

บทที่ 3

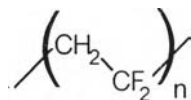
ฟิล์มพอลิเมอร์พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์

หลังจากที่ได้ทราบทฤษฎีไฟโรอิเล็กทริกและหลักการทำงานของฟิล์มไฟโรอิเล็กทริกมาแล้วในบทที่ 2 ดังนั้นในบทนี้จะได้กล่าวถึงเนื้อหาที่เป็นส่วนของสารไฟโรอิเล็กทริกที่เราสนใจคือ พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) เช่น โครงสร้างผลึก การเตรียมฟิล์มไฟโรอิเล็กทริก และกระแส TSC

สมบัติไฟโรอิเล็กทริกพบได้ในพอลิเมอร์หลายชนิด แต่สมบัติไฟโรอิเล็กทริกที่แรงนั้นพบในพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ หรือ PVDF และพอลิเมอร์ร่วมของมันบางชนิด ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 1.1 โครงสร้างโมเลกุล (molecular structure) ของ PVDF มีลักษณะที่ซับซ้อนเนื่องจากมีถึง 4 แบบด้วยกัน ดังรูปที่ 3.1 โดยมีนักวิทยาศาสตร์ทำการศึกษาเป็นจำนวนมากและได้มีการปรับปรุงแก้ไขต่อเนื่องกันมาตลอด (Hasegawa *et al.*, 1972) (Lovinger, 1983) ทำให้ทราบถึงโครงสร้างผลึก (crystal structure) และสมบัติต่าง ๆ ของ PVDF ได้ (Nalwa, 1995)

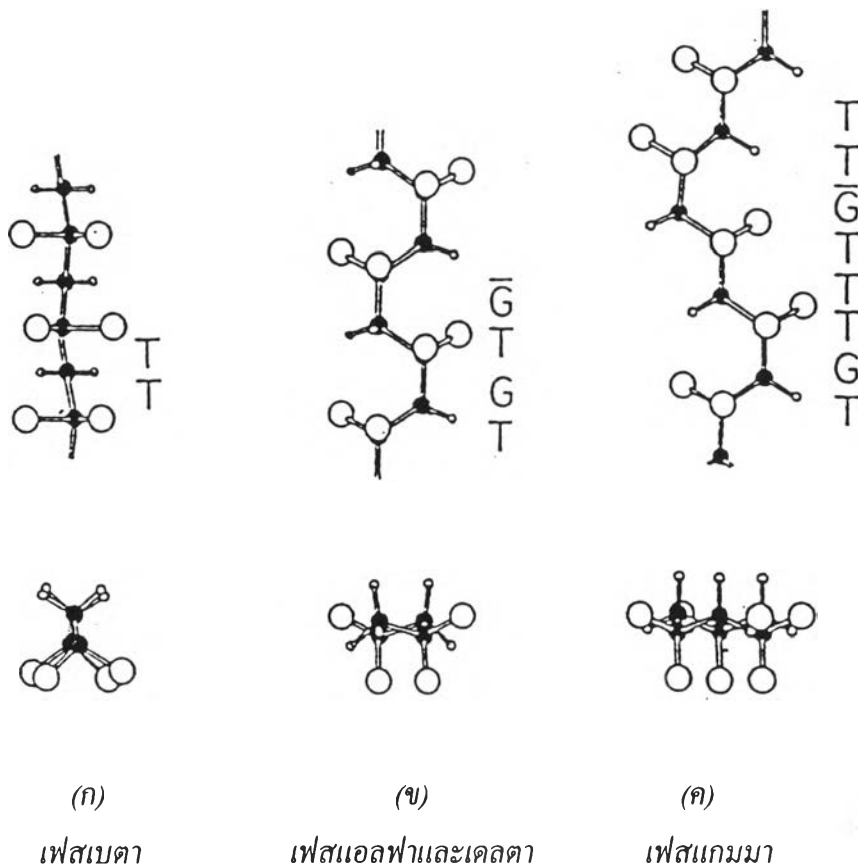
3.1 โครงสร้างผลึกของ PVDF

พอลิเมอร์ไฟโรอิเล็กทริกจะมีไดโพลถาวรทางไฟฟ้า (electric permanent dipole) เมื่อมีสนามไฟฟ้าความเข้มสูงทำให้ไดโพลจัดเรียงตัวตามทิศของสนามไฟฟ้า สำหรับ PVDF แสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ (Kepler and Anderson, 1978) (Bauer, 1996) จัดอยู่ในประเภทพอลิเมอร์กึ่งผลึก ประกอบด้วยมอนอเมอร์ (monomer)

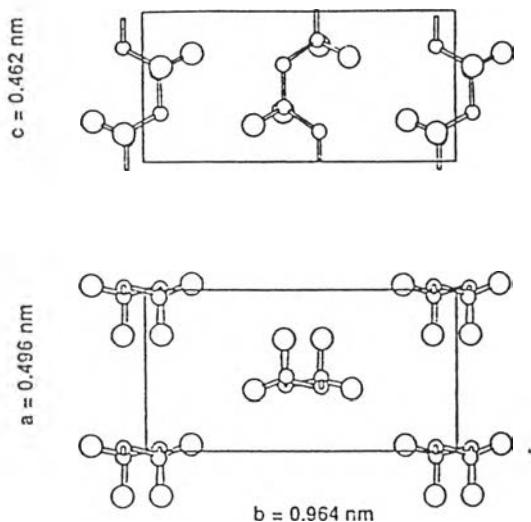


ต่อกันเป็นโซ่ยาว ประมาณ 60,000 มอนอเมอร์ มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weights) ระดับขนาด 4×10^6 มีอุณหภูมิการหลอมตัว (melt temperature " T_m ") ที่ประมาณ 175 -185 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคูรี (T_c) ที่ประมาณ 120 องศาเซลเซียส (Lovinger *et al.*, 1986) และ อุณหภูมิการกลายเป็นแก้ว (glass transition temperature " T_g ") ที่ -40 องศาเซลเซียส

ที่อุณหภูมิสูง PVDF จะหลอมเหลว เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าประมาณ 150 องศาเซลเซียส จะเริ่มเห็นลักษณะผลึกแบบ II หรือ เฟสแอลฟา (α -phase) (Takahashi *et al.*, 1983) มีโครงสร้างสเฟียรูไลต์ (spherulite) คือมีส่วนที่เป็นอสังฐานและผลึกปนกัน โครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก (monoclinic) แบบมุม 90 องศา ($\beta = 90^\circ$) (Kittel, 1988) เซลล์หน่วย (unit cell) เป็นผลึกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular lattice) การวางตัวของโซ่คาร์บอน (carbon-carbon chain) เป็นแบบซีสระนาบ $TGT\bar{G}$ (trans-gauche-trans-gauche' : planar cis) เนื่องจากอะตอมไฮโดรเจน (H) คาร์บอน (C) และฟลูออรีน (F) มีสภาพเป็นลบทางไฟฟ้า (electronegativity) เป็น 2.1 2.5 และ 4.1 ตามลำดับ ทำให้แต่ละมอนอเมอร์มีไดโพลถาวร แต่พบว่าในแต่ละเซลล์หน่วยจะมีโซ่โมเลกุลสองสาย โดยไดโพลของทั้งสองสายมีทิศทางสวนกัน จึงหักล้างกันหมด ทำให้ผลึกเฟสแอลฟาไม่มีไดโพลถาวร ดังรูปที่ 3.2

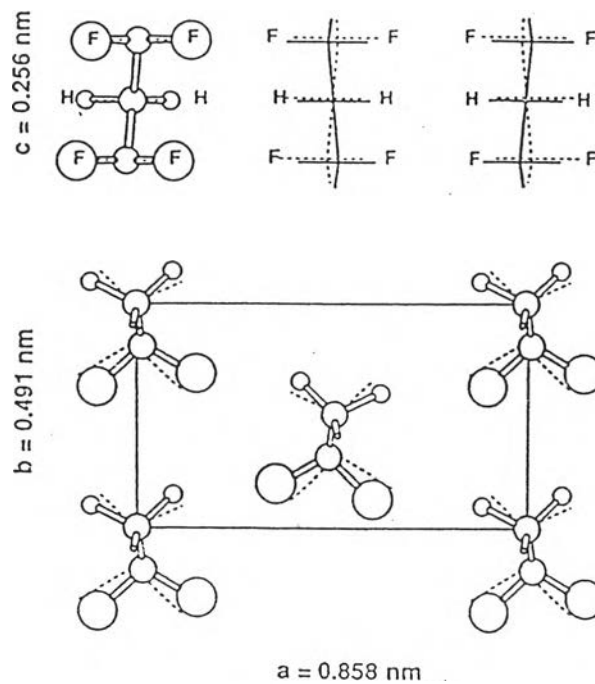


รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างโมเลกุล 4 แบบของ PVDF (ก) เฟสเบตา (ข) เฟสแอลฟาและเดลตา และ (ค) เฟสแกมมา โดยวงกลมที่บ วมกลมเล็ก และวงกลมใหญ่ แทนอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน ฟลูออรีน ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 แสดง โครงสร้างผลึกของ PVDF เฟสแอลฟา

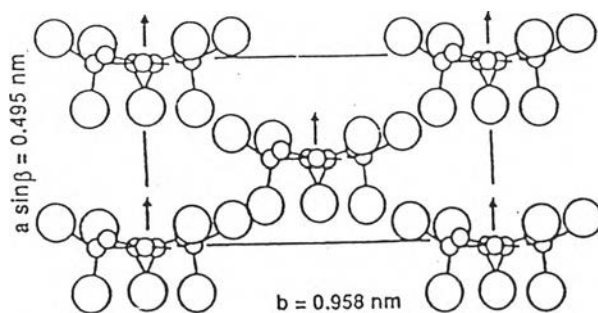
เมื่อยืดฟิล์ม PVDF ประมาณ 3-4 เท่าของความยาวเดิม ที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นอบฟิล์มที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4-5 นาที จะทำให้โซ่คาร์บอนถูกยืดออกไปตามแนวที่ยืด โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนเป็นแบบ I หรือ เฟสเบตา (β -phase) ซึ่งมีโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก (orthorhombic) การวางตัวของโซ่คาร์บอนเป็นแบบซิกแซกกระนาบ *TTTT* (all-trans : planar zigzag) โดยอะตอมคาร์บอนจะวางตัวซิกแซกอยู่ในระนาบหนึ่ง (ซึ่งตั้งฉากกับระนาบของกระดาษ) ส่วนอะตอมฟลูออรีนและไฮโดรเจนจะวางตัวขึ้นลง จากการศึกษาย่างละเอียดโดยรังสีเอกซ์ (X-ray studies) เนื่องจากรัศมีแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals radius) ของอะตอมฟลูออรีนมีค่าเท่ากับ 1.35 อังสตรอม ซึ่งใหญ่เกินไปที่จะบรรจุในโซ่โมเลกุลแบบนี้ ระยะระหว่างจุดกึ่งกลางของอะตอมฟลูออรีนเท่ากับ 2.56 อังสตรอม อะตอมคาร์บอนจึงต้องวางตัวให้โซ่โมเลกุลบิดไปมาเล็กน้อย เพื่อเพิ่มเนื้อที่ให้แก่อะตอมฟลูออรีน พบว่ามุมที่บิดไป (deflection angle) มีค่าประมาณ 7 องศา (Hasegawa *et al.*, 1972) ในทิศตรงข้ามกับระนาบซิกแซก (ระนาบ *yz*) ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างผลึกของ PVDF เฟสเบตา

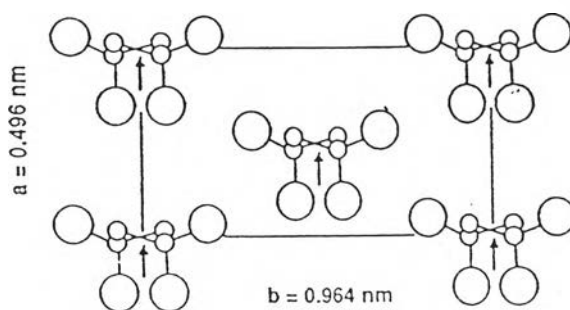
เซลล์หน่วยของผลึกเฟสเบตา ตามรูปที่ 3.3 แกนของโซ่โพลิเมอร์คือแกน c แต่ละเซลล์หน่วยประกอบด้วยโซ่โพลิเมอร์ 2 สาย ที่มีแนวแกนขนานกัน แต่ละมอนอเมอร์มีไดโพลประมาณ 2.1 เดอร์บาย (7.06×10^{-30} คูลอมบ์เมตร) ทิศตั้งฉากกับโซ่โพลิเมอร์ แต่ทิศของไดโพลในแต่ละผลึกเป็นแบบสุ่ม (random) ดังนั้นเพื่อให้ไดโพลมีทิศไปทางเดียวกัน จะต้องจัดขั้ว (poling) โดยให้สนามไฟฟ้าความเข้มสูง E_p ในแนวตั้งฉากกับฟิล์ม เป็นเวลา t_p ที่อุณหภูมิ T_p จากนั้นทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วลัดวงจรระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ผลจะทำให้ไดโพลถาวรจัดเรียงตัวไปตามแนวสนามไฟฟ้า ก็จะได้ฟิล์มไพโรอิเล็กทริก จากนั้นทำอิเล็กโทรดให้กับฟิล์ม สุดท้ายจะได้ฟิล์มเพื่อนำไปใช้งานได้ตามต้องการ

สำหรับผลึกแบบ III หรือ เฟสแกมมา (γ -phase) นั้น มีโครงสร้างผลึกดังรูปที่ 3.4 ผลึกเฟสนี้มีการรายงานครั้งแรกโดยทาคาฮาชิ (Takahashi) และ ทาคาคิโด (Tadakodo) ต่อมาได้รับการยืนยันจากโลวินเจอร์ (Lovinger, 1981) การวางตัวของสายโซ่คาร์บอนเป็นแบบ $TTTGT\bar{T}\bar{T}\bar{G}$ ($T_3GT_3\bar{G}$)



รูปที่ 3.4 แสดงการจัดเรียงตัวโมเลกุลของ PVDF เฟสแกมมา (ลูกศรหมายถึงทิศของไดโพลในโมเลกุล)

ส่วนผลึกแบบ IV หรือ เฟสเดลตา (δ -phase) มีการวางตัวของโซ่คาร์บอนแบบเดียวกับผลึกเฟสแอลฟา แต่ต่างกันที่ผลึกเฟสเดลตานั้นในแต่ละเซลล์หน่วยจะมีโซ่โมเลกุลสองสาย โดยไดโพลทั้งสองสายมีทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 3.5 จากการศึกษา (Lovinger, 1981) พบว่า ถ้าให้สนามไฟฟ้าประมาณ 100 เมกะโวลต์ต่อเมตร ผลึกเฟสแอลฟาจะเปลี่ยนเป็นผลึกเฟสเดลตาได้ โดยที่รูปแบบของโซ่โมเลกุลและขนาดของเซลล์หน่วยยังคงสภาพเดิมเพียงแต่ไดโพลมีการจัดเรียงตัวใหม่ให้อยู่ในทิศเดียวกัน และถ้าเพิ่มสนามไฟฟ้าขึ้นอีกจนประมาณ 500 เมกะโวลต์ต่อเมตร ผลึกเฟสเดลตาจะเปลี่ยนเป็นผลึกเฟสเบตาได้ โดยผลึกเฟสแกมมาและเดลตาจะมีไดโพลถาวรแต่มีขนาดน้อยกว่าผลึกเฟสเบตา



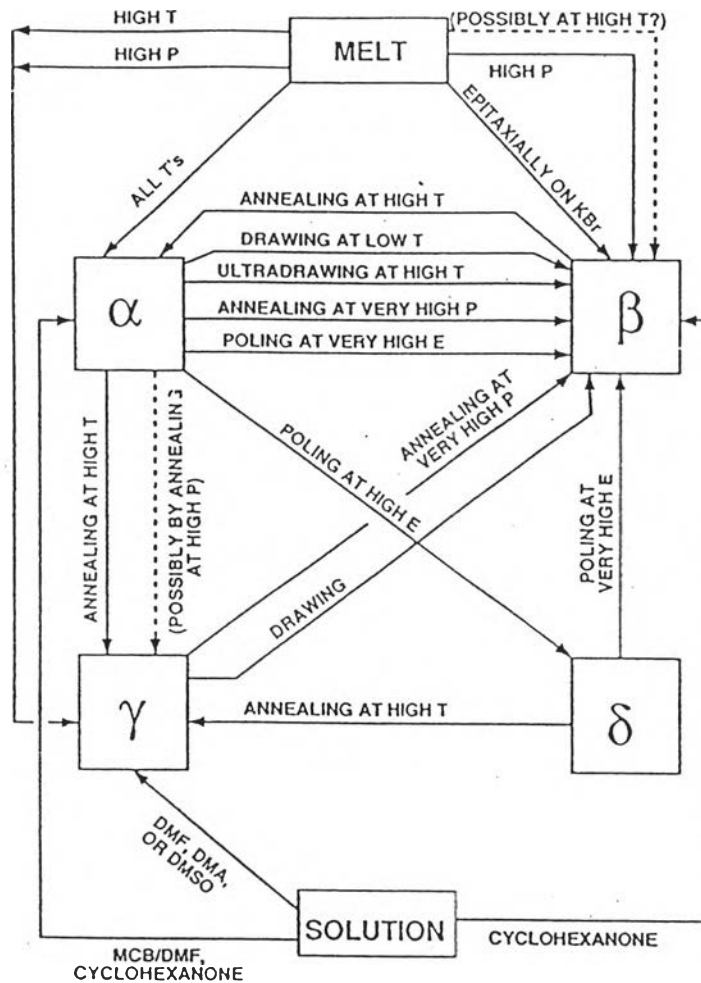
รูปที่ 3.5 แสดงการจัดเรียงตัวโมเลกุลของ PVDF เฟสเดลตา (ลูกศรหมายถึงทิศของไดโพลในโมเลกุล)

จากที่ได้กล่าวถึงโครงสร้างผลึกของ PVDF เฟสต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลโครงสร้างผลึกของ PVDF เฟสต่าง ๆ

| เฟส | พารามิเตอร์ของเซลล์หน่วย | โซ่โมเลกุล |
|-------|--|------------------|
| เบตา | $a = 8.58 \text{ \AA}, b = 4.91 \text{ \AA}, c = 2.56 \text{ \AA}$ | $TTTT$ |
| แอลฟา | $a = 4.96 \text{ \AA}, b = 9.64 \text{ \AA}, c = 4.96 \text{ \AA}, \beta = 90^\circ$ | $TGT\bar{G}$ |
| เดลตา | เหมือนเฟสแอลฟา | $TGT\bar{G}$ |
| แกมมา | $a = 4.96 \text{ \AA}, b = 9.58 \text{ \AA}, c = 9.23 \text{ \AA}, \beta = 92.9^\circ$ | $TTTGTTT\bar{G}$ |

เนื่องจาก PVDF สามารถเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสแบบต่าง ๆ ได้ ดังนั้น โลวินเจอร์ได้พัฒนาแผนภาพขึ้นมาเพื่อช่วยในการอธิบายการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเฟสต่าง ๆ ของ PVDF (Nalwa, 1995) เช่น โดยการยืด การจัดขึ้น การอบที่อุณหภูมิสูง และการหล่อฟิล์มในสารละลายต่างชนิดกัน แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเฟสต่าง ๆ ของ PVDF (DMF, DMA, DMSO และ MCB คือไดเมทิลฟอร์มามิด (dimethylformamide), ไดเมทิลอะซิตาไมด์ (dimethylacetamide), ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide), และ โมโนคลอโรเบนซีน (monochlorobenzene) ตามลำดับ โดยใช้ไซโคลเฮกซะนอน (cyclohexanone) เป็นตัวทำละลายในการหล่อฟิล์ม

3.2 การเตรียมฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF

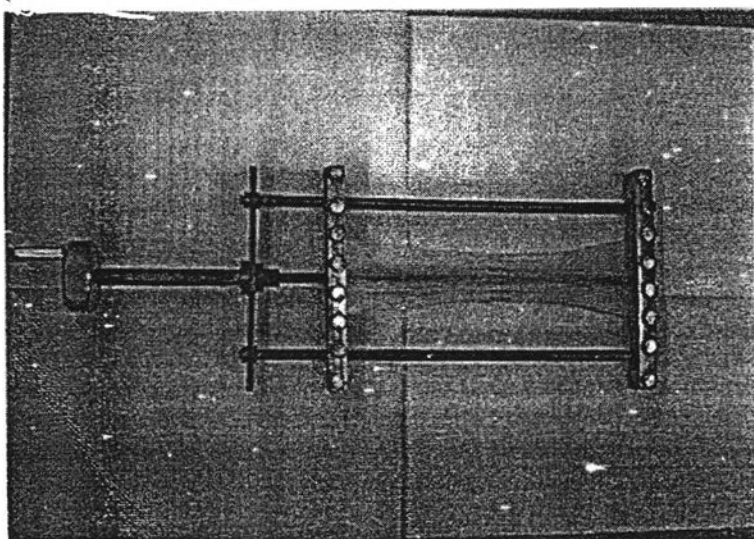
จากที่ได้กล่าวถึงโครงสร้างของ PVDF พบว่าฟิล์ม PVDF ธรรมดา (เฟสแอลฟา) จะไม่มีสมบัติไพโรอิเล็กทริก จะต้องทำให้ฟิล์มอยู่ในเฟสเบตา และฟิล์มที่จะนำไปใช้เป็นตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรดนั้น จะต้องมีความสัมพันธ์ไพโรอิเล็กทริกที่สูง แต่จากกระบวนการเตรียมฟิล์มที่มีผู้วิจัยทำมาแล้วนั้น (ชูศรี อุทัยวสิน, 2537) พบว่าฟิล์มมีการสูญเสียมาก ทำให้สิ้นเปลืองและเสียเวลา ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีที่จะเตรียมฟิล์มที่มีความสัมพันธ์ไพโรอิเล็กทริกสูง และมีการสูญเสียฟิล์มต่ำ

ในช่วงแรกที่มีการทำวิจัยเกี่ยวกับสมบัติเพียสโซ-ไพโรอิเล็กทริกนั้น PVDF จะมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม และมีการสร้างเครื่องมือต่าง ๆ ที่สามารถจัดหาวัสดุได้ภายในประเทศ เช่น เครื่องยัดฟิล์ม เตอบ เครื่องควบคุมอุณหภูมิ เครื่องกำเนิดความต่างศักย์สูง 3000 โวลต์ ต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่องมือดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะนำฟิล์ม PVDF ที่เตรียมขึ้นมาไปผ่านกระบวนการทางกายภาพที่เหมาะสมเพื่อเป็นฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF โดยใช้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาและเครื่องมือสำเร็จรูปบางชิ้น ซึ่งกระบวนการในการเตรียมฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

3.2.1. การยัดฟิล์ม เริ่มแรกต้มน้ำให้มีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส พร้อมกับให้ความร้อนแก่เตอบจนอุณหภูมิภายในประมาณ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นตัดฟิล์ม PVDF ที่ได้เตรียมมา เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดตามต้องการ สอดขอบทั้งสองข้างเข้ากับช่องหนีบของเครื่องยัด แล้วขันน็อตให้แน่นพอประมาณ (ถ้าขันน็อตแน่นเกินไปขณะที่ยัดจะทำให้ฟิล์มขาดได้ แต่ถ้าขันน็อตไม่แน่นพอจะทำให้ฟิล์มหลุด)

เมื่อน้ำร้อนได้ตามต้องการแล้ว จุ่มเครื่องยัดที่มีฟิล์ม PVDF ดิคอยู่ในถังน้ำร้อน ทิ้งไว้ประมาณ 1-2 นาที จากนั้น ค่อย ๆ หมุนเครื่องยัด ให้ฟิล์มยัดออกประมาณ 3.5-4 เท่าของความยาวเดิม นำเครื่องยัดที่มีฟิล์มดิคอยู่เข้าไปอบในเตอบตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ประมาณ 5 นาที ซึ่งจะมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเตอบ เสร็จแล้วนำเครื่องยัดออกจากเตอบ ทิ้งให้เย็น แล้วคลายน็อตและดึงฟิล์มออก ฟิล์มที่ยัดแล้วจะมีลักษณะเว้าคอคตรงกลาง และมีรอยย่นเกิดขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงฟิล์ม PVDF ที่ยืด 3.5 - 4 เท่า พร้อมเครื่องยืดฟิล์ม

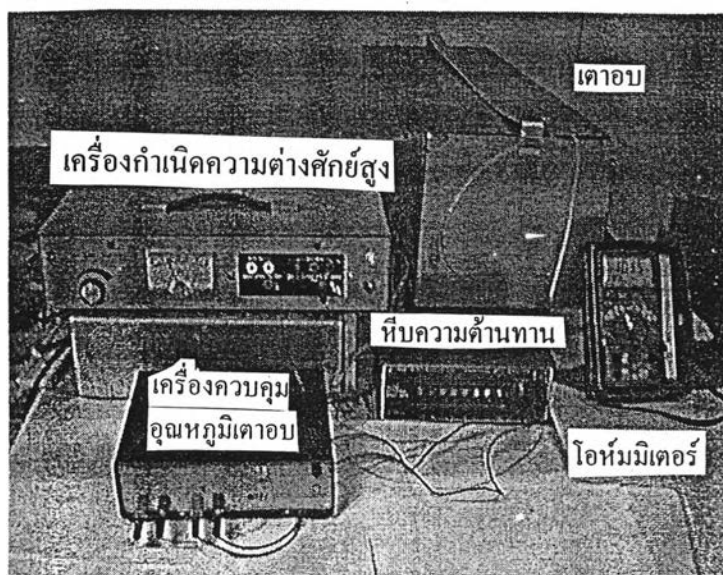
การยืดฟิล์มที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ฟิล์มฉีกขาดเพราะฟิล์มจะมีความแข็ง (strength) มาก จึงต้องออกแรงในการยืดมาก และถึงแม้ว่าจะยืดฟิล์มที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส ถ้าฟิล์มมีความไม่สม่ำเสมอ ขณะยืดก็จะเกิดการฉีกขาดหรือหลุดจากที่หนีบจากเครื่องยืด ทำให้เสียฟิล์มไป เหตุที่ต้องยืดฟิล์ม 3.5-4 เท่าของความยาวเดิมเพราะถ้ายืดด้วยอัตราส่วนที่ต่ำกว่านี้การจัดเรียงตัวของโซ่โมเลกุลจะมีความเป็นระเบียบน้อย ส่วนการยืดที่มีอัตราส่วนมากกว่านี้อาจจะทำให้ฟิล์มฉีกขาดได้ง่าย การยืดฟิล์มจะทำให้โซ่โมเลกุลเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น และทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนจากเฟสแอลฟาเป็นเฟสเบตา นอกจากนี้ยังทำให้การจัดขั้วง่ายขึ้น

การยืดฟิล์มมีทั้งการยืดในแนวเดียว (uniaxial stretch) และยืดสองแนว (biaxial stretch) (Wang *et al.*, 1988) แต่ในการวิจัยนี้เป็นการยืดแนวเดียว ซึ่งจะทำให้สมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มเปลี่ยนไปในแนวเดียว

การอบฟิล์ม (annealing) (Takase, *et al.*, 1989) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะทำให้ความหนืด (viscosity) ของฟิล์มลดลงอย่างมาก โมเลกุลจะเคลื่อนที่ออกจากกัน และปรับตัวให้เข้ากับความยาวใหม่ของฟิล์ม ภายใน 5 นาที ความตึง (tension) จะลดลงอย่างรวดเร็ว นั่นคือมีการปรับตัวเข้าสู่รูปร่างใหม่ได้เกือบสมบูรณ์ เมื่อถอดฟิล์มออกจากเครื่องยืดพบว่าฟิล์มจะหดตัวเพียงเล็กน้อย เนื่องจากสมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic) ของพอลิเมอร์ (มันส์ แซ่ด่าน, 2538) กล่าวคือพอลิเมอร์สามารถแสดงสมบัติผสมกันได้ระหว่างของเหลวหนืด (viscous liquid) และของแข็งยืดหยุ่น (elastic solid) โดยจะอยู่ในปรากฏการณ์ที่สำคัญได้แก่ การคืบ (creep) การผ่อนคลายความเค้น (stress relaxation) การคืนรูป (recovery) เป็นต้น

3.2.2. การจัดจั่ว เริ่มแรก ตัดแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminum foil) 2 แผ่น ให้มีลักษณะเหมือนกัน มีขนาดเล็กกว่าฟิล์ม PVDF เพียงเล็กน้อย ให้มีส่วนที่ยื่นยาวออกมาเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้า (electrode) ของเครื่องกำเนิดความต่างศักย์สูง (high-voltage dc supply) จากนั้นนำแผ่นแก้ว 2 แผ่น ที่มีขนาดใหญ่กว่าฟิล์ม PVDF เพียงเล็กน้อย โดยวางแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์แผ่นแรกบนแผ่นแก้ว แล้วตามด้วยฟิล์ม PVDF อะลูมิเนียมฟอยล์และแผ่นแก้วที่เหลือ (แผ่นแก้วจะช่วยให้อะลูมิเนียมฟอยล์กดทับกับฟิล์ม PVDF ดีขึ้น) ระวังอย่าให้แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ทั้งสองแตะกันเพราะจะทำให้ลัดวงจรได้ อาจใช้คลิปดำ (double clip) หนีบที่ด้านซ้ายและขวาของแผ่นแก้ว แล้วต่อปลายอะลูมิเนียมฟอยล์ทั้งสองเข้ากับขั้วไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดความต่างศักย์สูง

ขณะจัดจั่วใช้อุณหภูมิ T_p ประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส จึงต้องจัดจั่วในเตาอบ ดังรูปที่ 3.8 ความต่างศักย์ที่ใช้หาได้จากสมการ $E_p = \frac{V_p}{b}$ โดย b เป็นความหนาของฟิล์ม ในการเตรียมค่อย ๆ เพิ่มความต่างศักย์ช้า ๆ จนถึงความต่างศักย์ที่ต้องการ ทิ้งค้างไว้ 20 นาที แล้วลดอุณหภูมิภายในเตาอบจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วลดความต่างศักย์ลงจนเป็นศูนย์ และลัดวงจร อิเล็กโทรดทั้งสองของฟิล์ม ผ่านความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม หลังจากนั้นนำฟิล์มออกจากแผ่นแก้วและอะลูมิเนียมฟอยล์ ขณะจัดจั่วถ้าแผ่นฟิล์มเกิดสปาร์ก (spark) จะทำให้ฟิล์มเสียไปในทันที ซึ่งจุดที่เกิดการลัดวงจรง่ายที่สุดคือบริเวณรอยย่นเป็นริ้วบนแผ่นฟิล์ม วิธีแก้ไขคือหาซิลิโคนเหลวทั้งสองด้านของฟิล์ม จะมีผลทำให้การสปาร์กลดน้อยลง เพราะจะทำให้ฟิล์มมีความสม่ำเสมอในแง่ของไฟฟ้าสถิต (electrostatics)



รูปที่ 3.8 แสดงการจัดจั่วของฟิล์ม PVDF

จากการศึกษาเรื่องการจัดจั่ว เพื่ออุณหภูมิของสนามไฟฟ้า E_p , เวลาจัดจั่ว t_p และ อุณหภูมิจัดจั่ว T_p พบว่าเมื่อ E_p และ T_p สูงขึ้น จะทำให้โพลาริเซชันและสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกสูงขึ้นด้วย (Pfister et al., 1973) (Murayama, 1975) (วัฒนา เชนนะ, 2537)

3.2.3. การเตรียมอิเล็กโทรดของฟิล์ม ในงานวิจัยที่ผ่านมา การเตรียมอิเล็กโทรดของฟิล์ม ใช้วิธีระเหยไออะลูมิเนียมในสุญญากาศ (high vacuum evaporation) ที่ความดันประมาณ 10^{-5} ทอร์ (torr) เข้าจับแต่ละด้านของฟิล์มให้ตรงกัน (ชูศรี อุทัยวศิน, 2537) แต่จากการทดลองพบว่าวิธีนี้เสียเวลาและสิ้นเปลืองมาก ในงานวิจัยนี้จึงได้เตรียมอิเล็กโทรดโดยใช้กาวเงิน (silver conductive paint) ซึ่งประกอบด้วยผงเงินละเอียดมากห้อยแขวนอยู่ในกาว โดยใช้ตัวทำละลาย บิวติลอะซิเตต (butylacetate) เป็นส่วนประกอบ ในการเตรียมจะทำให้กาวเงินเจือจางลงโดยใช้ส่วนผสมของบิวติลอะซิเตตมาก ๆ และทาบาง ๆ ลงบนฟิล์ม โดยอิเล็กโทรดนี้จะมีขนาดเล็กกว่าฟิล์มเล็กน้อย จากนั้นทิ้งให้แห้งก็จะได้อิเล็กโทรดที่ติดสนิทกับฟิล์มตามต้องการ

อิเล็กโทรดที่ทำด้วยกาวเงินจะมีความหนามากกว่าใช้วิธีระเหยไออะลูมิเนียมในสุญญากาศ แต่เตรียมได้ง่าย ประหยัดเวลา และเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่า อย่างไรก็ตามความหนาของอิเล็กโทรดทำให้เกิดความกระด้าง เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปทำให้การสั้นไหวของฟิล์มลดลง (สมบัติเพียโซอิเล็กทริก) แต่สมบัติไพโรอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก ในการทา กาวเงินไม่ควรทาหนา ๆ เช่น หนากว่า 10 ไมโครเมตร เพราะจะทำให้รังสีอินฟราเรดไม่สามารถเข้าถึงตัวฟิล์มได้ และความจุความร้อนของฟิล์ม (heat capacity) จะเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของฟิล์มที่เปลี่ยนไปจะน้อยลง ทำให้สมบัติไพโรอิเล็กทริกลดลงไป ในการใช้งานจริง ๆ เราจับแต่ความต่างศักย์ของอิเล็กโทรดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปเท่านั้น แทบไม่ได้ดึงกระแสจากฟิล์มเลย ดังนั้นอิเล็กโทรดบางมากฟิล์มก็ยังทำงานได้

ก่อนที่จะนำฟิล์มไพโรอิเล็กทริกที่เตรียมได้นี้มาใช้งาน ควรเพิ่มอุณหภูมิของฟิล์มให้สูงขึ้นถึงค่าหนึ่ง (ซึ่งน้อยกว่า T_p) เพื่อไล่กระแส TSC ให้เหลือแต่กระแสไพโรอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาได้ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

3.3 กระแส TSC

3.3 กระแส TSC

หลังจากลัดวงจรระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองของสารไพโรอิเล็กทริกแล้ว เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารขึ้นจะทำให้เกิดกระแสขึ้น 2 ชนิดคือ กระแสไพโรอิเล็กทริก (ผันกลับได้) และกระแส TSC (Thermally Stimulated Conductivity or Current) (Seanor, 1982) เป็นกระแสที่มีในแท่งไฟฟ้าทั่ว ๆ ไป เกิดจากการจัดเรียงตัวของไดโพล (dipole orientation) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปซึ่งผันกลับไม่ได้ (irreversible)

เนื่องจากอัตราการลดลงของโพลาริเซชันถาวร P ซึ่งลดลงในเทอมของเวลาผ่อนคลาย τ เขียนได้เป็น (Perlman, 1971)

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} \quad (3.1)$$

เมื่อสารมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำให้ τ เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ นั่นคือ $\tau = \tau(T)$ จากสมการ (3.1) จะได้

$$P = P_0 \exp\left(-\int \frac{dt}{\tau}\right) \quad (3.2)$$

เมื่อไดโพลหมุนอย่างอิสระ (freely rotating) โพลาริเซชันเริ่มต้น P_0 (initial polarization) ถูกกำหนดโดยฟังก์ชันแลงเจวิน (Langevin function) เมื่อ $\mu E_p \ll k_B T_p$ สามารถเขียน P_0 ในเทอมของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ใช้ในการจัดจั่ว (Nalwa, 1995) ได้เป็น

$$P_0 = \frac{N\mu^2 E_p}{3k_B T_p} \quad (3.3)$$

เมื่อ μ คือไดโพลไฟฟ้า (electric dipole)
 k_B คือค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann constant) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.308×10^{-23} จูลต่อเคลวิน

อัตราการเปลี่ยนโพลาริเซชันก็คือกระแสดีโพลาริเซชัน (depolarization current)

$$J = -\left(\frac{P_0}{\tau}\right) \exp\left(-\int \frac{dt}{\tau}\right) \quad (3.4)$$

การจัดเรียงตัวของไดโพลจะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของประจุจากตำแหน่งสมดุลหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง โดยประจุจะต้องผ่านกำแพงศักย์ (potential barrier) ที่มีพลังงานกระตุ้น (activation energy) E_a ความน่าจะเป็นที่ประจุจะกระโดดข้ามต่อหน่วยเวลาจะแปรผันโดยตรงกับ $\exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right)$ โดยทั่วไป ค่าผ่อนคลายทางเวลาคือค่าเฉลี่ยทางเวลาที่ใช้กระโดดหรือก็คือ ส่วนกลับของความน่าจะเป็น นั่นคือ

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad (3.5)$$

เมื่อ τ_0 คือค่าคงที่

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature)

ถ้าสารมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสม่ำเสมอ ดังนั้น

$$T = \alpha + \beta t \quad (3.6)$$

เมื่อ α, β เป็นค่าคงที่

จากสมการ (3.3) ถึง (3.6) จะได้

$$J(T) = \frac{N\mu^2 E_p}{3k_B T_p \tau_0} \exp\left[-\frac{E_a}{k_B T} - \frac{1}{\beta\tau_0} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) dT\right] \quad (3.7)$$

จากสมการ (3.7) จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้ $J(T)$ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด หลังจากนั้นจะลดลง ส่วนประจุรวมทั้งหมด Q จะมีค่าเป็น

$$Q = \int_0^\infty AJ(t) dt \quad (3.8)$$

โดยการตรวจพินิจ (by inspection) สมการ (3.7) จะเห็นได้ว่า Q ไม่ขึ้นกับความหนาของฟิล์ม ถ้าให้ E_p และ T_p คงที่ ทำให้ Q แปรผันโดยตรงกับ E_p หาอนุพันธ์สมการ (3.7) แล้วกำหนดให้ $\frac{dJ}{dT} = 0$ จะได้อุณหภูมิขณะที่กระแสสูงสุด T_{\max}

$$\tau_0 = \frac{k_B T_{\max}^2}{\beta E_a \exp(E_a / k_B T_{\max})} \quad (3.9)$$

นั่นคือ T_{\max} ไม่ขึ้นกับทั้ง E_p และ T_p เนื่องจากโพลาริเซชัน P และเวลาผ่อนคลาย τ ขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อสารไพโรอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็จะปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลใหม่ โดยสารที่มีเวลาผ่อนคลายมากจะใช้เวลาในการปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลใหม่ช้ากว่าสารที่มีเวลาผ่อนคลายน้อย (Creswell, 1972)