



รายงานวิจัยเรื่อง

การพัฒนาเครื่องกำเนิดและเครื่องรับสัญญาณส่วนแบบพอลิเมอร์

โดย

ยุทธ อัครมาส

ภิชโย ปันยารชุน

วันชัย โนนจิตร

และ อนันตสิน เตชะกำพูน

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดย

เงินทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ. 2533

I18548568 23 ก.พ. 2543

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
บทนำ	1
การสร้างเครื่องมือช่วยวิจัย	11
การพัฒนาฟิล์มพอลิเมอร์เพื่อสโซอิลิเก็คตริก	20
เครื่องกำเนิดและรับสัญญาณส่วนะโดยใช้พอลิเมอร์เพื่อสโซอิลิเก็คตริก	31
การทดลองที่กำลังทำเพิ่ม	39
หนังสืออ้างอิง	41

เลขหมู่ จภ
๑๓ 15
เลขทะเบียน 007712
วัน.เดือน.ปี ๒๐ ม.ค. ๖๗



บทคัดย่อ

การพัฒนาเครื่องกำเนิดและเครื่องรับสัญญาณส่วนระบบพอลิเมอร์

ได้พัฒนาเครื่องยัดฟิล์มพอลิเมอร์ เตาอบฟิล์มในเข่งอุณหภูมิ $80^{\circ}-120^{\circ}\text{C}$ และเครื่องจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้า 3,000 โวลต์ เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์ม polyvinylidene fluoride (PVDF) ให้มีสภาพเพียโซอิเล็กทริกสูง ในการเตรียมขั้นแรกจะยัดฟิล์มออก 4-6 เท่าของความยาวเดิมที่อุณหภูมิ 80°C จากนั้นอบที่ 100°C ประมาณ 3 นาที ค่อยนำฟิล์มไปฉาบอะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน ที่อุณหภูมิ T_p เมื่อสร้างสนามไฟฟ้า E_p ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์โดยต่อสวิตช์ไฟฟ้าสูงกับอิเล็กโทรดทั้งสองเป็นเวลา t_p ฟิล์ม PVDF นี้จะกลายเป็นฟิล์มเพียโซอิเล็กทริก

จากการวิเคราะห์พบว่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก d_{31} ของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นเมื่อ E_p และ T_p สูงขึ้น โดยใช้ $E_p = 100 \text{ MV/m}$, $T_p = 100^{\circ}\text{C}$, $t_p \geq 20$ นาที จะได้ $d_{31} = 20 \times 10^{-12} \text{ C/N}$ ซึ่งมีค่าสูงเทียบเท่ากับฟิล์ม PVDF มาตรฐาน ได้นำฟิล์มเพียโซอิเล็กทริกนี้ไปทำเป็นแหล่งกระจายเสียง หูฟัง และไมโครโฟน พบว่าเครื่องมือเหล่านี้ทำงานได้ดีที่ความถี่ต่ำกว่า 350 Hz ที่ความถี่สูงเช่น 5 kHz จะทำงานได้ดีมาก และที่ความถี่เหนือเสียงก็ยังใช้งานได้ดี คาดว่าฟิล์ม PVDF นี้สามารถนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2533
จึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ในการวิจัยนี้ คุณชุกร จันทมาศ ได้ช่วยเหลือเป็นอย่างมากในการพัฒนาฟิล์ม PVDF
ในระยะต้น คุณวิภาดา เคนนะ ได้ช่วยในการวัดสัมประสิทธิ์ d_{31} ของฟิล์ม และคุณเอกชัย
แซ่ซาง ได้ช่วยเป็นอย่างดีในการพัฒนาเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้า 3,000 โวลต์ จึงขอขอบคุณเป็น
อย่างมากไว้ ณ ที่นี้ด้วย



การพัฒนาเครื่องกำเนิดและเครื่องรับสัญญาณสวณะ แบบพอลิเมอร์

1. บทนำ

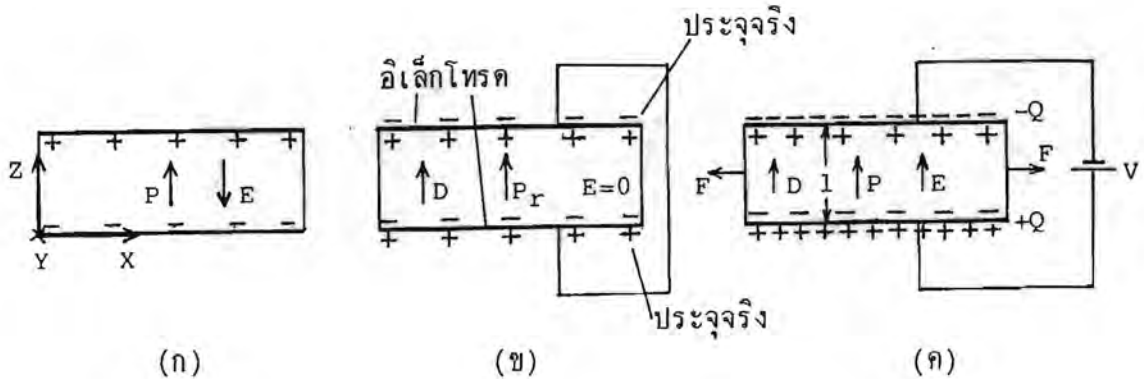
ในปลายคริสต์ศตวรรษที่ 19 ได้มีการค้นพบว่า ผลึกบางชนิดมีสมบัติเป็นสารเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) กล่าวคือในสภาพปกติมีไดโพลทางไฟฟ้าถาวร และเมื่อมีแรงกระทำ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของไดโพลถาวรนี้ ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าซึ่งนำมาใช้งานได้ [1] ตัวอย่างของสารนี้ได้แก่ผลึกควอตซ์ (Quartz) ซึ่งได้นำมาประยุกต์ทำเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นเหนือเสียง เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าความถี่คงที่สำหรับนาฬิกา ฯ ใช้แพร่หลายกันอยู่ในปัจจุบัน

ในตอนแรก ๆ นั้นสารเพียโซอิเล็กทริกจำกัดอยู่แต่ในผลึกสารอนินทรีย์ แต่ในปี ค.ศ. 1969 Kawai [2] ได้ค้นพบว่า พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งคือฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride, PVDF) หลังจากผ่านกรรมวิธีทางกายภาพที่เหมาะสม จะกลายเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกที่มีความไวทางไฟฟ้าสูง เนื่องจากฟิล์มนี้มีราคาถูก สามารถเตรียมเป็นแผ่นใหญ่ได้ จึงนิยมนำไปประยุกต์ทำเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์หลายชนิด เช่น เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นเสียง ไมโครโฟน เครื่องจับการสั่นสะเทือนใต้น้ำ เป็นต้น เนื่องจากประโยชน์ของพอลิเมอร์เพียโซอิเล็กทริกมีการนำไปใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เพียโซอิเล็กทริก การวัดสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก และการประยุกต์เบื้องต้นของฟิล์มนี้

1.1 ทฤษฎีพื้นฐานของสภาพเพียโซอิเล็กทริก

พิจารณาแผ่นสารเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งมีโพลาริเซชัน (Polarization) หรือไดโพลต่อปริมาตร P ที่อุณหภูมิคงที่ T_0 มีทิศในแนว $+Z$ ซึ่งตั้งฉากกับระนาบของแผ่น ไดโพลนี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในบริเวณแผ่นสาร จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแม็กเวลล์ [3] สนามไฟฟ้านี้อาจหาได้โดยคิดว่าแผ่นเพียโซอิเล็กทริกดังกล่าวกลายเป็นสุญญากาศ แต่ที่ผิวบนและล่างมีประจุไฟฟ้าต่อพื้นที่เท่ากับ $P \cdot \hat{Z}$ ตามรูป 1.1 ก ประจุด้านบนจะเป็นประจุบวก และประจุด้านล่างจะเป็นประจุลบ ประจุนี้เรียกว่า "ประจุโพลาริเซชัน" เป็นประจุเสมือนซึ่งไม่ปรากฏในสมการของแม็กเวลล์ จะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีทิศลง มีขนาดเท่ากับ $E = P/\epsilon_0$

ถ้าจากฟิล์มโลหะที่ผิวบนและล่างของแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเพื่อให้เป็นอิเล็กโทรด จากนั้นต่อลวดตัวนำเข้ากับอิเล็กโทรดทั้งสอง (รูป 1.1 ข) ในกรณีนี้ศักย์ไฟฟ้าของทั้งสองอิเล็กโทรดจะเท่า



รูป 1.1 (ก) แสดงประจุโพลาไรเซชันที่ผิวบนและล่างของแผ่นเพียโซอิเล็กทริก
 (ข) แสดงแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่อิเล็กโทรดทั้งสองถูกลัดวงจร ทำให้มีประจุจริงที่ด้านบนและล่าง และมีโพลาไรเซชัน P_r
 (ค) แสดงแผ่นเพียโซอิเล็กทริกซึ่งมีโพลาไรเซชัน P เนื่องจากสนาม E และความเค้น X ซึ่งเท่ากับแรง F ต่อพื้นที่ที่แรงกระทำ

กัน ทำให้ $E = 0$ จะต้องมีประจุลบเคลื่อนจากอิเล็กโทรดแผ่นล่างขึ้นไปอยู่ที่แผ่นบนเกิดประจุจริง $+Q$ ที่แผ่นทั้งสองเพื่อหักล้างประจุโพลาไรเซชัน เนื่องจาก E เปลี่ยนไปจากรูปแรก โพลาไรเซชันของแผ่นสารจะเปลี่ยนไปเล็กน้อยจาก P กลายเป็น P_r (residual polarization) ในสภาวะนี้การหัดทางไฟฟ้า $D = Q/A$ ($A =$ พื้นที่ของอิเล็กโทรด) และมีที่คี่ขึ้น

ถ้าต่อความต่างศักย์ V กับอิเล็กโทรดทั้งสอง และออกแรง F กระทำต่อแผ่นสารดังในรูป 1.1 ค พบว่า $E = V/l$ และโพลาไรเซชันเปลี่ยนไปเป็น P จากทฤษฎีพื้นฐานทางเพียโซอิเล็กทริก [4] พบว่าที่อุณหภูมิมาตรฐาน T_0 จะหาโพลาไรเซชันได้จากสมการ

$$P - P_r = \epsilon_0 \chi^* E + dX \tag{1.1}$$

โดย ϵ_0 เป็นสภาพยอมของสุญญากาศ X เป็นความเค้น (stress) ที่กระทำต่อแผ่นสาร $= F/a$ โดย a เป็นพื้นที่หน้าตัดเดิมที่แรง F กระทำ d คือสัมประสิทธิ์ความเครียดเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric strain coefficient) และ χ^* คือสภาพรับไว้ได้ (susceptibility) ที่ X คงที่ ในสมการ (1.1) ได้ใช้ E และ X เป็นตัวแปรอิสระ ในทำนองเดียวกันอาจเขียน P ในเทอมของความเครียด (strain, S) และสนาม E ดังสมการ

$$P - P_r = \epsilon_0 \chi^* E + eS \quad (1.2)$$

โดย e เป็นสัมประสิทธิ์ความเค้นเพียโซอิเล็กตริก ในรูป 1.1 ค โดยใช้สมการ (1.1) อาจแสดงได้ว่าการจัดทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากรูป 1.1 ข

$$\Delta D = \epsilon^* E + dX \quad (1.3a)$$

โดยสภาพยอม $\epsilon^* = \epsilon_0 (1 + \chi^*)$ และจากสมการ (1.1) และ (1.2) ได้

$$S = dE + \frac{1}{G^E} X \quad (1.3b)$$

ทั้งนี้เพราะ $G^E =$ ค่าคงที่ความแข็ง (stiffness constant) $= e/d$ (1.4)

และ $d = \epsilon_0 (\chi^* - \chi')/e$ (1.5)

สมการ (1.5) นี้ได้จากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิก [1] ในสมการ (1.3) ΔD และ S เชื่อมอยู่ในเทอมของ X และ E ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรอิสระ ถ้าถือว่า S และ E เป็นตัวแปรอิสระ ก็อาจหา ΔD และ X ได้ในแบบคล้าย ๆ กันจากสมการ

$$\Delta D = eS + \epsilon^* E \quad (1.6a)$$

และ $X = G^E S - eE$ (1.6b)

จากข้อมูลข้างบนพบว่าค่าการควบไฟฟ้าเชิงกล (electromechanical coupling) ซึ่งบอกอัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกลที่สะสมอยู่ในสาร จำกัดความได้โดยสมการ

$$k = d(G^E/\epsilon^*)^{1/2} \quad (1.7)$$

ควบคู่ไปกับสมบัติทางเพียโซอิเล็กตริก แผ่นสารยังมีสมบัติทางไพโรอิเล็กตริก (pyroelectric) กล่าวคือถ้าความเค้นคงที่ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของ D และเอนโทรปี (S_0) ดังสมการ

$$\Delta D = p\Delta T + \epsilon^T E \quad (1.8a)$$

$$\Delta S_0 = (C^E/T)\Delta T + pE \quad (1.8b)$$

เมื่อ ϵ^T เป็นสภาพยอมที่อุณหภูมิคงที่ T

C^E เป็นความจุความร้อนที่สนาม E คงที่

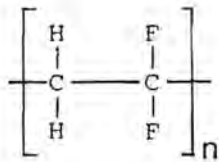
p เป็นสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กตริก

จากสมการ (1.3b) จะเห็นได้ว่า ถ้ามีสนามไฟฟ้าสลับผ่านฟิล์มเพียโซอิเล็กตริกจะทำให้ฟิล์มนี้สั่นไหว โดยสมบัติข้อนี้อาจใช้ฟิล์มเพียโซอิเล็กตริกไปเป็นตัวกำเนิดสัญญาณเสียงได้ ขณะเดียวกันถ้ากระตุ้นให้แผ่นฟิล์มเกิดการสั่นไหว เช่นเมื่อคลื่นเสียงผ่านฟิล์มก็ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าขึ้นในฟิล์ม สามารถนำไปขยายเพื่อใช้งานโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยสมบัติข้อนี้อาจนำฟิล์มไปทำ

เป็นเครื่องตรวจจับสัญญาณเสียงได้ ทำนองเดียวกันเมื่อมีรังสีอินฟราเรดกระทบฟิล์ม จะทำให้อุณหภูมิของฟิล์มเพิ่มขึ้น ตามสมการ (1.8a) ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุที่อิเล็กโทรด หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของ E ซึ่งจับได้โดยอาศัยวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์เช่นกัน จากสมบัติข้อนี้จึงอาจนำฟิล์มไปทำเป็นเครื่องจับรังสีอินฟราเรดได้ ฟิล์มเพียโซโซ-ไพโรอิเล็กทริกที่จำเป็นต้องมีสัมประสิทธิ์ d และ p ที่มีค่าสูง วิธีการเตรียมฟิล์มที่ดี และการวัด d และ p นี้จะได้กล่าวในตอนถัดไป ปริมาณ \bar{P} , \bar{D} และ \bar{E} เป็นปริมาณเวกเตอร์ ส่วนปริมาณ X, S, d, p เขียนได้ในรูปของเมตริกซ์ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ผลการทดลองสมการข้างบนสามารถจะเขียนให้อยู่ในเทอมของปริมาณสเกลาร์ ซึ่งอาจทำได้เป็นกรณี ๆ ไป

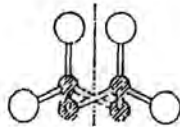
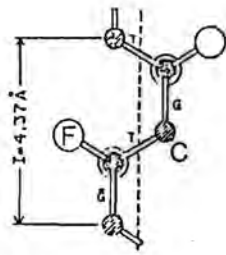
1.2 สมบัติของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF)

นับตั้งแต่ Kawai ได้ค้นพบว่า ฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride, PVDF) หลังจากผ่านกรรมวิธีทางกายภาพที่เหมาะสมจะกลายเป็นฟิล์มเพียโซโซอิเล็กทริกที่ใช้งานได้ดี เนื่องจากฟิล์มแบบนี้ราคาถูกและเตรียมง่ายจึงดึงดูดความสนใจทางด้านอุตสาหกรรม ในช่วง ค.ศ. 1970-1986 ได้มีการศึกษาทางด้านสมบัติทางนิลิกส์พื้นฐานของ PVDF กันอย่างมากมาจนปัจจุบันทราบข้อมูลสำคัญ ที่ทำให้เข้าใจสมบัติทางกายภาพของสารแบบนี้เป็นอย่างดี



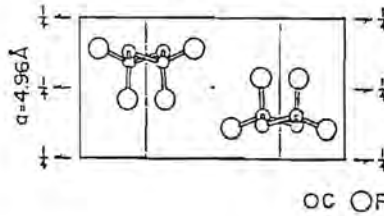
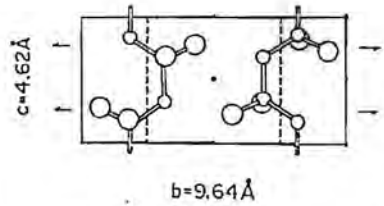
รูป 1.2 สูตรโครงสร้างของ PVDF

ที่อุณหภูมิสูง PVDF จะหลอมเหลว เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 150°C สารนี้จะเริ่มแข็งตัวเกิดโครงสร้างแบบสเฟียรูไรท์ (spherulitic structure) จะมีส่วนที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) และแบบผลึกปนกัน ผลึกที่เกิดขึ้นแบบนี้มีโครงสร้างรูปแบบที่ II หรือนิยมเรียกกันว่าเป็นแบบเฟส α จากการศึกษาโดยใช้รังสีเอกซ์พบว่า โครงสร้างผลึกแบบ II นี้แสดงในรูปข้างล่าง [5] การวางตัวของสายโซ่อะตอมคาร์บอนเป็นแบบ TGTG ดังแสดงในรูป 1.3 บนถ้ามองดูรูปนี้จากด้านบนจะเห็นอะตอมต่าง ๆ เป็นดังในรูป 1.3 ล่าง (ในรูปนี้ไม่ได้แสดงอะตอมไฮโดรเจน) เซลล์หน่วย (unit cell) ของผลึกนี้เป็นแลตทิซสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular lattice) ดังแสดงในรูป 1.4 (อาจพิจารณาเปรียบเทียบกับรูป 1.3) แต่ละเซลล์หน่วยจะประกอบด้วยสายโซ่สองสาย และเนื่องจากทิศของโมเมนต์ไดโพลของทั้งสองสายนี้มีทิศสวนกันจึงหักล้างกันหมด ผลคือทำให้ผลึก PVDF แบบนี้ไม่มีโมเมนต์ไดโพลและจะไม่เป็นสารเพียโซโซอิเล็กทริก



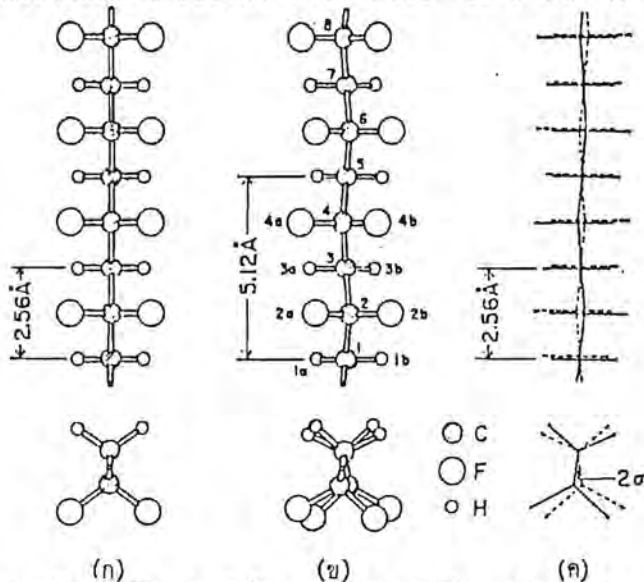
(TGTG) Model

รูป 1.3 โครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่ PVDF รูปแบบ II (เฟส α)



