บทที่ 4

การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เพียสโซอิเล็กตริก PVDF

PVDF ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสารสังเคราะห์สำเร็จรูปจากประเทศญี่ปุ่นมีลักษณะเป็นแผ่นบางใสหนาประมาณ 72 ไมโครเมตร สามารถจะดัดให้โค้งงอได้เช่นเดียวกับแผ่นพลาสติกทั่วๆไป จากข้อมูลผลการวิจัยที่มีมาก่อนบอกให้ทราบว่าในการพัฒนาแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF ให้เป็นสารเพียสโซอิเล็กตริกนั้น ต้องผ่านกรรมวิธีทางกายภาพหลายๆอย่างด้วยกันเช่น การยืด การอบ การจัดขั้ว เป็นต้น

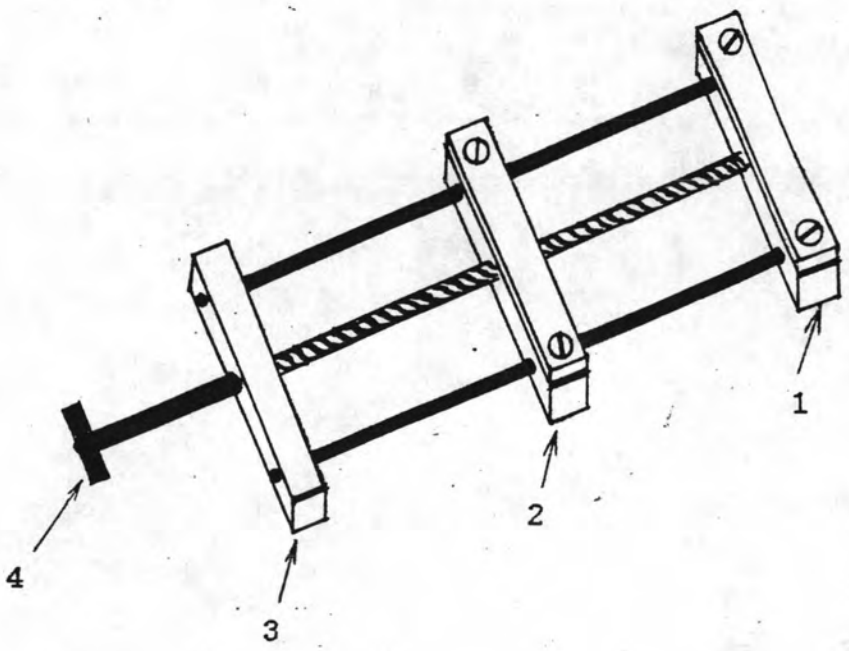
ในงานวิจัยนี้มุ่งที่จะดัดแปลงกรรมวิธีทางกายภาพดังกล่าวข้างต้นให้มีความเหมาะสมและสะดวกที่สุด นอกจากนั้นจะศึกษาหาสภาวะทางกายภาพที่ดีที่สุด เพื่อเป็นหลักเกณฑ์ในการพัฒนาพอลิเมอร์ PVDF ให้เป็นสารเพียสโซอิเล็กตริกที่มีคุณภาพสูงสุด โดยอาศัยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นและเครื่องมือสำเร็จรูปบางชิ้น ได้ทดลองเตรียมฟิล์มในสภาวะที่ต่างๆกัน เช่น อัตราส่วนของความยาวที่ยืดต่อความยาวเดิม อุณหภูมิขณะจัดขั้ว ขนาดของสนามไฟฟ้าที่ใช้จัดขั้ว เหล่านี้เป็นต้น

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ดังนั้นเพื่อศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} จึงต้องเตรียมฟิล์มเป็นจำนวนมาก จากนั้นทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} ของแผ่นฟิล์มทั้งหมด เพื่อนำผลมาวิเคราะห์หาว่าต้องเตรียมฟิล์มอย่างไรจึงจะมีผลให้ได้สัมประสิทธิ์ d_{31} มีค่าสูงสุด ต่อไปเตรียมฟิล์มให้มีขนาดรูปร่างตามต้องการแล้วนำไปประยุกต์ทางเสียงอันเป็นขั้นตอนสุดท้ายของงานวิจัยนี้

สำหรับกระบวนการในการพัฒนาพอลิเมอร์ PVDF ให้มีสภาพเพียสโซอิเล็กตริกนั้น งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตามลำดับขั้นตอนก่อนหลังดังต่อไปนี้

4.1 การยืดพอลิเมอร์ PVDF

ในขั้นตอนการยืดเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ นั้น มีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของผลึกจากแบบเฟส α ไปเป็นแบบเฟส β ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ซึ่ง PVDF จะเป็นสารเพียสโซอิเล็กตริกที่ดีก็ต่อเมื่อมีโครงผลึกแบบ β นี้ปนอยู่เป็นจำนวนมาก ในกระบวนการยืดได้ใช้เครื่องยืดที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.1 [ชุมพร จันทมาศ,2532] ซึ่งได้มีการสร้างไว้ก่อนแล้ว แต่เนื่องจากส่วนประกอบหมายเลข 1 และ 2 ซึ่งทำหน้าที่ยึดแผ่นฟิล์มไว้ในขณะยืด ยังยึดฟิล์มได้ไม่แน่นพอทำให้ฟิล์มหลุดบ่อยๆ จึงได้เพิ่มตัวหนีบเข้าไปช่วยส่วนละ 1 ตัว

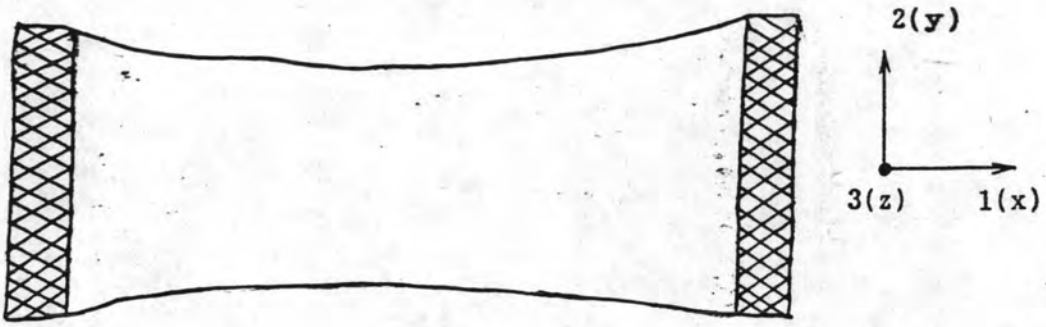


รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงลักษณะของเครื่องยืด

ในส่วนหมายเลข 1 และ 2 ประกอบด้วยแท่งทองเหลือง 2 แท่ง วางประกบและยึดติดกันด้วยน็อต 2 ตัว โดยมีแผ่นยาง 2 แผ่น วางคั่นอยู่ระหว่างกลางแท่งทองเหลืองทั้งสอง แท่งทองเหลืองชิ้นล่างรวมทั้งแท่งทองเหลืองในส่วนหมายเลข 3 เจาะรูกลมเรียบ 3 รูในแนวราบและให้ตรงกัน(ยกเว้นรูตรงกลางของแท่งทองเหลืองในส่วนหมายเลข 2 เจาะเป็นรูเกลียว) รูตรงกลางของทั้ง 3 แท่ง สอดแกนเกลียวทองเหลืองผ่านตลอด ส่วนรูที่เหลือสอดแกนทองเหลืองเรียบผ่านตลอดและย้ำแท่งทองเหลืองในส่วนหมายเลข 1 และ 3 ให้ตริงติดแน่นกับแกนทองเหลืองเรียบทั้งสอง ส่วนหมายเลข 1 และ 2 นี้จะทำหน้าที่หนีบแผ่น PVDF ขณะทำการยืด เมื่อหมุนส่วนหมายเลข 4 ในทิศตามเข็มนาฬิกาส่วนหมายเลข 2 จะเคลื่อนออกจากส่วนหมายเลข 1 ไปตามแกนเกลียว ผลทำให้แผ่น PVDF ถูกยืดออก

ในการยืดแผ่น PVDF เพื่อเปลี่ยนโครงผลึกภายในนั้นจะยืดในแนวเดียวยาวประมาณ 4-6 เท่าของความยาวเดิม ที่อุณหภูมิ 70-85 องศาเซลเซียส การเตรียมการขั้นแรกโดยการตัดแผ่น PVDF ออกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สอดปลายของแผ่น PVDF เข้าระหว่างแผ่นยางในส่วนหมายเลข 1 และ 2 ของเครื่องยืดแล้วขันน็อตให้แน่น ต้มน้ำให้ร้อนประมาณ 70-85 องศาเซลเซียส จากนั้นจุ่มเครื่องยืดพร้อมแผ่น PVDF ลงไปจนแผ่น PVDF จมมิดน้ำ แล้วหมุนส่วนหมายเลข 4 ในทิศตามเข็มนาฬิกา ด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอจนได้ความยาวตามต้องการแล้วจึงยกออกจากน้ำร้อน สิ่งที่ควรระวังขณะทำการยืดคือพยายามให้ฟิล์มจมมิดน้ำอยู่ตลอดเวลามิฉะนั้นฟิล์มอาจจะขาดได้ และเนื่องจากขณะกำลังยืดอุณหภูมิของน้ำจะลดลงเรื่อยๆ ก็ให้แก้โดยการเติมน้ำร้อนลงไปเป็นช่วงๆ จนกว่าจะสิ้นสุดการยืด

ลักษณะของแผ่นฟิล์มที่ได้จากการยืดดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งพบว่าบริเวณตรงกลางจะคอดเข้าหากันและความหนาจะลดลง จากการเปรียบเทียบแผ่นฟิล์ม 2 แผ่น ที่มีความกว้างเริ่มต้นเท่ากันแต่ความยาวเริ่มต้นต่างกันเมื่อผ่านการยืดแล้ว พบว่าแผ่นฟิล์มที่มีความยาวเริ่มต้นมากกว่าตรงกลางจะคอดเข้าหากันมากกว่าแต่ความหนาจะลดลงน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะการยืดทำให้ปริมาตรของ PVDF เปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก



รูปที่ 4.2 แสดงรูปร่างของแผ่นฟิล์มหลังจากผ่านการยืดแล้ว

นอกจากนั้นยังได้ทดลองยืดแผ่น PVDF ที่อุณหภูมิห้องด้วยแต่เนื่องจากที่อุณหภูมิห้องแผ่น PVDF มีความแข็งมาก การยืดจึงทำได้ยากมากแผ่นฟิล์มมักจะเคลื่อนหลุดจากเครื่องยืดเสียก่อน และถึงแม้ว่าบางครั้งจะไม่เคลื่อนหลุดจากเครื่องยืด แต่ฟิล์มจะยืดไม่สม่ำเสมอทุกส่วน และเกิดการฉีกขาดเสียก่อนที่จะได้ความยาวตามที่ต้องการ

แผ่นฟิล์มที่ผ่านการยืดมาแล้วนี้ แม้ว่าผลึกจะเปลี่ยนจากแบบเฟส α ไปเป็นแบบเฟส β แล้วก็ตาม แต่ไดโพลถาวรทางไฟฟ้าของผลึกมีทิศทางอย่างสุ่มจึงมีผลให้ไดโพลรวมเป็นศูนย์ ดังนั้นแผ่นฟิล์มจึงยังไม่มีสภาพเพียสโซอิเล็กตริกจะต้องผ่านการจัดขั้วด้วยสนามไฟฟ้าเสียก่อนซึ่งจะได้กล่าวถึงในลำดับหัวข้อถัดไป และนอกจากนี้ พบว่าฟิล์มที่ผ่านการยืดจะมีความเครียดสูงและอาจจะเกิดการฉีกขาดในระดับจุลภาคด้วย เพื่อลดผลดังกล่าวจึงต้องนำแผ่นฟิล์มไปอบเสียก่อน ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

4.2 การอบฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF

ในการอบแผ่นฟิล์มเพื่อลดความเครียดอันเกิดเนื่องมาจากการยืดนั้น จะต้องอบทั้งที่

ฟิล์มยังคงติดอยู่กับเครื่องยืด ทั้งนี้เพื่อที่จะให้โมเลกุลของฟิล์มกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น โดยใช้เตาอบที่สร้างเตรียมไว้ดังได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา อบที่อุณหภูมิสูงประมาณ 100 - 120 องศาเซลเซียส แต่ด้วยเหตุที่เตาอบมีขนาดไม่ใหญ่มากนัก เมื่อนำเครื่องยืดพร้อมฟิล์มใส่เข้าไปจึงมีผลทำให้อุณหภูมิภายในเตาอบลดลงค่อนข้างมาก แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเครื่องยืดขณะใส่เข้าไปด้วย กล่าวคือ ถ้าใส่เครื่องยืดในขณะที่ร้อนอยู่อุณหภูมิภายในเตาอบก็จะลดลงไม่มากนัก ดังนั้นจึงอบแผ่นฟิล์มภายหลังจากที่ยืดเสร็จใหม่ๆ เพราะเครื่องยืดมีอุณหภูมิสูงอยู่ แต่ต้องระวังอย่าให้มีหยดน้ำเกาะติดอยู่ที่ฟิล์มโดยการเช็ดฟิล์มให้แห้งก่อนทำการอบ ซึ่งถ้ามีหยดน้ำเกาะติดอยู่ที่ฟิล์มเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งในขณะที่อบ บริเวณนั้นจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณอื่นๆ อาจทำให้เกิดรอยย่นขึ้นบนแผ่นฟิล์ม ซึ่งเมื่อนำฟิล์มไปจัดขั้วอาจทำให้ฟิล์มเสียหายได้

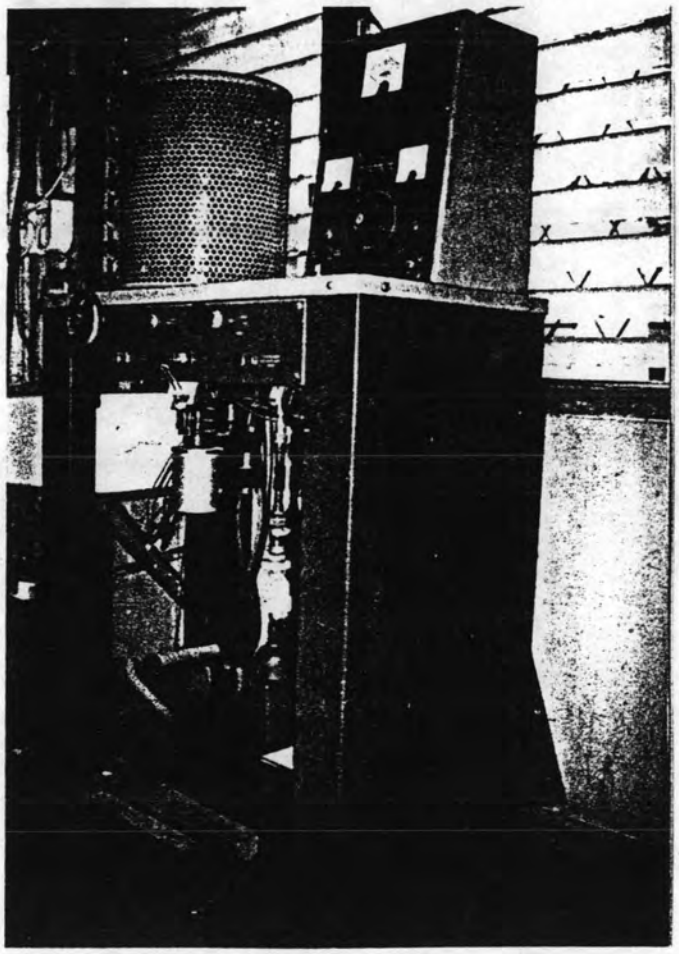
สำหรับช่วงระยะเวลาในการอบนั้นไม่ได้กำหนดเป็นที่แน่นอน แต่ก็ไม่ควรนานเกินไป เพราะความร้อนจะทำให้แผ่นยางที่หนีบยึดฟิล์มอยู่อ่อนตัวฟิล์มอาจหลุดจากเครื่องยืด และจะเกิดรอยย่นบนฟิล์มติดตามมา และนอกจากนั้นไม่ควรอบที่อุณหภูมิสูงจนทำให้ฟิล์มอ่อนตัวเพราะจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงผลึกจากแบบเฟส β ไปเป็นแบบเฟส α อันจะส่งผลให้ค่า d_{31} ลดลงซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ

ฟิล์มที่ผ่านการอบมาแล้ว พบว่าความเครียดของฟิล์มลดลง ฟิล์มอยู่ตัวได้ดีมาก ส่วนฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบมาก่อนเมื่อปลดออกจากเครื่องยืดฟิล์มจะคืนตัวกลับไปได้มาก อย่างไรก็ตามการอบมีความเสี่ยงสูงต่อการที่จะทำให้โครงผลึกแบบเฟส β เปลี่ยนไปเป็นโครงผลึกแบบเฟส α ได้จึงควรกระทำอย่างระมัดระวังให้มาก

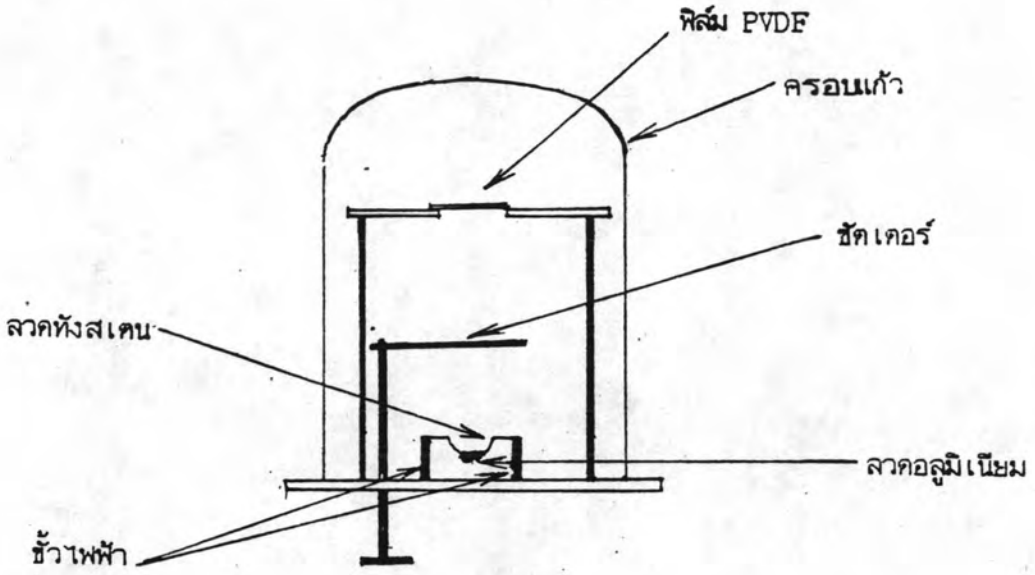
4.3 การทำอิเล็กโทรด

เพื่อความสะดวกในการจัดขั้ว และเพื่อเป็นการเตรียมฟิล์มให้มีสภาพพร้อมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่อไปด้วย จึงจำเป็นจะต้องทำแผ่นขั้วให้แก่ฟิล์มดังกล่าวโดยการฉาบผิว

ทั้งสองด้านของฟิล์มด้วยโลหะตัวนำเพื่อเป็นขั้วถาวรหรืออิเล็กโทรดให้แก่ฟิล์ม ในงานวิจัยนี้จะฉาบด้วยอลูมิเนียมบริสุทธิ์ โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศ ซึ่งสามารถจะทำได้ภายในครอบแก้วของเครื่องฉาบ (coating unit) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.3 หลักการทำงานของเครื่องฉาบก็คือ สูบอากาศออกจากครอบแก้วเพื่อให้เป็นสุญญากาศ จากนั้นให้ความร้อนแก่อลูมิเนียมเพื่อให้ระเหยไปฉาบลงบนผิวฟิล์มตามลำดับ สำหรับส่วนประกอบภายในครอบแก้วแสดงอยู่ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงลักษณะของเครื่องฉาบ(coating unit)

