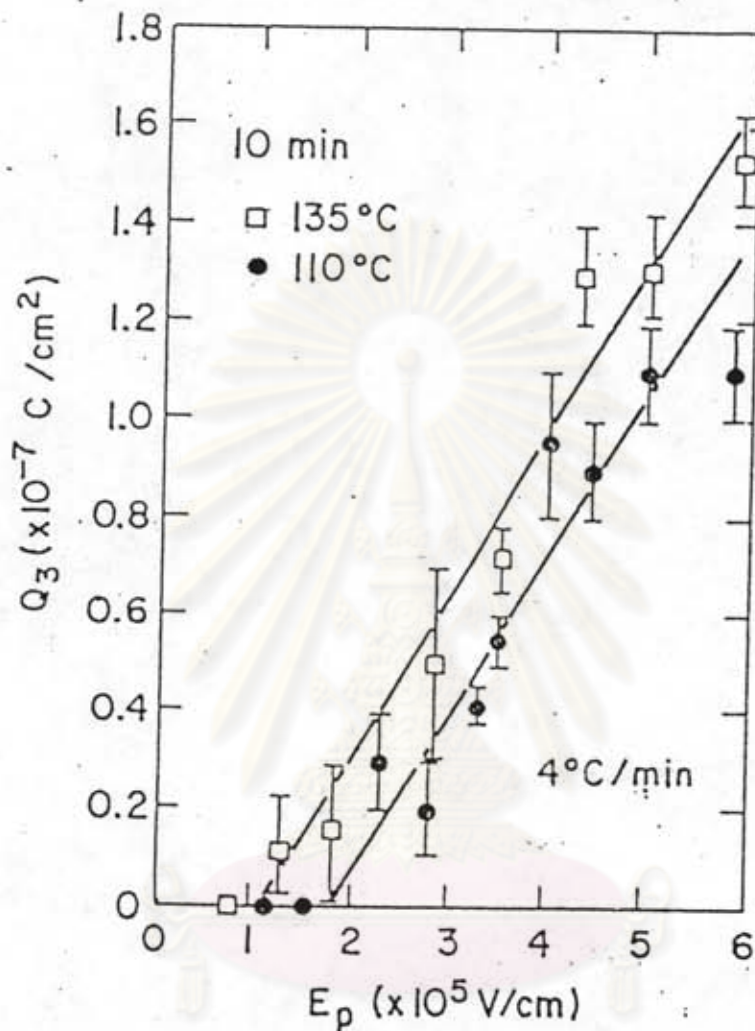
Q_1, Q_2 คือ ประจุที่เหลือในวงจรเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจากอุณหภูมิในห้องถึง 100°C ในรอบแรกและรอบที่ 2 ตามลำดับ

Q_3 คือ ประจุที่เหลือในวงจรเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 100°C ถึงอุณหภูมิห้องในรอบแรก

T_p, E_p, t_p คือ อุณหภูมิ สนามไฟฟ้า และช่วงเวลาที่ใช้ในการจัดขั้ว

ดังนั้น $Q_1 - Q_3$ คือ ประจุที่หายไปในรอบแรก ซึ่งเป็นประจุ TSC Q_2 และ Q_3 มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับแผ่นฟิล์มที่มีตัวแปรในการจัดขั้วเกินค่าขีดเริ่ม ซึ่งประจุส่วนนี้คือประจุที่ผันกลับได้เป็นผลให้เกิดกระแสไพโรอิเล็กตริกนั่นเอง

กระแสไพโรอิเล็กตริกจะเกิดขึ้นเมื่อตัวแปรที่ใช้ในการจัดขั้วเกินค่าขีดเริ่ม [Creswell et al., 1972] นั่นคืออุณหภูมิที่ใช้ในการจัดขั้วต้องมีค่าเกินอุณหภูมิขีดเริ่ม T_p^* สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้วต้องมีค่าเกินสนามไฟฟ้าขีดเริ่ม E_p^* โดย E_p^* ขึ้นกับ T_p^* ดังแสดงในรูปที่ 3.2.2 และ T_p^* ขึ้นกับ E_p เช่นที่ $E_p = 40$ MV/m, $T_p^* = 60^\circ\text{C}$



รูปที่ 3.2.2 แสดงประจุที่ผันกลับได้ Q_3 กับสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดหัว E_p^* ที่ $T_p = 110^\circ\text{C}$ และ 135°C , $t_p = 10$ นาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $4^\circ\text{C}/\text{นาที}$ [Creswell et al., 1972]

สารไพโรอิเล็กทริกจะหมดสภาพการเป็นไพโรอิเล็กทริก ถ้าได้รับการเพิ่มอุณหภูมิสูงเกินกว่าอุณหภูมิขณะจัดหัว T_p หรือลดอุณหภูมิลงโดยไม่มีสนามไฟฟ้า นอกจากนี้อุณหภูมิของสารไม่ควรเกินอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) สำหรับ PVDF มีค่าประมาณ 120°C โดยทั่วไปการเก็บรักษาแผ่น PVDF ควรเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60°C มิฉะนั้นสมบัติความเป็นไพโรอิเล็กทริกจะเสื่อมลง

แผ่นพอลิเมอร์ที่ผ่านขั้นตอนต่าง ๆ ที่กล่าวในหัวข้อ 3.1 สามารถนำไปใช้งานโดยอาศัยสมบัติที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แผ่นฟิล์มแต่ละแผ่นจะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแตกต่างกันไป ขึ้นกับค่าคงที่สัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก p แผ่นฟิล์มที่มีสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกสูง

จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี สามารถให้สัญญาณออกไปกระตุ้นวงจรที่ต่ออยู่ให้ทำงานได้ การหาสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริกมีหลายวิธี ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.3 การวัดสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริก

แผ่นฟิล์มที่ผ่านกระบวนการผลิตจากวิธีที่กล่าวมาข้างต้น จะมีสภาพโพโรอิเล็กทริกสูง เนื่องจากมีโมเมนต์ขั้วคู่เรียงอยู่ในทิศทางเดียวกันมากขึ้น จึงมีโพลาไรเซชันสุทธิสูงกว่าเดิมทั้งนี้ขึ้นกับวิธีการผลิต ในหัวข้อ 2.5 แสดงถึงโพลาไรเซชันสุทธิของแผ่นฟิล์มในเทอมของตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของแผ่นฟิล์มเปลี่ยนแปลงจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชัน โดยการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนไปคือ สัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริกซึ่งเป็นค่าคงที่สำหรับแผ่นฟิล์มหนึ่ง ๆ แผ่นฟิล์มที่มีสภาพโพโรอิเล็กทริกสูงมากสามารถนำไปใช้งานร่วมในวงจรอื่นได้ดี คุณภาพของแผ่นฟิล์มจึงวัดจากค่าคงที่นี้ การหาสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริกอาศัยหลักการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราคงที่ แล้ววัดกระแสไฟฟ้าได้จากแผ่นฟิล์ม หรือการวัดการเปลี่ยนแปลงของโพลาไรเซชันเมื่ออุณหภูมิของฟิล์มเปลี่ยนไป ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดแบบแรก โดยจะกล่าวถึงวิธีที่นิยมใช้เพียง 4 วิธี พอสังเขป

1) Electrical heating

เป็นวิธีการที่ใช้กันโดยปกติทั่วไป [Sessler, 1981] แผ่นฟิล์มจะถูกวางภายในตู้ให้ความ

ร้อน (electrical heater) ซึ่งเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราคงที่ $b = \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)$ มีแผ่นควบคุมความร้อน (Cryostat) เป็นตัวควบคุมไม่ให้อุณหภูมิเกินค่าที่ตั้งไว้ ป้องกันความเสียหายที่เกิดแก่แผ่นฟิล์ม กระแสไฟฟ้า I ที่ วัดได้ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริก p คือ

$$p = \frac{I}{bA} \quad (3.3.1)$$

วิธีนี้อาจให้ b เป็นอัตราการลดอุณหภูมิก็ได้

2) Optical heating [Sessler, 1981]

เป็นการทำให้แผ่นพอลิเมอร์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยใช้ลำแสงเลเซอร์ที่มีลักษณะเป็นพัลส์ (Chopped laser beam) ความถี่ประมาณ 5-80 Hz ยิ่งไปที่แผ่นฟิล์ม ถ้า W' คือ กำลังความร้อนที่แผ่นฟิล์มได้รับจากแสงเลเซอร์ c คือ ความจุความร้อนของแผ่นพอลิเมอร์ (heat capacity) อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $b = \frac{W'}{c}$ เมื่อวัดกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร สามารถหาสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริกได้จาก

$$p = \frac{c}{A} \frac{I}{W} \quad (3.3.2)$$

กระแสที่วัดจากทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมา จะต้องเป็นกระแสไฟโรอิเล็กทรอนิกส์เพียงอย่างเดียว ในทางปฏิบัติทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิและลดอุณหภูมิเกิน 1 รอบ แล้ววัดกระแสในรอบที่ 2, 3, 4, ของการเพิ่มอุณหภูมิ

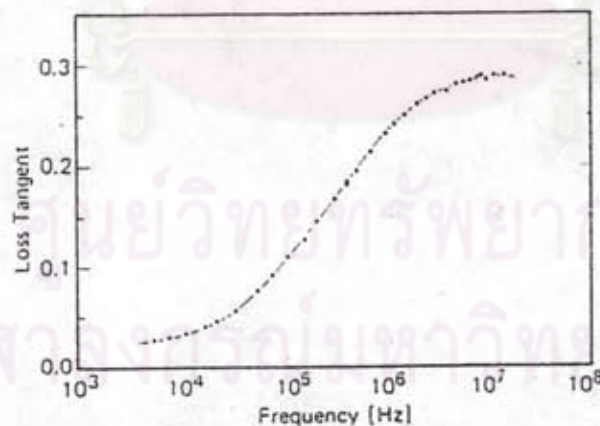
3) Dielectric heating

วิธีอื่น ๆ ที่กล่าวมาแล้วเป็นการทำให้อุณหภูมิ T เพิ่มขึ้น โดยแผ่นพอลิเมอร์ได้รับพลังงานความร้อนจากแหล่งกำเนิดภายนอก แต่วิธีการนี้แผ่นพอลิเมอร์ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกจะรับคลื่นวิทยุมาเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในแผ่นฟิล์มในช่วงเวลามิลลิวินาทีเท่านั้น [Sussner et al., 1978] ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแผ่นฟิล์มจะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสม่ำเสมอ