รูป 1.4 โครงสร้างผลึกและเซลล์หน่วยของ PVDF รูปแบบ II (เฟส α)

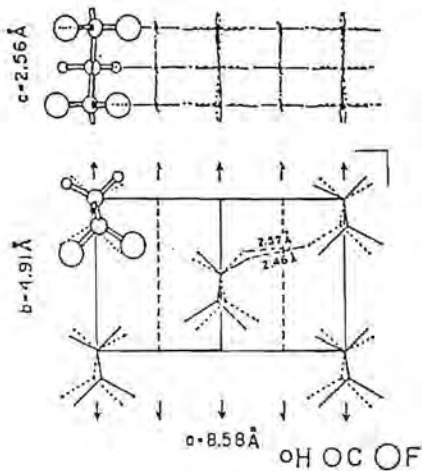
ถ้าดึงให้ฟิล์ม PVDF ซึ่งประกอบด้วยผลึกโครงสร้างแบบ II และส่วนอสัณฐานปนกันให้ยืดออกประมาณ 4-6 เท่า ที่อุณหภูมิประมาณ 80-100 °C สายโซ่คาร์บอนจะยืดออกไปตามความยาว และจะฟอร์มโครงสร้างผลึกแบบ I หรือเฟส β อะตอมคาร์บอนจะวางตัวซิกแซกอยู่ในระนาบหนึ่ง ในรูป 1.5 ระนาบนี้จะตั้งฉากกับระนาบของกระดาษ ส่วนอะตอม F และ H จะวางตัวขึ้น-ลง ดัง



รูป 1.5 (ก) โครงสร้างสายโซ่โมเลกุลของ PVDF รูปแบบ I (เฟส β)
(ข) การบิดตัวของสายโซ่โมเลกุลเพื่อให้อะตอม F บรรจบกันได้
(ค) มุมการบิดตัวของสายโซ่โมเลกุล

ในรูป (ก) จากการศึกษาย่างละเอียดโดยรังสีเอกซ์พบว่า เนื่องจากรัศมีฟันเดอร์วาลส์ (van der Waals radius) ของอะตอม F เท่ากับ 1.35 Å ซึ่งใหญ่เกินไปที่จะบรรจุในสายโซ่แบบนี้ (ระยะระหว่างจุดกึ่งกลางของอะตอม F ในรูป 1.5 ก เท่ากับ 2.56 Å) อะตอมคาร์บอนจึงต้องวางตัวทำให้สายโซ่โม่เลกุลบิดไปมาเล็กน้อยดังแสดงในรูป (ข) และ (ค) จากการวิเคราะห์พบว่ามุมบิดเท่ากับประมาณ 7°

เซลล์หน่วยของผลึกแบบที่ I หรือเฟส β แสดงในรูป 1.6 ตามรูปแกนของสายโซ่คาร์บอนคือแกน c แต่ละเซลล์หน่วยจะประกอบด้วยสายโซ่โม่เลกุลทั้งหมด 2 สายซึ่งแนวแกนขนานกัน เนื่องจากอะตอม F จะมีสภาพเป็นลบทางไฟฟ้ามากกว่าอะตอม C และอะตอม H จะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่าอะตอม C แต่ละมอนอเมอร์จะมีไดโพลถาวรทางไฟฟ้า ถ้าการเรียงตัวของอะตอมต่าง ๆ เป็นระเบียบดังที่แสดงในรูป 1.5 ก สายโซ่โม่เลกุลนี้จะมีไดโพลในทิศตั้งฉาก



รูป 1.6 แสดงเซลล์หน่วยของผลึก PVDF แบบ I (เฟส β)

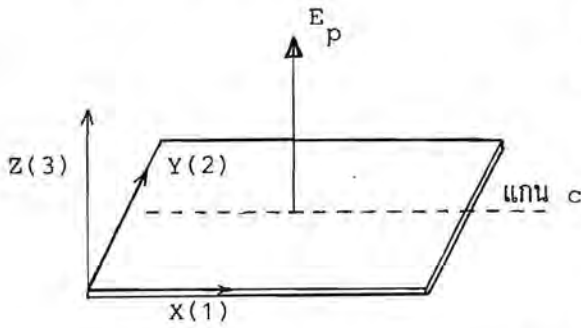
กับระนาบของกระดาษ พบว่าแต่ละมอนอเมอร์จะมีไดโพลขนาด 7.06×10^{-30} C-m (Coulomb-meter) ในทิศตั้งฉากกับแกนของสายโซ่ เนื่องจากการวางตัวของสายโซ่โม่เลกุลในเซลล์หน่วยเป็นไปในแบบเดียวกัน ผลึกแบบนี้จะมีไดโพลทางไฟฟ้าพบว่าขนาดของไดโพลต่อปริมาตรหรือโพลาริเซชันของผลึก PVDF รูปแบบ I หรือเฟส β นี้เท่ากับ

$$P_c = 0.23 \text{ C/m}^2 \quad (1.9)$$

ในการยึดฟิล์ม PVDF ที่อุณหภูมิสูงดังที่กล่าวมาแล้ว แล้ว ผลึกเฟส β จะไม่ได้เกิดขึ้นเพียงแบบเดียว แต่จะมี PVDF ซึ่งมีโครงสร้างแบบอสัณฐานปนอยู่ด้วย พบว่าผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก ๆ กล่าวคือ มีความยาว 100-200 Å และหนาเพียง 80-100 Å และหลังจากยึดจะมีผลึก PVDF ปนอยู่ประมาณ 50% ของสารทั้งหมด ถึงแม้ว่าแต่ละผลึกเล็ก ๆ ซึ่งแกนของสายโซ่วางตัวตามแนวการยึดนี้จะมีไดโพลถาวร พบว่าทิศของไดโพลของแต่ละผลึกซึ่งตั้งฉากกับแกนนี้จะวางตัวในระนาบของฟิล์มซึ่งเป็นไปได้สองทิศเท่า ๆ กัน ผลก็คือไดโพลรวมเนื่องจากผลึกเหล่านี้จะหักล้างกันหมด ดังนั้นหลังจากการยึด PVDF จะไม่มีไดโพลถาวร และจะยังไม่ใช้สารเพียโซอีเล็กตริก

วิธีที่จะทำให้แผ่นฟิล์มข้างบนเป็นสารเพียโซอีเล็กตริกทำได้โดยการจัดขั้ว (poling) กล่าวคือผ่านสนามไฟฟ้า $E_p = 50-150 \text{ MV/m}$ ขณะที่ฟิล์มมีอุณหภูมิ $T_p = 80-120^\circ\text{C}$ ใน

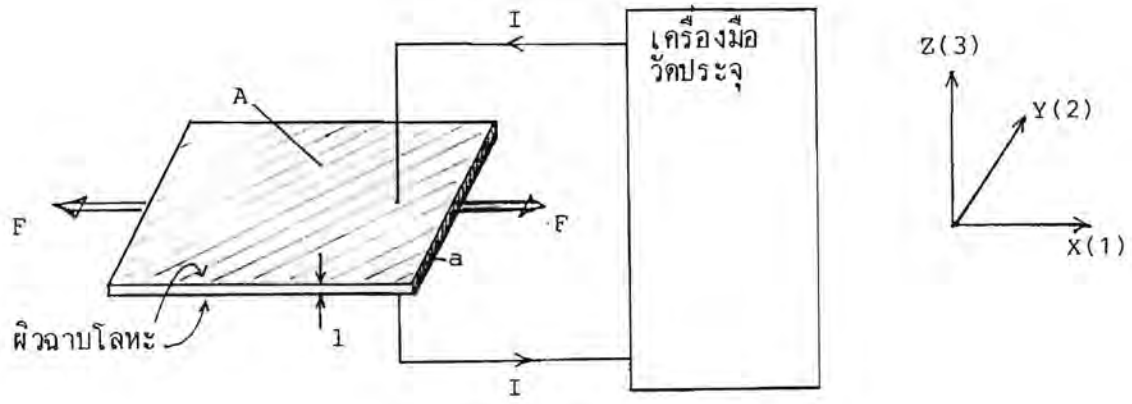
ช่วงเวลา $t_p = 3-30$ นาที (ดูรูป 1.7) ที่อุณหภูมิสูงแบบนี้ สนามไฟฟ้าความเข้มสูงในทิศตั้งฉากกับระนาบของฟิล์มจะสามารถเหนี่ยวนำให้ผลึกหมุนตัว ทำให้ไดโพลชี้ไปในแนวใกล้เคียงกับแนวของ



รูป 1.7 แสดงการจัดตัวของฟิล์ม PVDF ซึ่งมีผลึกแบบเฟส β ในรูปแผ่น c เป็นแนวการยึดและเป็นแกนของสายโซ่โพลีเมอร์

สนามไฟฟ้ามากขึ้น [4] เมื่อเวลาผ่านไปเท่าที่ต้องการ ลดอุณหภูมิของฟิล์มลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นลดสนามลงเป็นศูนย์ พบว่าฟิล์มจะมี P ในแนวของ E_p หมายความว่าฟิล์มนี้กลายเป็นสายเฟอร์โรอิเล็กทริก ซึ่งสามารถแสดงสมบัติทางเฟอร์โรอิเล็กทริกได้ตามต้องการ พบว่าในกระบวนการนี้ส่วนอสัณฐานของ PVDF ก็เกิดจากจัดตัวขึ้นด้วยเหมือนกัน แต่ไดโพลของส่วนอสัณฐานจะมีบทบาทมากเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิแก้ว (T_g) ของ PVDF ซึ่งเท่ากับประมาณ $-40^\circ C$ เท่านั้น ที่อุณหภูมิต้องโพลาริเซชันมาจากผลึกเฟส β เป็นส่วนใหญ่

ในการวิจัยพัฒนานี้มุ่งที่จะศึกษาการเปลี่ยนของ P (ซึ่งอยู่ในแนว z) เนื่องจากแรงยึดฟิล์มในแนว x (แนว 1) ทำได้โดยการทดลองดังแสดงในรูป 1.8 เมื่อแรง $\pm F$ กระทำต่อฟิล์มในแนว x จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของ P_z ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุบนพื้นที่ A ด้านล่างและบนดังรูป ในการนี้จะมีกระแส I ไหลผ่านเครื่องวัดประจุ (charge amplifier)



รูป 1.8 การวัดสัมประสิทธิ์ d_{31} ของฟิล์ม PVDF

ทำให้ทราบประจุ ΔQ ที่เปลี่ยนแปลงนี้ได้ จึงอาจคำนวณสัมประสิทธิ์ d_{31} ได้จากสมการ (1.3a)

$$\Delta D = \Delta Q/A = d_{31} F/a \tag{1.10}$$

สัมพันธ์เพื่อสร้างอิเล็กทริกที่วัดได้เป็น d_{31} ทั้งนี้เพราะแรงกระทำต่อพื้นที่ a ซึ่งตั้งฉากกับแกน 1 (แกน x) ขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุบนพื้นที่ A ล่าง-บน ซึ่งตั้งฉากกับแกน 3 (แกน z) ในการทดลองนี้ $E = 0$ และขณะดึงพื้นที่ A และความหนา l เปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก ในการคำนวณจึงถือว่าคงที่ ค่าที่ได้แบบนี้เรียกว่า d_{31} เชิงประจักษ์ (observed d_{31})

การประยุกต์ของฟิล์มเพียโซอิเล็กทริกในตอนท้ายของการวิจัยจะให้ผลดีต่อเมื่อฟิล์มมี d_{31} สูง ในการใช้ฟิล์มเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณเสียง นิยมป้อนสัญญาณไฟฟ้าสลับกับอิเล็กโทรดพื้นที่ A ทั้งสอง ขณะที่ $X = F/a = 0$ จากสมการ (1.3b) ฟิล์มจะมีการยืดหดสลับกันไปจึงทำให้เกิดคลื่นเสียงขึ้น ถ้า d_{31} มีค่ามากจะทำให้ฟิล์มสั้นด้วยอิมพลีจูดสูงจึงกำเนิดเสียงได้ดีขึ้น สำหรับการใช้นิโบลเป็นเครื่องรับสัญญาณเสียงก็มีผลแบบเดียวกัน สำหรับ d_{31} นั้นจะเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของประจุ ΔQ บนพื้นที่ A เมื่อแรงกดอยู่ในแนว $+z$ d_{31} สำคัญเฉพาะกรณีที่จะกำเนิดคลื่นเสียง ความถี่สูงมาก ๆ และมีบทบาทในการใช้ฟิล์มเป็นตัวจับสัญญาณเสียง เนื่องจากในการวิจัยนี้มุ่งที่จะใช้ฟิล์มเพื่อกำเนิดสัญญาณความถี่ไม่สูงนัก ($f < 20,000$ Hz) จึงสนใจเพียงค่า d_{31} เท่านั้น

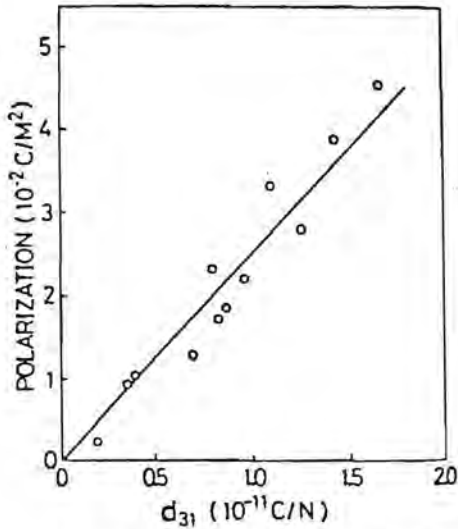
ในการอธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกของ PVDF ในระดับโมเลกุลนั้น ได้มีการสร้างแบบจำลองขึ้นหลายแบบเพื่ออธิบายปรากฏการณ์นี้ [4] สำหรับที่จะใช้ในการวิจัยนี้คือแบบจำลองของ Wada และ Hayakawa (เขียนย่อ ๆ ว่าแบบจำลอง W-H) ซึ่งถือว่าส่วนของฟิล์มที่ไวต่อปรากฏการณ์มีก้อนกลมเล็ก ๆ ภายในประกอบด้วย PVDF เฟส β และ PVDF แบบอสัณฐานที่ถูกจัดตัวแล้ว ก้อนกลมที่เรียกว่า "ผลึก" นี้กระจายอยู่ทั่วไปภายในฟิล์ม PVDF และจะล้อมรอบด้วยส่วนอสัณฐานที่ไม่มีสมบัติเพียโซอิเล็กทริก จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีจะได้ว่า

$$d_{31} = P_s \left[\frac{\epsilon_c}{2\epsilon_a + \epsilon_c} \cdot \frac{K_s}{\epsilon_a} + m_{31} \right] \quad (1.11)$$

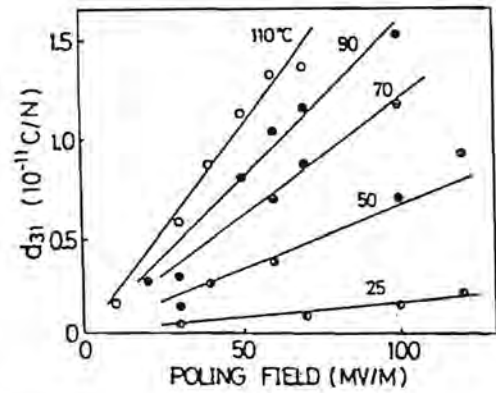
โดย P_s เป็นโพลาริเซชัน (ในแนว z) ของฟิล์มเมื่อ $E = 0$ (spontaneous polarization) ϵ_c และ ϵ_a เป็นสภาพยอมของส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน ตามลำดับ $K_s = \partial\epsilon_s/\partial S$ ซึ่งเรียกว่า electrostriction constant ส่วน Poisson's ratio $m_{31} = -(\partial l/\partial S)/l$

m_{31} หมายถึงสัดส่วนความหนาของฟิล์มที่ลดลงเมื่อถูกดึงไปตามแนว 1 (หรือแนวยึดเค็มของฟิล์ม) ในพอลิเมอร์ยืดหยุ่นทั่วไปเช่นยาง m_{31} จะมีค่าประมาณ $1/2 = 0.7$ สำหรับ PVDF ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย $m_{31} = 0.7$ เช่นกัน พบว่า m_{31} มีบทบาทเกือบ 80% ของเทอมในวงเล็บทั้งหมด และในการเตรียมแผ่นฟิล์ม พบว่าเทอมต่าง ๆ เหล่านี้จะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่า d_{31} จึงขึ้นกับ P_s เป็นส่วนใหญ่ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองดังแสดงในรูป 1.9g [4]

จะเห็นว่าวิถีการเพิ่ม d_{31} ของฟิล์ม PVDF อาจทำได้โดยวิธีเพิ่ม P_u ของฟิล์ม พบว่าอาจเตรียมฟิล์มให้มี P_u สูงได้โดยเพิ่ม E_p และ T_p ดังแสดงในรูป 1.9 ข [4] ทั้งนี้ต้อง



(ก)



(ข)

รูป 1.9 ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง P_u และ d_{31} ของฟิล์ม PVDF

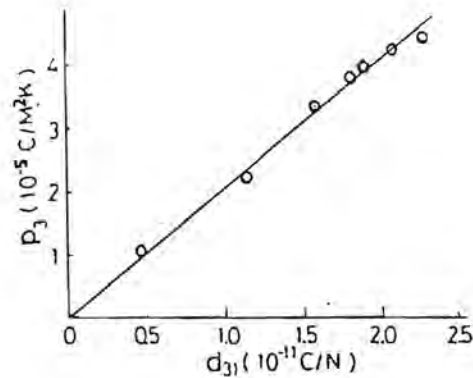
ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง d_{31} กับ E_p และ T_p ของฟิล์ม PVDF

ระวังมิให้สนาม E_p สูงเกินไปจนกระทั่งฟิล์ม PVDF ชำรุด กล่าวคือ มีการฉีกของกระแสระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสอง และขณะจัดหัวต้องระมัดระวังมิให้อุณหภูมิ T_p สูงเกินไปจนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของผลึกจากเฟส β ไปเป็นเฟส α ซึ่งจะทำให้ P_u ลดลง

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันในแนว z ของฟิล์มในรูป 1.8 จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุ ΔQ บนอิเล็กโทรดทั้งสองได้เช่นกัน ถึงแม้ว่าจะไม่มีแรงกระทำดังรูป จากสมการ (1.8a)

$$\Delta Q/A = p_3 \Delta T \quad \text{เมื่อ} \quad E = 0 \quad (1.12)$$

จากแบบจำลอง W-H พบว่า p_3 แปรผันโดยตรงไปกับ P_u เช่นกัน ซึ่งจะทำให้ p_3 แปรผันโดยตรงไปกับ d_{31} ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับผลการทดลองดังแสดงในรูป 1.10 ข้างล่าง [4] จะเห็นได้ว่าการเตรียมฟิล์มที่มี d_{31} สูงก็จะมี p_3 สูงไปด้วยเช่นกัน



