

## บทที่ 4

### ฟิล์มไพโรอิเล็กทริกพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์

เนื่องจากในห้องปฏิบัติการไม่มีฟิล์ม PVDF ดังนั้นในบทนี้จะได้กล่าวถึงการเตรียมฟิล์ม PVDF โดยวิธีอัดเบ้า (compression moulding) จากนั้นก็จะเตรียมเป็นฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ดังกระบวนการในบทที่ 3 ขั้นตอนต่อไปจะนำฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ไปทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อดูโครงสร้างผลึก วัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกโดยวิธีประยุกต์ เพื่อต้องการศึกษาผลจากการเตรียมฟิล์มโดยวิธีอัดเบ้า

#### 4.1 วิธีการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF

จากที่กล่าวมาแล้วว่า พอลิเมอร์ PVDF มีโครงสร้างผลึก 4 แบบ โครงสร้างผลึกแต่ละแบบสามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้างผลึกอีกแบบหนึ่งได้ ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต เช่น ความดัน อุณหภูมิ และการจัดชั้น และจากทฤษฎีไพโรอิเล็กทริกในพอลิเมอร์ (Wada and Hayakawa, 1981) (Broadhurst *et al.*, 1978) สัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกมีบางเทอมที่ขึ้นกับทิศของการจัดเรียงตัวของผลึก และความหนาแน่นของผลึก ดังนั้น ฟิล์มที่มีสมบัติไพโรอิเล็กทริกที่ดี จะต้องมีส่วนที่เป็นผลึกปนอยู่มาก (ผลึกเฟสเบตา) และต้องทำให้ไดโพลของแต่ละผลึกในฟิล์มชี้ไปทางเดียวกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการขึ้นรูปฟิล์ม (cast film) การยัด และการจัดชั้น

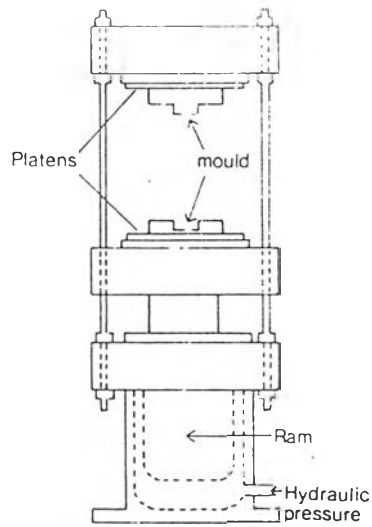
งานวิจัยในประเทศไทยที่ผ่านมา (ชูศรี อุทัยสิน, 2537) PVDF ที่นำมาใช้จะเป็นสารสังเคราะห์สำเร็จรูปจากประเทศญี่ปุ่น มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางใสหนาประมาณ 72 ไมโครเมตร แต่เนื่องจากปัจจุบันในห้องปฏิบัติการมี PVDF ลักษณะเป็นแผ่น (sheet) ซึ่งได้มาจากประเทศญี่ปุ่นเช่นกัน และในท้องตลาดไม่มีฟิล์ม PVDF จำหน่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้คิดวิธีเตรียมฟิล์ม PVDF จากแผ่น PVDF หนาประมาณ 5 มิลลิเมตร โดยใช้วิธีอัดเบ้า ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและธรรมดาที่สุด (Tadmor and Gogos, 1979) (Morton-Jones, 1989) แต่โดยทั่วไปกระบวนการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ (polymer processing) มีหลายวิธี (Wang, 1988)

เครื่องที่ใช้จะเป็นเครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic press) เพื่อใช้เป็นตัวส่งกำลังให้กับแท่นอัด เนื่องจาก PVDF มีจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 175 องศาเซลเซียส ดังนั้นจะตั้งอุณหภูมิของเครื่องไว้ที่ 250 องศาเซลเซียส อุปกรณ์ที่จะต้องใช้ ได้แก่

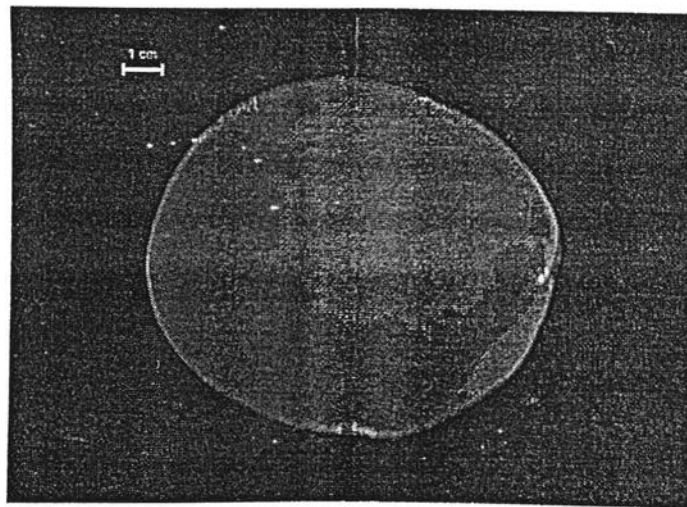
1. แผ่นสแตนเลสสตีล (stainless steel plate) ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร และหนา 0.3 เซนติเมตร อย่างน้อย 2 แผ่น
2. เบ้า (mould) มีลักษณะเป็นแผ่นสแตนเลสชนิดผิวมัน ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และหนา 0.05 เซนติเมตร อย่างน้อย 2 แผ่น

#### มีขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม ดังนี้

1. เปิดเครื่องทิ้งไว้ เพื่อให้ความร้อน (heated) กับแผ่นเพลทและเบ้า โดยนำแผ่นเพลทประกบด้วยเบ้า 2 แผ่นที่สะอาด ไปวางที่แผ่นเหล็กด้านล่างของเครื่อง (platens) ดังรูปที่ 4.1 (ก่อนวางควรหาผ้ามาเช็ดแผ่นเหล็กของเครื่องเพื่อไม่ให้มีสิ่งเจือปนติดอยู่ เช่น เม็ดทราย ไม่เช่นนั้นจะทำให้หลังจากเตรียมฟิล์มแล้วเบ้าจะมีรอยดำหิวนำไปใช้ต่อไม่ได้) เสร็จแล้วกดปุ่มให้แผ่นเหล็กด้านล่างดันขึ้นไปติดกับด้านบน (up-stroking) ในการทดลองตั้งอุณหภูมิไว้ที่ประมาณ 250 องศาเซลเซียส ความดัน 500 นิวตันต่อตารางเซนติเมตร ปรากฏว่าใช้เวลาประมาณ 1.30 ชั่วโมง จึงได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ
2. เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้ว กดปุ่มเพื่อให้แผ่นเหล็กด้านล่างลงมาอยู่ที่ตำแหน่งเดิม (down-stroking) แล้วใช้ท่อนเหล็กช่วยเพื่อนำแผ่นเพลทออกมา จากนั้นนำ PVDF ที่ตัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยม มวลประมาณ 3 กรัม (ต้องแน่ใจว่าปราศจากสิ่งสกปรก) ใส่ระหว่างเบ้าแล้วนำเบ้าไปใส่ไว้ระหว่างแผ่นเพลททั้งสองดังเดิม
3. กดปุ่มเพื่อให้แผ่นเหล็กด้านล่างดันขึ้นไปใกล้กับส่วนบน อย่างช้า ๆ แต่ไม่สุด ปล่อยให้ทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที เมื่อพอลิเมอร์มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวก็จะเริ่มหลอมเหลว ความร้อนและแรงอัดจะทำให้พอลิเมอร์หลอมละลายและไหล (flow) ติดกับเบ้าทั้งสอง
4. กดปุ่มอีกครั้งเพื่อให้แผ่นเหล็กด้านล่างดันขึ้นไปติดกับแผ่นเหล็กด้านบน จนสุด ทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที แล้วกดปุ่มให้แผ่นเหล็กด้านล่างลงมา นำเบ้าออกจากเครื่อง ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำฟิล์มออกมา พบว่าฟิล์มมีความหนาประมาณ 140-200 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.2 โดยฟิล์มจะมีความหนาไม่เท่ากัน ที่ตรงกลางจะหนากว่าบริเวณข้าง ๆ เมื่อนำฟิล์มไปยัดจะต้องเลือกส่วนที่มีความสม่ำเสมอ เลือกบริเวณที่ไม่มีฟองอากาศ และฟิล์มไม่ควรมีรอยดำหิวน เพื่อป้องกันฟิล์มฉีกขาดในขณะให้นำไปยัด

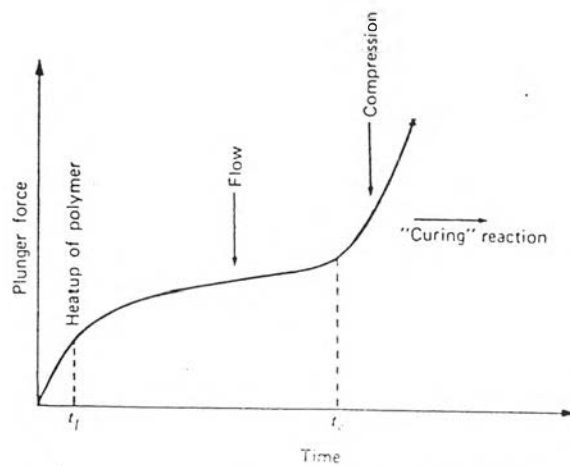


รูปที่ 4.1 แสดงเครื่องอัดไฮดรอลิกที่ใช้เตรียมฟิล์มโดยวิธีอัดเบ้า



รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์ม PVDF ที่ได้โดยวิธีอัดเบ้าจากเครื่องอัดไฮดรอลิก

จากการเตรียมฟิล์มโดยวิธีอัดเบ้า อธิบายได้ดังรูปที่ 4.3 (Tadmor and Gogos, 1979)