พิจารณาแผ่นพอลิเมอร์ซึ่งฉาบโลหะลงบนขั้วทั้งสอง ที่ความถี่ $f = \omega/2\pi$ แผ่นฟิล์มมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ และ $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$ เมื่อแผ่นฟิล์มได้รับคลื่นวิทยุซึ่งมีสนามไฟฟ้า $E = E_0 \sin \omega t$ เข้าไปยังแผ่นฟิล์ม กำลังความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Power dissipation per unit volume) W คือ

$$W = \epsilon \omega \tan \delta E_{rms}^2 \quad (3.3.3)$$

ค่า $\tan \delta$ ของสารขึ้นกับความถี่ f ดังรูปที่ 3.3.1



รูปที่ 3.3.1 กราฟแสดงค่า $\tan \delta$ ที่ความถี่ต่าง ๆ ของแผ่น PVDF หนา 30 μm ณ อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 3.3.1 กำลังความร้อน W จะมีค่าสูงที่ความถี่สูง ๆ

ถ้าการทำให้แผ่นพอลิเมอร์ซึ่งมีความจุความร้อนจำเพาะของสาร (specific heat) c_v มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ΔT ในช่วงสั้น ๆ จะต้องได้รับความร้อนจากภายนอก ΔQ ดังนั้น

$$\Delta Q = mc_v \Delta T$$

หารทั้งสองข้างด้วยปริมาตร v และช่วงเวลา Δt ที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะได้

$$\frac{1}{v} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{m}{v} c_v \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

สมมติว่าแผ่นฟิล์มสูญเสียความร้อนแก่สิ่งแวดล้อมน้อยมาก เทอมทางซ้ายมือก็คือ ค่ากำลังความร้อนต่อปริมาตรที่สารไดอิเล็กตริกเปลี่ยนมาจากคลื่นวิทยุ ดังนั้น

$$W = P_s c_v \frac{dT}{dt} \quad (3.3.4)$$

โดย P_s คือ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์

จะเห็นว่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นพอลิเมอร์จะมีค่าสูงเมื่อกำลังความร้อนมีค่ามาก หรืออัตราการเพิ่มอุณหภูมิจะสูงที่ความถี่สูง ๆ นั่นเอง

ถ้าแผ่นพอลิเมอร์มีพื้นที่หน้าตัด A มีความจุไฟฟ้า (Capacitor) C_0 ความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสองคือ V สัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กตริก p สามารถหาได้จาก

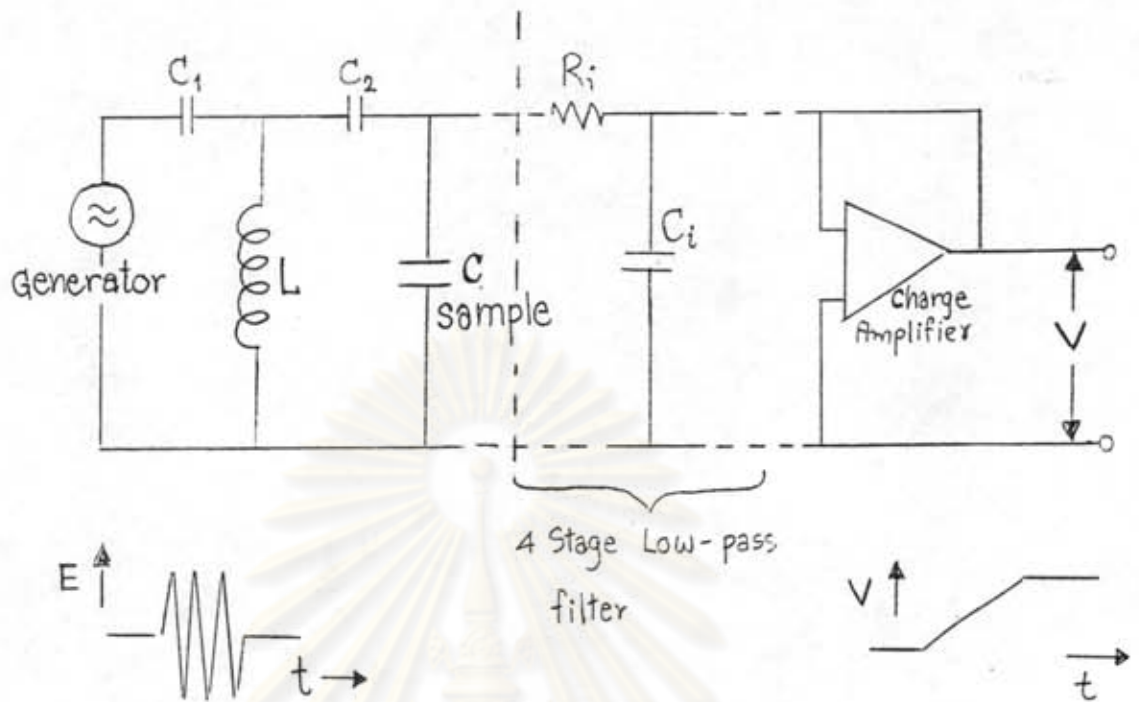
$$p = \frac{1}{A} \frac{dQ}{dT} = \frac{C_0}{A} \frac{dV}{dt} \frac{dt}{dT} \quad (3.3.5)$$

แทนค่าจากสมการ (3.2.3) และ (3.2.4) ลงใน (3.2.5) จะได้

$$p = \frac{C_0}{A} \frac{dV}{dt} \frac{P_s c_v}{\epsilon \omega \tan \delta E_{rms}^2} \quad (3.3.6)$$

การส่งคลื่นวิทยุเข้าไปยังแผ่นฟิล์ม จำเป็นต้องมีวงจรรองความถี่ เพื่อลดสัญญาณรบกวน ดังแสดงในรูป 3.3.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3.2 แสดงวงจรการวัดสัญญาณเอ้าท์พุทของแผ่นฟิล์ม PVDF ที่ได้รับคลื่น
วิทยุ $C_1 = 0.1 \mu\text{F}$, $L = 93 \mu\text{H}$, $C_2 = 0.022 \mu\text{F}$, $R_i = 49.9 \text{ k}\Omega$,
 $C_i = 200 \text{ pF}$ Sample capacitance C_0 ปกติประมาณ 300 pF ,
 $r - f \sim 500 \text{ kHz}$

คลื่นวิทยุจะถูกส่งมาจากตัวกำเนิดความถี่ (Generator) ด้วยความถี่ 500 kHz ด้วยความกว้างพัลส์ (pulse width) 20 มิลลิวินาที ผ่าน C_1 , C_2 , L ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ (high-pass filter) ยอมให้คลื่นที่มีความถี่สูงผ่านไปยังแผ่นฟิล์ม สัญญาณเอ้าท์พุทจากแผ่นฟิล์มจะผ่าน C_i , R_i ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่สูง (Low-pass filter) เพื่อกันสัญญาณรบกวนจากคลื่นวิทยุที่ส่งเข้ามา

การส่งคลื่นวิทยุเข้าไปยังแผ่นฟิล์มจะกระทำในช่วงเวลาสั้น ๆ ในหน่วยมิลลิวินาทีเท่านั้น ในระหว่างที่แผ่นฟิล์มได้รับคลื่นวิทยุความต่างศักย์ของแผ่นฟิล์มจะเพิ่มแปรผันตรงกับเวลา ขึ้นอยู่กับอัตราเพิ่มอุณหภูมิ b หลังจากหยุดส่งคลื่นวิทยุความต่างศักย์ของแผ่นฟิล์มจะคงที่ แสดงว่าไม่มีการสูญเสียความร้อนแก่สิ่งแวดล้อมในช่วงเวลาที่พิจารณา

การคำนวณสภาพไฟโรอิเล็กทริกด้วยวิธีนี้ มีข้อดีคือ ใช้เวลาในการทดลองน้อยและลดปัญหาในการควบคุมอุณหภูมิ แต่ต้องทราบค่าคงที่ต่าง ๆ ของแผ่นฟิล์ม เช่น ค่าคงที่ไดโพลีอิเล็กทริก ความหนาแน่น และความจุความร้อนจำเพาะของสาร เป็นต้น อย่างไรก็ตาม จากการทดลองพบว่า ค่า p ที่คำนวณได้จากสมการ (3.3.6) มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวิธีอื่น แตกต่างกันเพียง 7% เท่านั้น

4) Low-frequency sinusoidal temperature heating

การวัดกระแสไพโรอิเล็กทริก โดยทั่ว ๆ ไปจะได้กระแส TSC รวมออกมาด้วย ซึ่งกำจัดโดยการเพิ่มและลดอุณหภูมิเกิน 1 รอบ กระแส TSC ก็จะหมดไป วิธีการนี้สามารถแยกกระแสไพโรอิเล็กทริก ออกจากกระแส TSC โดยให้อุณหภูมิที่มีฟังก์ชันรูปไซน์แก่พอลิเมอร์ [Lynn and Edward. Part I, II., 1982] กระแสสลับจาก TSC จะมีเฟสตรงกับอุณหภูมิ ส่วนกระแสสลับจากไพโรอิเล็กทริกจะมีเฟสนำหน้าอุณหภูมิอยู่ $\pi/2$ เรเดียน ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

กระแส TSC ที่เกิดจากการหันเหทิศทางของโมเมนต์ขั้วคู่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา ดังสมการที่ (3.3.7)

$$i_d = \frac{N\mu^2 E_p A}{3k_B T_p \tau_0} \exp \left[-\frac{\xi}{k_B T} - \frac{1}{\tau_0} \int_0^t \exp \left(-\frac{\xi}{k_B T} \right) dt \right] \quad (3.3.7)$$