รูป 1.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง p_3 และ d_{31} ของฟิล์ม PVDF

1.3 ขั้นตอนการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้มุ่งที่จะหาวิธีพัฒนาฟิล์ม PVDF ให้มีสัมประสิทธิ์เพียโซโซ-ไพโรอิเล็กทริกที่มีค่าสูง และนำฟิล์มนี้ไปสร้างเครื่องกำเนิดและรับสัญญาณเสียง การวิจัยมีขั้นตอนดังนี้

(ก) พัฒนาเครื่องมือประกอบที่จะใช้ในการวิจัย ได้แก่ เครื่องยัดฟิล์ม เตาอบควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง 80°C ถึง 130°C เครื่องมือให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง 3000 โวลต์ และเครื่องมือวัดสัมประสิทธิ์เพียโซโซ-ไพโรอิเล็กทริก

(ข) ศึกษากระบวนการในการเตรียมฟิล์ม และพัฒนาฟิล์มให้มีค่า d_{31} และ p_3 ที่สูงที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้จะตรวจสอบผลการทดลองที่ผู้เฒ่ามาก่อนแล้ว และดัดแปลงวิธีการใหม่ให้เหมาะสมยิ่งขึ้นโดยยึดแบบจำลอง W-H เป็นหลัก

(ค) นำฟิล์มที่ได้ซึ่งมีค่า d_{31} และ p_3 สูงไปสร้างเครื่องมือทางเสียงต่าง ๆ ผลการวิจัยพัฒนาเขียนไว้โดยละเอียดในบทถัดไป

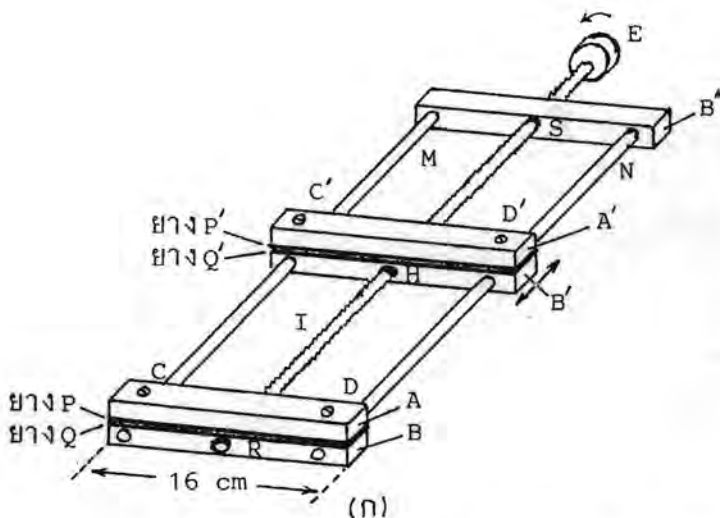
2. การสร้างเครื่องมือช่วยวิจัย

ถึงแม้ว่าในต่างประเทศจะมีนักวิจัยจำนวนมากสนใจในงานทางด้านพอลิเมอร์เพียโซอิเล็กทริกมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1969 แต่ในประเทศไทยเพิ่งจะเริ่มงานทางด้านนี้เมื่อประมาณ 2 ปีมานี้เอง และโครงการวิจัยนี้ก็นับได้ว่าเป็นงานเริ่มแรกที่จะพัฒนาพอลิเมอร์ไวไฟฟ้าดังกล่าว ดังนั้นในขั้นต้นนี้จะต้องเป็นการเตรียมเครื่องมือพื้นฐานต่างๆ เพื่อใช้ในการพัฒนาฟิล์มเพียโซอิเล็กทริกต่อไป การสร้างเครื่องมือขึ้นเองจะเป็นการประหยัดเงินวิจัยได้มาก และเมื่อมีเครื่องมือที่จำเป็นแล้วงานวิจัยก็จะทำได้โดยสะดวก การพัฒนาเครื่องมือต่าง ๆ แสดงอยู่ดังในรายละเอียดข้างล่าง

2.1 เครื่องยึดฟิล์มพอลิเมอร์

ในการเปลี่ยนฟิล์ม PVDF ธรรมดาที่มีผลึกโครงสร้างเฟส α ให้มาเป็นผลึกโครงสร้างเฟส β ซึ่งสามารถทำให้มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกนั้น ขั้นแรกจะต้องยึดฟิล์มให้ยาวออกทางด้านใดด้านหนึ่งประมาณ 4-6 เท่าที่อุณหภูมิ $80 - 100^{\circ}\text{C}$ งานวิจัยเริ่มแรกก็คือการสร้างเครื่องยึดฟิล์มนี้ ซึ่งแสดงในแผนภาพในรูป 2.1 ก. และโดยภาพถ่ายในรูป 2.1 ข

โครงของเครื่องมือเป็นทองเหลือง แกน M, N จะยึดติดแน่นกับแท่งทองเหลือง B และ B' เมื่อขันนอต C, D และ C', D' จะยึดให้แท่งทองเหลือง A และ A' ติดแน่นกับ B และ B' ตามลำดับ ระหว่างแท่งทองเหลืองสองคู่จะมียาง P, Q และ P', Q' สอดไว้ ในการใช้งานขอบสองข้างของฟิล์ม PVDF จะสอดติดแน่นระหว่างยาง P, Q และ P', Q' นี้



รูป 2.1 ก) แผนภาพของเครื่องยึดฟิล์ม

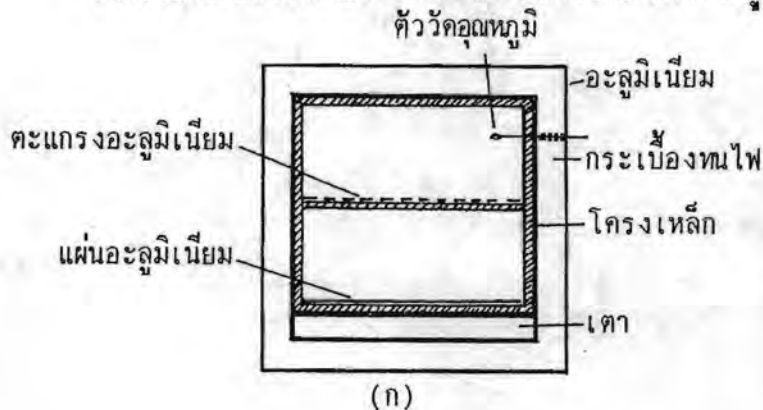
ข) ภาพถ่ายของเครื่องยึดฟิล์ม

ตามรูปถนนเกลียว I จะสอดผ่านรู R และ S และจะลอดผ่านรูปเกลียว H เมื่อหมุนปุ่ม E แท่งทองเหลือง A' B' ซึ่งติดกันแน่นจะเลื่อนเข้าออกได้ขณะที่ส่วนอื่นอยู่นิ่ง ๆ เมื่อหมุนปุ่ม E ไปในทิศตั้งรูป แท่งทองเหลือง A' B' จะค้อย ๆ เลื่อนออก ' ดึงแผ่นฟิล์ม PVDF ให้ยึดออกได้ตามที่ต้องการ พบว่าเครื่องยึดที่สร้างขึ้นนี้ใช้งานได้

2.2 เตาอบ

หลังจากยึดฟิล์มออกแล้วจำเป็นต้องอบฟิล์มที่อุณหภูมิประมาณ $100 - 120^{\circ}\text{C}$ ประมาณ 3-4 นาที เพื่อให้โครงสร้างของพอลิเมอร์คลายตัวลดความเครียดที่เกิดจากการยึด นอกจากนี้ในการจัดซื้อฟิล์มพอลิเมอร์ยังอาจต้องทำที่อุณหภูมิสูงเช่นประมาณ 100°C ดังนั้นในงานนี้จึงจำเป็นต้องสร้างเตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง $80 - 120^{\circ}\text{C}$ หรือว่านั้น สามารถเลือกช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ΔT ได้ และมีขนาดใหญ่พอที่ใช้เครื่องยึดในรูป 2.1 เข้าไปได้ เนื่องจากอุณหภูมิขณะทำงานของเตาอบนี้ไม่สูงจึงไม่ต้องใช้กำลังไฟฟ้ามากนัก

เตาอบที่สร้างขึ้นนี้มีขนาดภายนอกกว้าง 23 ซม. สูง 22 ซม. และยาว 66 ซม. รอบนอกเป็นแผ่นอะลูมิเนียม ถัดไปเป็นฉนวนความร้อนซึ่งทำด้วยกระเบื้องทนไฟซึ่งใช้ก่อสร้างธรรมดา กระเบื้องนี้หนาประมาณ 2 ซม. วางชิดอยู่ภายในของแผ่นอะลูมิเนียมโดยรอบทุกด้าน ด้านล่างบนแผ่นกระเบื้องนี้มีขดลวดความร้อนวางอยู่จากปากเตาอบเข้าไปจนถึงในสุด ถัดจากแผ่นกระเบื้องเข้าไปเป็นโครงเหล็กซึ่งทำจากเหล็กเส้นรัศมีประมาณ 2 มม. ถ้าเปิดฝาหน้าของเตาอบนี้และมองเข้าไปจะเห็นภาพดังแสดงในแผนภาพในรูป 2.2 ก และภาพถ่ายในรูป 2.2 ข



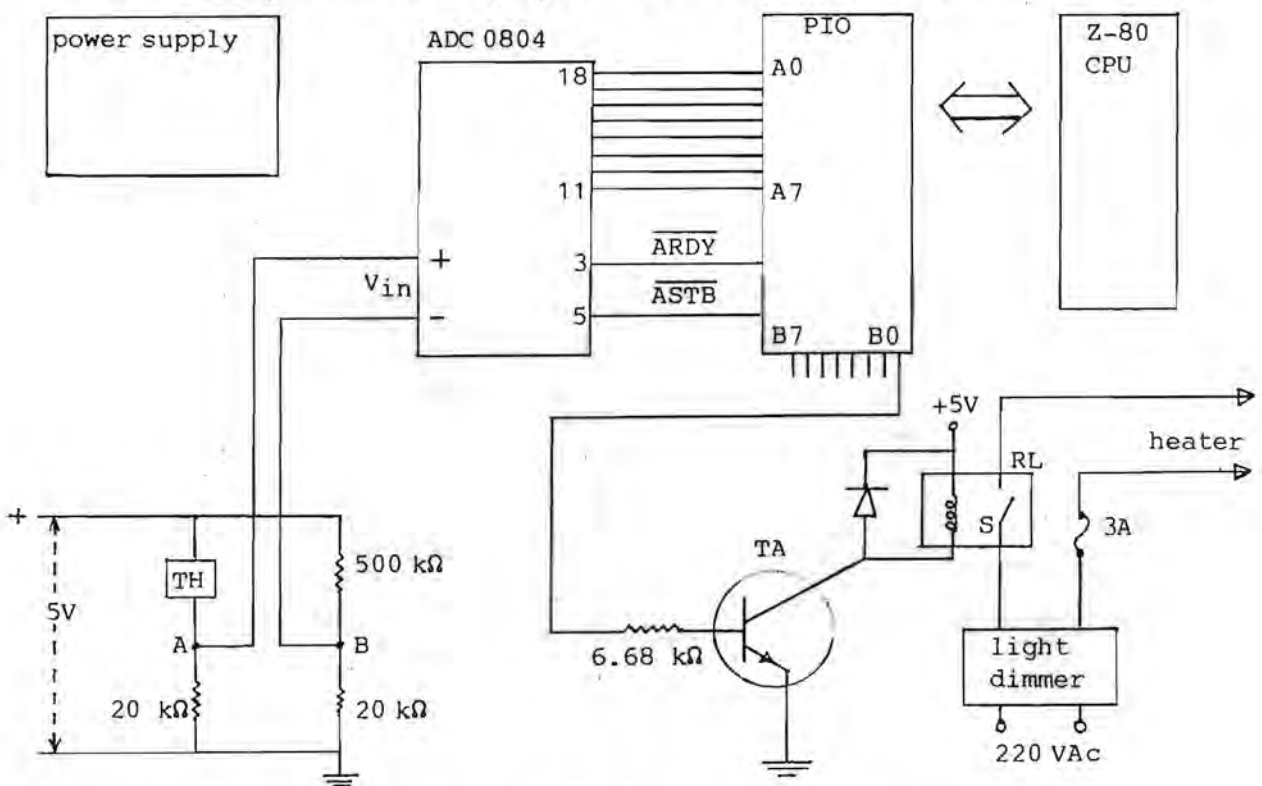
รูป 2.2 ก) แผนภาพแสดงด้านหน้าของเตาอบเมื่อเปิดฝาออก

ข) ภาพถ่ายด้านหน้าของเตาอบเมื่อเปิดฝาออก

รูป 2.2 ก แสดงโครงหลักซึ่งอยู่ติดกับผิวด้านในของแผ่นกระเบื้อง มีส่วนของโครงหลักกลางซึ่งกินปริมาตรภายในของเตาอบออกเป็นชั้นล่างและชั้นบน ด้านล่างจะมีแผ่นอะลูมิเนียมวางทับลดความร้อนเพื่อกันการแผ่รังสีโดยตรงจากหลอด และจะมีแผ่นอะลูมิเนียมที่เจาะรูกลมไว้ทั่วไปเป็นตะแกรงอะลูมิเนียมวางทับโครงหลักกลางอยู่ รูกลมทั้งหลายจะช่วยในการพาความร้อนของอากาศเพื่อปรับให้อุณหภูมิภายในเตาอบค่อนข้างจะเท่ากัน โดยปกติฟิล์มที่จะอบจะวางอยู่บนตะแกรงอะลูมิเนียมนี้ ด้านข้างมีรู 2 รู เพื่อสอดตัววัดอุณหภูมิ เช่น เทอร์มิสเตอร์ หรือเทอร์โมคอปเปิล เพื่อวัดอุณหภูมิภายในของเตา

พบว่าถ้าใช้ไฟฟ้าสลับ 220 โวลต์ กับลดความร้อนของเตาอบ จะทำให้อุณหภูมิภายในร้อนเกินไปหากการควบคุม ดังนั้นจึงใช้เครื่องหรี่ไฟ (light dimmer) เข้าช่วยเพื่อให้กำลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ลดความร้อนน้อยลงจนทำให้อุณหภูมิสูงสุดภายในเตาอบเท่ากับประมาณ 140°C พบว่าในสภาพการควบคุมอุณหภูมิของเตาอบทำได้ดี

ได้นัดนาหน่วยเชื่อมต่อ (interfacing unit) ซึ่งใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์แผ่นพิมพ์เขียวแบบ MPF-1 (Microprofessor 1) [6] เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเตาอบนี้ วงจรของหน่วยเชื่อมต่อแสดงในรูปที่ 2.3 การวัดอุณหภูมิของเตาอบนี้ทำโดยเทอร์มิสเตอร์ (TH) ซึ่งจะเป็นส่วน



รูป 2.3 วงจรเชื่อมต่อของหน่วยควบคุมอุณหภูมิ

ประกอบของวงจรบริดจ์ซึ่งเลี้ยงด้วยไฟ 5 V ความต่างศักย์ V_{AB} จากวงจรบริดจ์นี้อาจหาได้จากสมการ

$$V_{AB} = (5/26)(500-R)/(20+R) \quad (2.1)$$

โดย R เป็นความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ในหน่วยกิโลโอห์ม ตามรูป ADC 0804 จะเปลี่ยนความต่างศักย์นี้ให้เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข 8 หลัก เพื่อส่งต่อไปยัง PIO และ Z-80 CPU ของเครื่อง MPF-1 สำหรับการประเมินผลต่อไป ค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ (R) ที่อุณหภูมิ (T) ต่าง ๆ และค่า V_{AB} เชิงตัวเลขจาก ADC แสดงอยู่ในตาราง 2.1 พบว่าในวงจรนี้ค่ากำลังความร้อนที่เกิดขึ้นในเทอร์มิสเตอร์อยู่ในช่วง 0.05-0.20 มิลลิวัตต์ ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิแก่ตัวเองขึ้น

ก่อนการใช้งานจะต้องกำหนดอุณหภูมิของเตาอบที่ต้องการควบคุม เช่นถ้าต้องการให้อุณหภูมิเป็น 90°C จะต้องบันทึกตัวเลข $V_{AB} = 133$ ไว้ในโปรแกรม (ดูตาราง) เมื่อเปิดสวิทช์ให้เครื่องเริ่มทำงานนั้น ในจังหวะแรก CPU ของ MPF-1 จะส่งสัญญาณผ่าน PIO ไปกระตุ้นให้ ADC เริ่มทำงานเพื่อเปลี่ยนสัญญาณ V_{AB} เป็นสัญญาณตัวเลข จากนั้นส่งเข้าสู่ PIO ทางพอร์ต A ซึ่งในงานนี้โปรแกรมให้เป็นพอร์ตรับสัญญาณ CPU จะรับสัญญาณนี้จาก PIO และจะตรวจดูว่าสัญญาณนี้มากกว่า 133 หรือไม่ ถ้าไม่มากกว่าก็หมายความว่าอุณหภูมิของเตาอบยังต่ำอยู่ CPU จะสั่งให้ PIO จะส่งสัญญาณเลขคือออกทางพอร์ต B ซึ่งเป็นพอร์ตส่งสัญญาณออก สำหรับเลขที่ศักดิ์จากบิต BO จะเท่ากับ 5 โวลต์ ศักย์นี้จะกระตุ้นทรานซิสเตอร์ TA ให้ลัดวงจร ทำให้กระแสผ่านรีเลย์ RL ลงสู่ดิน ซึ่งจะดึงสวิทช์ S ให้ปิดนำกำลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ลวดความร้อน อุณหภูมิภายในเตาอบจะค่อย ๆ สูงขึ้น CPU จะตรวจสอบสัญญาณจาก ADC ตลอดเวลาทุก ๆ 1 วินาที เมื่อใด $V_{AB} > 133$ CPU จะสั่งให้ PIO ส่งสัญญาณเลขคือออกทางพอร์ต B ในกรณีศักดิ์ที่บิต BO จะเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะทำให้ทรานซิสเตอร์ TA และรีเลย์ RL หยุดทำงาน ทำให้ไม่มีกำลังไฟฟ้าเข้าสู่เตาอบซึ่งจะทำให้เตาอบเย็นลง โดยการทำงานซ้ำ ๆ กันแบบนี้ก็สามารถควบคุมอุณหภูมิของเตาอบให้อยู่บริเวณ 90°C ตลอดไปได้

สำหรับโปรแกรมการทำงานนั้นเขียนเป็นภาษาเครื่องบันทึกไว้ในเทปสามารถถ่ายลงในหน่วยความจำของ MPF-1 ได้เมื่อต้องการใช้งาน จากการตรวจสอบพบว่าหลังจากรีเลย์หยุดทำงานไปแล้วอุณหภูมิภายในเตาอบก็ยังสูงขึ้นอีกเล็กน้อย เพราะมีความร้อนสะสมอยู่บริเวณขดลวดความร้อน ขณะเดียวกันเมื่อรีเลย์เริ่มทำงานอุณหภูมิก็ตั้งไม่สูงขึ้นทันที ทำให้การควบคุมอุณหภูมิไม่แม่นยำ 100% แต่มีความคลาดเคลื่อนประมาณ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ซึ่งก็ยอมรับได้สำหรับการทำงานในโครงการนี้