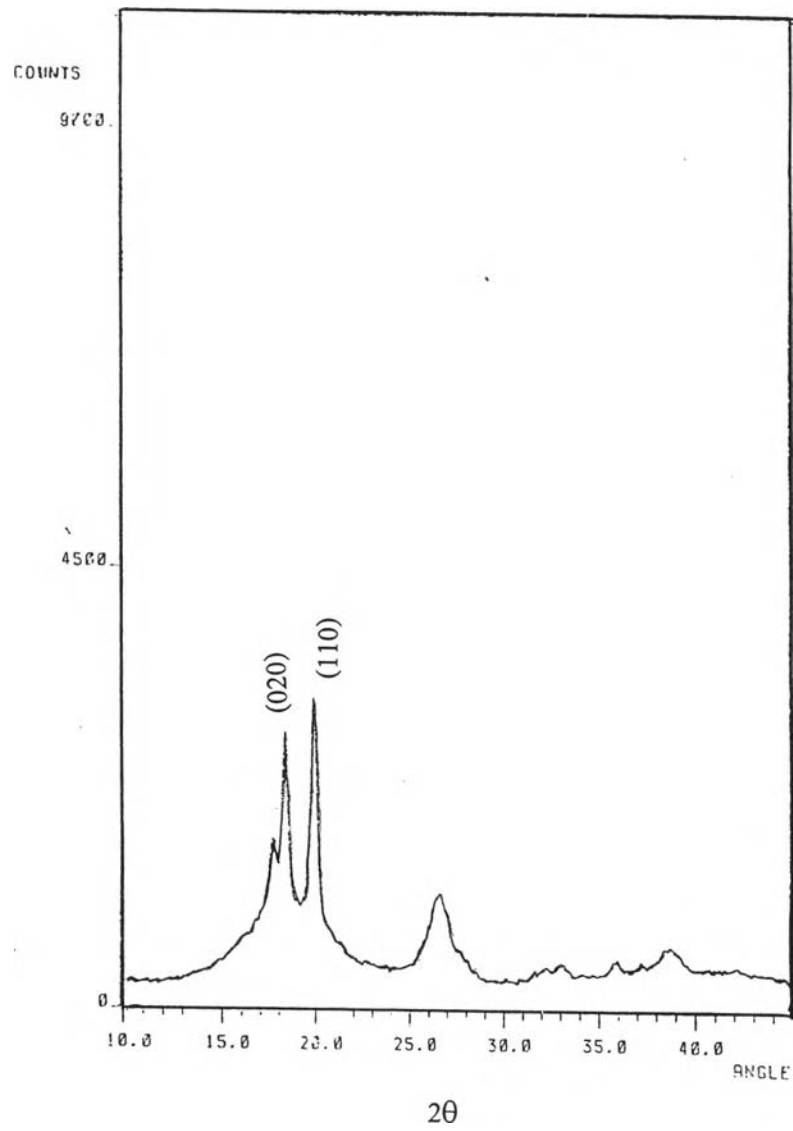


รูปที่ 4.3 แสดงการอธิบายการเตรียมฟิล์มโดยวิธีอัดเบ้า

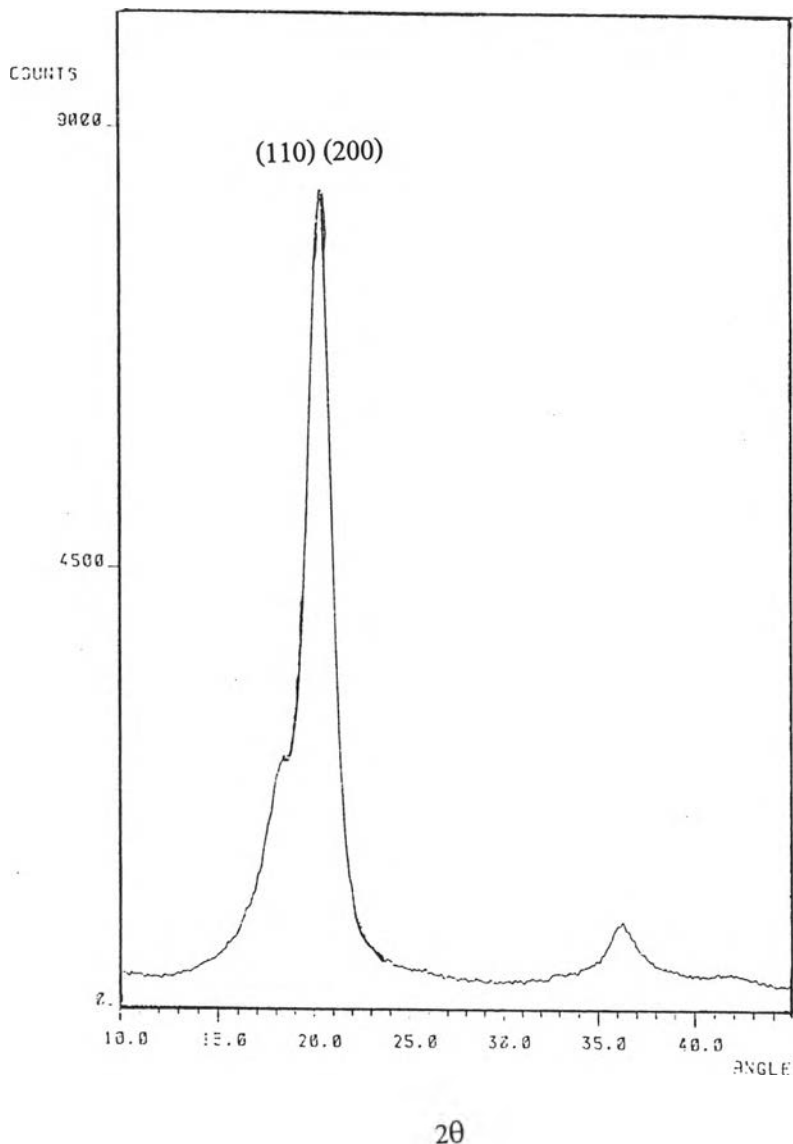
ช่วงแรกบริเวณ  $t \leq t_f$  แรงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากถูกอัด (squeezed) และ ความร้อนที่พอลิเมอร์ได้รับ ที่เวลา  $t_f$  ถือได้ว่าพอลิเมอร์อยู่ในสถานะหลอมเหลว (molten state) พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวจะเริ่มไหลในระหว่างเบ้า และจะสิ้นสุดการไหล (filling) ที่เวลา  $t_c$  เมื่อมีการอัดของพอลิเมอร์หลอมเหลว (compression of the polymer melt) เกิดขึ้น

#### 4.2 การทดสอบฟิล์ม PVDF ที่เตรียมขึ้นโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

จากการที่ได้ทดลองหาวิธีการเตรียมฟิล์ม PVDF เพื่อที่จะศึกษาว่าการเตรียมฟิล์ม โดยวิธี อัดเข้านี้ให้ผลอย่างไร ดังนั้นจะนำฟิล์ม PVDF ที่เตรียมได้ไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยใช้การ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ นั่นคือ นำฟิล์ม PVDF ที่เตรียมมา (เฟสแอลฟา) หนาประมาณ 170 ไมโครเมตร และฟิล์ม PVDF ที่ยึดแล้ว หนาประมาณ 80 ไมโครเมตร ไปทดสอบกับเอกซเรย์-ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) ซึ่งใช้ Cu K $\alpha$  radiations แบบ โหมดการส่งผ่าน (transmission mode) เพื่อต้องการจะเปรียบเทียบมุมแบรกก์ (Bragg angle “ $2\theta$ ”) (Kittel, 1986) ที่ก่อนหน้านี้มีนักวิทยาศาสตร์ได้ทำการทดลองมาแล้ว (Davis *et al.*, 1978) (Das Gupta and Doughty, 1980) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 แสดงการกวาดเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-ray diffractometer scan) ของฟิล์ม PVDF ที่ไม่ได้ยืด โดย  $2\theta$  คือมุมแบรกก์ และ (020), (110) คือระนาบ (hkl)



รูปที่ 4.5 แสดงการกวาดเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ของฟิล์ม PVDF ที่ยัดแล้ว โดย  $2\theta$  คือมุมแบรกก์ และ (110)(200) คือระนาบ (hkl)

ในการทดลอง มุมแบรกก์มีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 45 องศา ใช้เวลาในการวัด 1.5 วินาที ความต่างศักย์ 45 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมแปร์ พบว่าสำหรับฟิล์ม PVDF ที่ไม่ได้ยัด ระนาบ (020) และระนาบ (110) มุมแบรกก์มียอด (peak) ที่ 18.40 องศา และ 19.96 องศา ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งก็ให้ผลที่ใกล้เคียงกับรายงาน (Das Gupta and Doughty, 1980) คือที่ระนาบ (020) และระนาบ (110) มุมแบรกก์มียอดที่ 18.4 องศา และ 20.15 องศา ตามลำดับ และสำหรับฟิล์ม PVDF ที่ยัดแล้ว จะได้ระนาบผสม (composite) คือ (110) (200) มุมแบรกก์มียอดที่ 20.48 องศา ดังรูปที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบกับรายงาน มุมแบรกก์มียอดที่ 20.8 องศา

ดังนั้น เมื่อนำฟิล์มที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีอัดเบ้าไปทดสอบด้วยวิธีดังกล่าว พบว่า โครงสร้างผลึกของฟิล์ม PVDF ก็สอดคล้องกับรายงานที่มีผู้วิจัยมาแล้ว

#### 4.3 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF

จากตารางที่ 1.1 ฟิล์ม PVDF ได้เปรียบสารอื่นเมื่อนำมาใช้เป็นตัวรับรู้รังสีอินฟราเรด เนื่องจากมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ( $K$ ) ที่ต่ำกว่า การทำงานของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ใช้หลักที่ว่า เมื่อมีรังสีอินฟราเรดตกกระทบฟิล์มหนา  $b$  พื้นที่อิเล็กโทรด  $A$  ทำให้ฟิล์มร้อนขึ้น  $\Delta T$  ในกรณีนี้จะไม่มีการถ่ายเทประจุ หรือก็คือวงจรเปิด นั่นคือ  $\Delta Q = 0$  และ  $\Delta D = 0$  ดังนั้น จากความสัมพันธ์ของสมการ (2.16) จะได้ความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของฟิล์มเป็น

$$V = \frac{pb\Delta T}{K\epsilon_0} \quad (4.1)$$

จากสมการ (4.1) จะเห็นว่าความไว (sensitivity) ของฟิล์มขึ้นอยู่กับค่าของ  $\frac{V}{\Delta T}$  ซึ่งแปรผกผันกับ  $K$  แสดงว่าถ้าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกมากขึ้น จะทำให้ความไวของฟิล์มน้อยลง ในงานวิจัยที่ผ่านมา (Wang, 1988) พบว่าฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF มีค่า  $K$  ประมาณ 12 ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะทดลองวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์ม เพื่อจะดูว่ากระบวนการเตรียมฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ข้างต้นให้ผลอย่างไร