โดย i_d	คือ	กระแส TSC
N'	คือ	จำนวนโมเมนต์ขั้วคู่ต่อ 1 ปริมาตร
μ	คือ	โมเมนต์ขั้วคู่
A	คือ	พื้นที่ผิวของพอลิเมอร์
k_B	คือ	ค่านิจโบลต์ซมันน์
τ_0	คือ	ค่าคงที่ของ τ
T_p, E_p	คือ	อุณหภูมิและสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้ว
t	คือ	เวลา
ξ	คือ	กำแพงศักย์ หรือ พลังงานกระตุ้น

ก่อนที่กระแส TSC จะถึงค่าสูงสุด สามารถพิจารณาได้ว่า กระแส TSC เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับอุณหภูมิ สามารถตัดเทอมอินทิเกรตในสมการ (3.3.7) ที่ได้ที่อุณหภูมิประมาณ 300 k ในช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่เกิน 0.5 k กระแส TSC ในสมการ (3.3.7) สามารถประมาณได้เป็น

$$i_d = i_0 + RT \quad (3.3.8)$$

โดย i_0 คือ กระแส TSC ส่วนที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ RT คือ กระแส TSC ส่วนที่ขึ้นกับอุณหภูมิ โดยมี R เป็นค่าคงที่ขึ้นกับพลังงานกระตุ้นและอุณหภูมิของสาร ส่วนกระแสไพโรอิเล็กทริก i_π แปรผันกับอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ดังสมการ (3.3.9)

$$i_\pi = pA \frac{dT}{dt} \quad (3.3.9)$$

ถ้าเริ่มต้นสารมีอุณหภูมิสัมบูรณ์ T_0 ได้รับการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราคงที่ b ในช่วงเวลา t นอกจากนี้ยังให้อุณหภูมิที่มีฟังก์ชันไซน์ด้วยแอมพลิจูด T_1 ความถี่เชิงมุม ω โดยผ่านไฟฟ้ากระแสสลับไปยังตัวให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ ดังนั้นอุณหภูมิของสารที่ขณะเวลา t ใด ๆ คือ

$$T = T_0 + bt + T_1 \sin \omega t \quad (3.3.10)$$

ซึ่งจะให้กระแส TSC ดังสมการ (3.3.8) เมื่อ $T_0 + bt \sim 300 \text{ K}$ และ $T_1 < 0.5 \text{ K}$ กระแสที่ได้ทั้งหมด i_T จากส่วนของไพโรอิเล็กทริกและกระแส TSC จากสมการที่ (3.3.8) และ (3.3.9) ที่อุณหภูมิ T ใด ๆ คือ

$$i_T = [i_0 + R(T_0 + bt) + pAb] + [RT_1 \sin \omega t + pAT_1 \cos \omega t] \quad (3.3.11)$$

เทอมแรกและเทอมที่สองของสมการ (3.3.11) คือ กระแสตรง i_{dc} และกระแสสลับ i_{ac} จากกระแสทั้งหมดที่ได้รับการเพิ่มอุณหภูมิตามสมการ (3.3.10) ดังนั้นสมการที่ (3.3.11) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} i_{dc} &= [i_0 + R(T_0 + bt) + pAb] \\ &= [i_b + pAb] \end{aligned} \quad (3.3.12)$$

โดย i_b คือ กระแส TSC ที่เกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราคงที่ b

$$i_{ac} = [RT_1 \sin \omega t + pAT_1 \omega \cos \omega t] \quad (3.3.13)$$

จากสมการ (3.3.7) และ (3.3.8)

$$R = \frac{i_b \xi}{k_B (T_0 + bt)^2} \quad (3.3.14)$$

พิจารณากระแสสลับเทอม $RT_1 \sin \omega t$ มีเฟสตรงกับอุณหภูมิมาจากส่วนของ TSC ในขณะที่ เทอม $pAT_1 \omega \cos \omega t$ มาจากส่วนของไพโรอิเล็กทริกจะมีเฟสหน้าอุณหภูมิอยู่ $\pi/2$ เรเดียน สมการที่ (3.3.13) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$i_{ac} = i_n \sin \omega t + i_p \cos \omega t \quad (3.3.15)$$

โดย i_n คือ แอมพลิจูดของกระแสสลับส่วนที่มาจาก TSC (nonpyroelectric current)

$i_n = RT_1$ คือ แอมพลิจูดของกระแสสลับส่วนที่มาจาก TSC (nonpyroelectric current)

$i_p = pA\omega T_1$ คือ แอมพลิจูดของกระแสสลับส่วนที่มาจากสภาพโพโรอิเล็กตริก

สมการที่ (3.3.15) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$i_{ac} = i_1 \sin(\omega t + \theta) \quad (3.3.16)$$

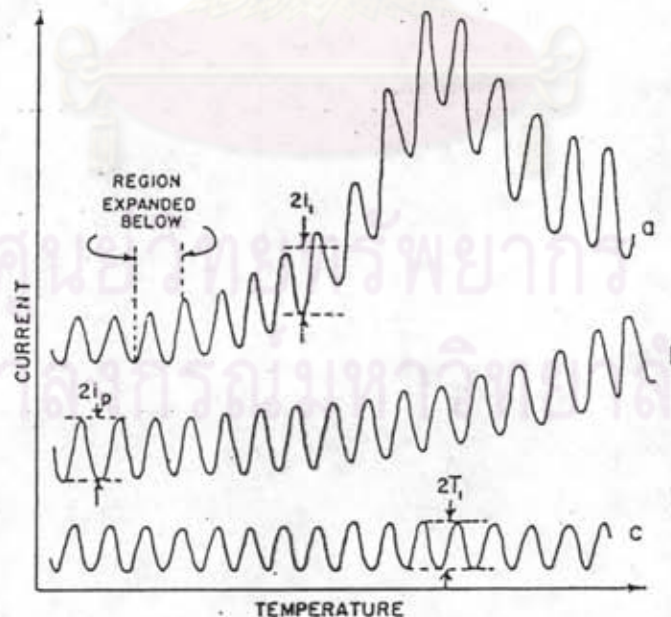
โดย

$$i_1 = (i_n^2 + i_p^2)^{1/2} = \left[\left(\frac{i_b \xi T}{k_B (T_0 + bt)^2} \right)^2 + (pA\omega T_1)^2 \right]^{1/2} \quad (3.3.17)$$

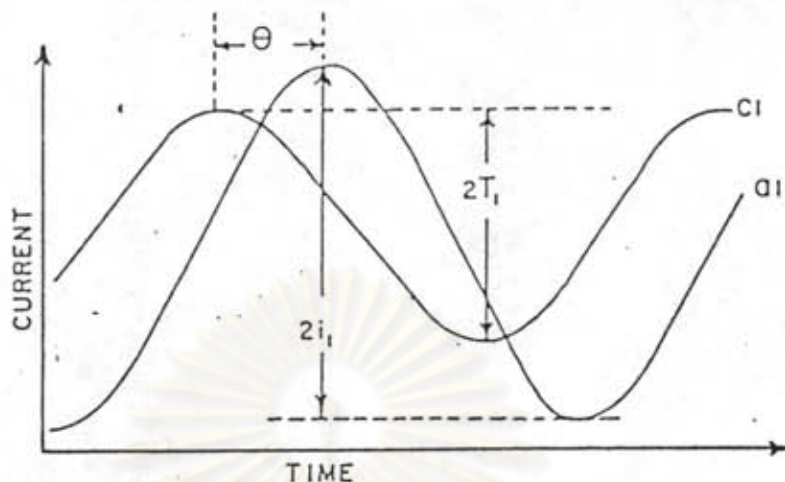
i_1 คือ แอมพลิจูดของกระแสสลับ

θ คือ มุมที่เฟสของอุณหภูมิหน้าหน้าเฟสกระแสสลับ (i_{ac})

พอลิเมอร์โพโรอิเล็กตริกใด ๆ ที่ได้รับการเพิ่มอุณหภูมิดังสมการ (3.3.10) จะให้กระแสดังรูป 3.3.3 ก และ 3.3.3 ข



รูปที่ 3.3.3 ก แสดงลักษณะกระแสที่ได้จากพอลิเมอร์ที่ได้รับการเพิ่มอุณหภูมิด้วยฟังก์ชันรูปไซน์ เช่น PVDF กราฟ (a), (b) เป็นกระแสที่ได้จากการเพิ่มอุณหภูมิในรอบแรกและรอบถัดมา กราฟ (c) แสดงอุณหภูมิ $T_1 \sin \omega t$



รูปที่ 3.3.3 ข แสดงเฟสกระแสนำหน้าเฟสอุณหภูมิ (θ)

จากกราฟสามารถหาสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กตริก p ได้ 3 วิธี

1. พิจารณากระแสตรงจากกราฟ (b) กระแสจาก TSC เป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการ (3.3.12) $i_{dc} = pAb$ สามารถคำนวณหา p ได้
2. พิจารณากระแสสลับจากกราฟ (b) กระแส TSC เป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการ (3.3.13) $i_{ac} = i_p \cos \omega t$ โดย $i_p = pA\omega T_1$ ซึ่งสามารถหา i_p จากกราฟได้
3. จากกราฟ (a) และ (c) หามุม θ ได้ คำนวณ i_p จาก $i_p = i_1 \sin \theta$ และใช้ $i_p = pA\omega T_1$

การหาสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กตริกของ PVDF ด้วยวิธีนี้ให้ผลใกล้เคียงกับวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือ ไม่จำเป็นต้องทราบค่าคงที่ต่าง ๆ เช่น ความจุความร้อนจำเพาะ, ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เป็นต้น อย่างไรก็ตามการหาสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กตริกด้วยวิธีการดังกล่าวข้างต้น จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีความละเอียด ชับซ้อน ไม่สามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการแบบธรรมดา ในบทความต่อไปจะกล่าวถึงการหาค่าคงที่ดังกล่าวด้วยอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการทั่วไป