ตาราง 2.1

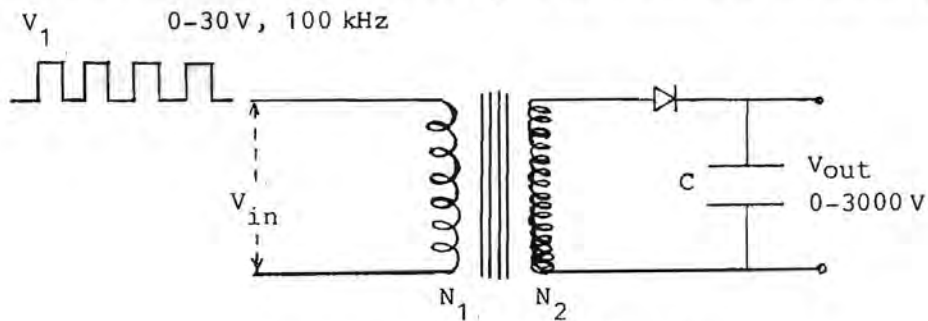
ค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และศักย์ V_{AB} เบื้องตัวเลข

T(°C)	R(kΩ)	V_{AB}	T(°C)	R(kΩ)	V_{AB}
80	43.2	100	106	16.00	185
81	41.6	103	107	15.45	189
82	39.6	107	108	14.89	192
83	38.0	110	109	14.42	195
84	36.6	113	110	13.83	198
85	35.0	117	111	13.32	201
86	33.5	120	112	12.90	204
87	32.3	123	113	12.46	207
88	31.1	127	114	12.07	210
89	30.0	130	115	11.65	213
90	28.8	133	116	11.25	216
91	27.7	137	117	10.95	218
92	26.7	140	118	10.54	221
93	25.7	143	119	10.22	224
94	24.8	146	120	9.88	226
95	23.9	150	121	9.56	229
96	23.0	153	122	9.29	231
97	22.1	157	123	8.95	234
98	21.3	160	124	8.69	236
99	20.5	163	125	8.44	238
100	19.89	166	126	8.22	240
101	19.17	169	127	7.97	243
102	18.56	172	128	7.73	245
103	17.89	176	129	7.45	248
104	17.30	179	130	7.19	250
105	16.58	182	131	6.95	253

2.3 เครื่องให้กำเนิดความต่างศักย์สูง

ในการจัดหัวแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ จำเป็นต้องมีเครื่องกำเนิดความต่างศักย์สูงเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับระนาบของพอลิเมอร์ ถ้าต้องการใช้สนามขนาด 100 MV/m สำหรับฟิล์มซึ่งมีความหนา $30 \mu\text{m}$ จะต้องใช้ความต่างศักย์ 3000 V ดังนั้นจึงต้องพัฒนาเครื่องมือที่ให้ความต่างศักย์ขนาดนี้ แต่เนื่องจากในการจัดหัวนั้น ส่วนใหญ่ใช้กระแสไฟฟ้าน้อยมาก กล่าวคือน้อยกว่า $50 \mu\text{A}$ (แล้วแต่ขนาดของฟิล์ม) ดังนั้นเครื่องมือนี้จึงพัฒนาขึ้นได้ไม่ยากนัก

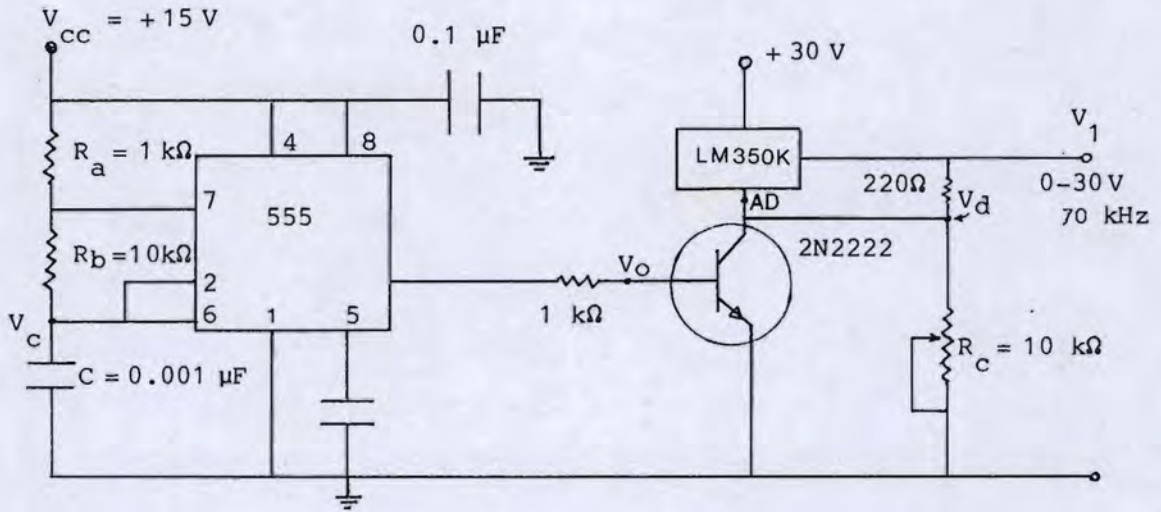
การสร้างความต่างศักย์สูงนี้ใช้หลักของหม้อแปลง (transformer) ซึ่งมีแกนเป็นเฟอร์ไรต์ แกนหม้อแปลงแบบนี้สามารถตอบสนองต่อความถี่สูง ๆ ขนาด 100 kHz โดยไม่เกิดการสูญเสีย



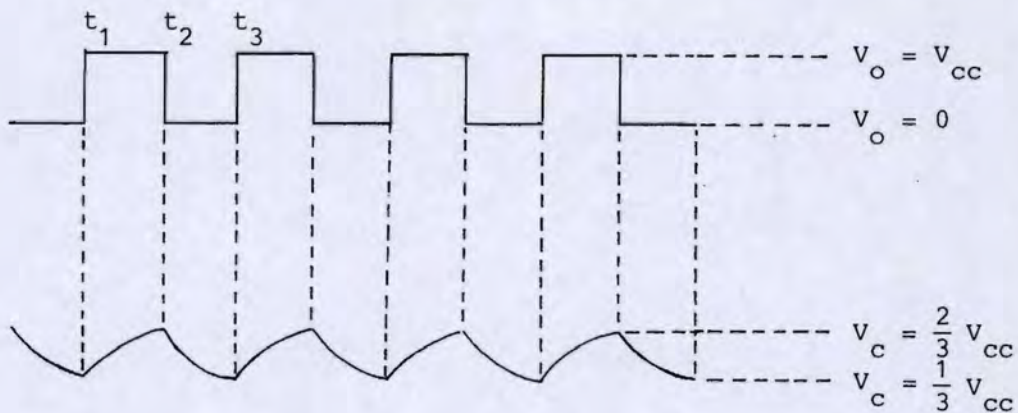
รูป 2.4 วงจรขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้า

กำลังงานมากได้ ชั้นแรกสร้างสัญญาณรูปเหลี่ยม $0-30$ โวลต์ ความถี่ 70 kHz เข้าสู่ขดลวดปฐมภูมิ เนื่องจากอัตราส่วนจำนวนขดลวดทุติยภูมิต่อปฐมภูมิ $N_2/N_1 = 100$ ศักย์ไฟฟ้าที่ออกทางด้านทุติยภูมิจะขยายขึ้นเป็น $0-3000$ โวลต์ ตามรูปใช้ไดโอดปรับให้กระแสสลับทางด้านนี้เป็นกระแสตรง พร้อมกับปรับให้เรียบโดยใช้ตัวเก็บประจุ ซึ่งสามารถทำได้ง่าย ๆ ที่ความถี่สูง ๆ ขนาดนี้

วงจรสร้างศักย์ไฟฟ้ารูปเหลี่ยมแสดงในรูป 2.5 ได้ใช้ Timer IC 555 เพื่อกำเนิดสัญญาณรูปเหลี่ยม $0/15$ โวลต์ 70 kHz เพื่อไปกระตุ้นทรานซิสเตอร์ 2N 2222 การทำงานของ IC 555 ควบคุมด้วยศักย์ไฟฟ้า V_c ที่ขา 6 เมื่อเริ่มทำงานตัวเก็บประจุ C จะมีประจุสะสมเพิ่มขึ้น และ V_c จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ขณะที่ V_c มีค่าเพิ่มขึ้นจาก $V_{cc}/3$ จนถึง $2V_{cc}/3$ สัญญาณออก V_o จะมีค่าเท่ากับ V_{cc} ซึ่งในงานนี้เท่ากับ 15 โวลต์ แต่เมื่อ V_c มีค่าสูงถึง $2V_{cc}/3$ นั้น วงจร upper comparator จะกระตุ้นวงจรพลิกผลิบซึ่งอยู่ภายใน IC นี้ ทำให้ขา 7 เชื่อมต่อกับดินหรือขา 1 ประจุใน C จะระบายออกสู่ดินทำให้ศักย์และประจุใน C ลดลง ในช่วงที่ V_c ลดลงจาก $(2/3)V_{cc}$ ถึง $V_{cc}/3$ นี้ ศักย์ V_o จะเท่ากับ 0 ที่ $V_c = V_{cc}/3$ ขา 7 จะขาดจากดินตัวเก็บประจุ C จะเริ่มสะสมประจุใหม่ทำให้ V_c เพิ่มขึ้น เป็นเช่นนี้เรื่อยไปดังในรูป 2.6



รูป 2.5 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณรูปเหลี่ยม 0-30 V ความถี่ 70 kHz



รูป 2.6 แสดงศักย์ V_o ซึ่งถูกควบคุมโดยศักย์ V_c

คาบหรือความถี่ของ V_o อาจควบคุมได้โดยเลือก R_a , R_b และ C ที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์ห้วงจร ในช่วงที่ C กำลังสะสมประจุ กล่าวคือเมื่อ V_c กำลังเพิ่มจาก $V_{cc}/3$ เป็น $2V_{cc}/3$ นั้นจะได้

$$V_c = V_{cc}(1 - e^{-t/C(R_a + R_b)}) \quad (2.2)$$

ถ้า $V_c(t_1) = V_{cc}/3$ และ $V_c(t_2) = 2V_{cc}/3$ จะได้

$$t_2 - t_1 = C(R_a + R_b) \ln 2 \quad (2.3)$$

และขณะที่ C กำลังคายประจุ พบว่า

$$V_c = \frac{2}{3}V_{cc} e^{-(t-t_2)/CR_b} \quad (2.4)$$

ถ้าให้ $V_c(t_3) = V_{cc}/3$ จะได้

$$t_3 - t_2 = C R_b \ln 2 \quad (2.5)$$

ดังนั้นคาบของ V_o

$$T = t_3 - t_1 = C(R_a + 2R_b) \ln 2 = 1/f \quad (2.6)$$

ในงานนี้ $R_a = 10^3 \Omega$, $R_b = 10^4 \Omega$, $C = 10^{-9} \text{ F}$ จะได้ว่าความถี่

$$f = [10^{-9} (2.1 \times 10^4) (0.693)]^{-1} = 6.9 \times 10^4 \text{ Hz}$$

ความถี่ค่าอื่นก็อาจทำได้โดยเลือก R_a , R_b และ C ที่เหมาะสม

สก็ร์ $V_o = V_{cc}$ จาก IC 555 นี้จะกระตุ้นที่ทรานซิสเตอร์ 2N2222 ทำให้ขา AD ของ IC LM350K ซึ่งเป็น regulator ลัดวงจรลงดิน ในจังหวะเหล่านี้สัญญาณออก V_1 จะเท่ากับ 0 หรือมีค่าน้อยมาก แต่จังหวะใดที่ $V_o = 0$ สก็ร์ที่กระตุ้นที่ขา AD จะเท่ากับ V_d ซึ่งจะทำให้สัญญาณ $V_1 > 0$ ในช่วงนี้ V_1 จะมีค่ามากขึ้น ถ้า V_d มากขึ้น ในงานนี้สามารถแต่ง V_1 ให้อยู่ในช่วงประมาณ 0-30 V ได้โดยการปรับ R_c สก็ร์ V_1 นี้จะป้อนเข้าสู่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 2.4

โดยการแต่ง R_c ในช่วง 0-10 k Ω จะได้ว่า $V_{o_{max}}$ จากขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นค่าในช่วงประมาณ 0-3000 โวลต์ ซึ่งอาจอ่านได้จากโวลต์มิเตอร์แบบเข็มที่สร้างขึ้นและติดตั้งไว้ด้านหน้าของเครื่องมือ พบว่าที่ความต่างสก็ร์สูง ๆ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายได้จากเครื่องนี้จะลดลงตามลำดับ เช่นที่ 1600 โวลต์ จ่ายกระแสสูงสุดได้ 320 μA ส่วนที่ 2750 โวลต์ จ่ายกระแสสูงสุดได้แค่ 55 μA แต่ก็มีข้อเสียที่จะใช้กับการจัดขั้วแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ ทั้งนี้เพราะแผ่นฟิล์มมีสถานะเป็นฉนวนดังที่กล่าวไว้แล้วในบทแรก ภาพด้านหน้าของเครื่องมือแสดงอยู่ในรูป 2.7



รูป 2.7 ภาพด้านหน้าของเครื่องกำเนิดความต่างสก็ร์สูง 0-3000 โวลต์

2.4 เครื่องมืออื่น ๆ ที่พัฒนาขึ้น

ในการวิจัยพัฒนานี้ ได้สร้างเครื่องมืออื่น ๆ อีกหลายชิ้น เช่น เครื่องวัดประจุไฟฟ้า (Charge Amplifier) โดยอาศัย operational amplifier ที่มีความต้านทานสูงมาก ๆ ได้ใช้เครื่องมือนี้ในการวัดประจุจากแผ่นฟิล์ม PVDF ในช่วงแรก ๆ แต่ในระยะหลังใช้เครื่องมือสำเร็จคือ electrometer ของ Princeton Research Lab. ซึ่งให้ผลแม่นยำกว่า จึงจะไม่กล่าวเกี่ยวกับสร้างเครื่องวัดประจุโดยละเอียดในที่นี้ นอกจากนี้ยังได้สร้างเครื่องมือประกอบเพื่อใช้ในการฉาบโลหะลงบนแผ่นฟิล์มโดยให้แผ่นฟิล์มนี้ได้รับความร้อนน้อยที่สุด ส่วนเครื่องมือเพื่อวัดสัมประสิทธิ์เพียโซ-ไพโรอิเล็กทริกนั้น จะกล่าวในบทถัดไป

3. การพัฒนาฟิล์มพอลิเมอร์เพียโซโซอิลิเล็กตริก

โดยใช้เครื่องมือที่ได้สร้างขึ้น ได้พัฒนาวิธีการทางกายภาพเพื่อทำให้ฟิล์ม PVDF มาตรฐานให้กลายเป็นฟิล์มที่มีสมบัติทางเพียโซโซอิลิเล็กตริกสูง เพื่อใช้เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงต่อไป ในการพัฒนานี้ได้อาศัยข้อมูลที่มีมาแล้วจากการวิจัยก่อน ๆ พร้อมทั้งได้ดัดแปลงกรรมวิธีใหม่ ๆ ซึ่งทำได้สะดวกขึ้นเอง โดยปกติฟิล์ม PVDF มีราคาไม่แพง อาจซื้อได้ง่าย ๆ จากต่างประเทศ จึงเป็นการประหยัดสำหรับการวิจัย

ในการวิจัยได้ลองพัฒนาฟิล์ม PVDF โดยใช้วิธีการแตกต่างกันไป เช่น เปลี่ยนค่าสนามไฟฟ้า E_p ที่ใช้จัดชั้นฟิล์ม เปลี่ยนอุณหภูมิขณะจัดชั้น $T_p \dots$ เป็นค่าต่าง ๆ กัน และนำฟิล์มจำนวนมากที่ได้มาวัดสัมประสิทธิ์ d_{31} เพื่อที่จะทราบบทบาทของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสัมประสิทธิ์นี้ จากนั้นก็จะสรุปวิธีการที่สะดวกและปลอดภัยที่สุดในการเตรียมฟิล์ม PVDF ให้มีสัมประสิทธิ์เพียโซโซอิลิเล็กตริกที่สูงเท่าที่จะทำได้ สุดท้ายก็เตรียมฟิล์มเหล่านี้ให้มีขนาดและรูปร่างของอิเล็กโทรดตามที่ต้องการ เพื่อนำไปสร้างเป็นเครื่องมือทางเสียงต่อไป

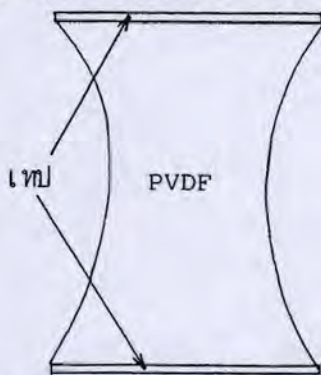
3.1 กระบวนการทางกายภาพเพื่อเตรียมฟิล์มเพียโซโซอิลิเล็กตริก

วิธีการเริ่มแรกของการเตรียมฟิล์ม PVDF เพียโซโซอิลิเล็กตริกคือ การยึดฟิล์มนี้ออกจากยาวประมาณ 4-6 เท่าของความยาวเดิมที่อุณหภูมิสูง ในการทำงานขั้นแรกตัดฟิล์มออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สอดขอบแต่ละข้างเข้าระหว่างยาง P, Q และ P', Q' ในรูป 2.1 ก จัดให้แน่นด้วยการขันสกรู C, D และ C', D' จุ่มด้านล่างของเครื่องมือลงในน้ำร้อนประมาณ 80-85°C จนฟิล์มจมนิดน้ำ จากนั้นค่อย ๆ หมุนปุ่ม E จนฟิล์มถูกดึงยึดออกช้า ๆ จนกระทั่งระหัดระหัดเท่ากับที่ต้องการ และค่อย ๆ ดึงเครื่องมือออกจากน้ำร้อน

เมื่อถูกดึงให้ยึดนั้น โมเลกุล PVDF จะถูกดึงออกไปตามความยาวของการยึด ผลึกเดิมซึ่งเป็นแบบเฟส α จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบเฟส β ซึ่งสามารถจัดชั้นให้เป็นสารเพอร์โรอิเล็กตริกได้ตามต้องการตามที่กล่าวในบทที่ 1 แต่การยึดทำให้เกิดความเครียดในโครงสร้างโมเลกุลเพื่อลดความเครียดหลังจากยึดใส่ฟิล์มลงในเตาอบที่สร้างขึ้น โดยควบคุมเตาอบนี้ให้มีอุณหภูมิค่าใด