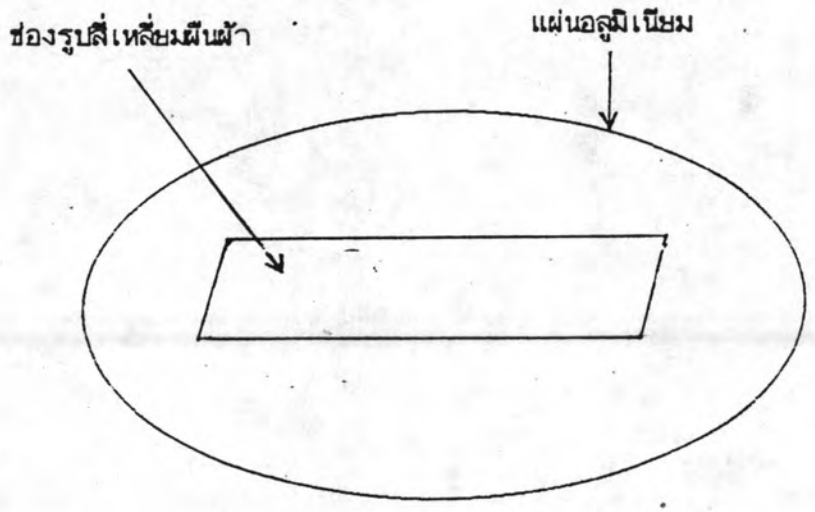


รูปที่ 4.4 แสดงส่วนประกอบภายในครอบแก้วของเครื่องฉาบ

จากรูปที่ 4.4 ส่วนบนสุดมีแท่นสำหรับวางสิ่งที่จะฉาบ ถัดลงมาเป็นชัตเตอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะรูปรีๆ สามารถบังคับให้หมุนไปมาได้จากคันบังคับซึ่งอยู่ภายนอกของครอบแก้ว ชัตเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมความร้อนและปริมาณไอระเหยของอลูมิเนียมที่จะไปกระทบบนฟิล์ม ส่วนล่างสุดมีลวดทังสเตนต่ออยู่กับขั้วบวก ลบ ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ลวดอลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่นำมาพันไว้โดยรอบเพื่อระเหยไปฉาบฟิล์มนั่นเอง

การดำเนินการทำอิเล็กโทรดให้แก่แผ่นฟิล์มในขั้นแรก ทำแบบพิมพ์ของขั้วที่จะฉาบลงไปบนฟิล์ม โดยการตัดแผ่นอลูมิเนียมเป็นรูปวงกลมขนาดใหญ่พอที่จะวางบนแท่นวางของเครื่องฉาบได้ จากนั้นเจาะตรงกลางออกให้เป็นช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือรูปอื่นๆ ตามต้องการ แต่ต้อง

มีขนาดเล็กกว่าแผ่นฟิล์มที่จะฉาบดังแสดงในรูปที่ 4.5 เพื่อป้องกันการลัดวงจรในขั้นตอนการจัดชั้ว ต่อไปนำฟิล์มที่จะทำแผ่นชั้ววางทาบลงไปเหนือช่องที่เจาะของแบบหิมพ์และหนีบให้ยึดติดแนบสนิทกับแบบหิมพ์ด้วยตัวหนีบที่ใช้หนีบกระดาษทั่วๆไป จากนั้นจึงนำไปวางบนแท่นสำหรับวางฟิล์มในครอบแก้ว เพื่อทำการฉาบอลูมิเนียมต่อไป



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะแบบหิมพ์ของอิเล็กโทรด

ต่อไปนี้เป็นลำดับขั้นตอนในการปฏิบัติ เพื่อทำการระเหยอลูมิเนียมด้วยเครื่องฉาบ (coating unit)

1. สำรวจดูวาล์วทุกตัวจะต้องปิดหมด จากนั้นเปิดเครื่อง Rotary pump และเปิดวาล์ว Backing line valve เพื่อสูบอากาศออกจาก Diffusion pump ใช้เวลาประมาณ 10 นาที

2. ปิดวาล์ว Backing line valve ตามด้วยการเปิดวาล์ว Roughing line valve ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที เพื่อให้ Rotary pump สูบอากาศออกจากครอบแก้ว

(Chamber) จนกระทั่งระดับความดันลดลงเหลือประมาณ 0.5 Torr

3. ปิดวาล์ว Roughing line valve พร้อมกับเปิดวาล์ว Backing line valve และเปิดเครื่อง Diffusion pump โดยการเสียบปลั๊กเข้ากับหม้อแปลงกระแสสลับ 230 V เพื่อต้มน้ำมัน ขณะเดียวกันเปิดน้ำเพื่อให้น้ำเป็นตัวถ่ายเทความร้อนให้แก่ Diffusion pump ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

4. เปิดวาล์ว High vacuum valve เพื่อให้ Diffusion pump สูบอากาศออกจากครอบแก้ว ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 30 นาที

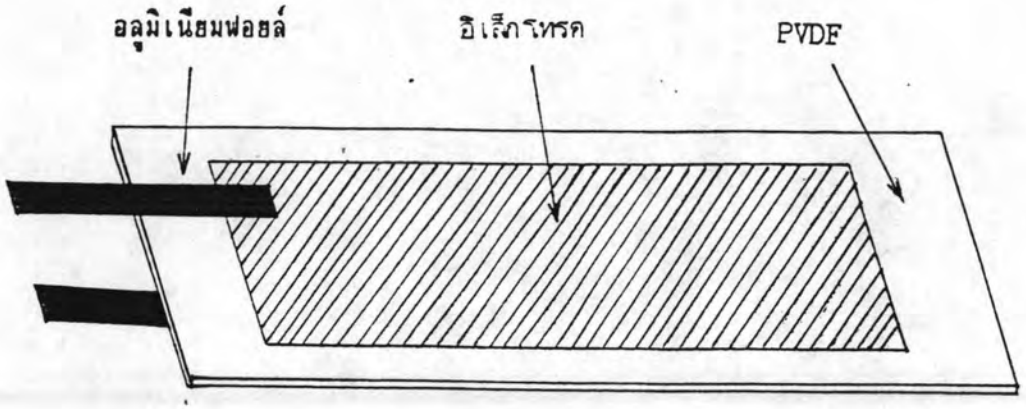
5. เปิดปุ่ม H.T. แล้วปรับความต่างศักย์ เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าภายในครอบแก้ว สังเกตมาตรอ่านกระแส ถ้าเข็มชี้ที่เลขศูนย์แสดงว่าภายในครอบแก้วเป็นสุญญากาศเพียงพอที่จะทำการระเหยอลูมิเนียมได้แล้ว

6. เปิดปุ่ม L.T. เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดทังสเตน ค่อยๆเพิ่มกระแสจนถึง 32 แอมแปร์ โดยประมาณ ถึงตอนนี้อลูมิเนียมจะระเหยจึงหมุนชัตเตอร์ออกเพื่อปล่อยให้ไอของอลูมิเนียมไปฉาบบนฟิล์ม ขั้นตอนนี้ควรทำอย่างระมัดระวังที่สุดเพราะถ้าเปิดชัตเตอร์ช้าไอของอลูมิเนียมจะไปฉาบลงบนชัตเตอร์หมด แต่หากเปิดชัตเตอร์รอไว้นานเกินไปความร้อนจากลวดทังสเตนจะทำให้ฟิล์มย่นและจะทำให้โครงผลึกแบบเฟส β เปลี่ยนไปเป็นแบบเฟส α ได้

7. เมื่อระเหยเสร็จแล้วปิดปุ่ม L.T.ปิดวาล์ว High vacuum valve และปิดเครื่อง Diffusion pump

ฟิล์มอลูมิเนียมบางๆที่ฉาบลงไปบนแผ่นฟิล์ม PVDF ทั้งสองด้านนั้นไม่ควรจะฉาบให้หนาหรือบางจนเกินไป เพราะถ้าหนามากฟิล์มจะแข็งกระด้างเมื่อกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าสลับฟิล์มจะตอบสนองในลักษณะของการสั่นได้ไม่ดี แต่ถ้าบางเกินไปความต้านทานจะสูงจนทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปมาก จึงควรฉาบให้หนาพอเหมาะซึ่งพบว่าความหนาขนาดมองผ่านเห็นความสว่างของหลอดไฟได้จะใช้งานได้ดี

เมื่อทำแผ่นขั้วให้แก่ฟิล์มพอลิเมอร์แล้ว จากนั้นตัดแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์เป็นแถบยาว ประมาณ 3 ซม. กว้าง 0.5 ซม. นำไปติดกับฟิล์มตรงบริเวณที่ฉาบด้วยอลูมิเนียมเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าโดยใช้ silver paste ซึ่งเป็นกาวโลหะชนิดหนึ่ง ลักษณะฟิล์มที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 4.6