สำหรับฟิล์มไดอิเล็กทริก PVDF เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มจาก 0 เป็น  $E$  การขจัดทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองเพิ่มจาก 0 เป็น  $D$  ดังนั้น จะได้

$$D = \epsilon_0 KE \quad (4.2)$$

ในกรณีของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF เมื่อการขจัดทางไฟฟ้าเพิ่มจาก  $D_r$  เป็น  $D$  จากสมการ (2.16) จะได้

$$D = \epsilon_0 KE + D_r \quad (4.3)$$

ในการวัดจะใช้เครื่องวิเคราะห์หิมพีแดนซ์แอลเอฟ (LF Impedance Analyzer) ของบริษัท Hewlett Packard Model HP4192A ที่มีในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเครื่องนี้สามารถวัดค่าความต้านทาน ความจุไฟฟ้า และความเหนี่ยวนำ (inductance) ในช่วงความถี่สัญญาณไฟสลับ 5.00 เฮิรตซ์ ถึง 13.00000 เมกะเฮิรตซ์ มีความละเอียดต่ำสุด 1000 เฮิรตซ์ และมีแอมพลิจูด (amplitude) 5 มิลลิโวลต์ (root mean squares “rms”) ถึง 1.1 โวลต์ (rms) มีความละเอียด 1 มิลลิโวลต์ (rms) ให้ความต่างศักย์กระแสตรงในช่วง 35 โวลต์ ถึง -35 โวลต์ มีความละเอียด 1 มิลลิโวลต์ อ่านผลเป็นตัวเลข

เครื่องนี้สามารถทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ (PC) ผ่านทางบัสเชื่อมต่ออนุกรมประเภท GPIB (General Purpose Interface Bus) ตามมาตรฐานสากล IEEE488 ได้ ดังนั้นจึงสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่อง HP4192A ได้ เช่น สั่งให้วัดค่าความจุไฟฟ้า (C) ในช่วงความถี่ 1 - 20 กิโลเฮิรตซ์ ทุก ๆ 1 กิโลเฮิรตซ์ แล้วแสดงผลทางจอภาพ หรือจะพิมพ์ออกมาก็ได้ ทำให้สะดวกในการทำงาน โปรแกรมที่ใช้คือ Visual Basic ซึ่งสามารถใช้นวินโดวส์ (Windows) ได้ นอกจากนี้เครื่องนี้ยังสามารถส่งสัญญาณขาออกเข้าเครื่อง X-Y Recorder ทำให้เห็นกราฟของข้อมูลที่วัดได้ทันทีตามที่ต้องการ

เนื่องจากเราทราบพื้นที่อิเล็กโทรดและความหนาของฟิล์ม ดังนั้นถ้าวัดความจุไฟฟ้าของฟิล์ม ก็จะสามารถคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฟิล์มได้ การวัดค่าความจุสามารถทำได้ทั้งวิธีไฟฟ้ากระแสตรง (dc) และกระแสสลับ (ac) แต่ในงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการวัดโดยวิธีกระแสตรงผลการทดลองที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนมาก ดังนั้นในการทดลองนี้จะวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยวิธีไฟฟ้ากระแสสลับ

จากสมการ (4.2) สำหรับฟิล์มไดอิเล็กตริก PVDF จะได้

$$D = \frac{Q}{A} = \frac{\epsilon_0 KV}{b} \quad (4.4)$$

นั่นคือ จะได้ความจุไฟฟ้า

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 KA}{b} \quad (4.5)$$

และจากสมการ (4.3) สำหรับฟิล์มไพโรอิเล็กตริก PVDF จะได้



$$D = D_r + \varepsilon_0 K \frac{V}{b}$$

สำหรับไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ  $V$  จะได้

$$dD = \frac{dQ}{A} = \varepsilon_0 K \frac{dV}{b}$$

$$\frac{dQ}{dV} = C = \frac{\varepsilon_0 KA}{b} \quad (4.6)$$

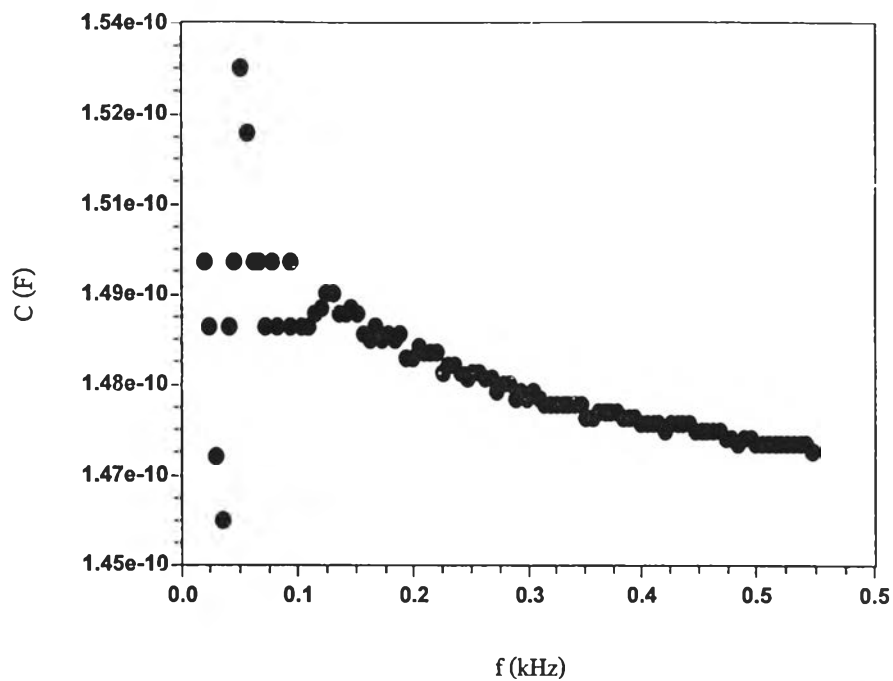
นั่นคือ เครื่องวิเคราะห์ห้อมพีแคนซ์แอลเอฟสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าได้ทั้งกรณีของฟิล์มไดอิเล็กทริกและฟิล์มไพโรอิเล็กทริก

ในการวิจัยนี้จะใช้เครื่องวิเคราะห์ห้อมพีแคนซ์แอลเอฟวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มไดอิเล็กทริก PVDF และฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ซึ่งเป็นฟิล์มที่ได้มาจากกระบวนการอัดเข้าเพื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PVDF พาณิชย์ โดยจะทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) เนื่องจากมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิขณะใช้งานของฟิล์มในการทำเป็นตัวรับรู้รังสีอินฟราเรด

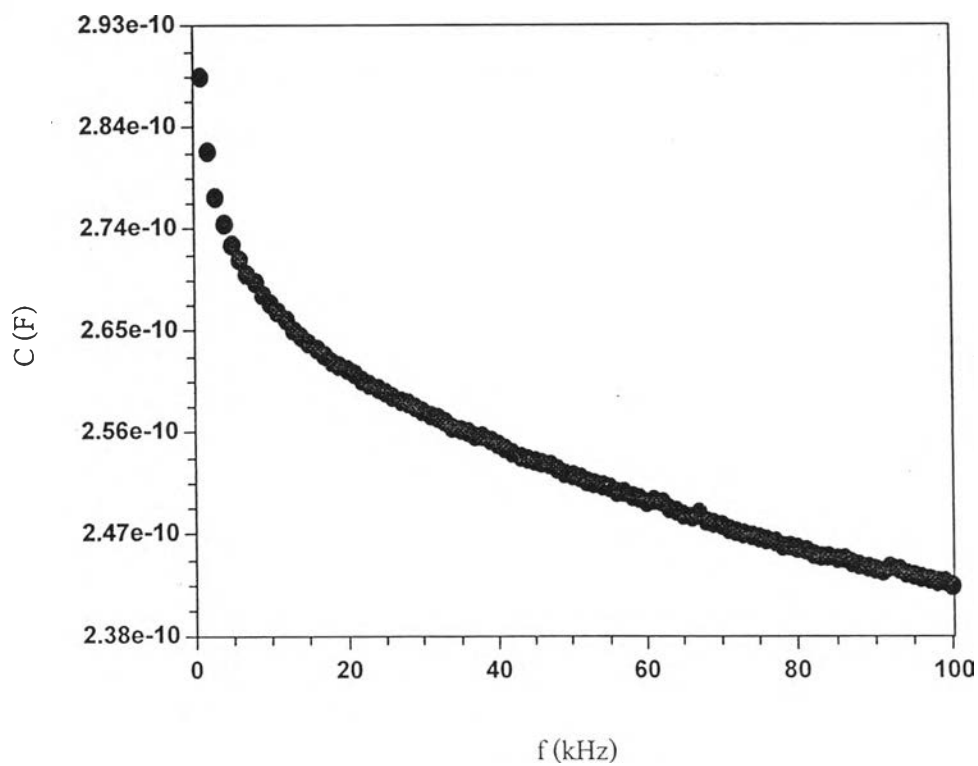
จากการที่ได้ทดลองวัดค่า  $C$  ของฟิล์มไดอิเล็กทริกพบว่าที่ความถี่ต่ำมาก ๆ เช่น 20-500 เฮิร์ตซ์ การวัดจะทำได้ลำบาก เนื่องจากสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ดังนั้นจึงวัดค่า  $C$  ของฟิล์มไดอิเล็กทริก ที่ความถี่ต่ำที่เลือกคือ 100 เฮิร์ตซ์ จำนวน 160 ครั้ง จากนั้นหาค่าเฉลี่ย จะได้  $C$  อยู่ในช่วง 150 พิโคฟารัด ดังรูปที่ 4.6 เนื่องจากฟิล์มนี้มีพื้นที่อิเล็กโทรด 2.88 ตารางเซนติเมตรหนา 130 ไมโครเมตร ดังนั้น จากสมการ (4.6) จะได้

$$K = \frac{Cb}{\varepsilon_0 A} = \frac{150 \times 10^{-12} \times 130 \times 10^{-6}}{8.85 \times 10^{-12} \times 2.88 \times 10^{-4}}$$

$$= 7.65$$



รูปที่ 4.6 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มไดอิเล็กทริก PVDF ตัวอย่างที่ความถี่ 20-500 เฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.7 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ตัวอย่างที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์

จากรูปที่ 4.7 แสดงความจุของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ตัวอย่างหนึ่งในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยฟิล์มนี้มีค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกประมาณ  $1.0 \times 10^{-5}$  คูลอมบ์ต่อตารางเมตรเคลวิน พื้นที่อิเล็กโทรด 3.36 ตารางเซนติเมตร หนา 90 ไมโครเมตร จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่า  $C$  ของฟิล์มจะมีค่าสูง และจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าที่ความถี่ต่ำ ๆ ค่า  $C$  ของฟิล์มจะแปรปรวนมากกว่าในกรณีของฟิล์มไดอิเล็กทริก