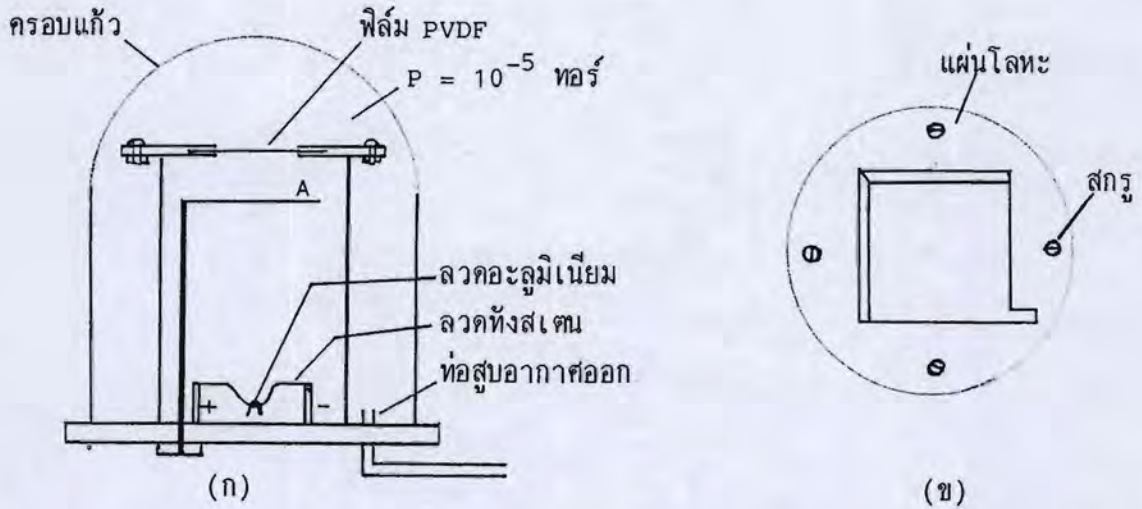
ค่าหนึ่งที่ต้องการในช่วง $80^{\circ}\text{C}-120^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาอบประมาณ 3 นาที จากนั้นเอาออกจากเตาอบทิ้งไว้ให้เย็น แล้วจึงถอดออกจากเครื่องยึด

ปัญหาที่พบในช่วงการทดลองก็คือ ขณะยึดฟิล์มที่ถูกหนีบไว้บริเวณตรงกลาง (ในรูป 2.1 ก คือบริเวณ R และ H) มักจะเคลื่อนหลุดออกจากการหนีบของยาง ทำให้การยึดไม่สม่ำเสมอ และฟิล์มนั้นจะเสียไป ทั้งนี้เนื่องจากแรงหนีบตรงกลางซึ่งห่างจากนอตไม้ค้ำพอ ต่อมาได้แก้ไขโดยใช้ตัวหนีบซึ่งแข็งแรงมาก ๆ จับเพิ่มเติมที่บริเวณตรงกลาง นอกจากนั้นยังใช้เทปใสกว้างประมาณ 1 ซม. ปิดทับทั้งสองด้านของฟิล์มที่ขอบทั้งสอง ทำให้ฟิล์มถูกหนีบแน่นที่ขอบอย่างสม่ำเสมอ และการยึดทำได้ดีขึ้น ฟิล์มหลังจากยึดและอบแล้วแสดงในรูป 3.1 บริเวณตรงกลางจะคอดลง ลักษณะนี้จะพบทั่ว ๆ ไป ทั้งนี้เพราะการเปลี่ยนรูปร่างของพอลิเมอร์นั้น ปริมาตรจะไม่เปลี่ยนแปลง คาดว่าบริเวณตรงกลางของฟิล์มสามารถนำไปใช้ในงานนี้ได้



รูป 3.1 รูปร่างของฟิล์ม PVDF หลังจากยึดประมาณ 3-5 เท่า

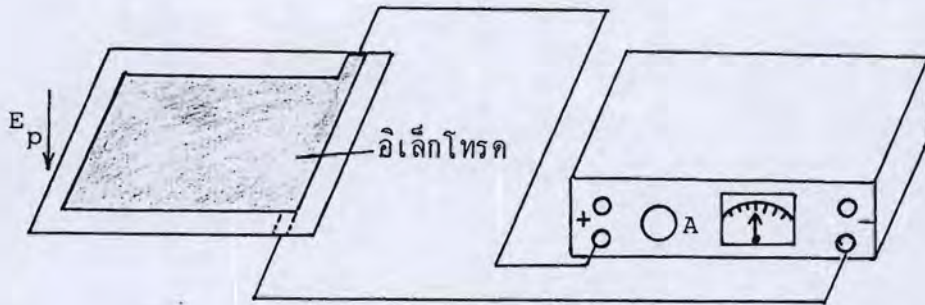
งานขั้นต่อไปคือการฉาบอะลูมิเนียมบางลงบนฟิล์มทั้งสองด้าน งานนี้ต้องทำให้ครอบคลุมอากาศดังแสดงในรูป 3.2 ก. ฟิล์ม PVDF ที่ยึดแล้วจะวางแทรกอยู่ระหว่างแผ่นโลหะกลมสองแผ่น ซึ่งประกบติดกันด้วยสลักตรงกลางของแผ่นโลหะเจาะเป็นช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าตรงกันทั้งสองด้าน ซึ่งจะเป็นบริเวณผิวของ PVDF ที่จะฉาบด้วยฟิล์มโลหะเป็นอิลเล็กโทรด (ดังรูป 3.2 ข) ถ้าต้องการให้อิลเล็กโทรดเป็นรูปร่างอื่น ๆ เช่นวงกลมก็ต้องเจาะให้ช่องนี้เป็นวงกลม และทั้งหมดจะวางในแนวระดับอยู่ด้านบนของครอบแก้ว ด้านล่างสุดจะเป็นหลอดทั้งสแตนเลสต่อกับขั้วไฟฟ้าบวกลบโดยมีหลอดอะลูมิเนียมบริสุทธิ์คล้องอยู่ ในตอนแรกจะปั๊มอากาศออกจากครอบแก้วโดยใช้ rough pump และตามด้วย diffusion pump จนความดันภายในครอบแก้วเท่ากับประมาณ 10^{-5} ทอร์ จากนั้นเดินกระแสไฟฟ้าผ่านหลอดทั้งสแตนเลสหลอดอะลูมิเนียมหลอมละลาย เมื่ออะลูมิเนียมเริ่มระเหยหมุนแผ่นกันความร้อน A ซึ่งบังฟิล์ม PVDF จากหลอดทั้งสแตนเลสออกเพื่อให้อะลูมิเนียมระเหยจับด้านล่างของแผ่น PVDF เป็นอิลเล็กโทรด แผ่น A จะช่วยกันไม่ให้ PVDF รับความร้อนจากหลอดทั้งสแตนเลสในช่วงแรก ๆ ของการเดินกระแสมากเกินไป จากนั้นเปิดให้อากาศเข้าสู่ครอบแก้ว เปิดครอบแก้วออก พลิกกลับฟิล์ม PVDF เอาด้านบนเดิมลงด้านล่าง และระเหยอะลูมิเนียมไปจับอีกครั้งตามวิธีที่อธิบายไว้ข้างบน



รูป 3.2 ก) แสดงการฉาบฟิล์มอะลูมิเนียมลงบนผิวของ PVDF ซึ่งทำในครอบแก้วสุญญากาศ
ข) แสดงโลหะกลมบางมีช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าตรงกลางประกบติดฟิล์ม PVDF ทั้งสอง
ด้าน อัดติดกันด้วยสกรู

ปัญหาที่พบในการทดลองช่วงนี้ก็คือบางครั้งฟิล์ม PVDF ได้รับความร้อนจากลวดทังสเตนมากเกินไปจนฟิล์มขุ่นเป็นลูกคลื่น ในสภาวะนี้ผลึกเฟส β บางส่วนจะกลายเป็นผลึกเฟส α ซึ่งจะเป็นการลดโพลาริเซชันของฟิล์มไป ฟิล์มนี้จะใช้งานไม่ได้ดี นอกจากนี้การจัดขั้วก็ทำได้ลำบาก รวมทั้งการวัด d_{01} ก็ทำได้ไม่แม่นยำด้วย ดังนั้นผู้ทำการทดลองจะต้องมีความชำนาญในการเปิดแผ่น A โดยต้องทำอย่างรวดเร็วและทำในจังหวะที่เหมาะสม รวมทั้งนั้นจะต้องมีการควบคุมขนาดและช่วงเวลาของกระแสไฟฟ้าให้ถูกต้องอีกด้วย ปริมาณอะลูมิเนียมที่ระเหยไปจับฟิล์ม PVDF ก็สำคัญเช่นกัน ในการวิจัยนี้ควบคุมปริมาณของอะลูมิเนียมอย่างคร่าว ๆ โดยจำกัดขนาดของลวดอะลูมิเนียมที่ใช้ ถ้าอะลูมิเนียมอิเล็กโทรดบางเกินไป (เช่นอาจบางจนแสงทะลุผ่านได้) อิเล็กโทรดจะมีความต้านทานไฟฟ้าสูงจนทำให้เกิดการสูญเสียของพลังงานไฟฟ้าที่บริเวณนั้นขึ้นได้ แต่ถ้าอะลูมิเนียมอิเล็กโทรดหนาเกินไป จะทำให้ฟิล์มแข็งกระด้าง การสั้นไหวเพื่อส่งสัญญาณเสียงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าสลับจะทำได้ไม่ดี ดังนั้นอิเล็กโทรดควรจะมีขนาดเหมาะสม พบว่าความหนาที่กำลังพอดีนี้มีช่วงกว้าง จึงเตรียมได้ไม่ยากนัก

ขั้นตอนต่อไปคือการจัดขั้วฟิล์ม PVDF ทำโดยวางฟิล์มลงบนแผ่นแก้ว จากนั้นทับด้วยแผ่นแก้วแบบเดียวกัน เพื่อให้ฟิล์มเรียบเท่าที่จะทำได้ ต่อขั้วไฟทั้งสองกับอิเล็กโทรดบน-ล่าง และต่ออีกปลายกับเครื่องกำเนิดความต่างศักย์สูงดังแสดงในรูป 3.3 (ในรูปไม่ได้แสดงแผ่นแก้วทั้งสอง)



รูป 3.3 การจัดขั้วฟิล์ม PVDF

จากนั้นเปิดสวิตช์เครื่องกำเนิดศักย์สูง ค่อย ๆ เพิ่มความต่างศักย์ให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงขนาดที่ต้องการ โดยทั่วไปฟิล์ม PVDF ที่ยัดแล้วจะหนาประมาณ $30 \mu\text{m}$ ถ้าใช้ศักย์ $V = 3000$ โวลต์ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของเครื่องมือ จะได้สนาม

$$E_p = 3000\text{V}/30 \times 10^{-6}\text{m} = 100 \text{ MV/m} \quad (3.1)$$

ซึ่งเพียงพอสำหรับการจัดขั้วในงานนี้

ในรูป 3.3 เป็นการจัดขั้วที่อุณหภูมิห้อง ($T_p = 27^\circ\text{C}$) ถ้าต้องการจัดขั้วที่อุณหภูมิสูงขึ้น เช่นที่ $T_p = 100^\circ\text{C}$ จะต้องวางแผ่น PVDF ซึ่งประกบด้วยแผ่นแก้วในเตาอบซึ่งควบคุมอุณหภูมิไว้ให้เท่ากับที่ต้องการ ในการทดลองต้องใช้ความระมัดระวังและความรอบคอบมากขึ้น โดยเฉพาะการจัดขั้วที่ความต่างศักย์สูงมาก ๆ หลังจากให้สนามไฟฟ้า E_p ผ่านแผ่นฟิล์มอยู่เป็นเวลานานพอสมควร (t_p) ก็ค่อย ๆ ลดอุณหภูมิของฟิล์มลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงลด E_p ลงเป็นศูนย์ จากนั้นตัดวงจรอิเล็กโทรดทั้งสองทิ้งค้างไว้ประมาณ 1-2 ชั่วโมง ก็จะได้ฟิล์มที่จัดขั้วแล้ว ซึ่งพร้อมจะนำไปทำเป็นเครื่องกำเนิดเสียงต่อไป

ปัญหาที่พบในการทดลองช่วงนี้ก็คือ เมื่อใช้ความต่างศักย์สูง ๆ ในบางครั้งการสปีกของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองผ่านฟิล์ม PVDF ทำให้ฟิล์มนี้เสียไปทันที ขณะสปีกจะมีกระแสไฟฟ้าสูง ซึ่งเป็นการกระทบกระเทือนเครื่องจ่ายศักย์สูงอย่างยิ่ง ตามทฤษฎีแล้วสนามไฟฟ้าจะมีความเข้มสูงที่บริเวณผิวหักมุมของอิเล็กโทรด ถ้าฟิล์มและอิเล็กโทรดโค้งงอเป็นลูกคลื่น การสปีกจะเกิดขึ้นได้มาก ถ้าฟิล์มเรียบมาก ๆ การสปีกจะเกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นขณะที่ทำการฉาบฟิล์มด้วยอะลูมิเนียม จะต้องระมัดระวังไม่ให้ฟิล์มถูกความร้อนมากเกินไปจนย่น ซึ่งจะส่งผลทำให้การจัดขั้วทำได้ลำบากยิ่งขึ้น

ในการเตรียมฟิล์มเพียโซอิเล็กทริกนี้ มีตัวแปรหลายตัวที่มีบทบาทต่อสภาพเพียโซอิเล็กทริกของฟิล์ม ตัวแปรเหล่านี้ได้แก่

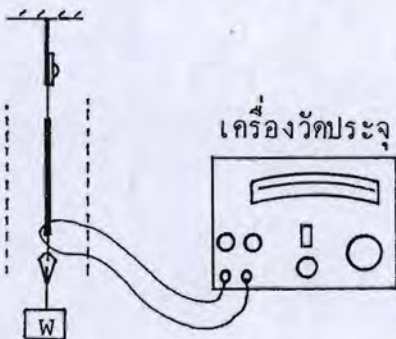
- 1) T_H = อุณหภูมิขณะยัดแผ่นฟิล์ม
- 2) l/l_0 = สัดส่วนการยัดของฟิล์ม
- 3) T_P = อุณหภูมิขณะจัดขั้ว
- 4) E_P = สนามไฟฟ้าที่ใช้จัดขั้ว
- 5) t_P = เวลาที่ใช้จัดขั้ว

(3.2)

ได้ลองเปลี่ยนตัวแปรเหล่านี้เป็นค่าต่าง ๆ เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีสภาพเพียโซอิเล็กทริกแรงที่สุด ผลสรุปจะเขียนไว้ในหัวข้อ 3.3

3.2 การวัดสภาพเพียโซอิเล็กทริกของฟิล์ม

ดังที่กล่าวไว้ในบทแรก สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกของฟิล์มที่เป็นตัวบอกความสามารถในการกำเนิดเสียงคือ d_{31} ดังนั้นในงานนี้จึงได้พยายามวัด d_{31} ของฟิล์มด้วยวิธีต่าง ๆ พบว่าวิธีที่ใช้กระแสไฟฟ้าสลับถึงแม้ว่าจะให้ผลแม่นยำแต่การเตรียมและนวดนาเครื่องมือนี้ยุ่งยากมาก และจะต้องใช้เวลานานเกินไป จึงหันไปใช้การวัดโดยวิธีซึ่งอาศัยไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งจัดเตรียมเครื่องมือง่ายกว่ามาก วิธีการวัดแสดงโดยแผนภาพในรูป 3.4



รูป 3.4 แผนภาพแสดงการวัดสัมประสิทธิ์ d_{31} ของฟิล์ม PVDF

ประจุผ่านเข้าไปด้วยสวิตช์ เครื่องสามารถอ่านประจุในช่วง 1-10 นาโนคูลอมป์ (nC) ได้อย่างแม่นยำ

ตามรูปปลายบนของฟิล์มจะแขวนนิ่งอยู่ที่จุดยึด ปลายล่างถ่วงน้ำหนัก W_1 ขนาดพอเหมาะ ใช้สายอะลูมิเนียมบางเส้นเล็ก ๆ สองสายทาบติดแน่นกับอิเล็กโทรดแต่ละข้าง โดยใช้กาวนำไฟฟ้า silver paste ปลายอีกด้านของสายคู่นี้ต่อกับขั้วบวก-ลบของเครื่องวัดประจุ ในการวิจัยเครื่องมือนี้คือ electrometer model 135 ของ Princeton Research Lab. เมื่อใช้ในการวัดประจุ ความต้านทานภายในของเครื่องจะน้อยมาก ทั้งนี้เพื่อให้

แม่นยำ

ในขั้นแรกถ่างฟิล์มด้วยน้ำหนัก W_1 ซึ่งเพียงพอให้แผ่นฟิล์มตึงและเรียบ เมื่อถ่างน้ำหนักเพิ่มของเครื่องมือจะกวาดไปซึ่งค่าใดค่าหนึ่ง เพื่ออ่านประจุที่ผ่านเข้าเครื่อง ในตอนแรกนี้จะไม่สนใจค่าประจุดังกล่าวและจะปรับเครื่องมือให้อ่านศูนย์ ต่อมาถ่างน้ำหนัก W_2 เพิ่มลงไป เมื่อความเค้นที่กระทำเพิ่มขึ้น จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันของฟิล์มทำให้เกิดการปรับตัวของประจุบนผิว จะมีประจุ ΔQ ผ่านจากอิเล็กโทรดด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่งซึ่งจะอ่านได้โดยเครื่องมือ จากนั้นอาจคำนวณ d_{31} ได้จากสมการ

$$\Delta Q/A = d_{31} W_2/a \quad (3.3)$$

โดย A เป็นพื้นที่ของอิเล็กโทรด a คือพื้นที่ที่แรง W_2 กระทำ ซึ่งเท่ากับความหนาของฟิล์มคูณความกว้างของอิเล็กโทรด ตัวอย่างเช่นถ้า $W_2 = 0.196$ N (นิวตัน), $A = 2 \times 2 \text{ cm}^2 = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $a = 30 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, $\Delta Q = 2.1 \times 10^{-9} \text{ C}$ จะได้

$$\begin{aligned} d_{31} &= \frac{2.1 \times 10^{-9}}{4 \times 10^{-4}} \times \frac{30 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{-2}}{0.196} \\ &= 16 \times 10^{-12} \text{ N/C} \end{aligned}$$

ในการวัด d_{31} ดังกล่าวพบว่าจะต้องระมัดระวังเป็นอย่างมากเพื่อให้อุณหภูมิคงที่ เพราะถ้าอุณหภูมิของวัสดุฟิล์มเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย ผลทางไพโรอิเล็กตริกของฟิล์มก็อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันของฟิล์มด้วยเช่นกัน พบว่าถ้ามีอากาศเพียงเล็กน้อยพัดผ่านฟิล์ม เช่นจากระบบปรับอากาศภายในห้อง เป็นต้น การพาความร้อนจากอากาศนี้จะทำให้อุณหภูมิของฟิล์มเปลี่ยนไป ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อการวัด จึงควรมีภาชนะล้อมฟิล์มไว้โดยรอบ เพื่อไม่ให้ฟิล์มกระทบการแปรปรวนของอากาศภายนอกได้โดยง่าย แต่ขณะเดียวกันก็ต้องมีที่ว่างพอสำหรับการระบายความร้อนของฟิล์ม ทั้งนี้เพราะขณะที่ฟิล์มจะร้อนขึ้นเล็กน้อย การระบายความร้อนที่ดีจะทำให้ฟิล์มลดอุณหภูมิลงสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็ว และทำให้การทดลองไม่ผิดพลาด

ในการเตรียมฟิล์ม PVDF เพื่อสัทธิอิเล็กตริกแต่ละฟิล์มตามกระบวนการที่กล่าวในหัวข้อก่อนจะต้องใช้เวลาไม่ต่ำกว่า 2 วัน อย่างไรก็ตามในการวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์มดังกล่าวขึ้นถึง 50 ฟิล์ม โดยเปลี่ยนตัวแปร (3.2) ไปเป็นแบบต่าง ๆ กัน จากนั้นนำแต่ละฟิล์มไปวัด d_{31} เพื่อจะหากรรมวิธีที่จะให้ได้ฟิล์มซึ่งมีค่า d_{31} สูง ผลการทดลองนี้สรุปอยู่ในหัวข้อถัดไป