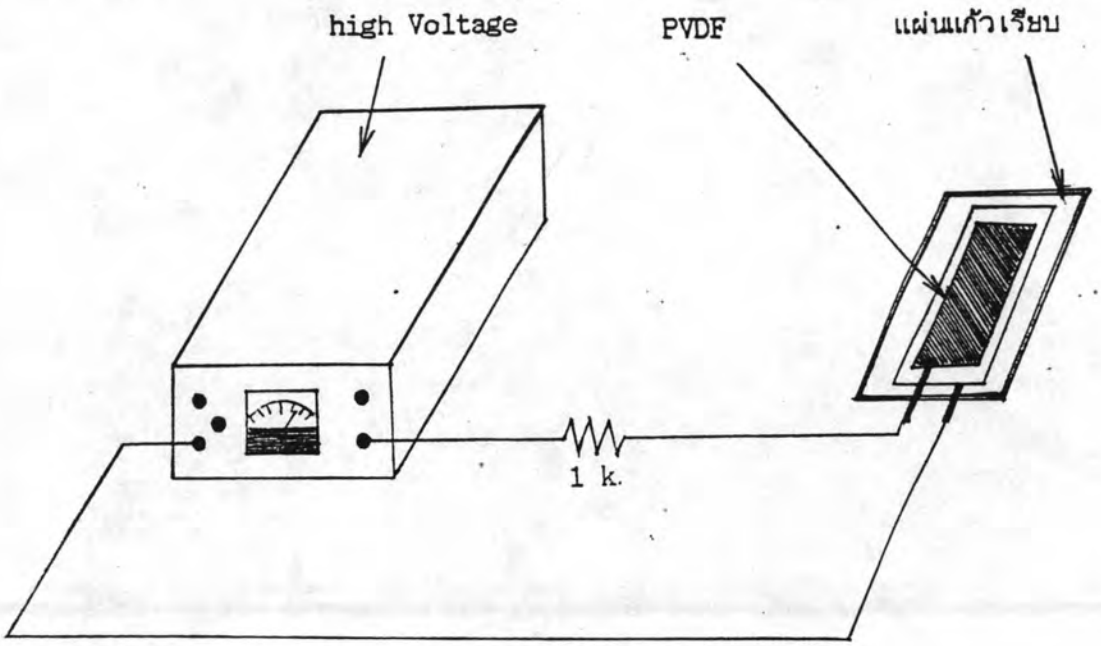
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของฟิล์มที่ทำอิเล็กโทรดและขั้วเสร็จแล้ว

4.4 การจัดขั้ว

แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF ที่ผ่านการยืดมาแล้วจะมีโครงผลึกแบบเฟส β และผลึกมีไดโพลถาวรทางไฟฟ้า แต่ด้วยเหตุที่ไดโพลถาวรทางไฟฟ้าของผลึกมีทิศทางอย่างสุ่มจึงทำให้ไดโพลรวมมีค่าเป็นศูนย์ แผ่นฟิล์มจึงไม่แสดงสภาพเพียสโซอิเล็กตริก เพื่อที่จะให้แผ่นฟิล์มดังกล่าวนี้มีสภาพเพียสโซอิเล็กตริกก็จะต้องทำให้ไดโพลของแต่ละผลึกหันเหไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเพียงทิศทางเดียว ซึ่งสามารถกระทำได้ด้วยการผ่านสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเข้าไปในเนื้อของแผ่นฟิล์ม ไดโพลเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าก็จะถูกแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ากระทำให้มีทิศชี้ไปใน

ทิศเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้านั้น ซึ่งในสถานการณ์ดังกล่าวไดโพลรวมของแผ่นฟิล์มก็จะไม่เป็นศูนย์ สำหรับในงานวิจัยนี้จะผ่านสนามไฟฟ้าเข้าไปในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบของแผ่นฟิล์ม ซึ่งมีรายละเอียดและขั้นตอนดังต่อไปนี้

จัดวางแผ่นฟิล์ม PVDF ให้นอนราบลงบนแผ่นแก้วเรียบพยายามจัดให้ฟิล์มวางตัวแนบสนิทกับแผ่นแก้วให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ อาจใช้แผ่นแก้วเรียบอีกแผ่นวางทับลงไปอีกทีหนึ่ง แต่บางครั้งการทำเช่นนี้กับฟิล์มที่ผ่านการยืดอย่างไม่สม่ำเสมอมาก่อนจะทำให้เกิดการหักมุมมีลักษณะเป็นคลื่นเล็กๆจำนวนมากเกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม ซึ่งจะทำให้ฟิล์มเสียหายได้เมื่อผ่านสนามไฟฟ้าความเข้มสูงๆ เข้าไป หลังจากวางแผ่นฟิล์มลงไปบนแผ่นแก้วเป็นที่เรียบร้อยแล้วต่อขั้วไฟฟ้าทั้งสองของแผ่นฟิล์มเข้ากับขั้วบวก-ลบ ของเครื่องกำเนิดความต่างศักย์โวลต์สูงดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.7 โดยมีความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม ต่อไว้อย่างอนุกรมกับฟิล์มด้วยเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดความต่างศักย์โวลต์สูงในกรณีที่เกิดการสปาร์กขึ้นบนแผ่นฟิล์ม เพราะขณะเกิดการสปาร์กจะมีกระแสไฟฟ้าสูงมาก เปิดสวิทช์เครื่องกำเนิดความต่างศักย์โวลต์สูง ค่อยๆเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงค่าที่ต้องการปล่อยค้างไว้ประมาณ 20 นาที แล้วลดความต่างศักย์ลงอย่างรวดเร็ว จากนั้นทำการลัดวงจรระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.7 แสดงการจัดขั้วให้แก่แผ่นฟิล์ม PVDF

สำหรับค่าความเข้มสูงสุดของสนามไฟฟ้าที่สามารถปรับได้นั้นพบว่าขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นฟิล์ม ทั้งนี้เพราะเครื่องกำเนิดความต่างศักย์โวลต์สูงสามารถให้กำเนิดความต่างศักย์สูงสุดได้จำกัดเพียง 3,000 โวลต์ เท่านั้น อย่างเช่นกรณีของฟิล์มที่หนา 30 ไมโครเมตร ความเข้มของสนามไฟฟ้าจะปรับได้ไม่เกิน 100 MV/m ในกรณีจัดขั้วที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องทำโดยวางแผ่นฟิล์ม PVDF ซึ่งประกบด้วยแผ่นแก้วไว้ในเตาอบ ซึ่งควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในระดับที่ต้องการแล้วจึงต่อขั้วไฟฟ้าทั้งสองของแผ่นฟิล์มเข้ากับขั้วบวก-ลบ ของเครื่องกำเนิดความต่างศักย์โวลต์สูงเปิดสวิทช์แล้วค่อยๆ เพิ่มความต่างศักย์จนถึงระดับที่ต้องการปล่อยค้างไว้ประมาณ 20 นาที แล้วลดอุณหภูมิของแผ่นฟิล์มลงให้เท่ากับอุณหภูมิห้องโดยการนำแผ่นฟิล์มออกจากเตาอบ จากนั้นจึงลดความต่างศักย์ลงเป็นศูนย์และลัดวงจรปล่อยทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง

ก็จะได้ฟิล์มที่มีสภาพเพียสโซอิเล็กตริกตามต้องการ

ในการจัดขั้วพบว่าบางครั้งเกิดการสปีากขึ้นบนแผ่นฟิล์มทำให้ฟิล์มทะลุเสียหายซึ่งการสปีากดังกล่าวเกิดมาจากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น

1. พบว่า T_p สูงๆ โอกาสที่จะเกิดการสปีากมีมาก

2. ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ใช้จัดขั้ว E_p มีค่ามากเกินไป

3. ความไม่เรียบของฟิล์ม จากความรู้ทางไฟฟ้าสถิตทราบว่าตรงส่วนที่แหลมๆของฟิล์มประจุไฟฟ้าจะไปรวมกันหนาแน่นกว่าบริเวณอื่นๆจะมีผลทำให้ตรงส่วนนั้นของฟิล์มทะลุได้

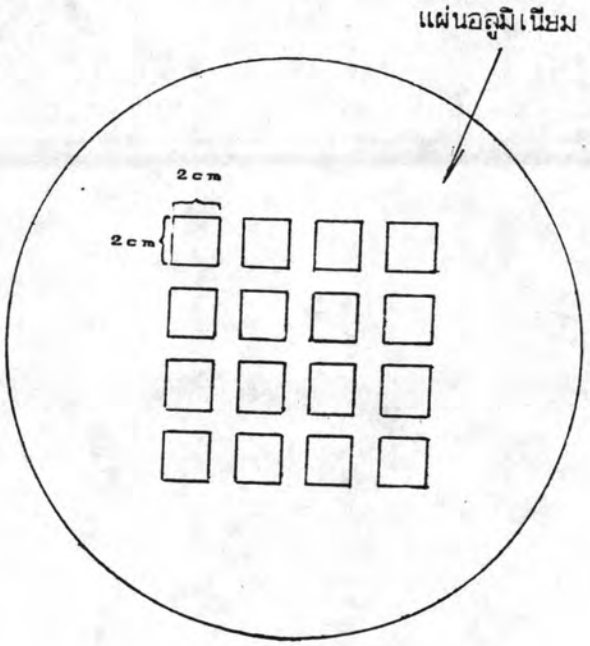
4. ฟิล์มบางจะเกิดการสปีากได้ง่าย

แผ่นฟิล์ม PVDF ที่ผ่านการจัดขั้วแล้วจะมีสภาพเพียสโซอิเล็กตริกสูงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆได้เป็นอย่างดี

เนื่องจากในการเตรียมฟิล์มเพียสโซอิเล็กตริกจะต้องผ่านกระบวนการทางกายภาพหลายกระบวนการดังได้กล่าวถึงอย่างละเอียดมาแล้วในข้างต้นจึงมีตัวแปรหลายตัวแปรด้วยกันที่มีอิทธิพลต่อสภาพเพียสโซอิเล็กตริกของฟิล์มเกิดขึ้น เช่น สัดส่วนการยืดของฟิล์ม (l/l_o) อุณหภูมิขณะจัดขั้ว(T_p) ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ใช้จัดขั้ว(E_p)และช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการจัดขั้ว(t_p) เป็นต้น ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของตัวแปรดังกล่าวต่อสภาพเพียสโซอิเล็กตริกของฟิล์มและได้เลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปร เพื่อนำไปใช้เป็นเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มให้มีสภาพเพียสโซอิเล็กตริกที่แรงที่สุดต่อไป

สำหรับกรรมวิธีในการเตรียมฟิล์ม PVDF เพื่อใช้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อสภาพเพียสโซอิเล็กตริกของฟิล์มสามารถทำได้ดังนี้คือ เตรียมฟิล์มขนาดใหญ่โดยยืดในอัตราส่วน l/l_o ค่าหนึ่ง หลังจากอบแล้วจึงนำฟิล์มไปฉาบอลูมิเนียมทำอิเล็กโทรดโดยทำฉากกั้นเป็นช่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กประมาณ 2x2 cm^2 หลายๆช่องดังรูปที่ 4.8 ต่อจากนั้นจึงตัดฟิล์มออกเป็น