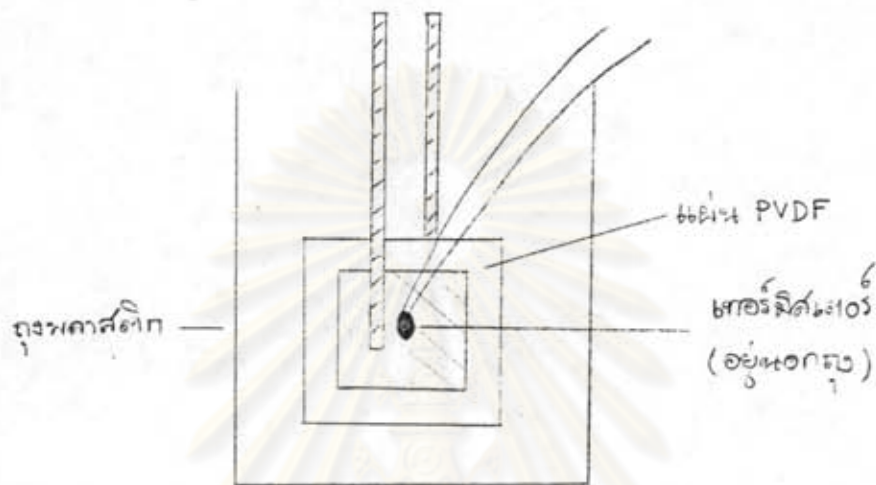
3.4 การวัดสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กตริกโดยวิธีประยุกต์

การหาสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กตริกด้วยวิธีที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.3 มีความยากลำบากในการควบคุมอุณหภูมิ ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราคงที่โดยการยิงแสงเลเซอร์, คลื่นวิทยุ หรือการให้อุณหภูมิแก่ฟิล์มเป็นฟังก์ชันรูปไซน์ ทั้งบางวิธีจะต้องทราบความจุความร้อนจำเพาะของสารต้องวัดอุณหภูมิให้ได้แม่นยำและรวดเร็วและต้องทราบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกด้วย ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวัดสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กตริกด้วยวิธีการง่าย ๆ ไม่ต้องอาศัยตัวแปรอื่น ๆ และใช้เครื่องมือที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ

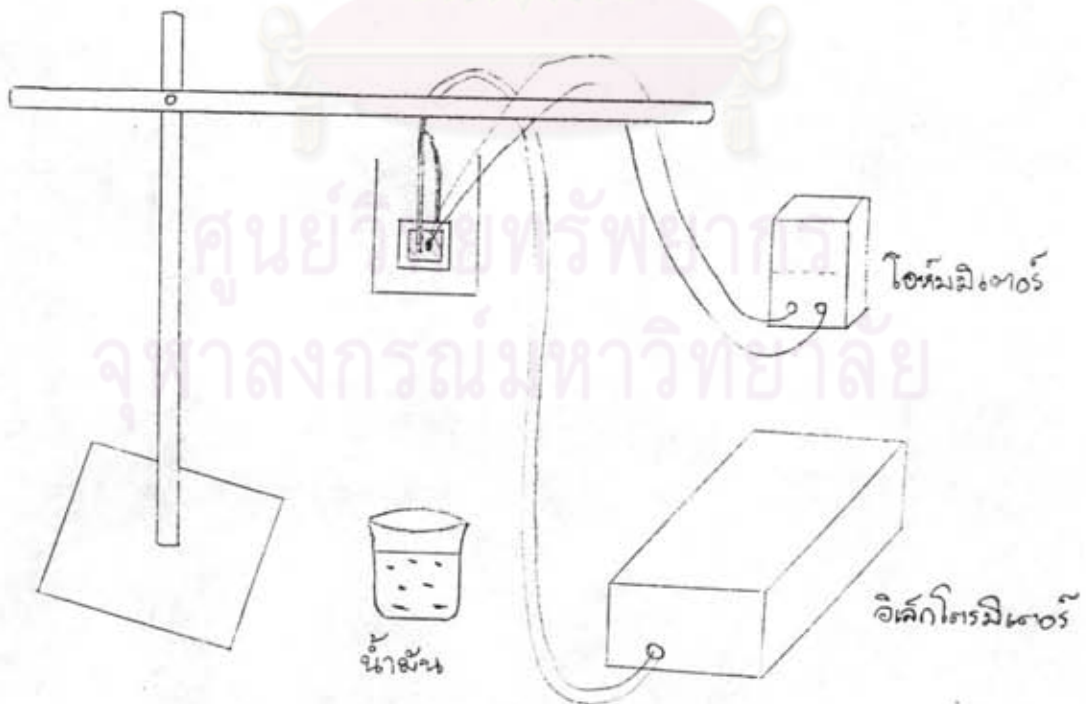
ในการวิจัย ผู้ทำการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่น้ำมันเครื่องแล้วตั้งทิ้งไว้ อุณหภูมิของน้ำมันจะลดลงช้า ค่อนข้างจะคงที่ในช่วงเวลาสั้น ๆ น่าจะใช้เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิของพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากอิเล็กโตรมิเตอร์วัดประจุได้สูงสุด 20 nc ดังนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่แผ่นฟิล์มไม่เกินค่าสูงสุดค่าหนึ่งขึ้นกับสภาพโพโรอิเล็กตริกของแผ่นฟิล์มนั้น แต่เพื่อลดผลการรบกวนจากกระแส TSC จึงเพิ่มอุณหภูมิให้แก่แผ่นฟิล์มเกินกว่าค่าสูงสุดนั้นในรอบแรกแล้วจึงวัดประจุที่ได้จากการเพิ่มอุณหภูมิในรอบถัดไป ขั้นตอนในการทดลองมีดังนี้

1. นำแผ่นฟิล์มใส่ถุงพลาสติกขนาดเล็ก ใช้เทปติดแผ่นฟิล์มไว้กับถุง อย่าให้เทปทับส่วนที่เคลือบอลูมิเนียม ต่อสายอลูมิเนียมออกมานอกถุงหนีกับอิเล็กโตรมิเตอร์เพื่อวัดประจุ
2. ติดเทอร์มิสเตอร์ไว้บนอกถุงพลาสติกในระดับเดียวกับกึ่งกลางแผ่น PVDF ดังรูป 3.4.1 ต่อปลายทั้งสองเข้ากับโอห์มมิเตอร์
3. ห้อยถุงพลาสติกในอากาศ ดังรูป 3.4.2
4. อุ่นน้ำมันให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องประมาณ 15°C นำบีกเกอร์น้ำมันรองใต้ถุงพลาสติก ใช้ไม้หนูนบิกเกอร์ให้สูงจนถุงพลาสติกจมในน้ำมัน ทิ้งไว้สักครู่ประมาณ 3 นาที ช่วงนี้เป็นการให้ความร้อนแก่ฟิล์มเพื่อไล่กระแส TSC
5. นำบีกเกอร์ออก รอให้น้ำมันเย็นลงสักพักหนึ่ง จนกระทั่งอุณหภูมิน้ำมันสูงกว่าอุณหภูมิห้องประมาณ $2-10^{\circ}\text{C}$ ทิ้งไว้จนระบบทุกอย่างหยุดนิ่ง รวมทั้งผู้ทดลองด้วย
6. อ่านความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ขณะแผ่นฟิล์มอยู่ที่อุณหภูมิห้อง
7. กดปุ่มให้อิเล็กโตรมิเตอร์เริ่มวัดประจุ ค่อย ๆ นำบีกเกอร์รองใต้ถุงพลาสติก ใช้ไม้หนูนบิกเกอร์ให้ถุงจมในน้ำมัน ช่วงนี้เป็นการวัดสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กตริกของฟิล์ม
8. อ่านความต้านทานที่ต่ำสุดจากโอห์มมิเตอร์ ซึ่งจะให้อุณหภูมิของน้ำมันและแผ่นฟิล์มและอ่านประจุสูงสุดจากอิเล็กโตรมิเตอร์
9. เปลี่ยนอุณหภูมิแล้วทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 5 ขึ้นไป
10. จากความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์นำไปคำนวณหาอุณหภูมิจากสมการ (3.4.1) พล็อตกราฟระหว่างประจุและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากกราฟสามารถหาสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กตริกได้ ดังที่จะกล่าวต่อไป
11. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนแผ่น PVDF

ในการวิจัยนี้จะทดลองกับแผ่นฟิล์มทั้งหมด 6 แผ่น ซึ่งแผ่นฟิล์มเหล่านี้ที่ทราบค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกแล้ว เพื่อวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเพียโซอิเล็กทริกและสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริกของฟิล์ม



รูปที่ 3.4.1 แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มที่อยู่ในถุงพลาสติก



รูปที่ 3.4.2 แสดงการจัดเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.4.1 แสดงความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

RESISTANCE VERSUS TEMPERATURE				
TEMP°C RES	TEMP°C RES	TEMP°C RES	TEMP°C RES	TEMP°C RES
	-20 21.87K	+ 10 4482	+ 40 1200	+ 70 394.5
	19 20.64K	11 4273	41 1152	71 381.2
	18 19.48K	12 4074	42 1107	72 368.5
	17 18.40K	13 3886	43 1064	73 356.2
	16 17.39K	14 3708	44 1023	74 344.5
	15 16.43K	15 3539	45 983.8	75 333.1
	14 15.54K	16 3378	46 946.2	76 322.3
	13 14.70K	17 3226	47 910.2	77 311.8
	12 13.91K	18 3081	48 875.3	78 301.7
	11 13.16K	19 2944	49 842.8	79 292.0
-40 75.79K	-10 12.46K	+ 20 2814	+ 50 811.3	+ 80 282.7
39 70.93K	9 11.81K	21 2690	51 781.1	81 273.7
38 66.41K	8 11.19K	22 2572	52 752.2	82 265.0
37 62.21K	7 10.60K	23 2460	53 724.5	83 256.7
36 58.30K	6 10.05K	24 2354	54 697.9	84 248.6
35 54.66K	5 9534	25 2252	55 672.5	85 240.9
34 51.27K	4 9046	26 2156	56 648.1	86 233.4
33 48.11K	3 8586	27 2064	57 624.8	87 226.2
32 45.17K	2 8151	28 1977	58 602.4	88 219.3
31 42.42K	- 1 7741	29 1894	59 580.9	89 212.6
-30 39.86K	0 7355	+ 30 1815	+60 560.3	+90 206.1
29 37.47K	+ 1 6989	31 1739	61 540.5	91 199.9
28 35.24K	2 6644	32 1667	62 521.5	92 193.9
27 33.15K	3 6319	33 1599	63 503.3	93 188.1
26 31.20K	4 6011	34 1533	64 485.8	94 182.5
25 29.38K	5 5719	35 1471	65 469.0	95 177.1
24 27.67K	6 5444	36 1412	66 452.9	96 171.9
23 26.07K	7 5183	37 1355	67 437.4	97 166.9
22 24.58K	8 4937	38 1301	68 422.5	98 162.0
21 23.18K	9 4703	+ 39 1249	69 408.2	99 157.3