3.3 สัมประสิทธิ์ d_{31} ของ PVDF เหนือโซลีโอเล็กตริกพอลิเมอร์

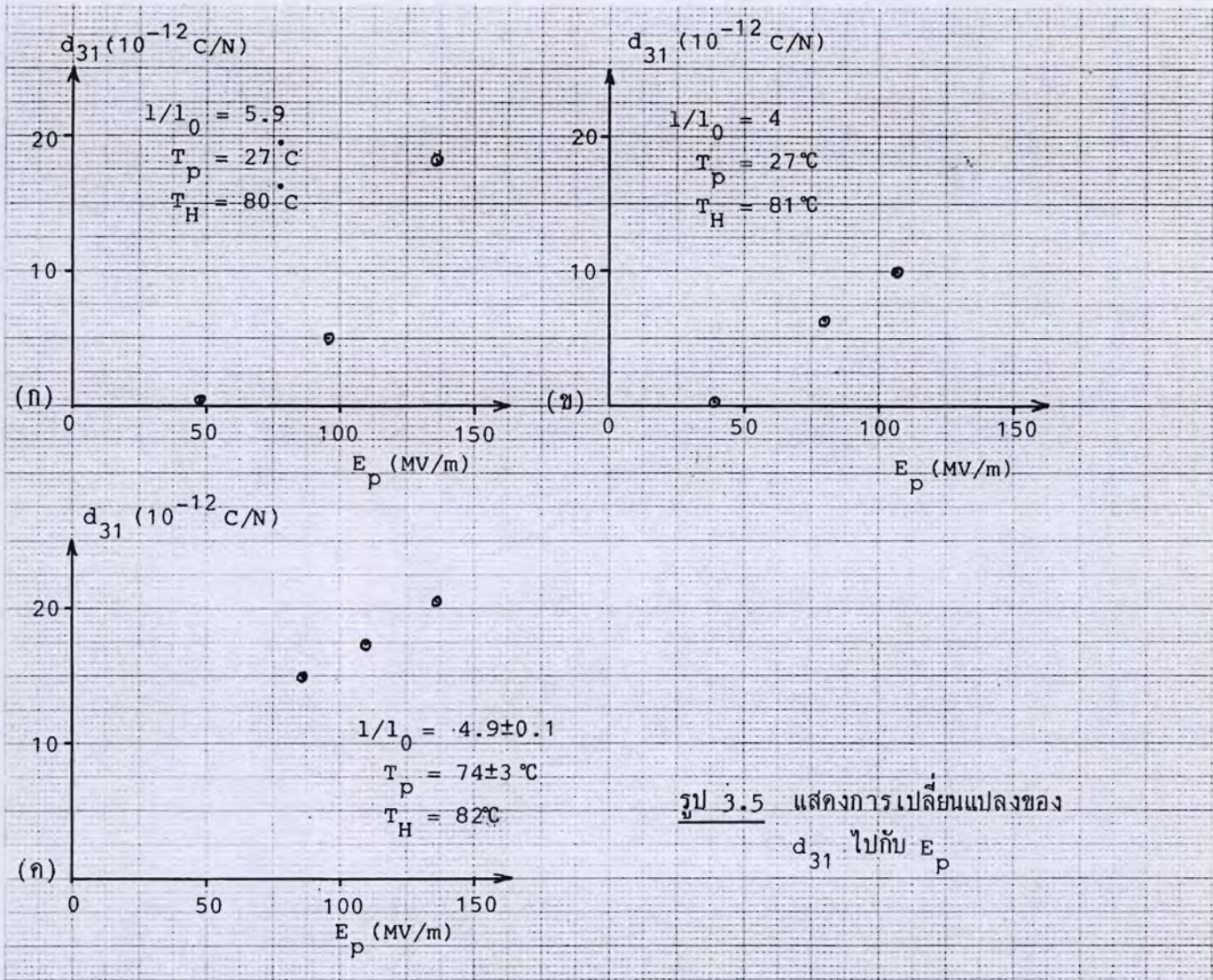
จากการวัด d_{31} ของฟิล์ม PVDF เหนือโซลีโอเล็กตริกที่เตรียมขึ้นโดยวิธีต่าง ๆ พอที่จะสรุปถึงภาวะที่ให้ผลดีที่สุด ตัวแปรต่าง ๆ ใน (3.2) สามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำ แต่ข้อลำบากมาจากการฉาบโอเล็กโตรดบนฟิล์ม PVDF ซึ่งแต่ละฟิล์มอาจรับความร้อนจากหลอดทั้งสแตนด์ไม่เท่ากัน จึงยากที่จะควบคุมให้สมบัติของฟิล์มต่างกันเหมือนกันทุกประการได้ ดังนั้นในการศึกษากรรมวิธีเตรียมฟิล์มทำดังนี้ สมมติว่าต้องการทราบบทบาทของ E_p ที่มีต่อ d_{31} ก็จะต้องเตรียมฟิล์มขนาดใหญ่ โดยการขีดในอัตราส่วน l/l_0 ค่าหนึ่งที่อยู่เหนือหนึ่ง หลังจากอบนำไปฉาบอะลูมิเนียมโดยทำจากกัน (masking) ที่มีรูสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ หลาย ๆ รู หลังจากการฉาบใช้กรรไกรตัดฟิล์มออกก็จะได้ PVDF ที่มีโอเล็กโตรดขนาดนี้หลาย ๆ ฟิล์ม และนำไปจัดหัวที่อุณหภูมิ T_p ในช่วงเวลา t_p เท่า ๆ กัน แต่ใช้ E_p ไม่เท่ากัน ก็จะได้ฟิล์มหลาย ๆ ฟิล์มที่มีตัวแปรต่าง ๆ ใน (3.2) เท่ากัน แต่มี E_p ต่างกัน จากการวัด d_{31} ของฟิล์มเหล่านี้ก็อาจจะทราบบทบาทของ E_p ต่อ d_{31} ได้ ผลสรุปแสดงอยู่ข้างล่างนี้

(ก) ค่า d_{31} จะน้อยถ้าเวลาจัดหัว t_p สั้นเกินไป

จากการวัด d_{31} ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นทั้งหลาย พบว่า d_{31} จะมีค่าน้อยมากที่ t_p สั้น ๆ เช่น 1-2 นาที เมื่อ t_p เพิ่มขึ้น d_{31} จะเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ และโน้มเข้าหาค่าคงที่ที่เวลาอิ่มตัว $t_{p\infty}$ ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิขณะจัดหัว ที่อุณหภูมิสูง ๆ $t_{p\infty}$ จะน้อย เพื่อให้ได้ค่า d_{31} ที่มากที่สุด ในสภาวะหนึ่ง ในการทดลองนี้ใช้ $t_{p\infty} \geq 20$ นาที ซึ่งเป็นเวลานานพอเพียงที่จะใช้จัดหัว ถึงแม้จะทำที่อุณหภูมิค่าเช่นอุณหภูมิห้องก็ตาม

(ข) d_{31} จะมีค่าสูงขึ้นถ้าสนามที่ใช้จัดหัว E_p สูงขึ้น

ในการจัดหัวได้ใช้สนาม E_p ในช่วง 40-140 MV/m พบว่าสำหรับฟิล์มชุดเดียวกัน ยิ่ง E_p ที่ใช้สูงมากขึ้น ก็จะมี d_{31} สูงมากขึ้นตาม ดังแสดงในรูป 3.5 แต่สำหรับฟิล์มที่จัดหัวที่อุณหภูมิห้อง d_{31} มิได้เปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นดังผลการทดลองที่ทำมาก่อนซึ่งแสดงในรูป 1.9 ข แต่เมื่อรวบรวมข้อมูลจากฟิล์มหลายชุด พบว่าเมื่อใช้ T_p สูงกว่าอุณหภูมิห้อง เช่นที่ $T_p = 74^\circ \text{C}$ ซึ่งแสดงในรูป (ค) ถึงแม้ว่าข้อมูลในรูปนี้จะไม่สามารถชี้ให้เห็นว่า d_{31} มีแนวโน้มที่จะแปรผันโดยตรงกันกับ E_p ได้ ผลของการทดลองนี้สอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่า E_p ที่มีค่าสูงจะมีความสามารถในการหมุนพลิกแบบเฟส β ให้แนวไดโพลของผลึกชี้ในแนวเดียวกันกับสนามได้มากขึ้น เป็นการเพิ่ม P_r และ d_{31}

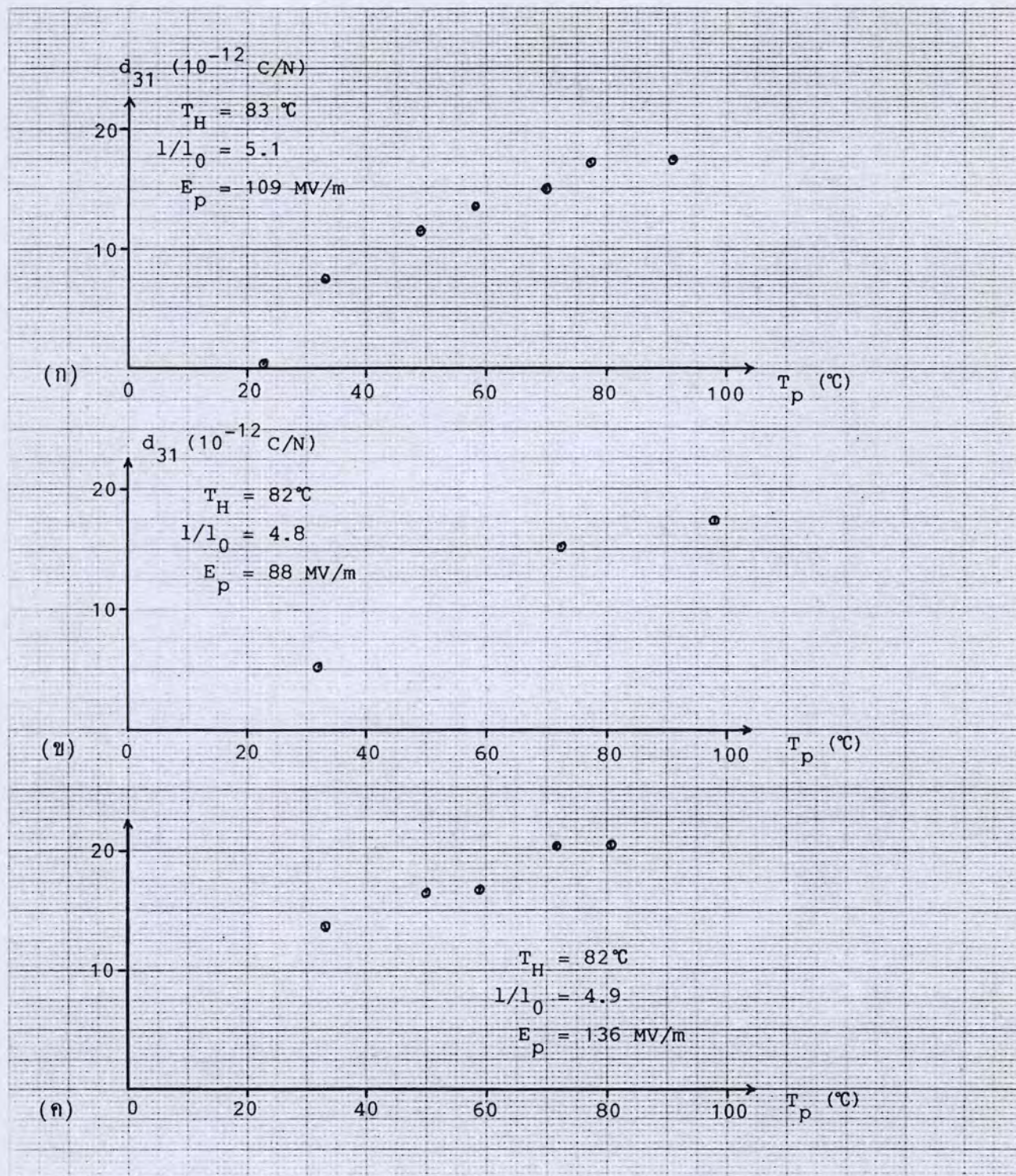


รูป 3.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ d_{31} ไปกับ E_p

(ค) d_{31} จะมากขึ้นถ้า T_p สูงขึ้น

การวิจัยพบว่ายิ่งทำการจัดตัวที่อุณหภูมิ T_p สูงขึ้น ก็จะได้ d_{31} ที่มีค่าสูงขึ้น ผลการทดลองแสดงในรูป 3.6 สำหรับฟิล์ม 3 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นมีตัวแปรของการจัดตัวเหมือนกัน แต่มี T_p ต่างกัน พบว่ามีแนวโน้มที่ d_{31} จะแปรผันโดยตรงไปกับ T_p

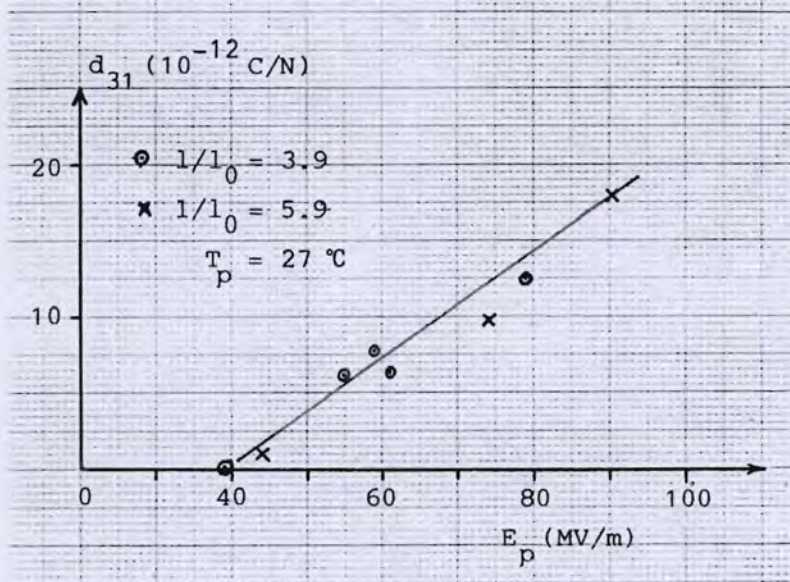
ภาคอสังฐานของ PVDF มีอุณหภูมิแก้ว $T_g = -40^\circ\text{C}$ ซึ่งอุณหภูมิ T_p สูงมากขึ้น ตามทฤษฎีแล้วปริมาตรอิสระของพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้น [7] ทำให้สายโซ่ของ PVDF สามารถจัดตัวให้เข้ากับแรงที่มากกระทำได้มากยิ่งขึ้น ทำให้พลิกเฟส β หมุนตัวเพื่อให้เกิดทิศของไดโพลชี้ไปตามสนามไฟฟ้าได้โดยสะดวก ดังนั้น d_{31} ซึ่งขึ้นกับ P_p จึงเพิ่มขึ้นไปกับ T_p ตามที่พบจากการทดลอง



รูป 3.6 แสดงการเพิ่มของ d_{31} ของฟิล์ม PVDF ไปกับอุณหภูมิ T_p ที่ใช้จัดตั้ง

(ง) อัตราส่วนการยึดในช่วง 4-6 เท่าไม่มีผลต่อ d_{31}

การศึกษาผลต่ออัตราส่วนการยึด l/l_0 ต่อ d_{31} นั้นทำได้ลำบาก เพราะจะต้องเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มคนละชุด ซึ่งนำไปฉาบอะลูมิเนียมคนละครั้ง แต่จากการศึกษาข้อมูลจากฟิล์มทั้งหมดที่เตรียมขึ้น ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูป 3.7 พอสรุปผลได้ว่า สำหรับอัตราส่วน l/l_0 ในช่วง 4 ถึง 6 ค่า d_{31} จะไม่ขึ้นกับอัตราส่วนนี้อย่างชัดเจน ดังนั้นในการเตรียมฟิล์ม อาจเลือกใช้ อัตราส่วน l/l_0 ในช่วง 4-6 อัตราส่วนใดก็ได้แล้วแต่ความสะดวกในการยึดฟิล์ม



รูป 3.7

แสดงค่า d_{31} ของฟิล์ม PVDF ซึ่งยึดด้วยอัตราส่วน $l/l_0 = 3.9$ และ 5.9 และจัดหัวที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ E_p ค่าต่าง ๆ

ความจริงแล้วการวิจัยนี้มุ่งที่จะพัฒนาให้ฟิล์ม PVDF มีสภาพทางไฟฟ้าโซอิเล็คตริกสูงเพื่อนำไปทำเป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณเสียงเท่านั้น จึงไม่ต้องการทราบรายละเอียดเกี่ยวกับค่าตัวแปรที่จะให้ d_{31} มีค่าต่าง ๆ จากข้อมูลข้างบนค่า d_{31} สูงสุดมีค่าประมาณ 20×10^{-12} C/N ดังนั้นในงานนี้จึงมุ่งเพื่อที่จะหากระบวนการที่ง่ายและปลอดภัยเพื่อให้ได้ฟิล์ม PVDF ที่มีค่า d_{31} ประมาณนี้เท่านั้น

จากข้อมูลในรูป 3.5 พบว่าในการจัดหัวยังใช้สนาม E_p สูงขึ้นเท่าใดก็ได้จะค่า d_{31} ของฟิล์มสูงขึ้นเท่านั้น แต่ยิ่งใช้ E_p สูงขึ้น การสเปกของกระแสจุลฟิล์ม ซึ่งทำให้ฟิล์มเสียไปในทันทีก็จะเกิดขึ้นง่ายเข้า ดังนั้นในงานนี้จึงใช้ E_p ในช่วง 80-100 MV/m แล้วแต่สภาพของฟิล์ม ฟิล์มเรียบมากก็สามารถใช้ E_p สูงมากได้

ในรูป 3.6 พบว่า ขณะจัดหัวถ้าอุณหภูมิของฟิล์ม T_p สูงก็จะให้ค่า d_{31} สูงด้วย แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกินไป เช่นใช้ T_p ในย่าน 140°C ขึ้นไปอาจเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากเฟส β เป็นเฟส α ซึ่งจะเป็นการลด d_{31} อย่างมากมาย เพื่อสะดวกในการเตรียมฟิล์มในการวิจัยนี้จึงใช้ T_p ประมาณ 80°C

ระยะยึด l/l_0 ในช่วง 4-6 มีผลไม่มากต่อ d_{31} (ดูรูป 3.7) แต่ถ้ายึดมาก ๆ ฟิล์มมีโอกาสขาดง่าย และความหนาอาจไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดการสปีกทะลุของกระแสขั้วจัดขั้ว ในการทดลองนี้จึงใช้ l/l_0 ประมาณ 4 สำหรับเวลาในการจัดขั้ว t_p นั้นใช้ $t_p \geq 20$ นาที เพราะถ้าใช้เวลามากกว่านี้ก็จะไม่ให้ผลดีกับ d_{31} มากนัก และจะเป็นการเสียเวลาอีกด้วย