ฟิล์มย่อยที่มีพื้นที่อิเล็กโทรดขนาด 2x2 cm^2 ได้หลายฟิล์มและนำฟิล์มที่ได้แต่ละฟิล์มไปจัดขั้วต่อไปโดยอาจจะควบคุมตัวแปร E_p , T_p หรือ t_p แล้วแต่ว่าจะศึกษาตัวแปรใด ตัวอย่าง เช่น ถ้าต้องการจะศึกษาอิทธิพลของความเข้มสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้ว E_p ก็นำฟิล์มแต่ละฟิล์มไปจัดขั้วที่อุณหภูมิ T_p เท่ากัน ในช่วงเวลา t_p เท่ากัน แต่ E_p ต่างๆกัน ก็จะได้ฟิล์มที่ตัวแปร l/l_o , T_p และ t_p ถูกควบคุมให้เหมือนกัน แต่ตัวแปร E_p ต่างกัน ซึ่งเมื่อนำฟิล์มเหล่านี้ไปวัดค่าสัมประสิทธิ์เพียสโซอิเล็กตริก d_{31} ก็จะทราบถึงอิทธิพลของ E_p ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} ในที่สุด ในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ถ้าต้องการศึกษาอิทธิพลของตัวแปร T_p ก็นำฟิล์มแต่ละฟิล์มไปจัดขั้วโดยใช้ E_p และ t_p ที่เท่ากัน แต่ T_p ต่างกัน



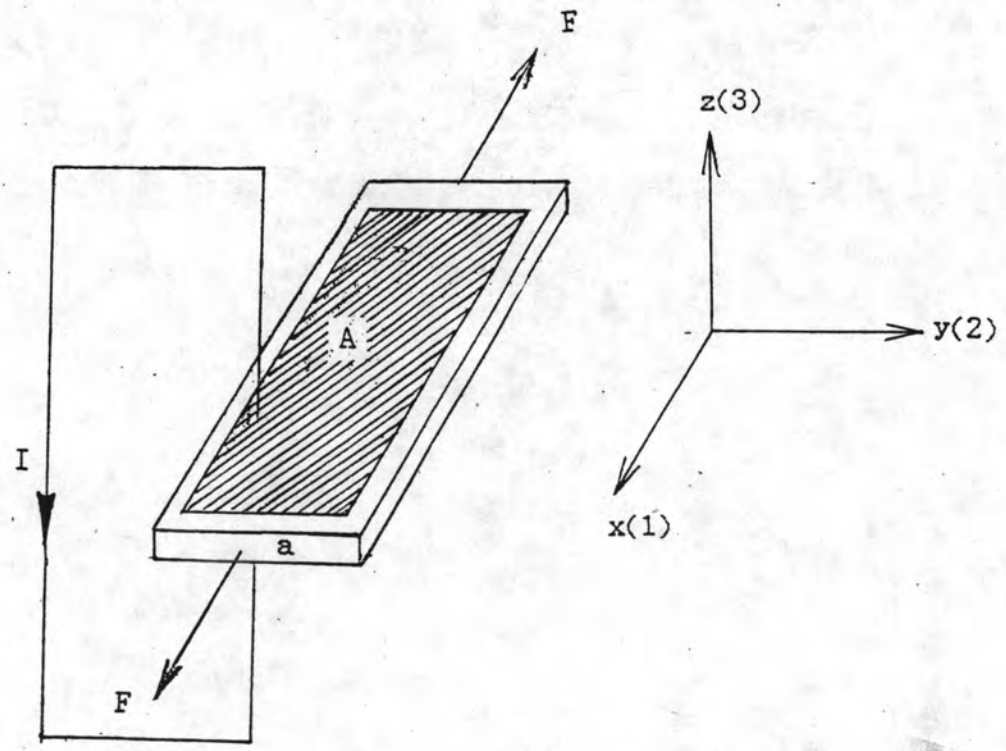
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะของฉากกั้นที่มีช่องสี่เหลี่ยมหลายๆช่อง

ในกรณีที่จะศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนการยืดฟิล์ม l/l_o ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} จะต้องเตรียมฟิล์มขนาดเล็กหลายๆฟิล์ม โดยแต่ละฟิล์มยืดที่อุณหภูมิเดียวกันในอัตราส่วนการยืดที่ต่างๆกัน อบที่อุณหภูมิเดียวกันเป็นเวลานานเท่าๆกัน ซึ่งในทางปฏิบัติปรากฏว่าเมื่อถึงขั้นตอน

การอบนั้นยากที่จะควบคุมอุณหภูมิให้เท่าๆกันได้ ด้วยสาเหตุที่ได้กล่าวถึงมาแล้ว เท่าที่หอจะทำได้ก็คือได้ค่าที่ใกล้เคียงกันเท่านั้น หลังจากอบน่าฟิล์มทุกฟิล์มไปฉาบอลูมิเนียมพร้อมกันและนำไปจัดขั้วที่อุณหภูมิ T_p ด้วยสนามไฟฟ้าที่มีขนาด E_p ในช่วงเวลา t_p ที่เท่าๆกัน ก็จะได้ฟิล์มหลายๆฟิล์มที่มีตัวแปร l/l_o ต่างกันตามต้องการ

4.5 การวัดค่าสัมประสิทธิ์เพียสโซอิเล็กตริกของฟิล์ม PVDF

กรณีระนาบของฟิล์มคือระนาบ xy เมื่อออกแรง F ดึงฟิล์มในแนวแกน x (แกน 1) ซึ่งเป็นแนวยืดฟิล์มเดิม(ดูรูปที่ 4.2) จากทฤษฎีเพียสโซอิเล็กตริก จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโพลาไรเซชัน P ในแนวตั้งฉากกับระนาบของฟิล์มคือในแนวแกน z (แกน 3)ซึ่งจะมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุขึ้นบนพื้นที่ A ด้านบนและล่างของฟิล์ม เมื่อนำเอาลวดตัวนำมาต่อเชื่อมระหว่างผิวทั้งสองก็จะเกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้า ΔQ ผ่านลวดตัวนำดังรูปที่ 4.9



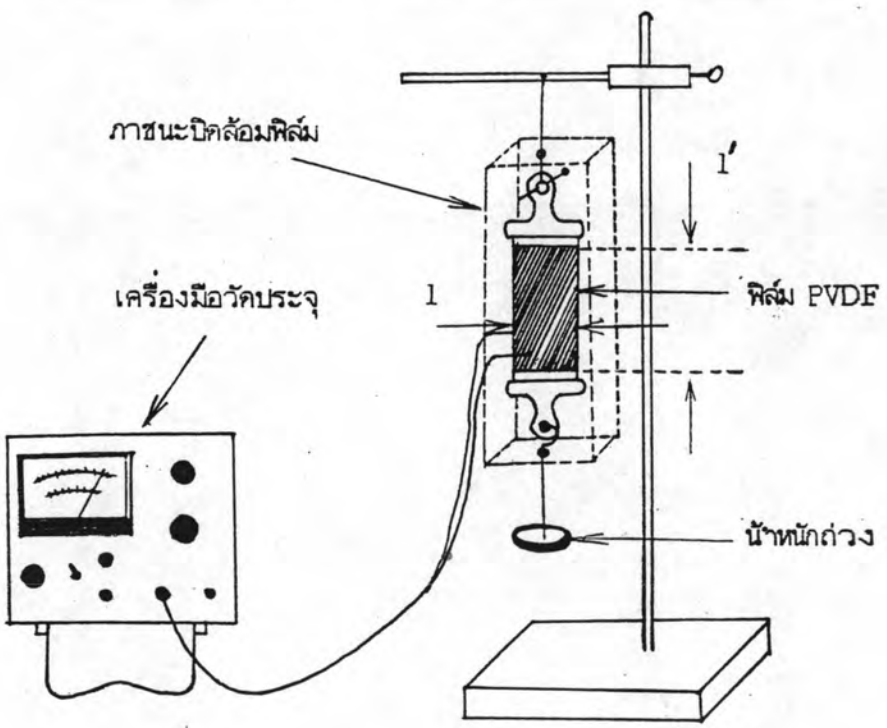
รูปที่ 4.9 แสดงการถ่ายเทประจุระหว่างด้านบน-ล่างของฟิล์มขณะมีแรงดึงฟิล์ม

จากสมการ(2.1.5) เมื่อ E=0 และเนื่องจาก PVDF มีค่า $d_{11}=d_{21}=0$ จะได้

$$\Delta D_3 = d_{31}X_1 \qquad (4.5.1)$$

$$\Delta Q/A = d_{31}X_1 \qquad (4.5.2)$$

d_{31} เป็นสัมประสิทธิ์เพียสโซอิเล็กตริก เมื่อมีแรงเค้น F กระทำต่อพื้นที่ a ซึ่งตั้งฉากกับแกน x (แกน 1) ในกรณีนี้ $X_1 = F/a$ ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุ ΔQ บนพื้นที่ A ด้านบน-ล่าง ซึ่งตั้งฉากกับแกน z (แกน 3) ในการวิจัยนี้ได้ทำการวัดสัมประสิทธิ์ d_{31} โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้ แขวนฟิล์มไว้ในแนวดิ่ง โดยปลายบนถูกยึดให้ติดแน่นด้วยตัวหนีบแล้วแขวนนิ่งไว้กับขาตั้งดังแสดงในรูปที่ 4.10 ปลายล่างใช้ตัวหนีบอีกตัวหนึ่งหนีบไว้ให้แน่น จากนั้นใช้สายไฟเส้นเล็กๆจำนวน 2 เส้น ต่อเข้ากับอิเล็กโทรดของฟิล์มด้านละเส้น นำปลายที่เหลือต่อเข้ากับเครื่องวัดประจุ ซึ่งในการวิจัยนี้เครื่องมือที่ใช้คือ electrometer model 135 ของ