ในทำนองเดียวกันได้วัดค่า  $C$  ของฟิล์มนี้ที่ความถี่ 100 เฮิร์ตซ์ จำนวน 160 ครั้ง จะได้  $C$  ในย่าน 280 พิโคฟารัด ดังนั้น จะได้

$$K = \frac{Cb}{\epsilon_0 A} = \frac{280 \times 10^{-12} \times 90 \times 10^{-6}}{8.85 \times 10^{-12} \times 3.36 \times 10^{-4}}$$

$$= 8.47$$

จากการทดลองวัดค่า  $K$  ของฟิล์ม พบว่าค่า  $K$  ที่แน่นอนนั้นวัดได้ยาก อาจจะเป็นเนื่องมาจากฟิล์มมีความไม่สม่ำเสมอ (จากการยัด) การทำอิเล็กโทรดโดยการทาภาวเงิน หรือขั้วไฟฟ้าที่ต่อออกมาจากฟิล์ม ในการวิจัยนี้จึงไม่ได้มุ่งเน้นที่จะศึกษาอย่างละเอียด แต่ต้องการจะพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริกที่ใช้ฟิล์มนี้ ที่จะได้กล่าวต่อไป

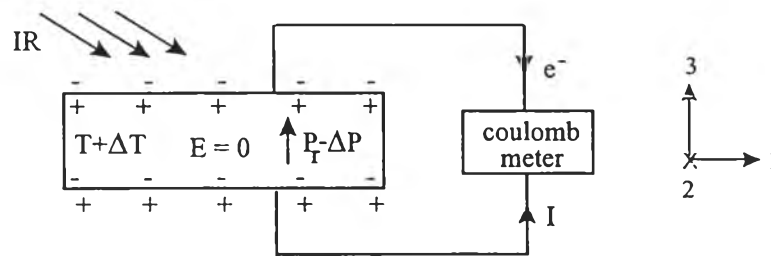
จากที่กล่าวมาแล้วว่า การเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ก็คือสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก ซึ่งเป็นค่าคงที่สำหรับฟิล์มแต่ละแผ่น ฟิล์มที่มีสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกสูงสามารถนำไปใช้งานได้ดี คุณภาพของฟิล์มจึงวัดจากค่าคงที่นี้ ดังนั้นก่อนที่จะนำฟิล์มไปใช้งานจะต้องวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกของฟิล์ม เพื่อดูว่าการเตรียมนั้นให้ผลดีอย่างไร

#### 4.4 การวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกโดยวิธีประยุกต์

โดยปกติแล้วการวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกมีหลายวิธี (ชูศรี อุทัยสิน, 2537) แต่จะต้องใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดซับซ้อน ในห้องปฏิบัติการธรรมดาไม่สามารถทำได้ (เพราะเครื่องมือมีราคาแพงมาก) และบางวิธีจะต้องทราบค่าความจุความร้อนจำเพาะ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสาร ต้องวัดอุณหภูมิให้ได้แม่นยำและรวดเร็ว ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้วิธี

วัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกแบบง่าย ๆ ที่ไม่ต้องอาศัยตัวแปรอื่น ๆ และใช้เครื่องมือที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งให้ผลแม่นยำพอสมควร

วิธีวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกแบบนี้มีผู้ทำวิจัยมาแล้ว (ชูศรี อุทัยวสิน, 2537) ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาให้ดีขึ้น วิธีการสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF เมื่อมีรังสีอินฟราเรดตกกระทบฟิล์ม ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลจากอิเล็กโทรดล่างไปอิเล็กโทรดบน

จากรูปที่ 4.8 เมื่อมีรังสีอินฟราเรดตกกระทบฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $\Delta T$  โพลาริเซชัน  $P_r$  จะลดลง  $\Delta P$  เพื่อให้สนามไฟฟ้าภายในฟิล์มเป็นศูนย์ ประจุลบจากอิเล็กโทรดบนจะเคลื่อนย้ายลงไปที่อิเล็กโทรดล่าง ในกรณีนี้ถ้าต่อหลอดตัวนำกับมาตรคูลอมบ์ ก็สามารถวัดประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนย้ายได้

จากสมการ (2.16) ถ้าตัดวงจรระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากกับฟิล์มจะเป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้

$$\Delta D = \frac{\Delta Q}{A} = p\Delta T \quad (4.7)$$

ถ้า  $\Delta Q$  เป็นขนาดของประจุที่เคลื่อนย้ายจากอิเล็กโทรดล่างไปอิเล็กโทรดบน จากสมการข้างบนจะได้ขนาดของ  $p$

$$p = \frac{\Delta Q}{A\Delta T} \quad (4.8)$$

จากสมการ (4.8) แสดงว่าถ้าเราวัดประจุที่เคลื่อนย้ายระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองเมื่ออุณหภูมิของฟิล์มเพิ่มขึ้น  $\Delta T$  ก็จะคำนวณหาขนาดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกได้

จากการสังเกตเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำมันเครื่องแล้วตั้งทิ้งไว้ พบว่าอุณหภูมิของน้ำมันจะลดลงค่อนข้างช้า หรือค่อนข้างจะคงที่ในช่วงเวลาสั้น ๆ ดังนั้นน่าจะใช้เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ได้ ในงานวิจัยนี้ใช้อิเล็กโทรมิเตอร์ (KEITHLEY Model 617 Programmable Electrometer) ซึ่งวัดประจุได้สูงสุด 20 นาโนคูลอมบ์ และฟิล์มที่ใช้ก็ทราบขนาดของพื้นที่อิเล็กโทรด ซึ่งสามารถนำไปคำนวณค่า  $p$  ได้ แต่ก่อนที่จะทำการทดลองวัดจะต้องไล่กระแส TSC ออกไปจากฟิล์มก่อน ซึ่งทำได้ง่าย ๆ โดยการฉายไฟ 100 วัตต์ ให้ฟิล์มเป็นเวลาประมาณ 10 วินาที หรืออาจกล่าวได้ว่าจะต้องให้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้งานของฟิล์ม (ตัวรับรู้รังสีอินฟราเรด) เช่น 60 องศาเซลเซียส แต่ต้องไม่ให้อุณหภูมิสูงกว่า 120 องศาเซลเซียส เพราะจะทำให้ฟิล์มไม่แสดงสมบัติไพโรอิเล็กทริก

ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกของฟิล์มในรูปที่ 4.8 จากสมการ (4.8) จริง ๆ แล้วค่าที่คำนวณออกมาได้คือ  $p_3$  แต่เพื่อความสะดวกในที่นี้จะไม่เขียนเลข 3 ไว้

สำหรับการวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27 องศาเซลเซียส) โดยวิธีประยุกต์มีวิธีการดังต่อไปนี้

1. ต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับอิเล็กโทรดทั้งสอง นำฟิล์มใส่ถุงพลาสติกขนาดเล็ก ควรปิดปากถุงพลาสติกให้มิดชิดเพื่อป้องกันไม่ให้ฟิล์มโดนน้ำมันเครื่อง ดังรูปที่ 4.9

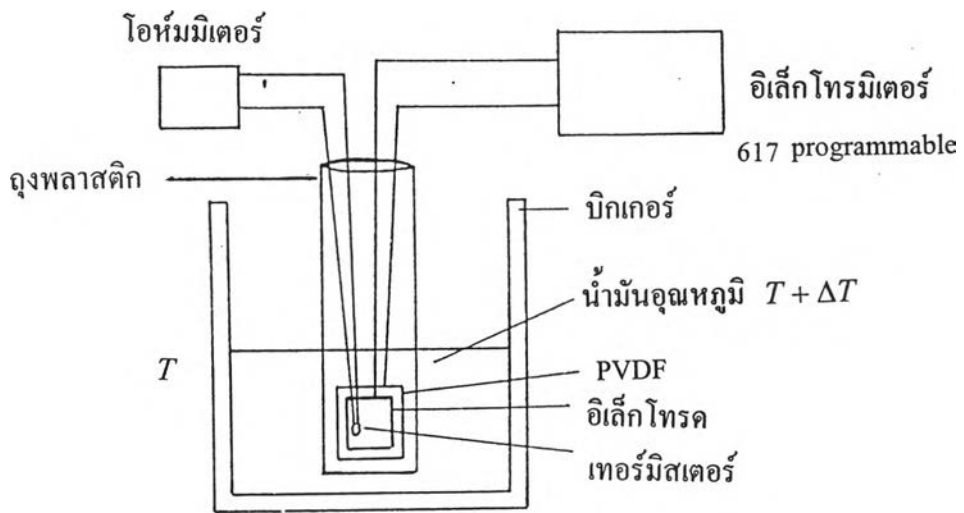
2. ต่อสายไฟจากฟิล์มเข้ากับอิเล็กโทรมิเตอร์ ซึ่งในที่นี้ใช้เป็นมาตรคูลอมบ์ (coulomb meter) เพื่อให้การวัดประจุมีประสิทธิภาพมากขึ้นก่อนจะวัดจะต้องเปิดอิเล็กโทรมิเตอร์ (warm) ทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมง

3. คิตเทอร์มิสเตอร์ (thermister) ซึ่งเป็นตัววัดอุณหภูมิที่มีความไวสูงไว้ในถุงพลาสติกในตำแหน่งกึ่งกลางของฟิล์ม ต่อสายไฟโยงออกมานอกถุงพลาสติกเข้ากับโอห์มมิเตอร์ (ohmmeter) จากการอ่านโอห์มมิเตอร์จะทราบอุณหภูมิเริ่มแรกของฟิล์ม

4. อุณหภูมิของน้ำมันเครื่องในบีกเกอร์ให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง  $\Delta T$  เช่นประมาณ 1-5 องศาเซลเซียส นำบีกเกอร์รองใต้ถุงพลาสติก

5. กดปุ่มให้อิเล็กโทรมิเตอร์เริ่มวัดประจุ หนูนบีกเกอร์ให้สูงขึ้นจนถุงพลาสติกจมในน้ำมันเครื่อง ดังนั้นอุณหภูมิของฟิล์มจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมันเครื่อง ซึ่งมีค่าประมาณ 28-32 องศาเซลเซียส โดยประจุอิสระ  $Q$  ที่เคลื่อนย้ายระหว่างอิเล็กโทรดจะอ่านได้จากอิเล็กโทรมิเตอร์ ขณะเดียวกันสังเกตความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่เปลี่ยนเนื่องจากอุณหภูมิของฟิล์มค่อย ๆ สูงขึ้น เมื่อความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์คงที่ แสดงว่าอุณหภูมิของฟิล์มเท่ากับอุณหภูมิของน้ำมันพอดี จึงอ่านค่า  $\Delta Q$  จากอิเล็กโทรมิเตอร์ อุณหภูมิของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น  $\Delta T$  อาจหาได้จากความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่เปลี่ยนไป (หาจากสมการ (4.9))