โดยสรุปแล้ว เพื่อเตรียมฟิล์ม PVDF ให้มี d_{31} อยู่ในย่าน 20×10^{-12} C/N ในการวิจัยนี้ใช้

$$\begin{aligned} l/l_0 &= 4 \\ t_p &> 20 \text{ นาที} \\ T_p &= 80^\circ\text{C} \end{aligned} \tag{3.4}$$

และ

$$E_p = 80-100 \text{ MV/m}$$

หลังจากได้ฟิล์มในสภาวะที่มีรูปร่างและขนาดเท่าที่ต้องการแล้ว จึงนำฟิล์มนี้ไปทำเครื่องมือกำเนิดและรับสัญญาณเสียงต่อไป



4. เครื่องมือกำเนิดและรับสัญญาณสวณะโดยใช้พอลิเมอร์เพียโซอิเล็กทริก

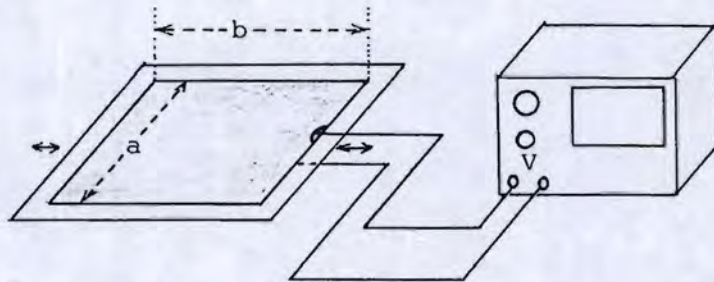
ในการวิจัยนี้ได้ใช้ฟิล์ม PVDF เพียโซอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้นมาทำเป็นเครื่องมือทางเสียง 3 ชนิดคือ แหล่งกำเนิดคลื่นเสียง หูฟัง และเครื่องรับสัญญาณเสียง จากการพัฒนาในขั้นเริ่มแรกนี้ได้เครื่องมือที่พอใช้ได้ แต่เห็นชัดว่ายังมีแง่มุมที่จะให้ทำการวิจัยเพิ่มเติมได้อีกมาก

4.1 แหล่งกำเนิดคลื่นเสียง

พิจารณาฟิล์ม PVDF เพียโซอิเล็กทริกหนา l ที่มีอิเล็กโทรดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยด้านยาวเป็นด้านของฟิล์มที่ถูกยึดติดแสดงแผนภาพในรูป 4.1 อิเล็กโทรดมีขนาด $a \times b = 4 \times 15 \text{ cm}^2$ มีสายไฟติดกับอิเล็กโทรดทั้งสองโดยใช้ silver paste ถ้าเราต่อศักย์ไฟฟ้าสลับ $V = V_0 \cos \omega t$ เข้ากับอิเล็กโทรดคู่นี้ สนามสลับ $E = V/l$ ที่ผ่านฟิล์มจะทำให้ฟิล์มนี้ยืดหดตามความยาวด้วยความถี่ของสนามนี้ อัมพลิจูดของการยืด-หดอาจได้จากสมการ (1.3b)

$$\Delta b = b d_{31} E_0 \quad (4.1)$$

ถ้า $b = 15 \text{ cm}$, $d_{31} = 20 \times 10^{-12} \text{ C/N}$, $V_0 = 30 \text{ volts}$, $l = 30 \text{ }\mu\text{m}$ จะพบว่าอัมพลิจูดของการยื่น



รูป 4.1 ฟิล์ม PVDF ซึ่งถูกกระตุ้นให้ยืด-หดด้วยศักย์ไฟฟ้าสลับ

$$\begin{aligned} \Delta b &= 15 \times 20 \times 10^{-12} \times 30 / 30 \times 10^{-6} \\ &= 3 \times 10^{-4} \text{ cm} \end{aligned}$$

ซึ่งอยู่ในย่านของอัมพลิจูดของคลื่นเสียงในอากาศ การยืดหดของฟิล์มน่าจะกำเนิดคลื่นเสียงให้ได้ยินได้

ความจริงแล้ว d_{31} ที่วัดได้ดังที่กล่าวในบทก่อนเป็น d_{31} กระแสตรง ถ้ากระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าสลับความถี่ ω d_{31} จะเขียนได้เป็น [4]

$$\begin{aligned} d_{31} &= d_{31\alpha} + \int d_{31} / (1+j\omega\tau) \\ &= d'_{31} - jd''_{31} \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\text{หรือ} \quad d_{31} = [(d'_{31})^2 + (d''_{31})^2]^{1/2} e^{-j\phi} = d_{31}^{\circ} e^{-j\phi} \quad (4.3a)$$

$$\text{โดย} \quad \phi = \tan^{-1}(d''_{31}/d'_{31}) \quad (4.3b)$$

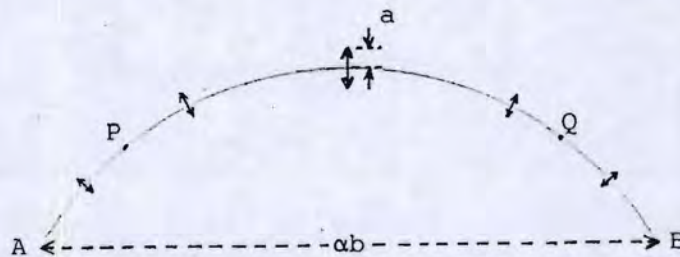
$$\begin{aligned} \text{สำหรับสนาม } E &= (V_0/l)e^{j\omega t} = E_0 e^{j\omega t} \quad \text{สมการ (4.1) ควรจะเป็น} \\ \Delta b &= bd_{31}^{\circ} E_0 e^{j(\omega t - \phi)} \end{aligned}$$

และอัมพลิจูดของการทอขยายของฟิล์มก็คือ

$$\Delta b = bd_{31}^{\circ} E_0$$

ซึ่งแตกต่างจากสมการ (4.1) เพียงเปลี่ยน d_{31} เป็น d_{31}° พบว่า d_{31} ในย่านความถี่ไม่สูงจนเกินไป เช่นประมาณ 45 kHz แตกต่างจาก d_{31}° ไม่มากนัก [4] ดังนั้นสมการ (4.1) ยังคงใช้ได้สำหรับย่านความถี่ของเสียงที่คนได้ยินนี้

ในรูป 4.1 ถ้าฟิล์มวางแบน ๆ อยู่บนพื้นราบ พบว่าคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจะไม่มากนัก แต่ถ้าตรึงฟิล์มไว้ที่ขอบด้านกว้างทั้งสองทำให้ฟิล์มโค้งงอ ดังในรูป 4.2 ภายใต้สนามสลับการยืดหด จะทำให้บริเวณตรงกลางของฟิล์มสั้นด้วยอัมพลิจูดใหญ่ จะมีบริเวณที่ทำให้เกิดคลื่นเสียงปริมาณมาก



รูป 4.2 ฟิล์ม PVDF ซึ่งตรึงที่ขอบด้านกว้างทำให้ฟิล์มโค้ง

ออกสู่อากาศ ทำให้เป็นแหล่งกำเนิดเสียงได้ดียิ่งขึ้น จากการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ พบว่าถ้าขอบตรึงที่แนว A, B ทั้งสองห่างกันเป็นระยะที่เท่ากับ αb โดย $\alpha \leq 1$ อัมพลิจูดการสั้นของฟิล์มบริเวณตรงกลางจะเท่ากับ

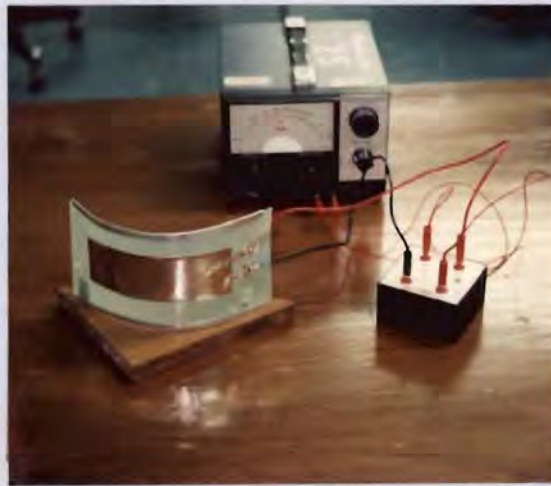
$$a = d_{31}^{\circ} b E_0 F(\alpha) \quad (4.4)$$

โดย $F(1) = 0$, $F(0) = 1/2$, $F(\alpha)$ จะลดลงเมื่อ α เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 1 และอัมพลิจูดของการสั้นของฟิล์มจะลดลงตามลำดับ เมื่อห่างจากจุดกึ่งกลางมากขึ้น เช่น ที่บริเวณ P และ Q

เป็นต้น พลังงานเสียงทั้งหมดขึ้นกับอัมพลิจูดของการสั่นของฟิล์มทั้งหมดในช่วง A ถึง B พบว่าเป็น การยากลำบากที่จะคำนวณพลังงานเสียงในเทอมของ α ได้ ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึง acoustic impedance ของอากาศด้วย ดังนั้นในการหา α ซึ่งทำให้เกิดเสียงดังจากฟิล์มที่สั่นนั้น คงทำได้ ล่าบากจากทางด้านทฤษฎี ในการวิจัยนี้ได้ลองตรึงฟิล์มที่ขอบทั้งสองจากนั้นค่อย ๆ เลื่อนจุดทั้งสอง เขาทากัน พร้อมทั้งกระตุ้นฟิล์มด้วยสนามไฟฟ้าสลับจากแหล่งกำเนิด จากนั้นพยายามฟังเสียงและเช็ค อัมพลิจูดของเสียงจากไมโครโฟนมาตรฐาน พบว่าถ้าใช้ความถี่ $f = 1000 \text{ Hz}$ ถ้า α อยู่ในบริเวณ

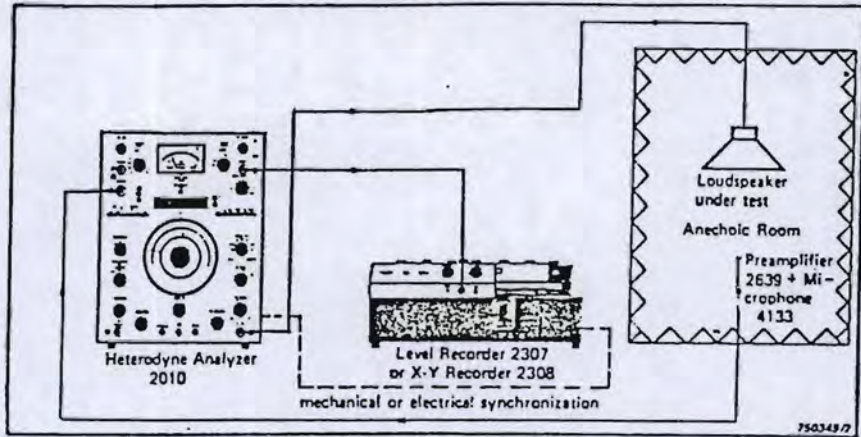
$$\alpha \approx 0.8 \quad (4.5)$$

ฟิล์มจะให้เสียงมากที่สุด และปริมาณเสียงจะไม่เปลี่ยนมากนักไปกับค่าของ α นี้ ภาพถ่ายของฟิล์ม PVDF กระจายเสียงแสดงในรูป 4.2 พบว่าถ้านำฟิล์มกระจายเสียงนี้ไปใส่ไว้ในกล่องลำโพงที่มี ด้านเปิดด้านเดียว จะให้เสียงที่ดังขึ้น

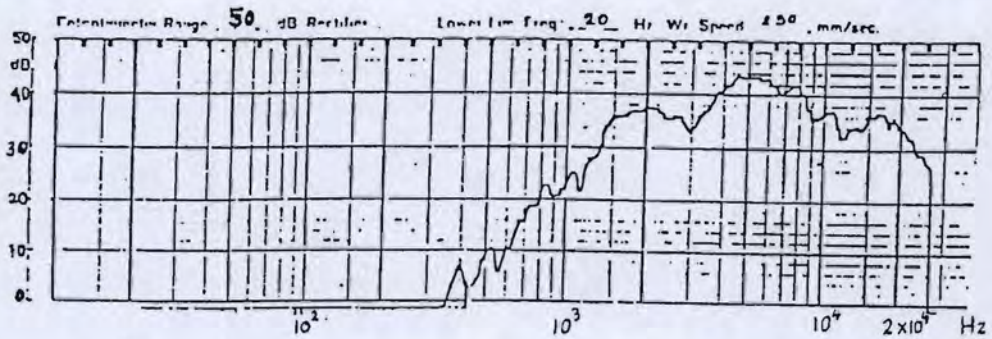


รูป 4.2 ภาพถ่ายของเครื่องกำเนิดเสียง PVDF

ได้ทำการทดสอบความสามารถในการกระจายเสียงของเครื่องกำเนิดเสียง PVDF นี้ โดยใช้เครื่องมือทดสอบสำเร็จซึ่งแสดงในรูป 4.3 เครื่อง heterodyne analyser จะป้อนไฟฟ้า สลับอัมพลิจูดคงที่แต่มีความถี่ต่าง ๆ กันในช่วง 20-20,000 Hz ให้กับเครื่องกำเนิดเสียงนี้ซึ่งตั้งอยู่ ในกล่องซึ่งภายในรอบ ๆ เป็นวัสดุดูดคลื่นเสียง และใช้ไมโครโฟนมาตรฐานวัดกำลังงานเสียงที่ ความถี่เหล่านี้ ค่ากำลังงานเสียงในหน่วย dB ที่ความถี่ต่าง ๆ แสดงในรูป 4.4 จะเห็นได้ว่าที่ ความถี่ต่ำกว่า 350 Hz เครื่องกำเนิดเสียงนี้แทบไม่ให้เสียงออกมาเลย การตอบสนองจะดีมากที่สุด ที่ความถี่ในช่วงประมาณ 5,000 Hz และจะลดลงเล็กน้อยที่ความถี่สูงขึ้น



รูป 4.3 เครื่องมือสำเร็จเพื่อใช้วัดการตอบสนองของแหล่งกำเนิดเสียง PVDF ที่ความถี่ต่าง ๆ



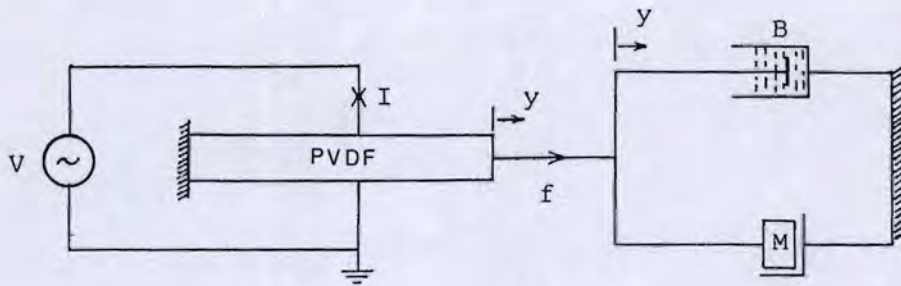
รูป 4.4 แสดงกำลังงานเสียงในหน่วย dB จากแหล่งกำเนิดเสียง PVDF ที่พัฒนาขึ้นเมื่อกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าอัมพลิจูดคงที่ที่ความถี่ต่าง ๆ

ถ้าจะใช้ฟิล์ม PVDF นี้รับสัญญาณจากวิทยุ เนื่องจากเครื่องขยายสัญญาณของวิทยุทรานซิสเตอร์ส่วนใหญ่มีความขัด (impedance) ต่ำมาก เหมาะที่จะใช้กับลำโพงความขัดต่ำ ๆ เช่นกัน ถ้าป้อนสัญญาณจากวิทยุซึ่งมีอัมพลิจูดเล็กมากนี้แก่ฟิล์ม PVDF จะให้เสียงน้อยมาก ดังนั้นจึงต้องทำเครื่องขยายสัญญาณวิทยุให้มีอัมพลิจูดประมาณ 30 โวลต์ เครื่องมือนี้คือหม้อแปลงไฟฟ้า (transformer) ธรรมดาที่ตนเองซึ่งแสดงอยู่ในรูป 4.2 เมื่อป้อนสัญญาณที่ขยายแล้วแก่ฟิล์มจะให้เสียงวิทยุ

ดังชัดเจนดี สำหรับเสียงคนพูดสามารถส่งออกไปได้ชัดเจนพอสมควร เพราะความถี่ต่ำกว่า 350 Hz ที่ขาดไปไม่ทำให้เสียงคนพูดบกพร่องลงมากนัก สำหรับเสียงดนตรีแล้วให้เสียงดีมากที่ความถี่สูง แต่ผู้ที่ชอบเสียงความถี่ต่ำมาก ๆ อาจจะไม่ชอบเสียงจากเครื่องกำเนิดแบบนี้

ในการวิเคราะห์การตอบสนองที่ความถี่ต่าง ๆ เราใช้แบบจำลองที่ว่า แผ่น PVDF ถูกตรึงอยู่ที่ขอบด้านหนึ่ง ขณะที่มันแรงเคลื่อนไฟฟ้าสลับความถี่ ω

$$v = v_0 e^{j\omega t} \tag{4.5}$$



รูป 4.5 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดเสียง PVDF ขณะถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าสลับ

การสั่นของฟิล์มถูกหน่วงด้วยมวล M และกระบอกน้ำมัน (dashpot) ดังแสดงในรูป 4.5 ขณะเกิดการขจัด y แรงต้านการเคลื่อนที่จากกระบอกน้ำมันจะเป็น Bdy/dt โดส B จะขึ้นกับความหนืดของน้ำมันซึ่งในที่นี้เป็นค่าคงที่ ส่วน M จะเป็นปริมาณที่แปรผันไปกับมวลของฟิล์ม โดยเขียนแบบสมการ

(1.6) สมการการเคลื่อนที่ของระบบนี้เขียนได้เป็น

$$f + Bdy/dt + Md^2y/dt^2 = 0 \tag{4.6}$$

$$f = -eV + Ky \tag{4.7}$$

$$I = \frac{d}{dt}(CV + ey) \tag{4.8}$$

ในสมการ (4.7) e และ K จะแปรผันไปกับ piezoelectric stress constant และ stiffness constant ของ PVDF ตามลำดับ ส่วน C เป็นความจุของแผ่น โดยเขียน $y = y_0 e^{j\omega t}$, $I = I_0 e^{j\omega t}$ จากสมการข้างบนจะได้

$$I = j\omega(CV + ey)$$

และ $-eV + Ky + j\omega By - \omega^2 My = 0$

จากสมการทั้งสองนี้จะได้

$$I = V \left[j\omega C + \frac{j\omega e^2}{K + j\omega B - \omega^2 M} \right] \tag{4.9}$$

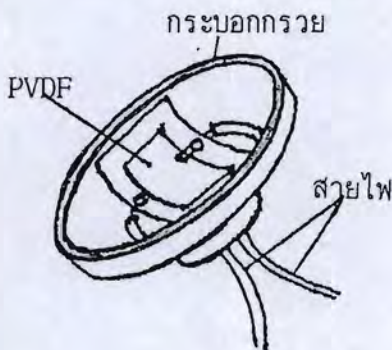
ดังนั้นการสูญเสียพลังงานโดยเฉลี่ยเนื่องจากการสั่นของฟิล์ม PVDF

$$\begin{aligned}\bar{P}_L &= \operatorname{Re} \frac{1}{2} VI^* \\ \bar{P}_L &= \frac{V_0^2 \omega^2 e^2 B}{2[(K - \omega^2 M)^2 + \omega^2 B^2]}\end{aligned}\quad (4.10)$$