รูปที่ 4.10 แสดงการวัดสัมประสิทธิ์ d_{31}

Princeton Research Lap. ซึ่งเมื่อใช้ในการวัดประจุ ความต้านทานภายในของเครื่องจะน้อยมากทั้งนี้เพื่อให้ประจุผ่านเข้าไปได้อย่างสะดวกและเครื่องสามารถอ่านประจุได้ละเอียดถึง 0.1 นาโนคูลอมบ์ ได้อย่างถูกต้อง เมื่อถ่วงน้ำหนัก w เข้าที่ปลายด้านล่างของฟิล์มจะเกิดความเค้น X_1 กระทำต่อฟิล์ม ซึ่งจากทฤษฎีเพียสโซอิเล็กตริก ความเค้นนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันในแนวตั้งฉากกับระนาบของฟิล์ม และ เกิดการถ่ายเทประจุจากอิเล็กโทรดหนึ่งผ่านเครื่องวัดประจุไปยังอีกอิเล็กโทรดหนึ่งซึ่งอยู่ด้านตรงข้าม จากสถานการณ์ดังกล่าวทำให้สามารถอ่านค่าของประจุ ΔQ ได้จากเครื่องวัด จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า d_{31} ได้จากสมการ

$$d_{31} = \Delta Q/AX_1$$
$$= (\Delta Q)a/Aw \qquad (4.5.3)$$

และเนื่องจากน้ำหนัก w ที่ใช้ถ่วงปลายล่างของฟิล์มมีค่าไม่มากนัก พื้นที่ A จึงเปลี่ยนไปน้อยมากจนถือได้ว่ามีค่าคงที่

ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} โดยวิธีดังกล่าวเพื่อให้ได้ค่าที่ตรงกับความเป็นจริงมากที่สุดแรงเค้น w ต้องกระทำอย่างสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทุกส่วนบนพื้นที่ a จึงได้ตัดฟิล์มตามแนวแกน x เป็นแถบเล็กๆ ก่อนจะนำมาวัดสัมประสิทธิ์ d_{31} และนอกจากนี้การวัดค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} ดังกล่าวจะต้องทำอย่างระมัดระวัง โดยเฉพาะอุณหภูมิขณะทำการวัดต้องควบคุมให้คงที่ด้วยทั้งนี้เพราะผลทางไพโรอิเล็กตริกของฟิล์มอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโพลาไรเซชันของฟิล์มได้ด้วย ซึ่งพบว่าเมื่อฟิล์มกระทบกับอากาศที่แปรปรวนแม้เพียงเล็กน้อย เช่น มีลมพัดผ่านฟิล์มผลทางไพโรอิเล็กตริกของฟิล์มก็ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน เพราะการพาความร้อนจากอากาศทำให้อุณหภูมิของฟิล์มเปลี่ยนไป ในทางปฏิบัติวัดค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} ที่อุณหภูมิห้อง โดยทำภาชนะปิดล้อมฟิล์มไว้โดยรอบเพื่อควบคุมให้อากาศที่อยู่รอบๆ ฟิล์มสงบนิ่งไม่แปรปรวน แต่เนื่องจากขณะที่ฟิล์มถูกยืดจะเกิดความร้อนขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นเพื่อให้การระบายความร้อนของฟิล์มกลับสู่ภาวะปกติเป็นไปอย่างรวดเร็วอันจะส่งผลให้การวัดสัมประสิทธิ์ d_{31} มี

ความแม่นยำยิ่งขึ้น ภาชนะที่ล้อมรอบฟิล์มจะต้องออกแบบให้มีที่ว่างพอสำหรับการระบายความร้อนของฟิล์มด้วย

สำหรับขั้นตอนการดำเนินการเพื่อคำนวณหาค่า d_{31} มีดังนี้

1. หาพื้นที่อิเล็กโทรด A ของฟิล์มซึ่งมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากการวัดด้านกว้างและด้านยาวของอิเล็กโทรด ตามรูป 4.10 $A = ll'$

2. หาพื้นที่ a ของฟิล์มซึ่งถูกแรงเค้น w กระทำ จากการวัดความหนาของฟิล์มคูณกับส่วนกว้างของฟิล์ม ตามรูป 4.10 $a = lt$ โดย t เป็นความหนาของฟิล์ม

3. วัดค่าประจุที่เปลี่ยนแปลง ΔQ บนพื้นที่อิเล็กโทรด A ด้านบน-ล่าง ของฟิล์มเมื่อถ่วงด้วยน้ำหนัก w ดังได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น

4. นำค่าที่ได้จากข้อ 1 , 2 และ 3 แทนลงในสมการ $d_{31} = (\Delta Q)a/A.w$ ก็จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} ของฟิล์มตามต้องการ

ตัวอย่าง ฟิล์มแผ่นหนึ่งมีอิเล็กโทรดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 1.25 cm ยาว 2.0 cm ส่วนฟิล์มหนา 2.45×10^{-5} m กว้าง 1.25 cm และยาว 4.5 cm เมื่อถูกดึงตามแนวยาวของฟิล์มโดยการถ่วงด้วยน้ำหนัก 0.98 นิวตัน เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าบนอิเล็กโทรดวัดได้ 1.58×10^{-8} C แสดงวิธีการหาค่า d_{31} ได้ดังนี้

$$A = (1.25\times10^{-2}\ \text{m})\times(2.0\times10^{-2}\ \text{m})$$

$$= 2.5\times10^{-4}\ \text{m}^2$$

$$a = (2.45\times10^{-5}\ \text{m})\times(1.25\times10^{-2}\ \text{m})$$

$$= 3.06\times10^{-7}\ \text{m}^2$$

$$\Delta Q = 1.58\times10^{-8}\ \text{C}$$

$$w = 0.98\ \text{N}$$

$$d_{31} = (1.58\times10^{-8}\ C)\times(3.06\times10^{-7}\ m^2)/(2.5\times10^{-4}\ m^2)\times0.98\ N$$

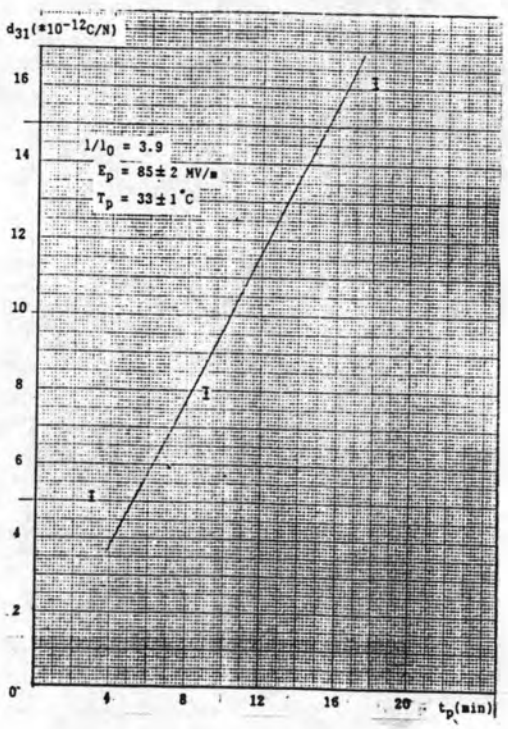
$$= 1.97\times10^{-11}\ C/N$$

4.6 สัมประสิทธิ์ d_{31} ของ PVDF เพียสโซอิเล็กตริกพอลิเมอร์

จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} ของ PVDF เพียสโซอิเล็กตริกที่เตรียมขึ้นโดยวิธีต่างๆ พอจะสรุปถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} ได้ดังต่อไปนี้

ก) ค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} จะมากถ้าเวลาที่ใช้ในการจัดขั้ว t_p มีค่ามาก

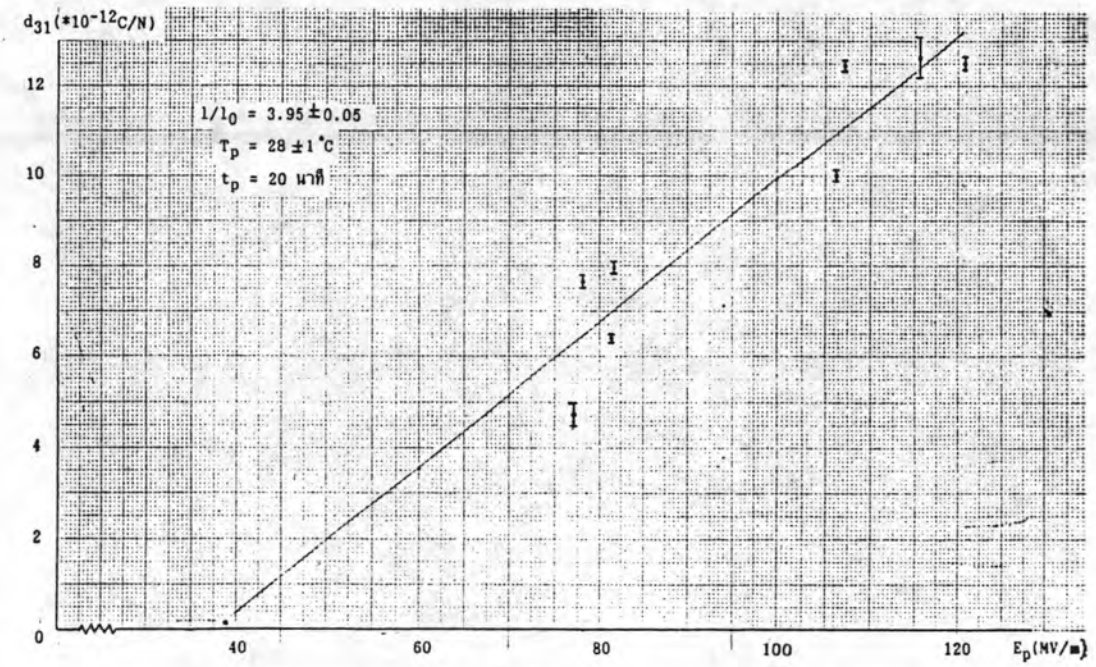
จากการวัดสัมประสิทธิ์ d_{31} ของฟิล์มที่เตรียมขึ้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของ t_p ต่อค่า d_{31} พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อใช้เวลาในการจัดขั้ว t_p มากขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง d_{31} กับ t_p แสดงดังรูปที่ 4.11 เนื่องจากข้อมูลหยาบจึงได้ประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง d_{31} กับ t_p เป็นกราฟเส้นตรง แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มของค่า d_{31} จะมีค่าจำกัดอยู่ที่ค่าหนึ่ง[Mort and Pfister, 1982] เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการสปีกที่เกิดขึ้นได้ง่าย เมื่อทำการจัดขั้วฟิล์มเป็นเวลานานๆ ในการวิจัยนี้จึงเลือกใช้ t_p ประมาณ 20 นาที ซึ่งนานเพียงพอที่จะใช้ในการจัดขั้วให้แก่ฟิล์ม เพื่อให้ d_{31} สูงเพียงพอ