จากตาราง สามารถสร้างสมการที่สอดคล้องกับตารางในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 37°C โดยมี ความผิดพลาด 0.0 %

$$\begin{aligned}
 T = & 274.7696 (R - 1.977) (R - 1.739) (R - 1.533) (R - 1.355) \\
 & - 1549.0842 (R - 2.252) (R - 1.739) (R - 1.533) (R - 1.355) \\
 & + 3209.7332 (R - 2.252) (R - 1.977) (R - 1.533) (R - 1.355) \\
 & - 2904.5565 (R - 2.252) (R - 1.977) (R - 1.739) (R - 1.355) \\
 & + 970.2143 (R - 2.252) (R - 1.977) (R - 1.739) (R - 1.533) \quad (3.4.1)
 \end{aligned}$$

ผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์โพรโอเล็กตริกแสดงในตาราง 3.4.2 - 3.4.7

ตารางที่ 3.4.2 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองแผ่นฟิล์ม E₇

แผ่น PVDF เบอร์	ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ (k Ω)		อุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม ที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}\text{C}$)	ประจุไฟฟ้าที่คายจาก แผ่นฟิล์ม (nC)
	เริ่มต้น	สุดท้าย		
E ₇	2.181	1.141	15.55	19.7
ได้รับการเพิ่มอุณหภูมิ จนถึง 44 $^{\circ}\text{C}$ ในรอบแรก	2.175	1.198	14.26	17.00
	2.189	1.196	14.45	16.89
	2.179	1.268	12.89	15.22
	2.195	1.396	10.68	11.84
	2.186	1.508	8.72	9.59
	2.202	1.575	7.84	8.79
	2.198	1.676	6.32	6.59
	2.197	1.747	5.33	5.75
	2.191	1.817	4.34	4.44
	2.191	1.925	2.99	2.96
	1.978	1.688	3.71	4.08
	2.076	1.965	1.21	1.24
	2.133	1.693	5.39	5.85
	2.055	1.780	3.35	3.75
	2.024	1.819	2.49	2.81
	2.000	1.812	2.19	2.63
	1.984	1.849	1.64	2.05
	2.052	1.549	6.61	7.55
	2.048	1.749	3.71	4.21
	2.048	1.778	2.84	3.31



ตารางที่ 3.4.3 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองแผ่นฟิล์ม E_g

แผ่น PVDF เบอร์	ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ ($k\Omega$)		อุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม ที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}C$)	ประจุไฟฟ้าที่คายจาก แผ่นฟิล์ม (nC)
	เริ่มต้น	สุดท้าย		
E_g	2.023	1.574	5.90	6.18
ได้รับการเพิ่มอุณหภูมิ จนถึง $44^{\circ}C$ ในรอบแรก	2.028	1.530	6.64	6.96
	2.024	1.576	5.88	6.16
	2.022	1.621	5.19	5.39
	2.020	1.668	4.48	4.32
	2.022	1.727	3.69	3.67
	2.022	1.747	3.41	3.53
	2.021	1.814	2.52	2.16
	2.009	1.734	3.44	3.37
	2.007	1.748	3.23	3.37
	2.013	1.808	2.50	2.15
	2.011	1.418	8.28	8.31
	2.020	1.657	4.64	4.59
	2.024	1.688	4.25	4.23
	2.028	1.080	2.78	2.33
	2.039	1.797	2.94	2.90
	2.036	1.808	2.77	2.66
	2.032	1.692	4.28	4.17
	2.042	1.791	3.06	2.54
	2.043	1.852	2.28	2.06
	2.050	1.897	1.80	1.38

ตารางที่ 3.4.4 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองแผ่นฟิล์ม m_6

แผ่น PVDF เบอร์	ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ ($k\Omega$)		อุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม ที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}C$)	ประจุไฟฟ้าที่คายจาก แผ่นฟิล์ม (nC)
	เริ่มต้น	สุดท้าย		
m_6	1.910	1.479	6.06	18.37
ได้รับการเพิ่มอุณหภูมิ	1.912	1.522	5.40	16.08
จนถึง $43^{\circ}C$	1.916	1.562	4.82	13.60
ในรอบแรก	1.927	1.596	4.44	12.71
	1.930	1.639	3.84	10.42
	1.943	1.693	3.23	7.54
	1.941	1.714	2.92	7.93
	1.935	1.729	2.64	6.07
	1.940	1.804	1.70	4.08
	2.016	1.854	1.95	4.37
	2.031	1.750	3.48	9.08
	2.028	1.890	1.54	3.96
	2.033	1.756	3.42	9.07
	2.036	1.762	3.37	7.98
	2.027	1.815	2.57	6.20
	2.029	1.833	2.37	5.41

ตารางที่ 3.4.5 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองแผ่นฟิล์ม k_{11}

แผ่น PVDF เบอร์	ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ ($k\Omega$)		อุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม ที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}C$)	ประจุไฟฟ้าที่คายจาก แผ่นฟิล์ม (nC)
	เริ่มต้น	สุดท้าย		
k_{11}	1.959	1.391	8.14	16.15
ได้รับการเพิ่มอุณหภูมิ จนถึง $39^{\circ}C$ ในรอบแรก	1.982	1.547	5.84	10.84
	2.009	1.622	5.02	8.63
	2.020	1.672	4.43	6.99
	2.030	1.753	3.43	5.41
	2.046	1.769	3.19	5.12
	2.046	1.836	2.52	4.05
	2.067	1.884	2.15	3.62
	2.095	1.894	2.34	3.58
	1.995	1.907	1.05	1.39
	2.051	1.886	1.95	3.34
	2.067	1.850	2.58	4.15
	2.091	1.914	2.05	2.90
	2.081	1.931	1.74	2.46
	2.095	1.944	1.73	2.58
	2.093	1.970	1.40	2.32

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4.6 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองแผ่นฟิล์ม D₁

แผ่น PVDF เบอร์	ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ (k Ω)		อุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม ที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}\text{C}$)	ประจุไฟฟ้าที่คายจาก แผ่นฟิล์ม (nC)
	เริ่มต้น	สุดท้าย		
D ₁	2.083	1.789	3.54	16.14
ได้รับการเพิ่มอุณหภูมิ จนถึง 43 $^{\circ}\text{C}$	2.059	1.849	2.50	10.81
ในรอบแรก	2.001	1.871	1.56	6.36
	2.047	1.908	1.63	7.05
	2.060	1.936	1.43	6.18
	2.087	1.960	1.45	6.19
	2.042	1.972	0.81	3.31
	1.996	1.891	1.26	5.60
	2.057	1.888	1.99	8.77
	2.065	1.899	1.95	8.61
	2.074	1.979	1.09	4.66
	2.039	2.009	0.34	1.38

ตารางที่ 3.4.7 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองแผ่นฟิล์ม D₈

แผ่น PVDF เบอร์	ความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ (k Ω)		อุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม ที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}\text{C}$)	ประจุไฟฟ้าที่คายจาก แผ่นฟิล์ม (nC)
	เริ่มต้น	สุดท้าย		
D ₈	2.009	1.606	5.26	17.94
ได้รับการเพิ่มอุณหภูมิ จนถึง 43 $^{\circ}\text{C}$	2.018	1.652	4.69	16.19
ในรอบแรก	1.983	1.684	3.77	13.03
	1.975	1.706	3.43	11.66
	1.963	1.724	2.97	10.37
	1.958	1.773	2.32	7.72
	1.952	1.791	2.01	6.82