\bar{P}_L ก็คือพลังงานความร้อนที่เสียไปภายในเนื้อสารของ PVDF ขณะสั่นมากับพลังงานของคลื่นเสียงที่กำเนิดขึ้น จากสมการ (4.10) จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ต่ำ $\omega \rightarrow 0$, $\bar{P}_L \rightarrow 0$ ซึ่งหมายความว่าพลังงานคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นที่ความถี่ต่ำจะน้อยมาก และที่ความถี่สูงมาก ๆ นั้น \bar{P}_L ส่วนใหญ่จะเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อสาร พลังงานคลื่นที่ออกมาจะน้อยลง ผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากรูป 4.4 และยืนยันว่าเครื่องกำเนิดเสียง PVDF แบบนี้ไม่สามารถจะให้เสียงความถี่ต่ำ ๆ ได้ดี

4.2 หูฟัง

ได้ทำฟิล์มเพียโซอิเล็กทริก PVDF ให้มีเนื้อฟิล์มที่ประมาณ $1 \times 1 \text{ cm}^2$ และทำให้ฟิล์มโค้งงอแบบในรูป เมื่อป้อนความต่างศักย์สลับแก่อิเล็กโทรดทั้งสองคล้าย ๆ ในรูป 4.4 ฟิล์มจะสั่น



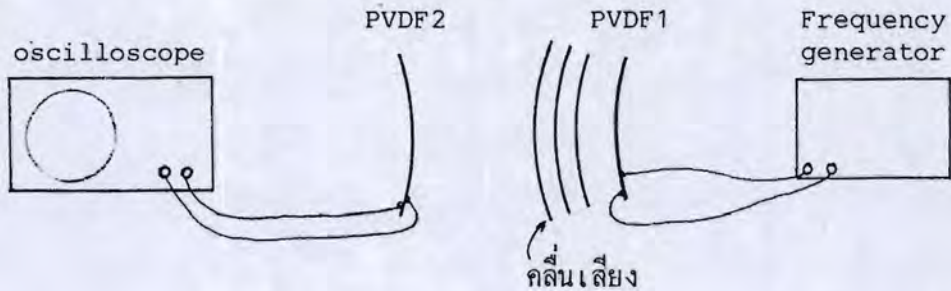
รูป 4.6 การวางฟิล์ม PVDF เพียโซอิเล็กทริกขนาดจิ๋วลงในกรวยหูฟัง

ให้เสียงได้เหมือนกับเครื่องกำเนิดเสียงขนาดใหญ่ ได้ลองบรรจุฟิล์มนี้ลงในกระบอกกรวยของหูฟัง และปิดทับด้วยวัสดุบาง ๆ คล้าย ๆ ฝ้าลำโพง เมื่อป้อนสัญญาณวิทยุแก่ฟิล์ม ขณะแนบลำโพงขนาดเล็กนี้กับช่องหูทั้งสองจะได้ยินเสียงชัดเจนดี จึงสามารถใช้ฟิล์ม PVDF เป็นแหล่งกระจายเสียงของหูฟังได้

พบว่ามีปัญหาหลายอย่างเกี่ยวกับหูฟัง PVDF นี้ การฉาบอิเล็กโทรดนั้น ถ้าอะลูมิเนียมมีความหนาเกินไป จะทำให้ฟิล์มขนาดเล็กนี้กระด้าง การสั่นไหวจะไม่สะดวก สัญญาณเสียงปริมาณจะลดลงไปมาก ความหนาของอะลูมิเนียมจึงต้องพอเหมาะ อีกปัญหาหนึ่งก็คือหูฟังทั้งสองข้างอาจดังไม่เท่ากัน ถ้าการควบคุมคุณภาพในแง่ต่าง ๆ ของฟิล์มไม่ดีพอ ถึงแม้ว่าหูฟังนี้จะดีอยู่คุณภาพในแง่ของเสียงต่ำ แต่ในย่านเสียงสูงแล้วให้เสียงดีมากจึงอาจเหมาะกับผู้ที่มีความพิการทางหู เช่น ผู้สูงอายุที่มีความบกพร่องของการได้ยินเสียงในย่านความถี่สูง ๆ เป็นต้น

4.3 เครื่องรับสัญญาณเสียง

ได้ทำการทดลองโดยใช้แหล่งกำเนิดเสียง PVDF 2 ตัว ตัวแรก (PVDF1) ต่อเข้ากับเครื่องจ่ายสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเปลี่ยนความถี่ได้ ซึ่งจะให้เสียงออกมา ตัวที่สอง (PVDF2) ซึ่งต่อเข้ากับออสซิลโลสโคปและวางใกล้ ๆ กับตัวแรกดังแสดงโดยแผนภาพในรูป 4.7 สัญญาณคลื่น



รูป 4.7 การทดลองใช้ฟิล์ม PVDF2 เพื่อ
รับสัญญาณคลื่นเสียงจาก PVDF1

เสียงจาก PVDF1 จะกระตุ้นที่ฟิล์ม PVDF2 ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าสลับ เนื่องจากออสซิลโลสโคปรับกระแสอ่อนอย่างมาก ถือได้ว่าสำหรับฟิล์ม PVDF2 นั้น $\Delta D = 0$ จากสมการ (1.3a) อัมพลิจูดศักย์ไฟฟ้าสลับที่เกิดขึ้นคือ

$$V = l dx / \epsilon^*$$

โดย X เป็นอัมพลิจูดของความเค้นที่เกิดขึ้นบนฟิล์ม PVDF2 เนื่องจากคลื่นเสียงจาก PVDF1 และ l เป็นความหนาของฟิล์ม PVDF2 โดยทั่วไปคลื่นเสียงนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาของความหนาของฟิล์ม PVDF2 หรือเกิดความเค้นในแนว Z ของฟิล์ม (ดูรูป 1.1) ดังนั้นสมการข้างบนจะเป็น

$$V_3 = d_{33} X_3 l / \epsilon^* \quad (4.11)$$

ในการวิจัยนี้ไม่ได้วัด d_{33} ของฟิล์ม แต่ตามทฤษฎีที่กล่าวมาแล้ว d_{33} จะแปรผันไปกับ P_3 ของฟิล์ม ซึ่งก็คือแปรผันไปกับ d_{31} ฟิล์มซึ่งเตรียมให้ d_{31} มีค่ามาก ก็จะมีค่า d_{33} มากตามไปด้วย

จากการทดสอบด้วยออสซิลโลสโคป พบว่าจากการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียง ฟิล์ม PVDF2 จะให้ศักย์ไฟฟ้าสลับที่ความถี่เท่ากับคลื่นเสียงออกมาเห็นชัดเจน สัญญาณนี้จะเสริมอยู่บนสัญญาณ 50 Hz ของไฟบ้าน ซึ่งออสซิลโลสโคปเพื่อจับเข้ามาได้ด้วย สำหรับเสียงที่เบาพอได้ยิน (40-50 dB) สัญญาณ 4-10 mV ที่ออกจาก PVDF2 นับว่าเป็นของธรรมดา สัญญาณดังกล่าวนี้ว่ามากเทียบกับที่ได้จากไมโครโฟนทั่วไป (ปกติไมโครโฟนจะมี preamplifier ขยายสัญญาณก่อนที่จะป้อนเข้าสู่

amplifier ถ้าใช้ฟิล์ม PVDF ทำเป็นไมโครโฟนคงไม่ต้องใช้ preamplifier) ถ้าเสียงดังมากขึ้นอิมพลีจูดของสัญญาณจาก PVDF2 จะสูงมากขึ้นเรื่อย ๆ พบว่าอาจสูงถึง 0.05 โวลต์

ที่เสียงความถี่ต่ำ ๆ เช่นต่ำกว่า 1 kHz ฟิล์ม PVDF ตอบสนองไม่ดี ได้ลองเตรียมฟิล์ม PVDF ขนาด $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ มาทำเป็นไมโครโฟนรับสัญญาณ พบว่ารับสัญญาณเสียงพูดได้ไม่ดี แต่ที่ความถี่สูงกว่า 1 kHz การตอบสนองของฟิล์ม PVDF ต่อสัญญาณเสียงดีขึ้นตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ประมาณ 5 kHz และถ้าความถี่สูงมากขึ้น เช่นที่ 30 kHz ซึ่งไมโครโฟนปกติไม่ค่อยจะตอบสนองแล้ว ฟิล์ม PVDF ก็ยังตอบสนองต่อสัญญาณนี้ได้โดยปกติ และที่น่าสนใจที่สุดก็คือที่ความถี่สูงขนาด 200 kHz ไมโครโฟน PVDF ก็ยังคงให้สัญญาณได้เป็นอย่างดี

สรุปได้ในขั้นต้นนี้ว่าไมโครโฟน PVDF ใช้ได้ดีในการรับความถี่สูงมาก ๆ ในย่าน 5 kHz-20 kHz ซึ่งเป็นย่านของเสียงที่คนได้ยิน และยังตอบสนองในย่านเหนือเสียงได้เป็นอย่างดียิ่ง แต่ถ้าจะใช้เป็นไมโครโฟนที่รับเสียงคนพูดจะต้องมีการออกแบบระบบสั่นพ้อง (resonance) ใหม่หรือออกแบบกลไกประกอบอย่างอื่นเพื่อให้การตอบสนองที่ความถี่ต่ำดีขึ้น ซึ่งยังมีได้ทำในการวิจัยนี้

5. การทดลองที่กำลังทำเพิ่มเติม

การวิจัยเกี่ยวกับเรื่องการประยุกต์ฟิล์ม PVDF เป็นเครื่องรับ-ส่งสัญญาณเสียงนั้น ขึ้น
ตอนการทำงานพอสรุปได้ดังนี้

- (1) พัฒนาเครื่องมือที่จำเป็น
- (2) เตรียมฟิล์ม PVDF ให้มีสภาพเพื่อสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์สูง และวัดสัมประสิทธิ์ d_{31}
- (3) สร้างเครื่องรับ-ส่งสัญญาณเสียงจากฟิล์มนี้

จากผลการวิจัยที่ได้กล่าวในบทก่อน พบว่าการวิจัยในเรื่องนี้ยังอยู่ในขั้นเฟื่องเริ่มต้น ยังมีเรื่องราว
อีกมากมายที่สมควรศึกษา วิจัย และพัฒนา ซึ่งอาจตามมาด้วยสิ่งประดิษฐ์ที่มีประโยชน์เชิงพาณิชย์
โครงการพัฒนาเพิ่มเติมนี้จะต้องใช้เวลาเนิ่นนาน และต้องการผู้ร่วมวิจัยอีกมาก การวิจัยที่กำลังทำ
เพิ่มเติมอยู่ขณะนี้ดังนี้

5.1 การวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF

ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 นอกจากจะมีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกแล้ว PVDF ยังมีสมบัติ
ทางไพโรอิเล็กทริกอีกด้วย ขณะนี้ได้ทำการวัดสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก p_3 ของฟิล์มอย่างคร่าวๆ
โดยวางฟิล์มซึ่งมีอิเล็กโทรดสองด้านขนาด 4 cm^2 กับเทอร์โมคอปเปอร์ ทั้งหมดวางอยู่บนแผ่นโฟม
เมื่อฉายแสงลงบนฟิล์มช่วงเวลาสั้น ๆ วัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของฟิล์มโดยเทอร์โมคอปเปอร์ และวัด
ความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มของประจุบนอิเล็กโทรด ทั้งนี้เพราะ
เกิดการเปลี่ยนแปลงของโพลาริเซชันของฟิล์มเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป เนื่องจากอิเล็กโทรมิเตอร์ที่ใช้
วัดความต่างศักย์มีความต้านทานสูงถึง $40,000 \text{ M}\Omega$ ในการวัดช่วงเวลาสั้น ๆ ถือว่า $\Delta D = 0$
จากสมการ (1.8a) ได้

$$p_3 = - \epsilon^T V / \Delta T$$

สำหรับ PVDF, $\epsilon^T = K \epsilon_0$ โดย $K = 12$ ความหนาของฟิล์ม $l = 30 \times 10^{-6} \text{ m}$ เมื่อทราบ
 ΔT และ V ก็สามารรถคำนวณ p_3 ได้ สำหรับฟิล์มซึ่ง $d_{31} = 20 \times 10^{-12} \text{ C/N}$ พบว่า

$$p_3 = 4 \times 10^{-5} \text{ C/m}^2 \cdot \text{K}$$

สอดคล้องกับข้อมูลการวิจัยจากที่อื่น

จากข้อมูลข้างบนพบว่าฟิล์ม PVDF ที่เตรียมขึ้นสามารถนำไปประยุกต์เป็นตัวจับรังสี
อินฟราเรด ซึ่งใช้ในเครื่องจับผู้บุกรุก หรือทางการทหารใช้เป็นเครื่องแสวงเป้า เช่น เครื่องบิน
หรืออาจใช้เป็นสวิตช์สัมผัสก็ได้ ปัจจุบันกำลังพัฒนาวิธีวัด p_3 ที่ดีขึ้น (เช่นใช้วิธีสัญญาณสลับเป็นต้น)

และกำลังสร้างเครื่องมือต่าง ๆ ซึ่งเกี่ยวกับการประยุกต์ของ PVDF ไพโรอิเล็กทริก ดังกล่าวไว้ข้างบน

5.2 การสร้างเครื่องมือวัดสัมประสิทธิ์ d_{31} ของฟิล์ม PVDF โดยใช้สัญญาณสลับ

ในการวิจัยนี้ได้ทำการวัด d_{31} ของฟิล์ม PVDF ที่เตรียมขึ้นโดยการดึงฟิล์มและวัดปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสอง การวัดนี้ใช้สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งตามทฤษฎีจะให้ผลไม่คล้อยแม่นยำนัก ดังนั้นจึงได้ทำการสร้างเครื่องมือเพื่อวัด d_{31} โดยใช้สัญญาณกระแสสลับความถี่ต่ำ ๆ เช่นต่ำกว่า 1 kHz โดยทั่วไปแล้วทำได้โดยตรงขอบฟิล์มด้านหนึ่ง จากนั้นติดอีกขอบหนึ่งของฟิล์มกับเกจวัดความเครียด (strain gauge) ซึ่งความต้านทานทางไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปกับความเค้นที่กระทำ จากเกจนี้จะต่อติดกับแกนเส้นของลำโพงกระจายเสียง เมื่อป้อนความต่างศักย์สลับความถี่ f เข้ากับลำโพงจะทำให้แกนของมันสั่น และจะทำให้เกิดความเค้นต่อฟิล์ม PVDF ด้วยความถี่นี้เช่นกัน โดยใช้ข้อสวิตช์โคปัดศักย์ไฟฟ้าสลับระหว่างอิเล็กโทรดของฟิล์ม เนื่องจากทราบความเค้นของฟิล์มจากเกจที่ต่อไว้ ก็สามารถทราบค่า d_{31} ของฟิล์มได้ ในการนี้จะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณผล บันทึก และแสดงผลด้วย การพัฒนาเครื่องมือนี้กำลังอยู่ระหว่างดำเนินการ

5.3 การพัฒนาเครื่องมือทางเสียงต่าง ๆ จากฟิล์ม PVDF

จากการวิจัยที่ได้ทำไปแล้ว ได้สร้างเครื่องมือทางเสียงขึ้นหลายอย่างจากฟิล์ม PVDF แต่ลักษณะเครื่องมือยังอยู่ในขั้นเริ่มแรก ดังนั้นขณะนี้จึงได้ทำการพัฒนาเครื่องมือเหล่านี้เพิ่มเติมเพื่อให้ได้คุณภาพที่ดียิ่งขึ้นดังนี้

- (ก) เครื่องกำเนิด-รับคลื่นเหนือเสียง (ultrasonic)
- (ข) หูฟังสำหรับคนไข้ที่บกพร่องทางด้านารได้ยินที่ความถี่สูง
- (ค) ไมโครโฟน

การพัฒนาเริ่มจากการเตรียมฟิล์มที่เหมาะสม เช่น สำหรับหูฟังฟิล์มจะมีขนาดเล็กมาก เช่น $0.8 \times 0.8 \text{ cm}^2$ ฟิล์มจะต้องบางมากและอ่อน อิเล็กโทรดก็จะต้องบางมากเช่นกันเพื่อมิให้ฟิล์มกระด้างจนเกินไป สำหรับแหล่งกำเนิดคอลดตราโซนิคและไมโครโฟนความถี่ต่ำนั้น ($f < 1 \text{ kHz}$) นั้น ได้พยายามพัฒนาโครงสร้างและระบบทางเสียงแบบต่าง ๆ โดยใช้ทฤษฎีของการสั่นพ้อง (resonance) ที่ความถี่ต่ำเข้าช่วย เพื่อให้เครื่องมือนี้ไวต่อความถี่ในย่านนี้ยิ่งขึ้น แต่สำหรับความถี่สูง ๆ แล้ว ฟิล์ม PVDF ตอบสนองได้ดีมากดังที่กล่าวไว้แล้วในบทก่อน



5.4 การศึกษาพอลิเมอร์เพียโซอิเล็กทริกแบบอื่น ๆ

นอกจาก PVDF แล้ว พอลิเมอร์อื่น ๆ หลายชนิด เช่น copolymer vinylidene fluoride-trifluoroethylene (PVF_2 -TrFE) หรือ Copolymer vinylidene fluoride-tetrafluoroethylene (PVF_2 -TFE) หรือ Copolymer vinylidene cyanide-vinyl acetate (PVCN-VAc) ก็เป็นฟิล์มเพียโซอิเล็กทริกที่ดี ฟิล์มแบบอื่น ๆ เหล่านี้อาจมีสมบัติดีกว่า PVDF ในบางแง่ เช่น มี d_{31} สูงกว่า เช่นในกรณีของ PVF_2 -TFE หรือมีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงมากกว่า เช่น PVCN-VAc เป็นต้น ปัจจุบันได้เริ่มการศึกษาพอลิเมอร์เหล่านี้ และเตรียมการทดลองเพื่อนำพอลิเมอร์เหล่านี้มาประกอบเครื่องมือต่าง ๆ ดังเช่นที่ทำได้แล้ว

การวิจัยและศึกษาเพิ่มเติมเหล่านี้ปัจจุบันได้ทำมาแล้วถึงระดับหนึ่ง คาดว่าคงจะใช้เวลาประมาณ 1 ปี จึงจะได้ผลในงานบางส่วน ซึ่งอาจจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์เชิงพาณิชย์ด้วย

หนังสืออ้างอิง

- 1) J. C. Burfoot, "Ferroelectric", D. Van Nostrand Company Ltd., London, 1967.
- 2) H. Kawai, Jpn. J. Appl. Phys., 8(1969) 975.
- 3) J. R. Reitz and F. J. Milford, "Foundations of Electromagnetic Theory", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts, 1960, p. 70.
- 4) J. Mort, G. Pfister, "Electronic Properties of Polymers", John Wiley and Sons, NY., 1982, p. 111.
- 5) R. Hasegawa, Y. Takahashi, Y. Chatani and H. Tadokoro, Polymer Journal, 3(1972) 600.
- 6) อื่น กุ๊ววรรณ และ วัฒนา เชียงกุล, "ไมโครโปรเซสเซอร์ ไมโครคอมพิวเตอร์" บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (1985).
- 7) F. Bueche, "Physical Properties of Polymers", Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York, 1979, p. 85.