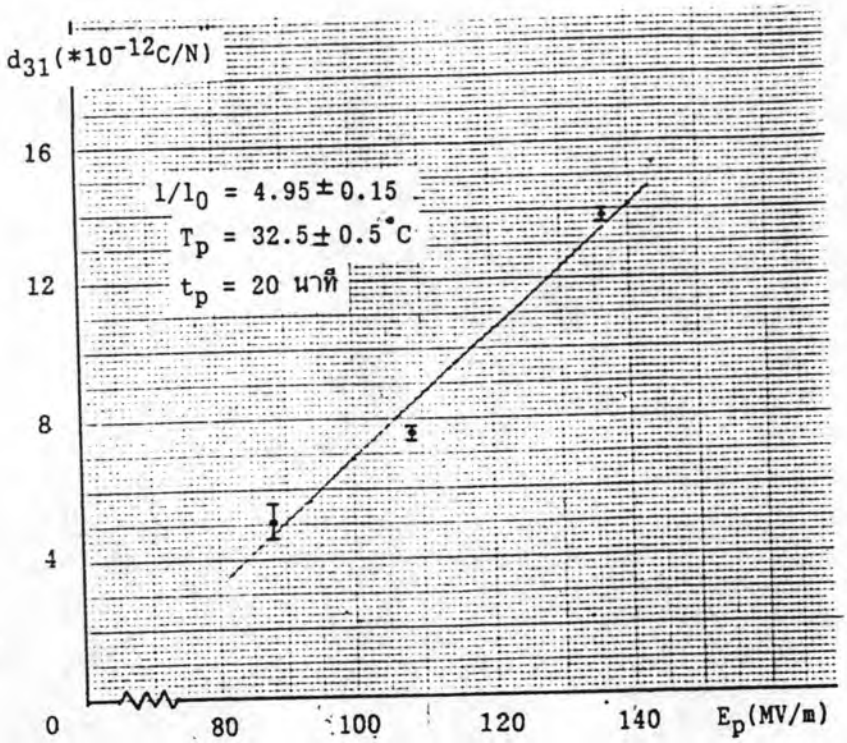
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง d_{31} กับ t_p

ข) ค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} จะมากถ้าสนามที่ใช้จัดขั้ว E_p มีค่ามาก

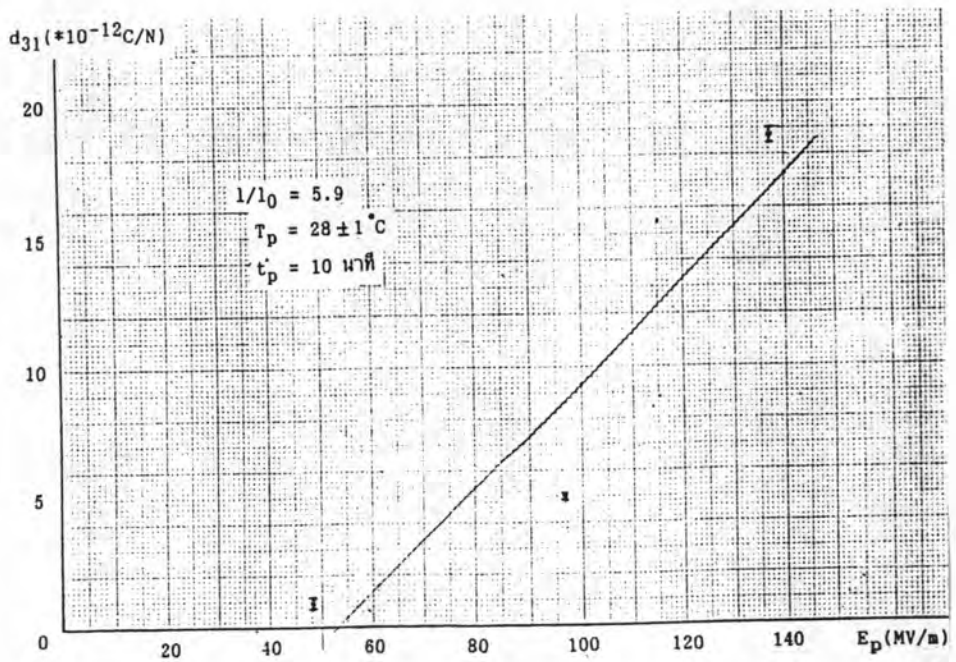
จากการทดลองพบว่าฟิล์มชุดที่ควบคุมตัวแปร l/l_0 , T_p และ t_p เท่าๆกัน ค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ใช้จัดขั้ว E_p ให้สูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่าง d_{31} กับ E_p แสดงดังรูปที่ 4.12 และเนื่องจากข้อมูลค่อนข้างหยาบจึงได้ประเมินความสัมพันธ์ระหว่าง d_{31} กับ E_p เป็นกราฟเส้นตรง ในการทดลองนี้ $t_p \simeq 20$ นาที ดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับสมมุติฐานที่ว่า E_p ที่มีค่าสูงจะมีความสามารถในการหมุนผลึกแบบเฟส β ให้ไดโพลของผลึกชี้ไปในแนวเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้าได้มากขึ้นเป็นการเพิ่มโพลาไรเซชัน P ในแนว z (แกน 3) และสัมประสิทธิ์ d_{31} ให้แก่ฟิล์ม



รูปที่ 4.2 (ก)



(ก)

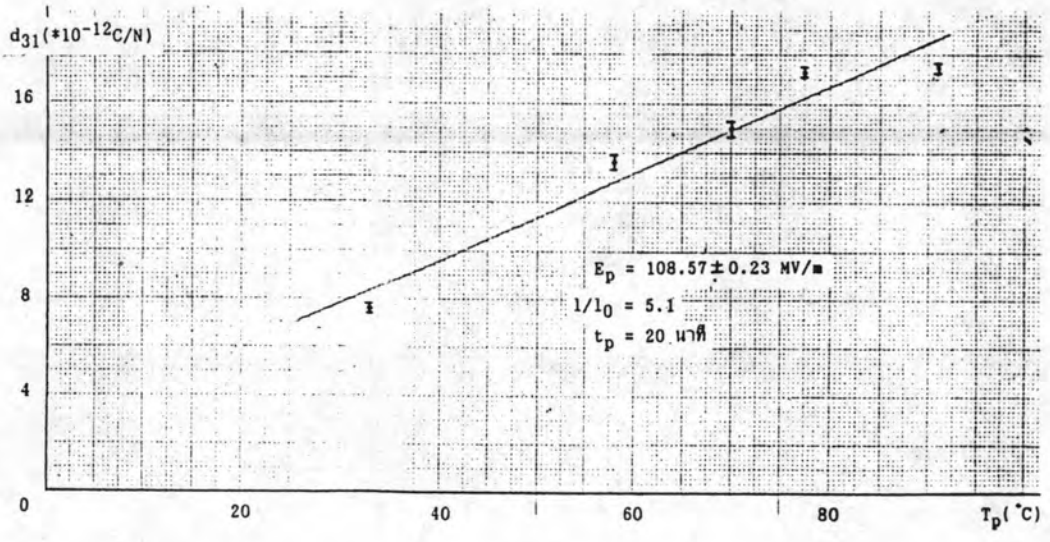


(ค)

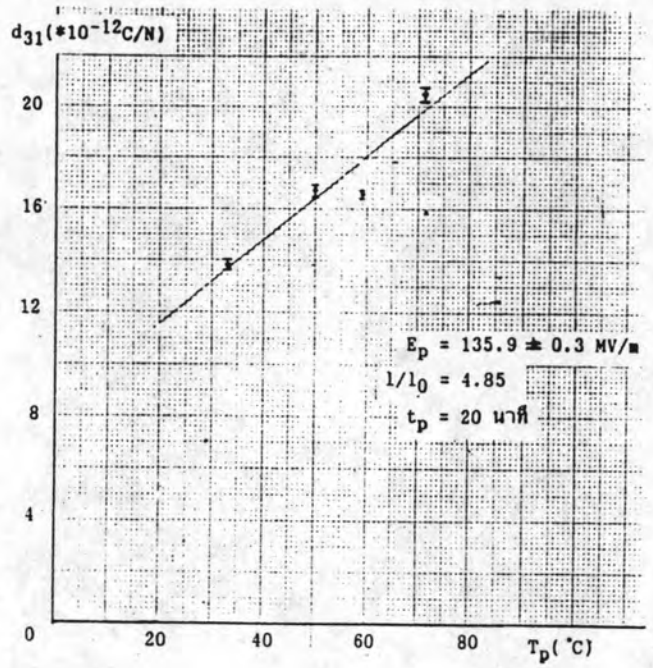
รูปที่ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ d_{31} ไปกับ E_p