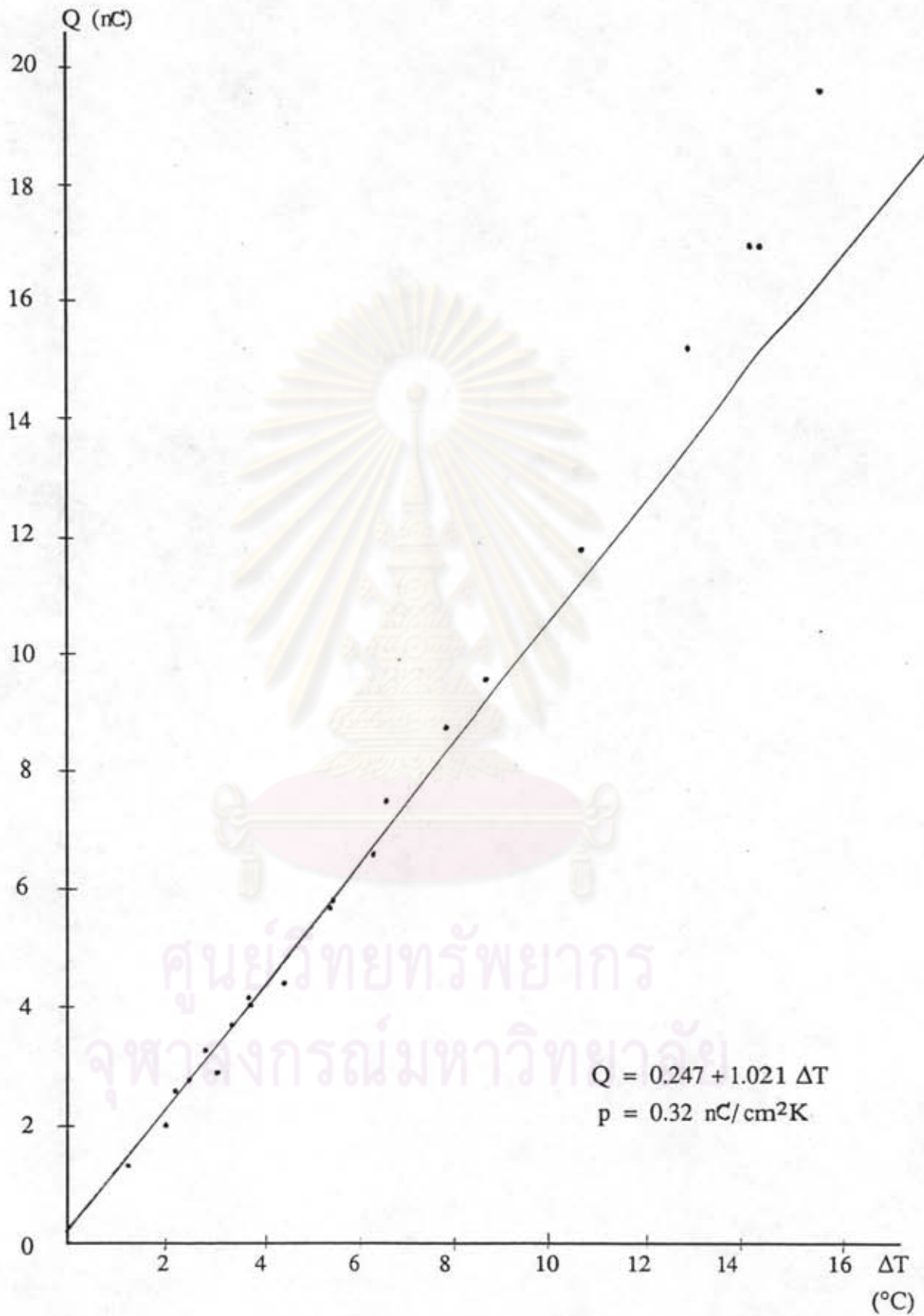
ภายในแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ไพโรอิเล็กทริกจะมีโพลาริเซชันและประจุตกค้างอยู่ในเนื้อสาร ที่ผิวของฟิล์มจะมีประจุอิสระซึ่งหักล้างกับโพลาริเซชันและประจุที่ตกค้างภายใน แผ่นฟิล์มจึงเป็นทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ สำหรับพอลิเมอร์ PVDF มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 10-15 ความหนาประมาณ 30 μm แผ่นฟิล์มที่ใช้มีพื้นที่ประมาณ 1-4 cm^2 จึงมีความจุ $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{d} \sim 1.8 \text{ nF}$ เมื่อแผ่นฟิล์มได้รับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้โพลาริเซชันและอัตราส่วนความหนาของฟิล์มในระนาบเหนือประจุตกค้าง และระนาบต่ำกว่าประจุตกค้างเปลี่ยนแปลงไปด้วย ประจุอิสระที่ผิวฟิล์มจึงต้องปรับตัวเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่ หากทั้งแผ่นฟิล์มไว้ในอากาศโดยมิได้ต่อขั้วทั้งสองเข้ากับอุปกรณ์ใด ๆ จะเสมือนมีตัวต้านทานที่มีความต้านทานสูงมาก เช่น ประมาณ $R = 10^8 \Omega$ ต่อเข้ากับขั้วทั้งสอง ประจุจึงรั่วออกไปจากขั้วด้วยค่าคงที่เวลาเท่ากับ $RC = 10^8 \times 1.8 \times 10^{-9} = 0.2$ วินาที สุดท้ายฟิล์มจึงไม่แสดงอำนาจทางไฟฟ้าให้เห็น แต่ถ้าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นใหม่ ๆ เราต่อเครื่องวัดประจุ (อิเล็กโตรมิเตอร์) ซึ่งมีความต้านทานต่ำเข้ากับขั้วทั้งสองของฟิล์ม เสมือนลัดวงจรระหว่างขั้วฟิล์ม ประจุทั้งหมดจะไหลผ่านเครื่องวัดประจุโดยมิได้รั่วผ่าน R ดังกล่าวข้างบน ดังรูป 3.4.3 ประจุที่วัดได้จะเป็นค่าที่ถูกต้อง และจาก (2.23b) อาจนำมาหาสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก จากสูตร



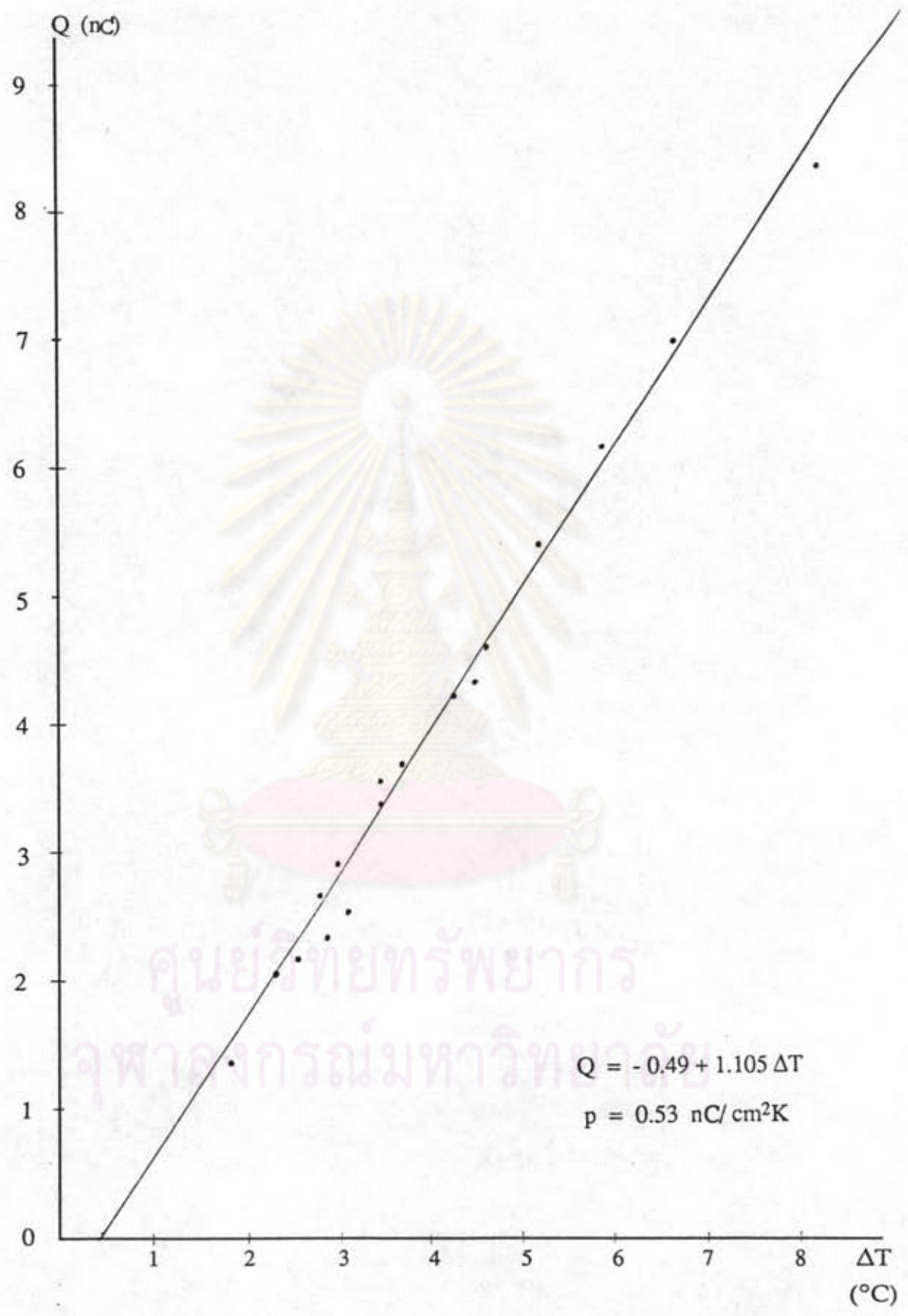
รูปที่ 3.4.3 แสดงลักษณะไดโพลภายในแผ่นพอลิเมอร์ และทิศทางการไหลของประจุเมื่อแผ่นฟิล์มได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

$$p = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{E=0} = \frac{1}{A} \frac{dQ}{dT} = \frac{1}{A} \frac{Q}{\Delta T} \quad (2.23b)$$