6. นำบิกเกอร์ออกจากถุงพลาสติก รอให้ฟิล์มมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง  
 7. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 5 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิ ( $\Delta T$ ) หลาย ๆ ค่า แล้ววัดประจุดั้งเดิม



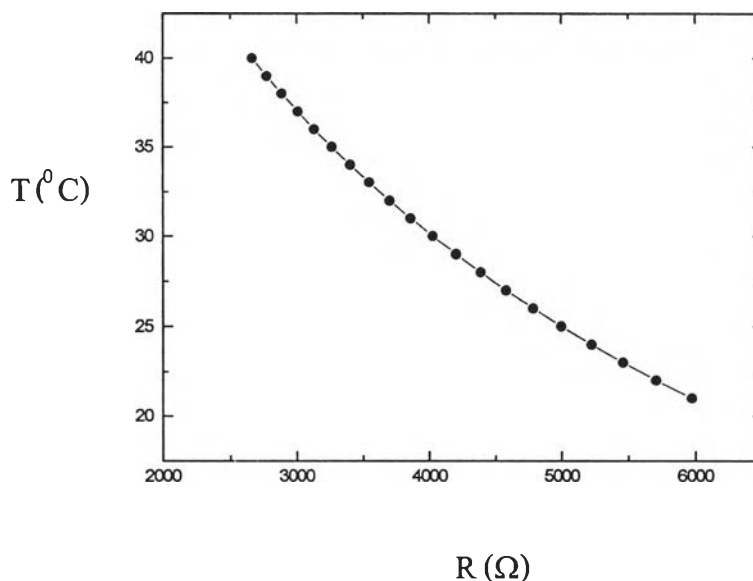
รูปที่ 4.9 แสดงการทดลองเพื่อวัดสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริกโดยวิธีประยุกต์

ตารางที่ 4.1 แสดงความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ระหว่างอุณหภูมิ 21-40 องศาเซลเซียส

T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)
21	5972	31	3861
22	5710	32	3701
23	5462	33	3549
24	5225	34	3404
25	5000	35	3265
26	4786	36	3133
27	4582	37	3007
28	4389	38	2887
29	4204	39	2772
30	4028	40	2663

ตารางที่ 4.1 แสดงความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในการหาอุณหภูมิ  $T$  จากความต้านทาน  $R$  ของเทอร์มิสเตอร์ มีวิธีการดังนี้

จากตารางที่ 4.1 เราสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ ในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานก็คือระหว่างอุณหภูมิ 25-37 องศาเซลเซียส ได้ดังกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ ระหว่างช่วงอุณหภูมิ 25 - 37 องศาเซลเซียส

จากความสัมพันธ์ของกราฟในรูปที่ 4.10 สามารถจะเขียนสมการพหุนามดีกรี 4 (4<sup>th</sup> degree polynomial) ในช่วงอุณหภูมิ 25-37 องศาเซลเซียส ได้เป็น

$$T = a + bR + cR^2 + dR^3 + eR^4 \quad (4.9)$$

เมื่อ	$a = 85.454063$	$b = -0.028627254$
	$c = 5.9713374 \times 10^{-6}$	$d = -7.062454 \times 10^{-10}$
	$e = 3.468810 \times 10^{-14}$	

(เขียนอยู่ในรูปสมการพหุนามดีกรี 4 เนื่องจากกราฟจะมีค่าสหสัมพันธ์ (correlation) เข้าใกล้ 1 มากที่สุด)

จากการอ่านค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์จากโอห์มมิเตอร์ก็สามารถคำนวณหาอุณหภูมิได้ตามสมการ (4.9) จากผลการทดลองหลาย ๆ ครั้งเมื่อนำมาเขียนกราฟระหว่างประจุ ( $\Delta Q$ ) ในแกน  $y$  กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta T$ ) ในแกน  $x$  ตามทฤษฎีจะมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น (linear) ผ่านจุดกำเนิด (origin) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริกได้จากสมการ (4.8) นั่นคือ

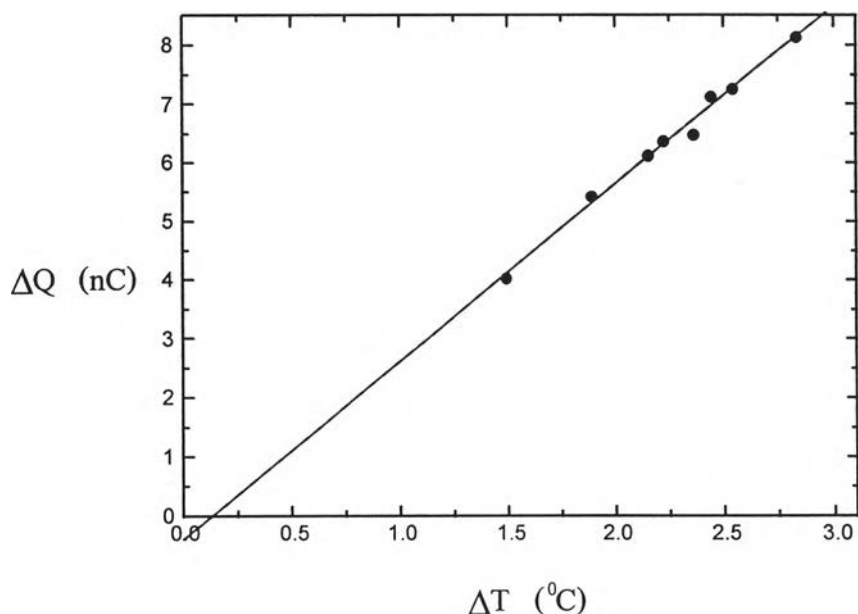
$$p = \frac{1}{A} \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

ต่อไปจะแสดงผลการวัดสัมประสิทธิ์ไฟโรอิเล็กทริกของฟิล์มพื้นที่อิเล็กโทรด 2.34 ตารางเซนติเมตร ซึ่งจัดขั้วที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 28.57 เมกะโวลต์ต่อเมตร เวลาสำหรับจัดขั้ว 20 นาที ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.11



ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองของฟิล์มโดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 28.57 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 2.34 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 1)

ความต้านทานเริ่มต้น (k $\Omega$ )	ความต้านทานสุดท้าย (k $\Omega$ )	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $^{\circ}$ C)	ประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (nC)
4.62	4.09	2.83	8.14
4.63	4.15	2.54	7.26
4.71	4.24	2.44	7.12
4.65	4.20	2.36	6.48
4.70	4.27	2.22	6.37
4.73	4.31	2.15	6.12
4.72	4.35	1.89	5.42
4.66	4.37	1.49	4.03



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม ( $\Delta Q$ ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta T$ ) ของฟิล์ม 1

จากรูปที่ 4.11 ได้ความสัมพันธ์  $\Delta Q = 3.02\Delta T - 0.4$

เนื่องจาก -0.4 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ  $\Delta Q$  ในการทดลองอาจถือได้ว่า

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T} \cong 3.02 \text{ nC / K}$$

สำหรับฟิล์มนี้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก

$$p = \frac{3.02 \times 10^{-9} \text{ C / K}}{2.34 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1.29 \times 10^{-5} \text{ C / m}^2 \text{ K}$$

(ความจริง  $p$  มีค่าคิดลบแต่ไม่ได้เขียนเครื่องหมายแสดงไว้)

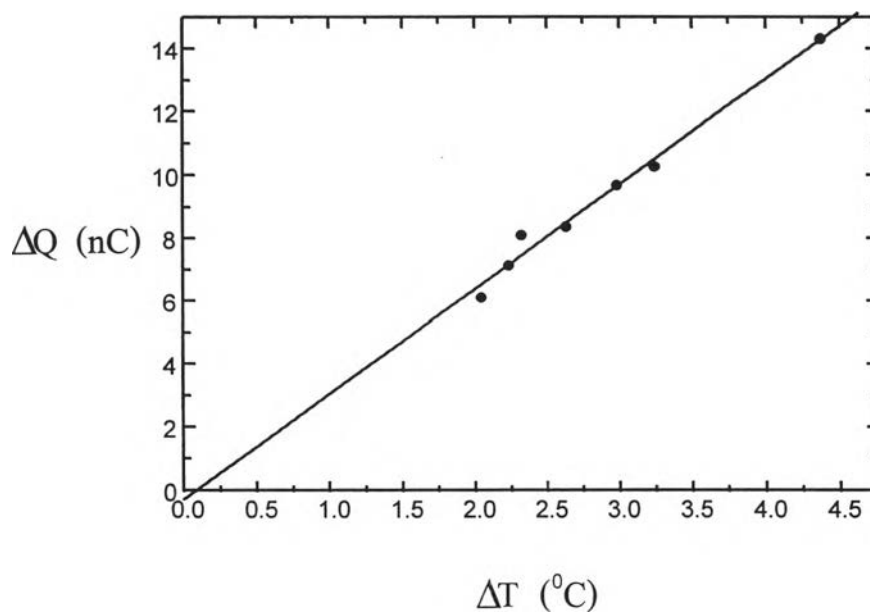
วิธีนี้สามารถนำไปวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกของฟิล์มต่าง ๆ ได้

#### 4.5 สัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF

ในการวิจัยนี้จะวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF อีก 8 แผ่น ซึ่งฟิล์มแต่ละแผ่นจะทราบตัวแปรของการเตรียมฟิล์มในกระบวนการจัดขึ้น ได้แก่ อุณหภูมิ ( $T_p$ ) และสนามไฟฟ้า ( $E_p$ ) โดยฟิล์มทั้ง 9 แผ่น ใช้เวลาในการจัดขึ้น ( $t_p$ ) เท่ากันหมดคือ 20 นาที เพื่อจะรู้ว่าตัวแปรต่าง ๆ ข้างต้นมีผลต่อสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกอย่างไร และเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่มีผู้ทำวิจัยมาแล้ว (Mort and Pfister, 1982) โดยผลการทดลองของฟิล์มแต่ละแผ่น แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 - 4.10 และ รูปที่ 4.12 - 4.19

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของฟิล์มโดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 33.33 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 2.40 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 2)

ความต้านทานเริ่มต้น (k $\Omega$ )	ความต้านทานสุดท้าย (k $\Omega$ )	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $^{\circ}\text{C}$ )	ประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (nC)
4.34	3.69	4.37	14.31
4.34	3.78	3.24	10.26
4.35	3.83	2.98	9.68
4.33	3.87	2.63	8.36
4.34	3.93	2.32	8.10
4.30	3.91	2.23	7.12
4.31	3.95	2.04	6.11



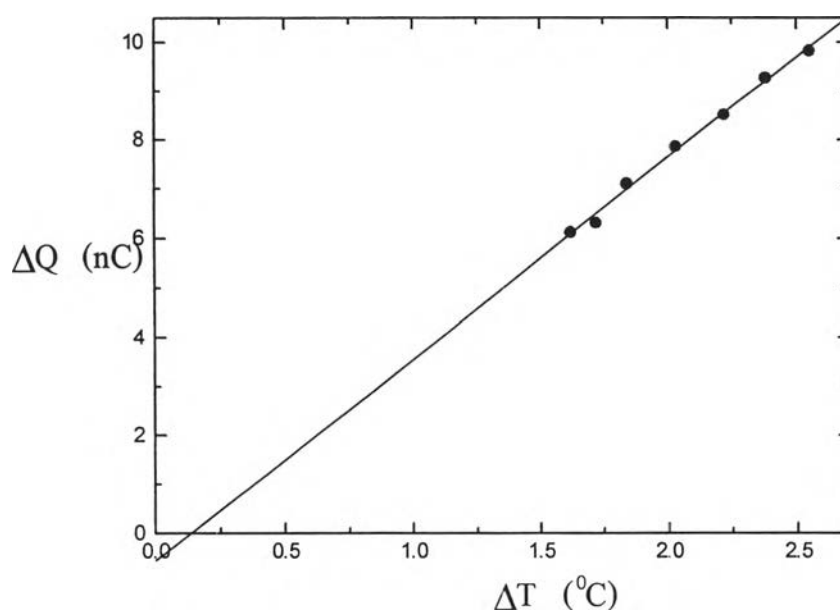
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม ( $\Delta Q$ ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta T$ ) ของฟิล์ม 2

จากรูปที่ 4.12 ได้ความสัมพันธ์  $\Delta Q = 3.33\Delta T - 0.28$

ดังนั้น จะได้  $p = 1.38 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2 \text{ K}$

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองของฟิล์มโดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 42.86 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 2.23 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 3)

ความต้านทานเริ่มต้น (k $\Omega$ )	ความต้านทานสุดท้าย (k $\Omega$ )	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $^{\circ}$ C)	ประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (nC)
4.79	4.29	2.55	9.83
4.80	4.33	2.38	9.27
4.70	4.27	2.22	8.51
4.65	4.26	2.03	7.86
4.60	4.25	1.84	7.11
4.60	4.27	1.72	6.31
4.59	4.28	1.62	6.12



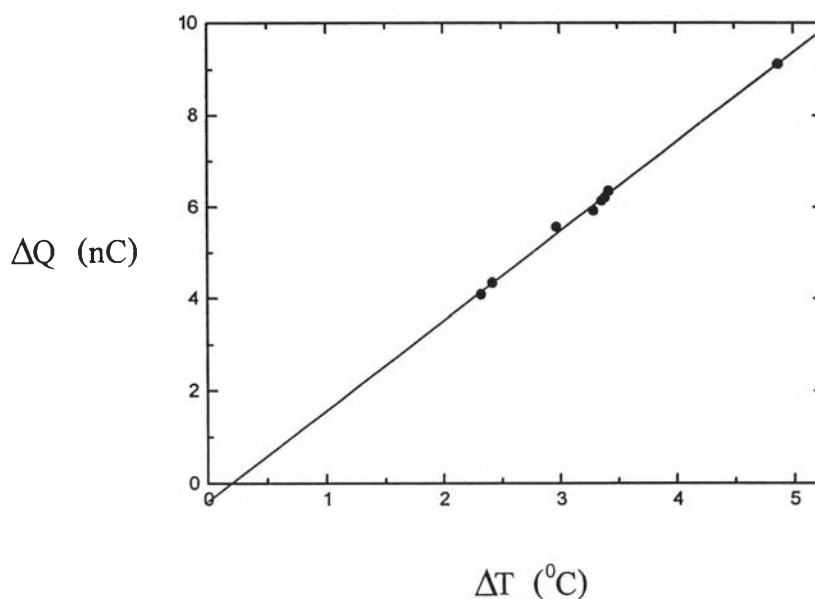
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม ( $\Delta Q$ ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta T$ ) ของฟิล์ม 3

จากรูปที่ 4.13 ได้ความสัมพันธ์  $\Delta Q = 4.10\Delta T - 0.55$

ดังนั้น จะได้  $p = 1.80 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2\text{K}$

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลองของฟิล์มโดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 28.57 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 2.01 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 4)

ความต้านทานเริ่มต้น (k $\Omega$ )	ความต้านทานสุดท้าย (k $\Omega$ )	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $^{\circ}$ C)	ประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (nC)
4.77	3.87	4.87	9.12
4.74	4.09	3.42	6.35
4.65	4.02	3.39	6.21
4.61	3.99	3.36	6.14
4.69	4.07	3.29	5.92
4.66	4.10	2.97	5.57
4.65	4.19	2.42	4.35
4.54	4.11	2.32	4.09



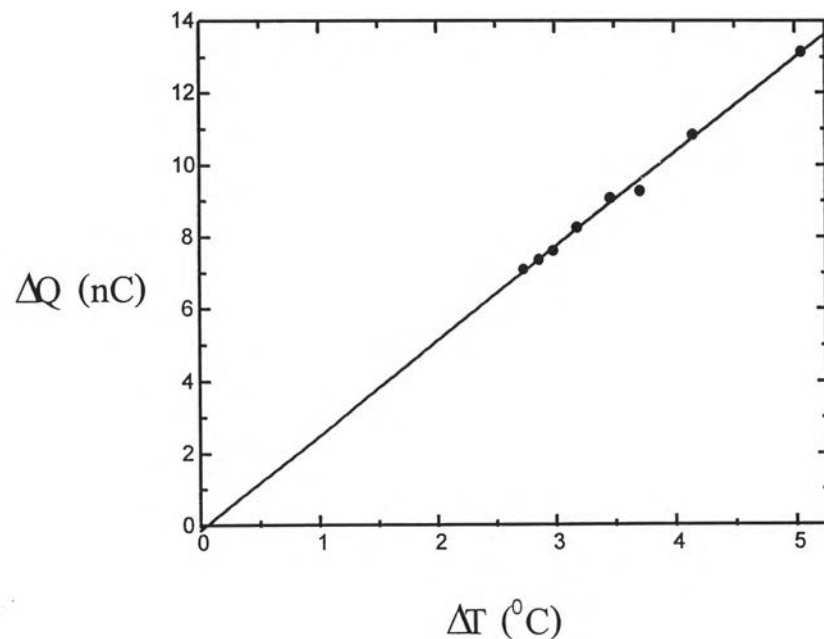
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม ( $\Delta Q$ ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta T$ ) ของฟิล์ม 4

จากรูปที่ 4.14 ได้ความสัมพันธ์  $\Delta Q = 1.95\Delta T - 0.38$

ดังนั้น จะได้  $p = 0.97 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2 \text{K}$

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองของฟิล์มโดยจัดชั่วที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 38.70 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 1.92 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 5)

ความต้านทานเริ่มต้น (k $\Omega$ )	ความต้านทานสุดท้าย (k $\Omega$ )	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $^{\circ}$ C)	ประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (nC)
4.73	3.81	5.05	13.14
4.77	3.99	4.15	10.85
4.80	4.09	3.71	9.29
4.83	4.16	3.46	9.08
4.83	4.21	3.18	8.26
4.87	4.28	2.98	7.61
4.82	4.26	2.86	7.37
4.85	4.31	2.73	7.10



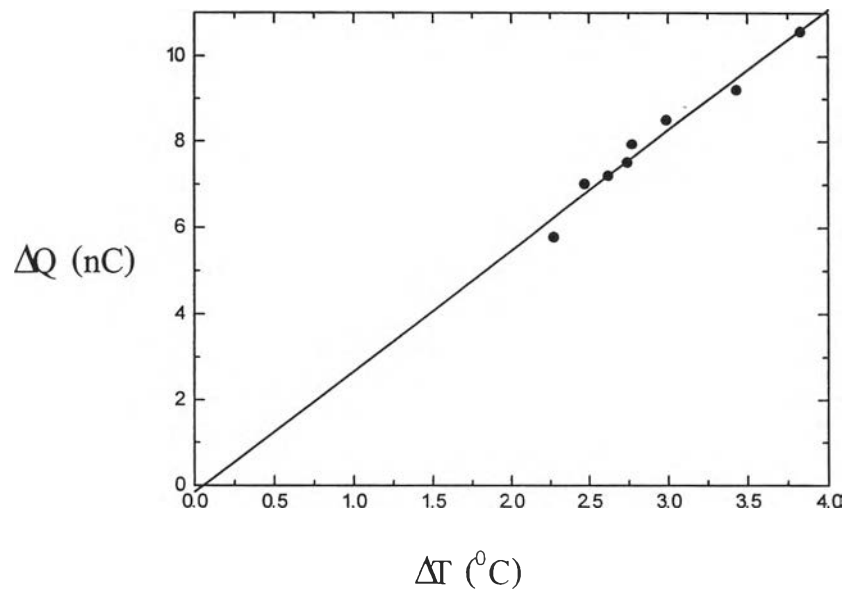
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม ( $\Delta Q$ ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta T$ ) ของฟิล์ม 5

จากรูปที่ 4.15 ได้ความสัมพันธ์  $\Delta Q = 2.62\Delta T - 0.13$

ดังนั้น จะได้  $p = 1.36 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2 \text{ K}$

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองของฟิล์มโดยจัดชั่วที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 42.86 เมกะโวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 1.94 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 6)

ความต้านทานเริ่มต้น (k $\Omega$ )	ความต้านทานสุดท้าย (k $\Omega$ )	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $^{\circ}\text{C}$ )	ประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (nC)
4.97	4.21	3.83	10.58
4.99	4.30	3.43	9.21
5.00	4.39	2.99	8.51
4.87	4.32	2.77	7.94
4.98	4.42	2.74	7.52
5.00	4.46	2.62	7.20
5.00	4.49	2.47	7.02
4.99	4.52	2.27	5.78



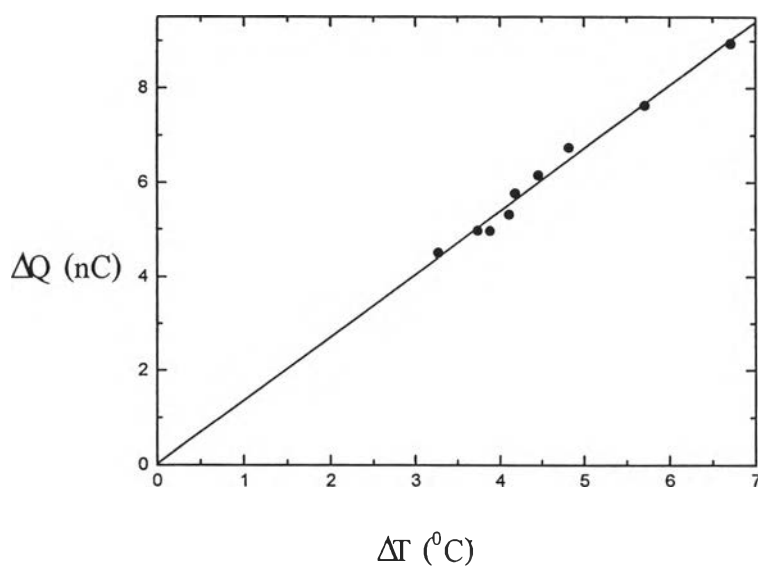
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม ( $\Delta Q$ ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta T$ ) ของฟิล์ม 6

จากรูปที่ 4.16 ได้ความสัมพันธ์  $\Delta Q = 2.80\Delta T - 0.14$

ดังนั้น จะได้  $p = 1.44 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2\text{K}$

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองของฟิล์มโดยจัดชั่วที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 25 เมกะโวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 2.0 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 7)

ความต้านทานเริ่มต้น (k $\Omega$ )	ความต้านทานสุดท้าย (k $\Omega$ )	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $^{\circ}$ C)	ประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (nC)
4.52	3.40	6.71	8.94
4.50	3.53	5.71	7.63
4.47	3.64	4.82	6.73
4.45	3.68	4.46	6.15
4.47	3.74	4.18	5.77
4.53	3.80	4.11	5.31
4.63	3.92	3.88	4.96
4.53	3.86	3.74	4.97
4.58	3.98	3.27	4.50



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม ( $\Delta Q$ ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta T$ ) ของฟิล์ม 7

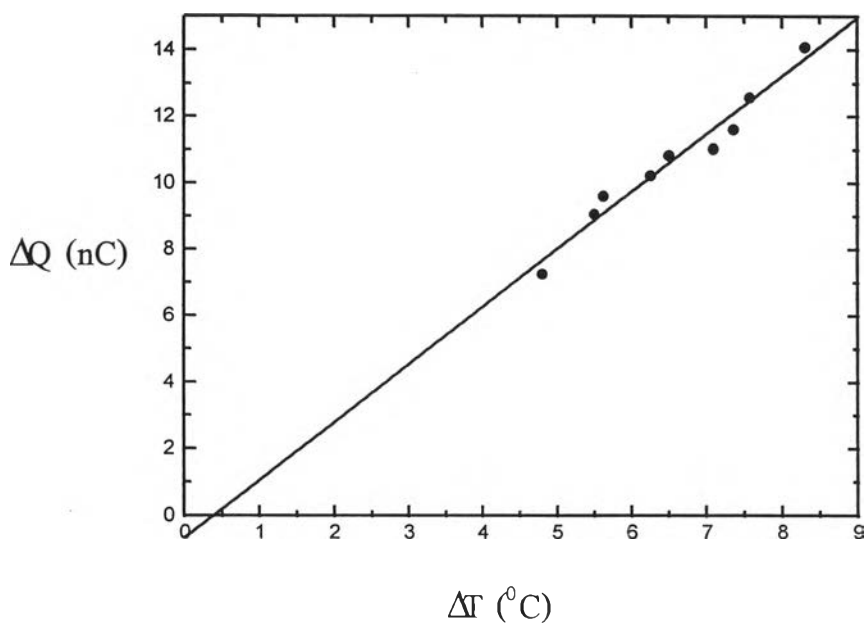
จากรูปที่ 4.17 ได้ความสัมพันธ์  $\Delta Q = 1.34\Delta T + 0.02$

ดังนั้น จะได้  $p = 0.67 \times 10^{-5} \text{ C / m}^2 \text{ K}$



ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองของฟิล์มโดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 30 เมกะ โวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 1.98 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 8)

ความต้านทานเริ่มต้น (k $\Omega$ )	ความต้านทานสุดท้าย (k $\Omega$ )	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $^{\circ}$ C)	ประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (nC)
4.13	2.92	8.30	14.09
4.16	3.03	7.57	12.58
4.18	3.07	7.36	11.62
4.23	3.14	7.09	11.05
4.22	3.21	6.50	10.84
4.27	3.28	6.25	10.23
4.26	3.36	5.62	9.61
4.33	3.43	5.50	9.07
4.29	3.50	4.80	7.26



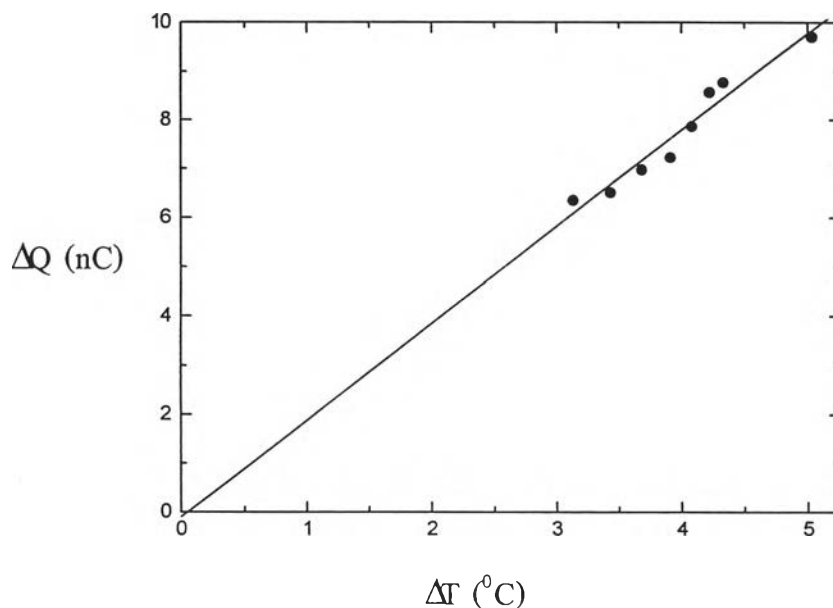
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม ( $\Delta Q$ ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta T$ ) ของฟิล์ม 8

จากรูปที่ 4.18 ได้ความสัมพันธ์  $\Delta Q = 1.73\Delta T - 0.67$

ดังนั้น จะได้  $p = 0.87 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2 \text{ K}$

ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองของฟิล์มโดยจัดขั้วที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สนามไฟฟ้า 35 เมกะโวลต์ต่อเมตร พื้นที่ของอิเล็กโทรด 1.97 ตารางเซนติเมตร (ฟิล์ม 9)

ความต้านทานเริ่มต้น (k $\Omega$ )	ความต้านทานสุดท้าย (k $\Omega$ )	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $^{\circ}$ C)	ประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม (nC)
4.23	3.42	5.03	9.71
4.24	3.53	4.33	8.77
4.49	3.75	4.22	8.57
4.28	3.60	4.08	7.87
4.31	3.65	3.91	7.23
4.35	3.72	3.68	6.98
4.41	3.81	3.43	6.51
4.32	3.78	3.13	6.35



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจากฟิล์ม ( $\Delta Q$ ) กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ( $\Delta T$ ) ของฟิล์ม 9

จากรูปที่ 4.19 ได้ความสัมพันธ์  $\Delta Q = 1.97\Delta T - 0.10$

ดังนั้น จะได้  $p = 1.0 \times 10^{-5} \text{ C / m}^2 \text{ K}$

จากการทดลอง มีแนวโน้มว่าถ้าใช้  $\Delta T$  สูง ๆ สมการ (2.9) อาจจะไม่ใช้สมการเชิงเส้น ดังนั้นที่ค่า  $\Delta T$  มาก ๆ กราฟระหว่าง  $\Delta Q$  และ  $\Delta T$  ในรูปที่ 4.11-4.19 อาจโค้งขึ้นเล็กน้อยได้ อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อน (errors) นี้น้อยมากจนไม่สามารถจะวัดได้ใน การทดลองแบบนี้ และไม่ทำให้  $p$  ที่ได้ผิดไปมากเกินไป จึงไม่ได้ทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมในงานวิจัยนี้

#### 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $p$ , $E_p$ และ $T_p$

เนื่องจากสัมประสิทธิ์โพโรอิเล็กทริก ( $p$ ) จะมีความสัมพันธ์กับสปอนเดเนียสโพลาริเซชัน ( $P_s$ ) โดย  $p$  และ  $P_s$  จะแปรผันโดยตรงกับ  $E_p$ ,  $T_p$  และ  $t_p$  ซึ่งจากรายงานการวิจัย (Mort and Pfister, 1982) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$  และ  $E_p$  ที่  $T_p$  ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$T_p = 80^\circ \quad \text{จะได้} \quad p = 3.07 \times 10^{-13} E_p \quad (4.10ก)$$

$$T_p = 90^\circ \quad \text{จะได้} \quad p = 3.23 \times 10^{-13} E_p \quad (4.10ข)$$

$$T_p = 100^\circ \quad \text{จะได้} \quad p = 4.03 \times 10^{-13} E_p \quad (4.10ค)$$

( $p$  และ  $E_p$  มีหน่วยเป็น  $10^{-5} C/m^2 K$  และ  $MV/m$  ตามลำดับ)

ถ้าเขียน  $p = m(T_p)E_p$  ค่า  $m(T_p)$  จะสรุปได้ดังตารางที่ 4.11 ข้างล่าง

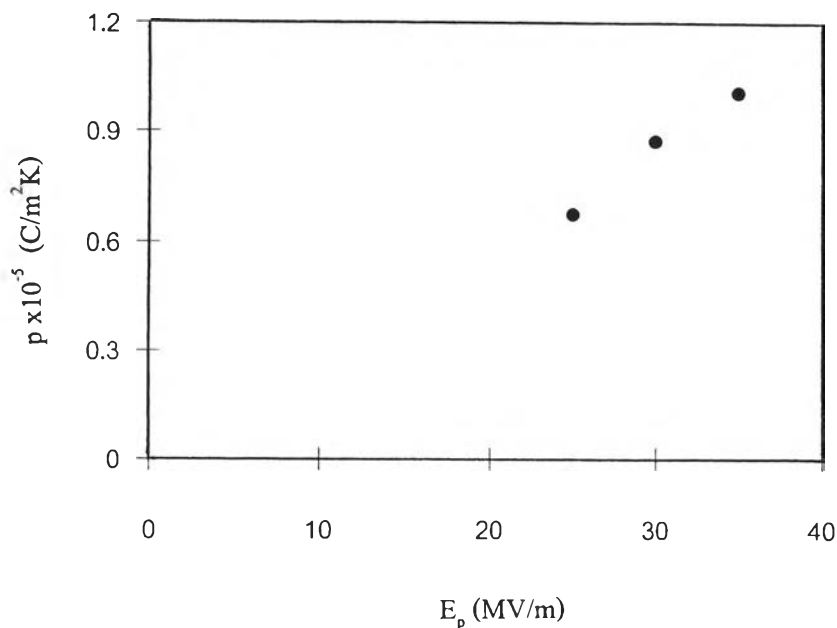
ตารางที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_p$  และ  $m(T_p)$  จากงานวิจัยที่ผ่านมา

$T_p$ ( $^\circ C$ )	$m(T_p)$ ( $F/mK$ )
80	$3.07 \times 10^{-13}$
90	$3.23 \times 10^{-13}$
100	$4.03 \times 10^{-13}$

ผลการทดลองที่ได้จากหัวข้อ 4.5 เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$  ในแกน  $y$  และ  $E_p$  ในแกน  $x$  ที่  $T_p$  ต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.12-4.14 และรูปที่ 4.20-4.22

ตารางที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$  และ  $E_p$  เมื่อ  $T_p = 80$  องศาเซลเซียส

$E_p$ (MV/m)	$p$ ( $\times 10^{-5}$ C/m <sup>2</sup> K)
25	0.67
30	0.87
35	1.00



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$  และ  $E_p$  เมื่อ  $T_p = 80$  องศาเซลเซียส

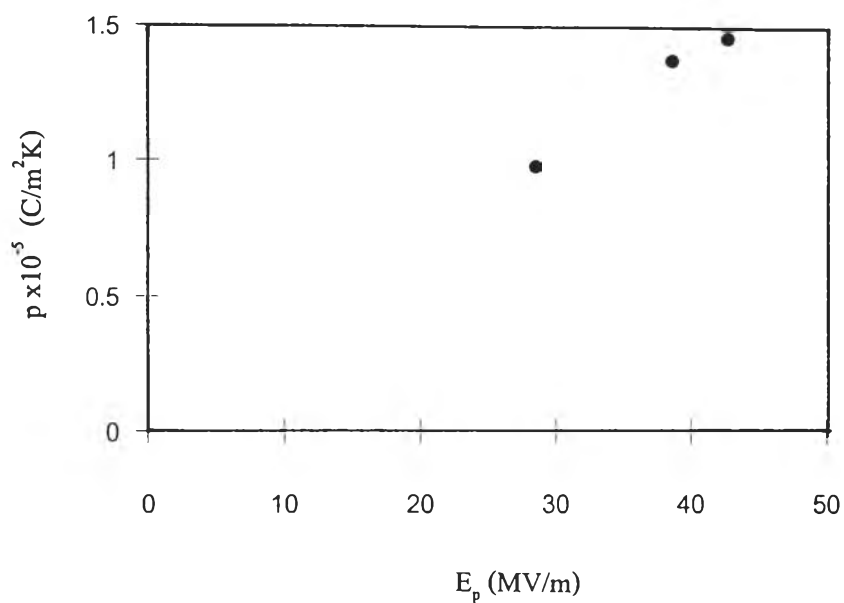
ถ้าถือว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$  และ  $E_p$  เมื่อ  $T_p$  คงที่เป็นแบบเชิงเส้น จากข้อมูลในรูปที่ 4.20 อาจจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$  และ  $E_p$  โดยใช้วิธีการปรับแบบกำลังสองที่น้อยที่สุด (least-square fit) ได้ดังนี้

$$p \cong 3.30 \times 10^{-13} E_p - 0.14 \quad (4.11)$$

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อมูลมีเพียง 3 จุด สมการนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$  และ  $E_p$  โดยประมาณเท่านั้น

ตารางที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$  และ  $E_p$  เมื่อ  $T_p = 90$  องศาเซลเซียส

$E_p$ (MV/m)	$p$ ( $\times 10^{-5}$ C/m <sup>2</sup> K)
28.57	0.97
38.70	1.36
42.86	1.44



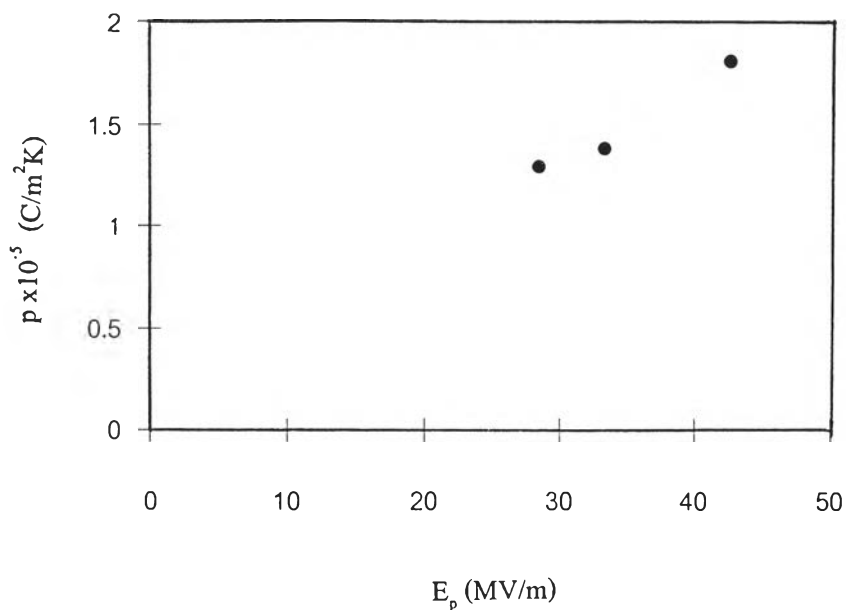
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$  และ  $E_p$  เมื่อ  $T_p = 90$  องศาเซลเซียส

ในทำนองเดียวกันกับสมการ (4.11) จะได้

$$p \cong 3.41 \times 10^{-13} E_p + 0.007 \quad (4.12)$$

ตารางที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$  และ  $E_p$  เมื่อ  $T_p = 100$  องศาเซลเซียส

$E_p$ (MV/m)	$p$ ( $\times 10^{-5}$ C/m <sup>2</sup> K)
28.57	1.29
33.33	1.38
42.86	1.80



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$  และ  $E_p$  เมื่อ  $T_p = 100$  องศาเซลเซียส

ในทำนองเดียวกันกับสมการ (4.11) จะได้

$$p \cong 3.69 \times 10^{-13} E_p + 0.20 \quad (4.13)$$

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$  และ  $E_p$  ที่  $T_p$  ต่าง ๆ มีแนวโน้มที่เป็นแบบเชิงเส้น และสอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่า  $p$  จะมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิจัดจั่ว  $T_p$  สูงขึ้น และสนามในการจัดจั่ว  $E_p$  สูงขึ้น สำหรับในการทดลองตัวแปรที่ควบคุมได้ยาก ได้แก่ ความหนาของฟิล์มที่เกิดจากอัตราส่วนการยึดฟิล์ม อุณหภูมิที่ใช้ขณะอบ ความหนาของอิเล็กโทรด อุณหภูมิจะมีผลต่อโครงสร้างผลึกของ PVDF ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ในขณะที่ความหนาของอิเล็กโทรดจะมีผลต่อการตอบสนองของฟิล์ม

จากสมการ (4.11)-(4.13) จะเห็นได้ว่าค่าความชันจากกราฟระหว่าง  $p$  และ  $E_p$  เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ หรือสามารถเขียนได้เป็น

$$p = mE_p + C'$$

นั่นคือ  $m = m(T_p)$

ดังนั้น สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_p$  และ  $m$  ได้ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_p$  และ  $m(T_p)$  ในงานวิจัยนี้

$T_p$ ( $^{\circ}C$ )	$m(T_p)$ ( $F / mK$ )
80	$3.3 \times 10^{-13}$
90	$3.41 \times 10^{-13}$
100	$3.69 \times 10^{-13}$

ซึ่งคล้ายกับผลในตารางที่ 4.11 กล่าวคือ  $m(T_p)$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นไปกับค่า  $T_p$

ดังนั้นในการเตรียมฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ให้มีสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกที่สูงสรุปได้ดังนี้

1. ยืดฟิล์มอย่างช้า ๆ ในน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ให้มีอัตราส่วนการยืด 4 เท่า
2. จากการทดลอง พบว่าในการจัดขั้วถ้าใช้สนามไฟฟ้า ( $E_p$ ) สูง ค่า  $p$  จะสูงขึ้นด้วย ในขณะเดียวกันโอกาสที่จะเกิดการสปาร์กขึ้นบนฟิล์มก็มากขึ้นด้วย แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของฟิล์มและอุณหภูมิที่ใช้จัดขั้วด้วย กล่าวคือถ้าจัดขั้วที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 27 องศาเซลเซียส) ก็จะสามารถให้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง ๆ ได้ เช่น ประมาณ 80-100 เมกะ โวลต์ต่อเมตร
3. จากกราฟในรูปที่ (4.20)-(4.22) จะเห็นได้ว่าค่า  $p$  จะสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิจัดขั้ว  $T_p$  มากขึ้นด้วย แต่ค่า  $T_p$  ไม่น่าจะสูงเกิน 100 องศาเซลเซียส เพราะอาจจะทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนจากเฟสเบตาเป็นเฟสแอลฟาได้ นั่นคือจะส่งผลให้ค่า  $p$  ลดลง และที่  $T_p$  สูงอาจจะทำให้เกิดการสปาร์กได้ง่าย ดังนั้นคิดว่าอุณหภูมิจัดขั้วที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 90 องศาเซลเซียส