ค) สัมประสิทธิ์ d_{31} จะมากขึ้นถ้าจัดขั้วที่อุณหภูมิ T_p สูงขึ้น

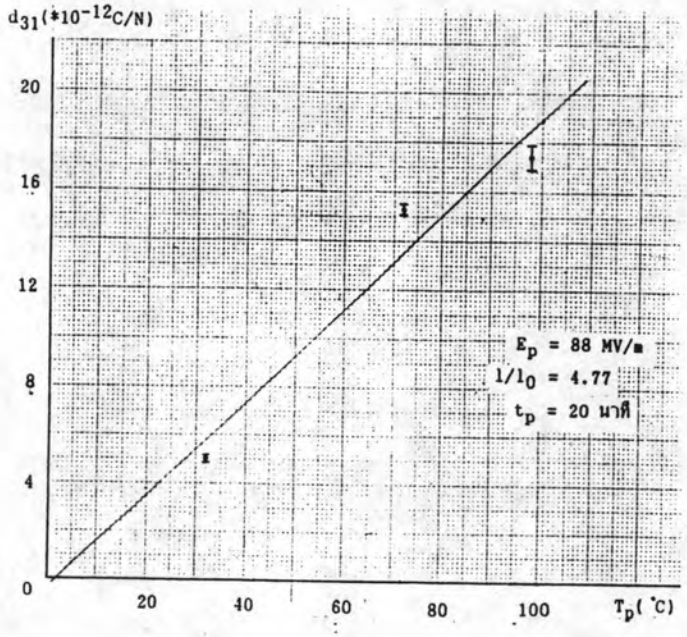
ในการวิจัยเพื่อศึกษาบทบาทของ T_p ต่อค่า d_{31} โดยการเตรียมฟิล์มขึ้นมา 3 ชุด ซึ่งแต่ละชุดมีตัวแปรอื่นๆเหมือนกันแต่มี T_p ต่างกัน พบว่าสัมประสิทธิ์ d_{31} จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อจัดขั้วที่อุณหภูมิ T_p สูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่าง d_{31} กับ T_p จากผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.13 และเนื่องจากข้อมูลค่อนข้างหยาบจึงได้ประเมินความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่ายิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นปริมาตรอิสระของพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้น [F.Bueche, 1979] ทำให้ผลึกเฟส β หมุนตัวเพื่อให้ทิศของไดโพลชี้ไปตามสนามไฟฟ้าได้โดยสะดวกยิ่งขึ้น ดังนั้นสัมประสิทธิ์ d_{31} ซึ่งขึ้นกับโพลาไรเซชัน P ในแนวแกน z (แกน3) จึงเพิ่มขึ้นไปกับ T_p



รูปที่ 4.13 (ก)



(ข)



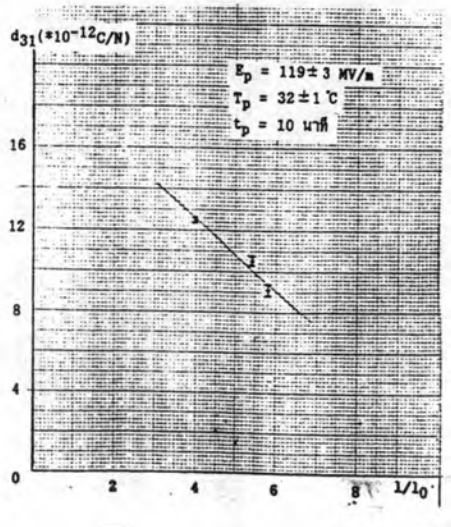
(ค)

รูปที่ 4.13 แสดงการเพิ่มของ d_{31} ไปกับอุณหภูมิ T_p ที่ใช้จัดขั้ว

ง) สัมประสิทธิ์ d_{31} มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนการยืด l/l_o เพิ่มขึ้น

ในการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนการยืด l/l_o ต่อค่า d_{31} จะต้องเตรียมฟิล์มขึ้นมาชุดหนึ่งโดยการควบคุมตัวแปร E_p , T_p และ t_p ให้เท่าๆกัน ซึ่งปรากฏว่าทำได้ยุ่งยากเป็นอย่างมาก เพราะในการเตรียมฟิล์มเพื่อศึกษา l/l_o นั้น จะต้องเตรียมฟิล์มแต่ละแผ่นอย่างเป็นอิสระกันในทุกขั้นตอนไม่เหมือนกันกับในกรณีของการศึกษาอิทธิพลของ E_p ,T_p หรือ t_p ดังนั้นจึงมีตัวแปรที่ควบคุมได้ยากเกิดเพิ่มขึ้นมาอีกเช่น อุณหภูมิขณะยืดของฟิล์มแต่ละแผ่น อุณหภูมิที่ใช้อบ ความหนาของอลูมิเนียมที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด อุณหภูมิขณะฉาบอลูมิเนียมเป็นต้น ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิมีผลต่อโครงผลึกดังได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ส่วนความหนาของอิเล็กโทรดก็จะมีผลต่อการจัดขั้วและการตอบสนองของฟิล์ม

ในการวิจัยนี้ได้แปรค่า l/l_o อยู่ในช่วง 4-6 เท่า ความสัมพันธ์ระหว่าง d_{31} กับ l/l_o จากการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 เนื่องจากข้อมูลหยาบจึงได้ประเมินความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งพอจะสรุปได้ว่า เมื่ออัตราส่วนการยืดของฟิล์มเพิ่มขึ้นค่า d_{31} ลดลง ดังนั้นในการเตรียมฟิล์มเพื่อใช้งานในด้านต่างๆ ควรจะยืดฟิล์มในอัตราการยืดเท่ากับ 4 เท่า



รูปที่ 4.14 แสดงการแปรค่าของ d_{31} ไปกับ l/l_o

ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาแผ่นฟิล์ม PVDF ให้มีสภาพเพียสโซอิเล็กตริกสูง โดยทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อค่า d_{31} รวมทั้งหาวิธีการในการเตรียมฟิล์มที่สะดวกและง่ายต่อการปฏิบัติให้มากที่สุดด้วย

สรุป ในการเตรียมฟิล์มให้มีสภาพเพียสโซอิเล็กตริกที่แรง สามารถทำได้ดังข้อสรุปต่อไปนี้

1. ยืดฟิล์มอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วนการยืด l/l_o เท่ากับ 4 เท่า ทั้งนี้ถ้ายืดในอัตราส่วนที่มากขึ้นค่า d_{31} จะลดลงและฟิล์มอาจเกิดการฉีกขาดได้

2. จากการสังเกตและการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าในการจัดขั้วนั้น ถ้าใช้สนามไฟฟ้า E_p ที่มีความเข้มสูง ค่า d_{31} จะสูงด้วย แต่ก็มีข้อเสียตรงที่การเกิดการสปาร์กขึ้นบนแผ่นฟิล์มที่ E_p สูงๆ ซึ่งทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับความเรียบของฟิล์มและอุณหภูมิขณะจัดขั้วด้วย กล่าวคือ ถ้าใช้ฟิล์มที่เรียบจัดขั้วที่อุณหภูมิต่ำๆเช่น อุณหภูมิห้อง ก็สามารถจะใช้ E_p สูงๆได้ ในงานวิจัยนี้เพื่อให้ได้ค่า d_{31} สูงๆ (d_{31} มากกว่าหรือเท่ากับ 18×10^{-12} C/N)ใช้ E_p มากกว่าหรือเท่ากับ 80 MV/m

3. จากข้อมูลในรูปที่ 4.13 ถ้าใช้ T_p มาก ค่า d_{31} จะเพิ่มมากขึ้นด้วย แต่ T_p ไม่ควรสูงเกิน 100 องศาเซลเซียส เพราะที่อุณหภูมิสูงๆ เช่นนี้ อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงผลึกจากเฟส β ไปเป็นเฟส α ได้ ซึ่งจะส่งผลให้ค่า d_{31} ลดลง และอีกประการหนึ่งที่อุณหภูมิสูงๆการสปาร์กเกิดขึ้นได้ง่าย ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยและสะดวกในการเตรียมฟิล์มจึงเลือกใช้ T_p ประมาณไม่เกิน 80 องศาเซลเซียส

4. ช่วงเวลาที่ใช้ในการจัดขั้วนั้น เนื่องจากในการกลับตัวของผลึกเพื่อให้ไดโพลชี้ไปในแนวของสนามไฟฟ้าได้เต็มที่ที่ความเข้ม E_p ค่าหนึ่ง ในการวิจัยนี้จึงใช้ t_p เท่ากับ 20 นาที

สุดท้ายของการวิจัยนี้ ได้ทดลองเตรียมฟิล์มขึ้นมาแผ่นหนึ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ทางเสียงโดยได้นำไปใช้แทนลำโพงของวิทยุทรานซิสเตอร์ จากการรับฟังพบว่าการตอบสนองของฟิล์มต่อสัญญาณความถี่ต่ำไม่ดีเท่าที่ควร แต่สำหรับสัญญาณความถี่สูงแล้วตอบสนองดีมาก ส่วนความดังของเสียงจากฟิล์ม PVDF นั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นฟิล์มแล้วพบว่ายังขึ้นอยู่กับการนำไปประกอบเข้ากับวิทยุอีกด้วย กล่าวคือ ถ้านำไปต่อเข้ากับวิทยุโดยตรงแล้วเสียงที่ได้ยินจะเบากว่าการต่อโดยผ่านหม้อแปลงไฟขึ้น เพราะเหตุว่าฟิล์ม PVDF มีค่าอิมพิแดนซ์สูงกว่าลำโพงที่ใช้กันในปัจจุบัน ดังนั้นเมื่อต้องการให้ได้เสียงดังมากขึ้นจึงต้องใช้อุปกรณ์ช่วยขยายสัญญาณจากวิทยุให้มีแอมปลิจูดเพิ่มขึ้น ซึ่งในการวิจัยนี้อุปกรณ์ดังกล่าวก็คือ หม้อแปลงไฟธรรมดานั่นเอง แต่ต้องระวังอย่าให้สัญญาณที่ขยายแล้วนั้นมีแอมปลิจูดสูงเกินไปเพราะอาจทำให้ฟิล์มทะลุเสียหายได้ ในการทดลองใช้ของงานวิจัยนี้ พบว่าสัญญาณที่ขยายแล้วมีแอมปลิจูดประมาณ 30 โวลต์ นั้นให้เสียงดังฟังชัดเจนทั้งเสียงดนตรีและเสียงคนพูด จึงเชื่อว่างานวิจัยครั้งนี้ประสบผลแล้วในอีกระดับหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามยังมีเรื่องที่น่าสนใจเกี่ยวกับ PVDF ในอีกหลายเรื่องจึงควรจะมีการวิจัยพัฒนาต่อเนื่องกันไป