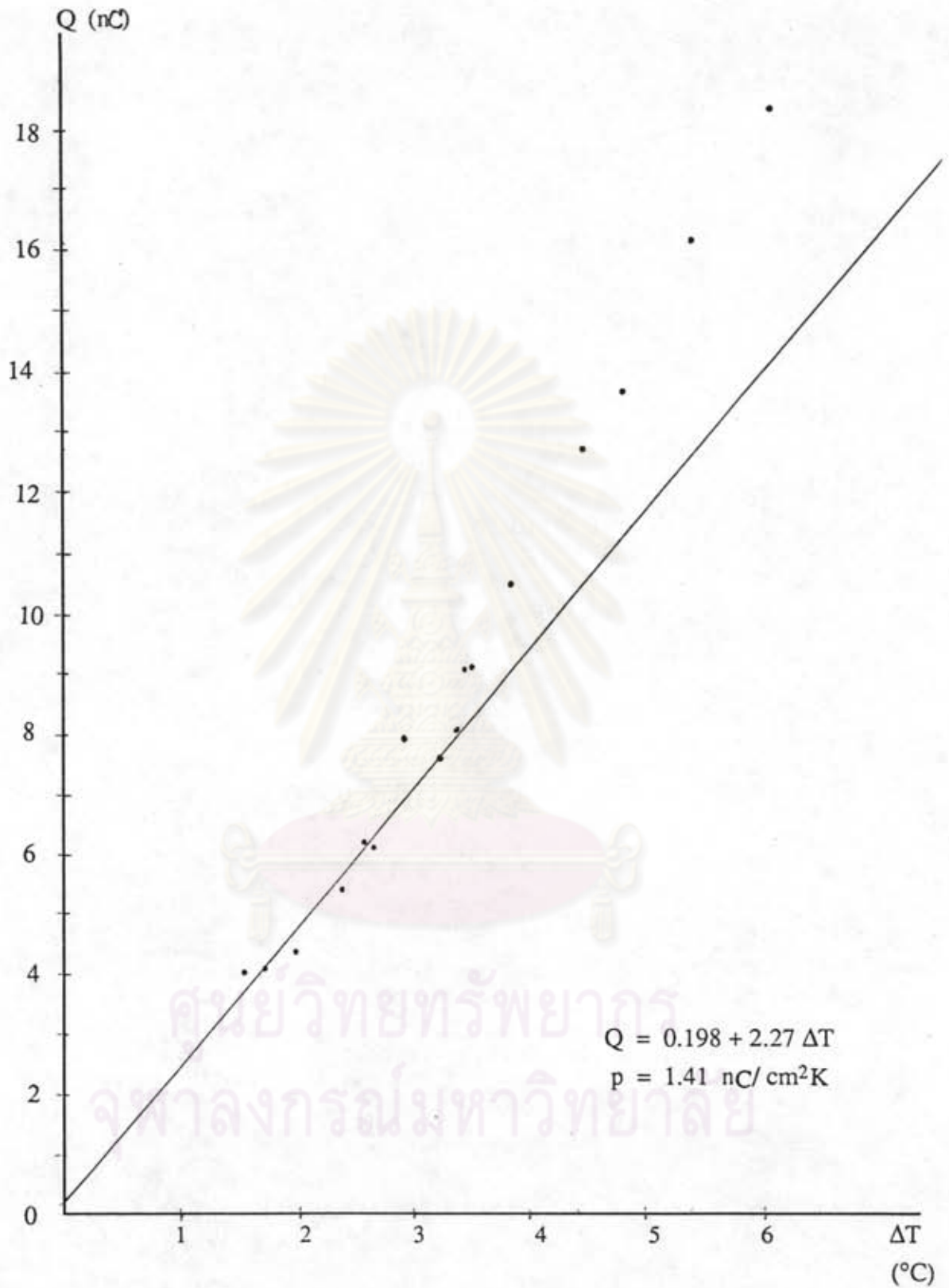
ในที่นี้ Q เป็นประจุที่ผ่านอิเล็กโตรมิเตอร์ และ ΔT เป็นอุณหภูมิของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาพล็อตกราฟระหว่างประจุ (Q) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นให้แก่แผ่นฟิล์ม (ΔT) โดยใช้โปรแกรมหาสมการเส้นตรงที่ดีที่สุด (least-square fit) สำหรับข้อมูลชุดนั้น ๆ ค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก คือ ความชันของกราฟ / พื้นที่ของอิเล็กโตรด ผลการทดลองสำหรับฟิล์ม PVDF ทั้ง 6 แผ่น แสดงในรูป 3.4.4-3.4.9



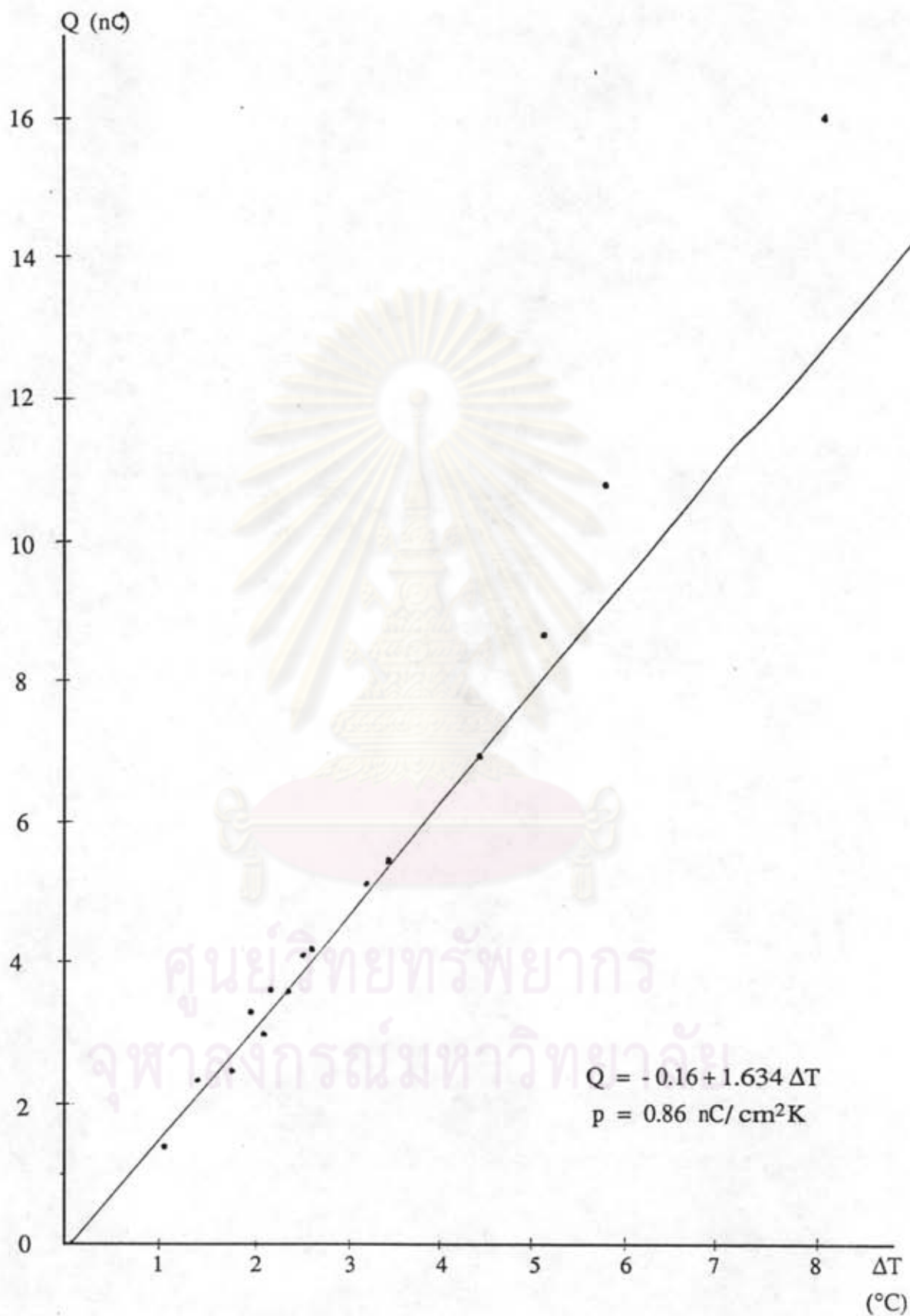
รูปที่ 3.4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุที่วัดได้จากการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม E₇



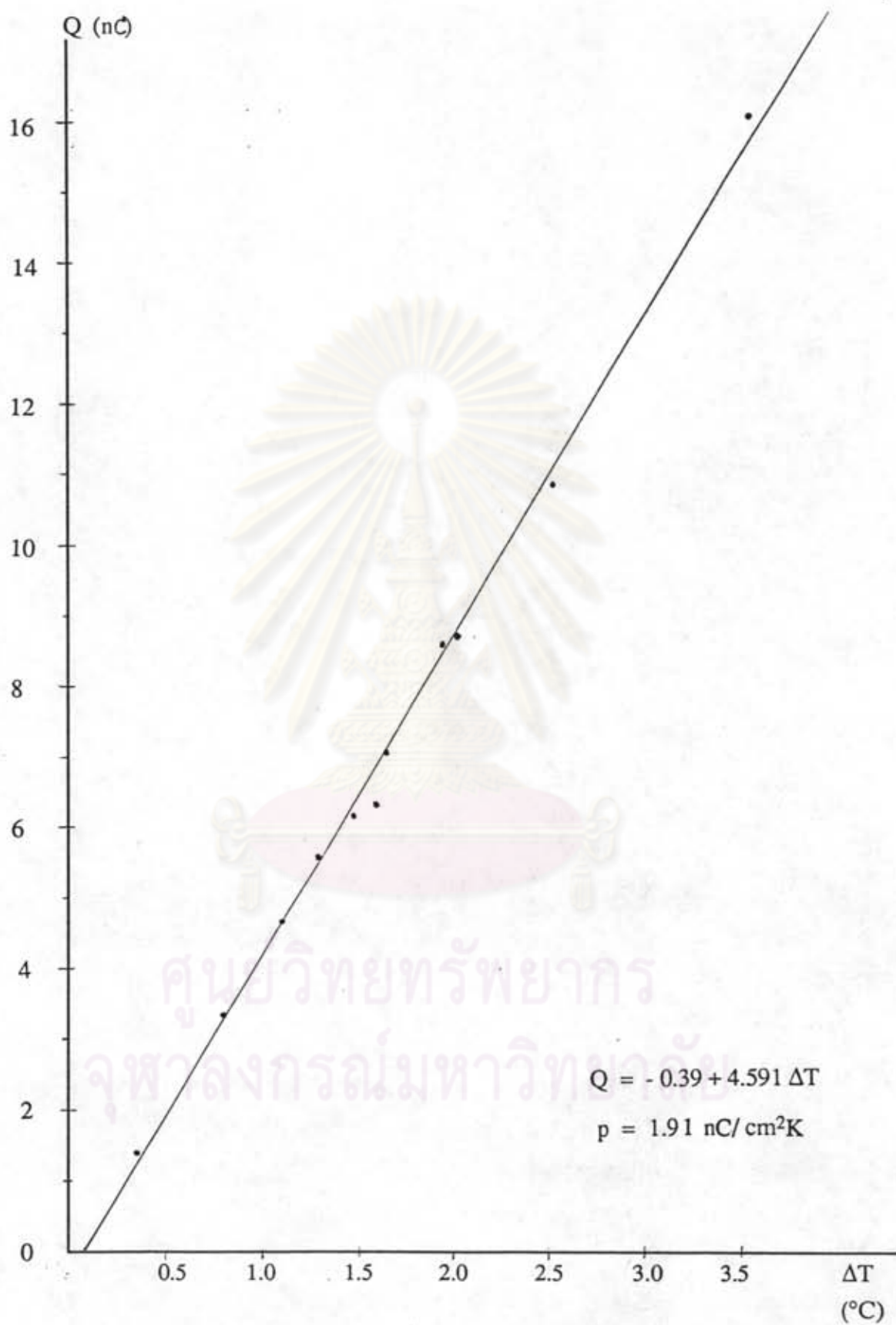
รูปที่ 3.4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุที่วัดได้จากการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม E₈



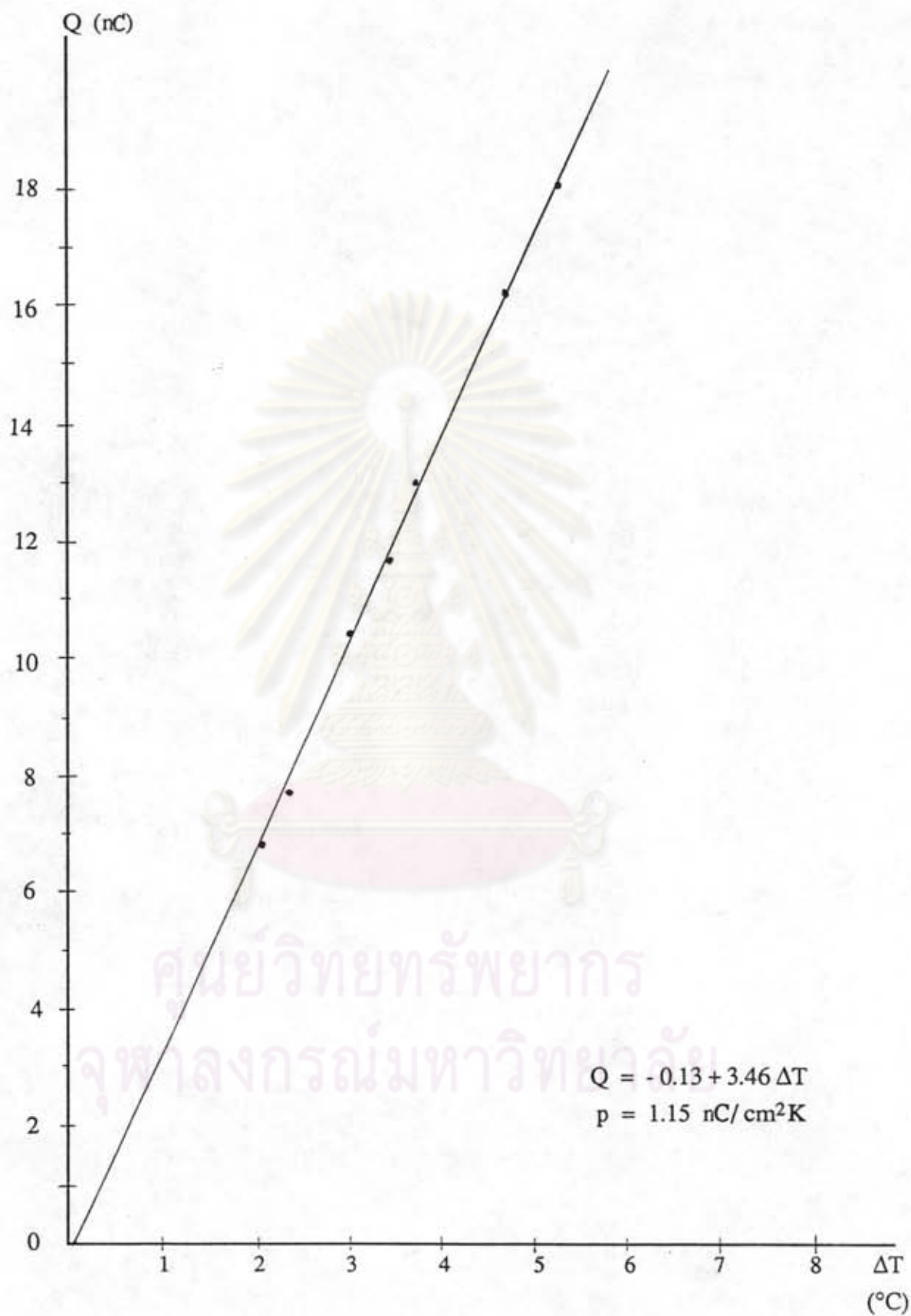
รูปที่ 3.4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุที่วัดได้จากการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม m_6



รูปที่ 3.4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุที่วัดได้จากการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม k_{11}



รูปที่ 3.4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุที่วัดได้จากการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม D_1



รูปที่ 3.4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุที่วัดได้จากการเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฟิล์ม D_8



รูปที่ 3.4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก p และสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก d_{31} ของแผ่นฟิล์มแต่ละแผ่น

ผลการวิจัยแสดงค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์เพียสโซอิเล็กทริก แสดงในตาราง 3.4.8 โดยค่า d_{31} ของฟิล์มที่ได้มาจากการทดลองในเวลาใกล้เคียงกัน [ธีระพนธ์ แยมวงษ์, 2537]

ตารางที่ 3.4.8 แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์เพียสโซ-ไพโรอิเล็กทริกของแผ่นฟิล์ม PVDF ต่าง ๆ กัน

แผ่น PVDF เบอร์	พื้นที่ของ อิเล็กโทรด (cm^2)	สัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก p ($\text{nC}/\text{cm}^2\text{K}$)	สัมประสิทธิ์เพียสโซอิเล็กทริก d_{31} (nC/N)	อัตราส่วน d/p ($\text{cm}^2\text{K}/\text{N}$)
D ₁	2.0 x 1.2	1.91	8.45	4.42
m ₆	1.9 x 0.85	1.41	7.09	5.03
D ₈	2.0 x 1.5	1.15	3.87	3.37
k ₁₁	1.9 x 1.0	0.86	4.01	4.65
E ₈	1.9 x 1.1	0.53	1.85	3.49
E ₇	2.0 x 1.6	0.34	1.88	5.53

จากผลในตารางนำไปพล็อตกราฟดูความสัมพันธ์ระหว่าง d_{31} และ p ได้ดังรูป 3.4.10

จากรูปที่ 3.4.4-3.4.9 พบว่าที่อุณหภูมิสูง ๆ ความชันของกราฟจะสูงขึ้นกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิสูงจะมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในรูป 3.1.3 และ 3.1.4 นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากความผิดพลาดของการวัดอุณหภูมิ เนื่องจากเทอร์มิสเตอร์ต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งในการวัดอุณหภูมิที่แท้จริงของน้ำมัน เมื่อมิเตอร์วัดประจุถึงค่าสูงสุดแล้ว เทอร์มิสเตอร์ยังไม่สามารถอ่านค่าถึงอุณหภูมิที่แท้จริงในขณะนั้น ต้องรออีกประมาณ 1 นาที อุณหภูมิที่ได้จากเทอร์มิสเตอร์จึงสูงสุดคงที่ซึ่งแสดงอุณหภูมิที่แท้จริงขณะนั้น แต่ไม่ใช่อุณหภูมิที่ต้องการวัด (อุณหภูมิขณะประจุถึงค่าสูงสุด) เพราะในช่วงเวลาประมาณ 1 นาที น้ำมันได้คายความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อม ถ้าอุณหภูมิน้ำมันสูงกว่าสิ่งแวดล้อมมาก ๆ (ΔT มาก ๆ) ทำให้น้ำมันคายความร้อนเร็ว อุณหภูมิที่อ่านได้จึงน้อยกว่าความเป็นจริง แต่ถ้า ΔT น้อย ๆ อัตราการลดลงของอุณหภูมิน้ำมันน้อย ΔT ที่อ่านได้จะถูกต้องดี ดังนั้นในการวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกด้วยวิธีนี้จึงควรวัดประจุที่ ΔT น้อย ๆ จึงจะได้ค่าเที่ยงตรงขึ้น

ในการวิจัยนี้ มุ่งหาวิธีวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกด้วยเครื่องมือที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ จากกราฟในรูป 3.4.4-3.4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q และ ΔT เป็นเส้นตรง สอดคล้องกับ

ทฤษฎีสำหรับการทดลองซ้ำกันหลาย ๆ ครั้งของแต่ละฟิล์ม ดังนั้นน่าจะใช้เป็นวิธีวัดสัมประสิทธิ์
โพโรอิเล็กทริกได้ดี และแม่นยำ

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าสภาพเพียโซ-โพโรอิเล็กทริกของสารขึ้นกับโพลาไรเซชัน ดังนั้น
แผ่นฟิล์มที่มีสภาพเพียโซอิเล็กทริกสูงก็ควรจะมีสภาพโพโรอิเล็กทริกสูง ซึ่งจากผลการวิจัยก็มีแนวโน้ม
เป็นเช่นนั้น ถ้าพิจารณาสมการ (2.4.5), (2.4.8) และ (2.5.14) จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริก
นอกจากจะขึ้นกับโพลาไรเซชันแล้วยังขึ้นกับตัวแปรอื่นๆ ซึ่งน่าจะมีการวิจัยขั้นตอนในการพัฒนาให้ฟิล์ม
มีสภาพโพโรอิเล็กทริกสูงต่อไป

หากมีการวัดสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริกต่อไป ควรทำการทดลองในห้องที่มีอุณหภูมิค่อนข้าง
คงที่ เพื่อวัดอุณหภูมิห้องซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของแผ่นฟิล์มได้อย่างแม่นยำขึ้น และหุ้มบีกเกอร์
น้ำมันด้วยโฟมเพื่อลดอัตราการสูญเสียความร้อนแก่สิ่งแวดล้อม



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย