

การพัฒนาแผ่นฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์เพื่อเป็นแตรนส์ดีวเซอร์



นายรัชชัย พุทซ้อน

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

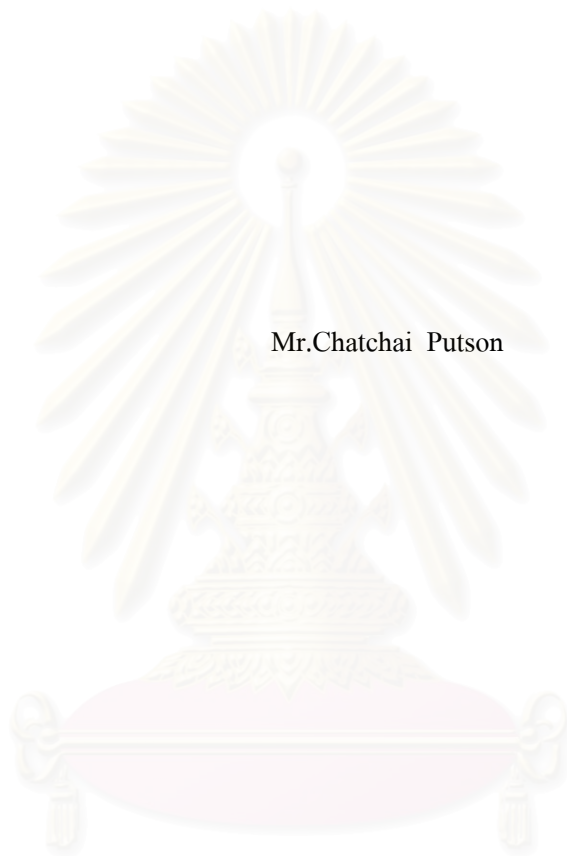
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6069-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF POLYVINYLIDENE FLUORIDE FILM FOR TRANSDUCERS



Mr.Chatchai Putson

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Physics

Department of Physics

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6069-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแผ่นฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์เพื่อเป็นแตรนส์คิวเซอร์
โดย	นาย ชัชชัย พุทซ้อน
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์นต์ รัตนธรรมพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ชนะ ผิวล่อง

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประไพพรรณ ฉันทิกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์นต์ รัตนธรรมพันธ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์ชนะ ผิวล่อง)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.บุรินทร์ อัสวพิภพ)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.นัทรชัย ศรีนิติวรวงศ์)

นายชัชชัย พุทซ้อน : การพัฒนาแผ่นฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์เพื่อเป็นทรานสดิวเซอร์.

(DEVELOPMENT OF POLYVINYLIDENE FLUORIDE FILM FOR TRANSDUCERS)

อ. ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ รัตนธรรมพันธ์, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อาจารย์ชนะ ฝิว่อง  
จำนวนหน้า 90 หน้า. ISBN 974-17-6069-8

ในการเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) ใช้ผง PVDF 10 % โดยน้ำหนัก ละลายใน เอน-เมทิลทูโพรลิโดน นำสารละลายเทใส่ถาดที่จัดระดับแล้วอบที่ 120 องศาเซลเซียส นำฟิล์มที่ได้ ตรวจสอบโครงสร้างด้วย XRD เพื่อหาโครงสร้างที่ได้จากการเตรียม ต่อมานำไปยืดให้ยาวขึ้น 3.5 ถึง 4 เท่า ความยาวเดิม นำไปตรวจสอบโครงสร้างด้วย XRD อีกครั้ง ได้ค่ามุม Bragg ของระนาบ (110) และ (200) เท่ากับ 20.48 องศา ซึ่งใกล้เคียงกับงานของ Das Gupta and Doughty ที่ 20.80 องศา นำฟิล์มไปทำขั้วด้วยการระเหยทอง นำไปจัดขั้วไฟฟ้าด้วยสนามไฟฟ้าตั้งแต่ 40 ถึง 80 MV/m วัดค่าไดอิเล็กตริกของฟิล์มด้วย LCR meter ได้ค่าไดอิเล็กตริก 10.55 ถึง 8.25 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กตริกวัดด้วยอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กตริก  $d_{33}$  ที่วัดได้อยู่ในช่วง 2.5 ถึง 4.4 pm/V เปลี่ยนแปลงตามค่าสนามจัดขั้ว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ฟิสิกส์  
สาขาวิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิติ.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4472246423 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: POLYVINYLIDENE FLUORIDE / PIEZOELECTRIC

CHATCHAI PUTSON : DEVELOPMENT OF POLYVINYLIDENE FLUORIDE FILM FOR  
TRANSDUCERS. THESIS ADVISOR :ASSIST.PROF.KIRANANT RATANATHAMMAPAN,  
THESIS COADVISOR : CHANA PEWLONG, 90 pp. ISBN 974-17-6069-8

The polyvinylidene fluoride films (PVDF) were prepared by adding 10% of PVDF powder (by weight) into N-methyl-2-pyrrolidone as solvent. The PVDF solution was poured into the glass tray with fine leveling, then heated at 120°C until a dry film was obtained. The crystal structure of the film was examined by the XRD method to find out its crystal structure. Then the film was stretched to a length of 3.5 to 4 times of its original length. The crystal structure of the stretched film was reexamined by the XRD method. The XRD pattern indicates that the Bragg angles of planes (110) and (200) are 20.48° which is close to the value of 20.80° obtained by Das Gupta and Doughty work. Gold was sputtered onto the film as electrodes, and the poling fields of 40 to 80 MV/m were used. The dielectric constant of the film was measured by LCR meter. The dielectric constant values of 10.55 to 8.23 were obtained. The piezoelectric effect was measured using the interferometer. The values of piezoelectric coefficient  $d_{33}$  found to be in the range between 2.5 to 4.4 pm/V depending on the poling field.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Physics

Field of study Physics

Academic year 2004

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเรียบร้อย ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ดี รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ชนะ พิวล่อง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ และตรวจทานวิทยานิพนธ์ แก่ผู้วิจัยด้วยดีมาตลอด

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภสโรช หมั่นสิทธิ์ และขอขอบคุณ คุณปัญญา เขาน้ำแก้ว ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ทั้งสองท่านได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและให้ความสะดวกในการวัดค่าสัมประสิทธิ์โพอิซอเล็กทริก

ขอขอบคุณ คุณงยุทธ วรรณ เจ้าหน้าทีวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ประจำห้องเผาผลาญ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องวิเคราะห์ LCR meter และเตาอบสาร

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทรมิเตอร์ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ คุณปกรณ์ ปรีชาบุรณะ คุณศุภลักษณ์ อ่าลอย พี่ๆในห้องปฏิบัติการ และผู้มีส่วนร่วมอื่นๆ ที่ไม่สามารถเอ่ยนามได้ทั้งหมด ที่ได้ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้เสมอ

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนทุกๆด้าน มาโดยตลอด จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ปราบฏการณ์ไฟอไอโซอิเล็กทริกและแทรนส์คิวเซอร์.....	5
2.1 ปราบฏการณ์ไฟอไอโซอิเล็กทริก.....	5
2.2 คำศัพท์ประสิทธิไฟอไอโซอิเล็กทริก.....	6
2.3 วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์ไฟอไอโซอิเล็กทริก.....	11
2.4 ไฟอไอโซแทรนส์คิวเซอร์.....	16
บทที่ 3 फिल्मพอลิเมอร์พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	19
3.1 โครงสร้างผลึกพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	20
3.1.1 โครงสร้างผลึกแบบ II หรือ เฟสแอลฟา.....	20
3.1.2 โครงสร้างผลึกแบบ I หรือ เฟสเบตา.....	21
3.1.3 โครงสร้างผลึกแบบ III หรือ เฟสแกมมา.....	22
3.1.4 โครงสร้างผลึกแบบ IV หรือ เฟสเดลตา.....	22
3.1.5 โครงสร้างผลึกแบบ V และแบบ VI.....	23
3.2 วิธีการเตรียมฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	26
3.2.1 การรีดอัดฟิล์ม.....	26
3.2.2 การอัดเบ้า.....	27
3.2.3 การหล่อในสารละลาย.....	28
บทที่ 4 การเตรียมและพัฒนาแผ่นฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์เป็นแทรนส์คิวเซอร์.....	30
4.1 การเตรียมฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์โดยวิธีการหล่อในสารละลาย.....	30
4.2 การพัฒนาฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์เป็นแทรนส์คิวเซอร์.....	33
4.2.1 การยึดฟิล์ม.....	35
4.2.2 การอบฟิล์ม.....	41
4.2.3 การจัดขั้วไฟฟ้า.....	49

บทที่	หน้า
4.3 การทดสอบฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ที่เตรียมขึ้นได้โดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	51
บทที่ 5 สมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติโพซิโวลิตีของฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	54
5.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก.....	54
5.2 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	56
5.3 ทฤษฎีของระบบอินเทอร์เฟอร์โรมิเตอร์.....	66
5.3.1 การแทรกสอดของแสงและการประยุกต์ใช้ระบบอินเทอร์เฟอร์โรมิเตอร์วัดค่าสัมประสิทธิ์โพซิโวลิตี.....	66
5.3.2 ความเสถียรภาพของระบบอินเทอร์เฟอร์โรมิเตอร์.....	70
5.4 การวัดค่าสัมประสิทธิ์โพซิโวลิตี.....	73
5.5 สัมประสิทธิ์โพซิโวลิตีของฟิล์มโพซิโวลิตีพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์.....	74
5.6 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก .....	82
ภาคผนวก ก สมบัติทางกายภาพและไฟฟ้าของฟิล์มที่ชื่อมา.....	83
ภาคผนวก ข ข้อมูลของออปแอมป์ LF 353 .....	84
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	90



## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 การกระจัดทางไฟฟ้าเมื่อเกิดปรากฏการณ์โพธิโซอิเล็กทริก.....	6
รูปที่ 2.2 ทิศทางแรงที่กระทำต่อวัสดุ.....	8
รูปที่ 2.3 วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริก.....	12
รูปที่ 2.4 การติดตั้งการวัดค่าสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริกโดยอาศัยคลื่นเสียง.....	13
รูปที่ 2.5 การติดตั้งการวัดค่าสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริกโดยอาศัยแรงกด.....	14
รูปที่ 2.6 การติดตั้งการวัดค่าสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริกโดยอาศัยแรงดันกาซ.....	15
รูปที่ 2.7 การทำงานของทรานส์ดิวเซอร์.....	16
รูปที่ 2.8 รูปแบบของทรานส์ดิวเซอร์.....	18
รูปที่ 3.1 โครงสร้างโมเลกุล 4 แบบ ของ PVDF.....	19
รูปที่ 3.2 โครงสร้างผลึกของ PVDF เฟส แอลฟา .....	20
รูปที่ 3.3 โครงสร้างผลึกของ PVDF เฟส เบตา .....	21
รูปที่ 3.4 โครงสร้างผลึกของ PVDF เฟส แกมมา .....	22
รูปที่ 3.5 โครงสร้างผลึกของ PVDF เฟส เดลตา .....	23
รูปที่ 3.6 การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเฟสต่างๆของ PVDF.....	24
รูปที่ 3.7 แผ่นฟิล์มผลึกของ PVDF.....	25
รูปที่ 3.8 การกวาดเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ของฟิล์ม PVDF ที่ผ่านและไม่ผ่านการยืด.....	25
รูปที่ 3.9 การหล่อแบบสล็อต-คาย.....	26
รูปที่ 3.10 เครื่องอัดไฮดรอลิกที่ใช้เตรียมฟิล์ม โดยวิธีอัดเบ้า.....	27
รูปที่ 3.11 แผ่นฟิล์ม PVDF ที่ได้จากวิธีอัดเบ้าจากเครื่องอัดไฮดรอลิก.....	28
รูปที่ 3.12 ลักษณะแบบฟิงเกอร์ของฟิล์ม PVDF โดยเครื่องสแกนนิ่งไมโครสโคป.....	29
รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการเตรียมโดยวิธีหล่อฟิล์มในสารละลาย.....	31
รูปที่ 4.2 การเตรียมแผ่นฟิล์ม PVDF โดยวิธีหล่อในสารละลาย.....	32
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ขณะกวนสาร.....	32
รูปที่ 4.4 แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้โดยวิธีการหล่อในสารละลาย.....	33
รูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF ที่ผ่านการยืดและไม่ผ่านการยืด.....	34
รูปที่ 4.6 ลักษณะของเครื่องมือยืด.....	35
รูปที่ 4.7 แผนภูมิของเครื่องควบคุมมอเตอร์.....	36
รูปที่ 4.8 เฟืองทดรอบระหว่างอันใหญ่และอันเล็กโดยใช้สายแบบดินตะขาบ.....	37
รูปที่ 4.9 วงจรของเครื่องควบคุมมอเตอร์.....	38

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ญ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.10 ภาพของเครื่องควบคุมมอเตอร์.....	39
รูปที่ 4.11 ชุดเครื่องมือการยัดฟิล์ม PVDF.....	40
รูปที่ 4.12 ด้านหน้าของเตาอบ.....	41
รูปที่ 4.13 ส่วนประกอบผ่านในเตาอบ.....	42
รูปที่ 4.14 แผนภูมิของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ.....	43
รูปที่ 4.15 วงจรแหล่งจ่ายไฟคู่ขนาด $\pm 12$ โวลต์.....	44
รูปที่ 4.16 วงจรเครื่องควบคุมอุณหภูมิ.....	45
รูปที่ 4.17 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ.....	46
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้โดยไดโอดและเทอร์โมคอปเปิล.....	48
รูปที่ 4.19 การวางแผนอะลูมิเนียมฟอยล์ในการจัดขั้วไฟฟ้า.....	49
รูปที่ 4.20 การจัดขั้วของฟิล์ม PVDF.....	50
รูปที่ 4.21 ผลการกวาดเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ของฟิล์ม PVDF ที่ไม่ได้ยัด.....	52
รูปที่ 4.22 ผลการกวาดเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ของฟิล์ม PVDF ที่ผ่านการยัด.....	53
รูปที่ 5.1 การวัดความจุของฟิล์ม PVDF โดยวิธีไฟฟ้ากระแสตรง.....	56
รูปที่ 5.2 การวัดความจุของฟิล์ม PVDF โดยวิธีไฟฟ้ากระแสสลับ.....	57
รูปที่ 5.3 ค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มไพโอโซอิเล็กทริก PVDF ที่ความถี่ 1-100 กิโลเฮิร์ตซ์.....	59
รูปที่ 5.4 ค่าตัวประกอบของฟิล์มไพโอโซอิเล็กทริก PVDF ที่ความถี่ 1-100 กิโลเฮิร์ตซ์.....	60
รูปที่ 5.5 ค่าไดอิเล็กทริกของฟิล์มไพโอโซอิเล็กทริก PVDF ที่ความถี่ 1-100 กิโลเฮิร์ตซ์.....	61
รูปที่ 5.6 ค่าไดอิเล็กทริกส่วนจริงของฟิล์มไพโอโซอิเล็กทริก PVDF ตัวอย่าง B1 ที่สนามไฟฟ้าขณะจัดขั้ว 40 เมกะโวลต์ต่อเมตร.....	62
รูปที่ 5.7 ค่าไดอิเล็กทริกส่วนจินตภาพของฟิล์มไพโอโซอิเล็กทริก PVDF ตัวอย่าง B1 ที่สนามไฟฟ้าขณะจัดขั้ว 40 เมกะโวลต์ต่อเมตร.....	63
รูปที่ 5.8 ค่าไดอิเล็กทริกของฟิล์มไพโอโซอิเล็กทริก PVDF ใช้สนามไฟฟ้าขณะจัดขั้ว 40-80 เมกะโวลต์ต่อเมตร ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์.....	64
รูปที่ 5.9 ค่าไดอิเล็กทริกของฟิล์มไพโอโซอิเล็กทริก PVDF ใช้สนามไฟฟ้าขณะจัดขั้ว 40-80 เมกะโวลต์ต่อเมตร ที่ความถี่ต่างๆ .....	65
รูปที่ 5.10 ความเข้มแสงที่จุดศูนย์กลางของริ้วแทรกสอดที่ $\Delta d$ ต่างๆ.....	67
รูปที่ 5.11 การสั่นในแนวความหนาของสารตัวอย่างเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก.....	68
รูปที่ 5.12 แผนผังอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์.....	71

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ฉ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.13 ที่จับยึดสารตัวอย่าง แทนวาง ตัวแบ่งแสง และกระจกอ้างอิง.....	71
รูปที่ 5.14 การยึดจับสารตัวอย่างของที่จับยึดสาร.....	72
รูปที่ 5.15 สารตัวอย่าง PVDF บนฐานรอง.....	72
รูปที่ 5.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดทางไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้องกันฟิล์ม.....	76
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์โพซิโชนิกและสนามไฟฟ้าให้แก่ฟิล์มขณะจัดจั่ว.....	77



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ชนิดของพลังงาน.....	17
ตารางที่ 4.1 ค่าอุณหภูมิที่วัดได้โดยใช้ไดโอดและเทอร์โมคอปเปิล.....	63
ตารางที่ 5.1 ค่าไดอิเล็กทริกสัมพันธ์กับการจัดขั้วไฟฟ้าของฟิล์มที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์.....	60
ตารางที่ 5.2 ความต่างศักย์ที่วัดได้ของฟิล์ม ที่สนามไฟฟ้าที่ใช้จัดขั้วต่างๆ.....	74



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

ในศตวรรษที่ 18 มีผู้พบว่าพลอยสี (tourmaline) เมื่อมีแรงกดบนก้อนพลอยสีทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นได้ ในปี ค.ศ. 1880 สองพี่น้องปีแอร์และแจค คูรี (Pierre and Jacques Curie) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectricity) ในผลึกบางชนิด เช่น ควอตซ์ (quartz) ทัวร์มาลีน (tourmaline) โทปาซ (topaz) และเกลือโรเชลล์ (rochelle salt) ปรากฏการณ์ที่พบนี้เป็นปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบตรง (direct piezoelectric effect)

ต่อมาปี ค.ศ. 1881 ลิปแมนน์ (Lippmann) ได้ทำนายโดยอาศัยทฤษฎีว่ามีปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบผกผัน (converse piezoelectric effect) ด้วย และพี่น้องตระกูลคูรีก็ได้ทำการทดลองพิสูจน์คำทำนายดังกล่าวนี้ได้สำเร็จในปี ค.ศ. 1881 เช่นกัน ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกได้กลายเป็นพื้นฐานสำคัญในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าเชิงกล (electromechanical devices) และอุปกรณ์ไฟฟ้าเชิงความร้อน (electrothermal devices) หรืออุปกรณ์ไพโรอิเล็กทริก โดยก่อนหน้านั้น ปีแอร์ คูรี ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์ไพโรอิเล็กทริกและความสมมาตรของผลึก

นับตั้งแต่การค้นพบปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกในปี ค.ศ. 1880 20 ปีต่อมาได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อวางรากฐานทางด้านไพโซอิเล็กทริกมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่มีส่วนในการศึกษาค้นคว้า นักวิจัยที่มีชื่อเสียง เช่น ลอร์ดเคลวิน (Lord Kelvin) โวลต์มาร์ วอยท์ (Woldemar Voigt) ร่วมกันวางทฤษฎีเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกอย่างเป็นระบบ มีการจัดกลุ่มผลึกโดยละเอียดตามความสมมาตร (symmetry) โดยผลึกไม่มีสมมาตรที่จุดศูนย์กลาง (noncentre symmetry) แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริก

ปี ค.ศ. 1917 พอล แลงจิวิน (Paul Langevin) ชาวฝรั่งเศส ได้ประยุกต์ใช้งานผลึกที่มีสมบัติไพโซอิเล็กทริกเริ่มเป็นรูปเป็นร่าง โดยประสบความสำเร็จจากการใช้ผลึกควอตซ์เป็นตัวกำเนิด (generator) และตัวตรวจจับ (detector) คลื่นเสียงที่เดินทางในน้ำ ซึ่งเป็นหลักการของเครื่องโซนาร์ (sonar)

ต่อมา เคดี (W.G.Cady) และมาสัน (W.P.Mason) จากห้องปฏิบัติการเบลล์ (Bell laboratory) สหรัฐอเมริกา ได้ริเริ่มประยุกต์ใช้ผลึกควอทซ์เป็นตัวสั่น (oscillator) และตัวกรอง (filter) ความถี่ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นมา ผลึกไพโซอิเล็กทริกโดยเฉพาะควอทซ์ กลายเป็นชิ้นส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแทบทุกชนิดไม่ว่าจะเป็น โทรทัศน์ นาฬิกา คอมพิวเตอร์ ฯลฯ และเริ่มต้นยุคการศึกษาค้นคว้าทางไพโซอิเล็กทริกทางการค้าและอุตสาหกรรมอย่างจริงจัง

ปี ค.ศ. 1940 -1965 สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และสหภาพโซเวียตได้ตั้งกลุ่มวิจัยเพื่อพัฒนาทางด้านวัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิดใหม่ๆ การพัฒนาที่สำคัญคือการค้นพบสมบัติไพโซอิเล็กทริกของวัสดุเซรามิกส์ (ceramic material) เซรามิกส์ชนิดแรกที่ได้รับการพัฒนา คือแบเรียมไทเทเนต (barium titanate, BaTiO<sub>3</sub>) และได้มีการพัฒนาต่อถึงกลุ่มเซรามิกส์เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (lead zirconate titanate, Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>) ที่แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ดีกว่า

ปี ค.ศ. 1969 คาวาอิ (H.Kawai) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกในพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น คือพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride, PVDF หรือ PVF<sub>2</sub>) โดยการยึดฟิล์ม จากนั้นให้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงแก่ฟิล์ม PVDF ที่อุณหภูมิค่าหนึ่งแล้วลดอุณหภูมิลง จากนั้นลดความต่างศักย์ให้เป็นศูนย์ก็จะได้ฟิล์มที่แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริก

หลังจากปี ค.ศ. 1965 การวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้วัสดุไพโซอิเล็กทริก มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว และแพร่หลายไปทั่วโลกได้มีการผลิตวัสดุไพโซอิเล็กทริกใหม่ๆ เช่น แทรนสดิวเซอร์ (transducers) ไฮโดรโฟน (hydrophone) เซนเซอร์ (sensors) ไมโครโฟน (microphone) ตัวจุดประกายไฟ (ignitor) เป็นต้น

ในปัจจุบันการวิจัยทางด้านไพโซอิเล็กทริกได้มุ่งไปที่การประยุกต์ใช้งานวัสดุที่มีสมบัติไพโซอิเล็กทริกชนิดต่างๆ มากขึ้น โดยเฉพาะด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่เน้นการลดขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ลง โดยอาศัยสมบัติไพโซอิเล็กทริกในการพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ นอกจากนี้ การวิจัยพื้นฐานทางด้านไพโซอิเล็กทริกก็ยังคงมีความสำคัญเพื่อพัฒนาด้านไพโซอิเล็กทริกให้ก้าวหน้ายิ่งขึ้น เช่น กระบวนการเตรียมสารตัวอย่าง การพัฒนาเครื่องมือวัดและเครื่องมือตรวจสอบชิ้นงาน ส่งผลให้การวิจัยทางด้านไพโซอิเล็กทริกก้าวหน้าตามไปด้วย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีความสนใจ พอลิเมอร์ PVDF เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและขึ้นรูปได้ง่ายกว่ากลุ่มเซรามิกส์ แต่แผ่นฟิล์ม PVDF ราคาค่อนข้างแพงและยังต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้พัฒนาการเตรียมฟิล์ม PVDF ที่ใช้เครื่องมือชุดใหญ่และราคาแพง มาใช้วิธีการหล่อในสารละลาย ซึ่งสามารถเตรียมขึ้นเองในห้องปฏิบัติการพื้นฐาน ซึ่งมีความสะดวกและสามารถเตรียมได้ง่าย และพัฒนาระบบการยึด ออบสาร เพื่อให้สารมีสมบัติไพโอโซอิเล็กทริก ตลอดจนใช้เทคนิคทางแสงที่มีความละเอียดและแม่นยำสูงในการวัด

### วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของสารไพโอโซอิเล็กทริกและสมบัติของฟิล์ม PVDF
2. หาวิธีการเตรียมฟิล์ม PVDF ที่สามารถเตรียมได้ในห้องปฏิบัติการ
3. ปรับปรุงกระบวนการพัฒนาฟิล์ม PVDF เป็นฟิล์มไพโอโซอิเล็กทริก โดยได้สร้างเครื่องยึดฟิล์มโดยใช้มอเตอร์ในการควบคุมการหมุนเพื่อให้แรงขณะยึดมีค่าเท่ากันทุกช่วงการหมุน และสามารถควบคุมอุณหภูมิของเตาอบได้ เป็นต้น
4. นำฟิล์ม PVDF ที่เตรียมและผ่านการยึดไปทดสอบ โครงสร้างผลึกโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
5. วัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์มไพโอโซอิเล็กทริก PVDF ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่บ่งบอกการตอบสนองทางไฟฟ้า
6. วัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโอโซอิเล็กทริกของฟิล์มไพโอโซอิเล็กทริก PVDF ที่เตรียมขึ้นโดยเทคนิคทางแสงในระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์
7. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสัมประสิทธิ์ไพโอโซอิเล็กทริกของฟิล์มไพโอโซอิเล็กทริก PVDF กับสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดจั่วไฟฟ้า

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

สามารถรู้วิธีการของกระบวนการผลิตฟิล์ม PVDF ตลอดจนการพัฒนาฟิล์ม PVDF เป็นฟิล์มไพโอโซอิเล็กทริก PVDF และสามารถรู้เงื่อนไขในการพัฒนาฟิล์มในขั้นตอนการยึดและการอบสาร ทั้งสามารถได้เรียนรู้และสามารถใช้เทคนิคการวัดทางแสงระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ ในการแสดง

สมบัติไพโอโซอิเล็กทริกของฟิล์มไพโอโซอิเล็กทริก PVDF ซึ่งกระบวนการต่างๆในงานวิจัยพื้นฐานด้านไพโอโซอิเล็กทริกนี้สามารถนำข้อมูลพื้นฐานไปประยุกต์ใช้ หรือนำไปพัฒนาสมบัติของฟิล์มให้ดีขึ้น งานวิจัยระดับประเทศมีศักยภาพเพียงพอที่จะพัฒนาต่อไปได้ หากได้รับการสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาอย่างจริงจังและต่อเนื่อง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



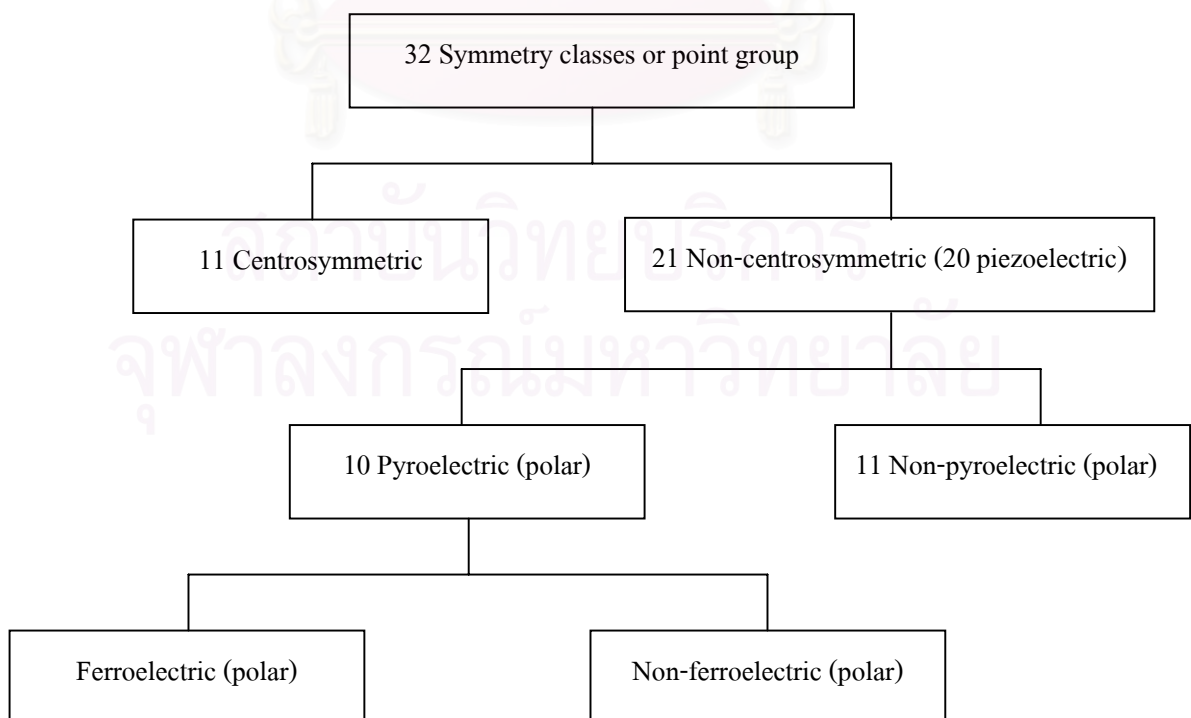
## บทที่ 2

### ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกและทรานส์ดีวเซอร์

#### 2.1 ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก

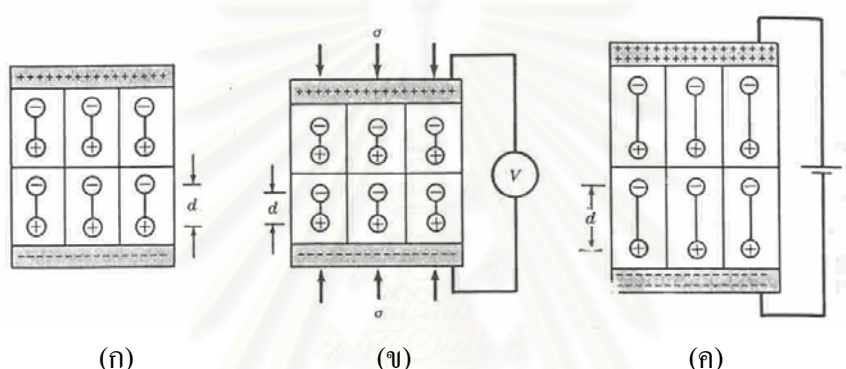
ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) คำว่า “piezo” เป็นภาษากรีกหมายถึง ความดัน (pressure) ส่วน “electric” หมายถึงไฟฟ้า ดังนั้น ไพโซอิเล็กทริกจึงหมายถึงไฟฟ้าที่เกิดจากความดัน คือเมื่อออกแรงหรือมีความเค้นกระทำต่อวัสดุสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณประจุไฟฟ้าบนผิวของวัสดุ โดยศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับแรงกระทำที่วัสดุได้รับ และเมื่อให้สนามไฟฟ้าผ่านเข้าไปในตัวของวัสดุจะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือเกิดความเครียดแก่วัสดุซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ให้แก่วัสดุ ลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกตรงและกลับ

วัสดุที่สามารถแสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้นั้นพบที่มีความอสมมาตร (asymmetry) กับจุดศูนย์กลางของเซลล์หน่วย (unit cell) จากโครงสร้างผลึกในระดับจุลภาค (microscopic) ทั้งหมด 32 แบบ point group จะมีโครงสร้างผลึก 20 แบบ ที่มีสมบัติไพโซอิเล็กทริก (Buchanan,1991) สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



## 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกมีด้วยกัน 2 แบบ คือปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบตรง (direct effect) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากความเค้นกระทำวัสดุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันขึ้นภายในวัสดุ ซึ่งจะให้ศักย์ไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.1(ข) โดยค่าโพลาไรเซชันมีค่าเท่ากับไดโพลสุทธิต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร และปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบกลับ (inverse effect) เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกลเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.1(ค) (Smith, 1993)



รูปที่ 2.1 การกระจัดทางไฟฟ้าเมื่อเกิดปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (ก) ไดโพลทางไฟฟ้าภายในสารไพโซอิเล็กทริก (ข) เมื่อให้ความเค้นกระทำแก่สาร (ค) เมื่อให้สนามไฟฟ้าภายนอกแก่สาร

ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกสามารถนิยามโดยอาศัยทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ (thermodynamics) พิจารณาการเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างสมบัติทางกล ไฟฟ้าและความร้อน เมื่อกำหนดให้  $X, E$  และ  $T$  แทนความเค้น (stress) สนามไฟฟ้า (electric field) และอุณหภูมิ (temperature) ตามลำดับ โดยตัวแปรอินเทนสียฟ (intensive variables) เหล่านี้เป็นตัวแปรอิสระ (independent variables) และให้  $x, D$  และ  $S$  แทนความเครียด (strain) การกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) และเอนโทรปีต่อปริมาตร (entropy per volume) ตามลำดับ ดังนั้นสมการปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแสดงในรูปสมการสถานะเชิงเส้น (linear equations of states) ได้ดังนี้ (Nye, 1957)

$$D_n = P_n^x \Delta T + d_{nkl}^T X_{kl} + e_{nm}^{x,T} E_m \quad 2.1 \text{ (ก)}$$

$$x_{ij} = \alpha_{ij}^E \Delta T + s_{ijkl}^{E,T} X_{kl} + d_{mij}^T E_m \quad 2.1 \text{ (ข)}$$

$$\Delta S = \left( \frac{\rho c^{X,E}}{T} \right) \Delta T + \alpha_{ij}^E X_{ij} + p_m^X E_m \quad 2.1 \text{ (ก)}$$

- เมื่อ  $e$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)  
 $d$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient)  
 $p$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริก (pyroelectric coefficient)  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่น (density)  
 $C$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะต่อมวล (specific heat per mass)  
 $s$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (elastic compliance coefficient)  
 $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวความร้อนเชิงเส้น (linear thermal expansion coefficient)

โดย  $s, \epsilon$  และ  $c$  เป็นค่าคงที่หลัก (principal constants) ที่แสดงสมบัติทางกล ไฟฟ้า และความร้อน ตามลำดับ ส่วน  $d, p$  และ  $\alpha$  เป็นค่าคงที่คู่ควบ (coupling constants) ของสองระบบ

ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบตรง เมื่อมีความเค้นกระทำต่อวัสดุไพโซอิเล็กทริก ทำให้เกิดการกระจัดทางไฟฟ้าขึ้น โดยไม่ป้อนสนามไฟฟ้า ( $E = 0$ ) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ( $\Delta T = 0$ ) ดังนั้น สมการ 2.1 (ก) สามารถเขียนใหม่ได้

$$D_n = d_{nkl}^T X_{kl} \quad 2.2 \text{ (ก)}$$

และในทางกลับกัน ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบกลับ เมื่อนำวัสดุไพโซอิเล็กทริกวางไว้ในสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดความเครียดขึ้น โดยไม่มีความเค้นมากระทำวัสดุ ( $X = 0$ ) และไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ( $\Delta T = 0$ ) ดังนั้น สมการ 2.1 (ข) สามารถเขียนใหม่ได้

$$x_{ij} = d_{mij}^T E_m \quad 2.2 \text{ (ข)}$$

ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก ซึ่งจาก 2.2(ก) และ 2.2(ข) ความเค้นและความเครียดอยู่ในรูปเทนเซอร์ อันดับ 2 และ ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกอยู่ในรูปเทนเซอร์ อันดับ 3

เทนเซอร์ความเค้น (stress tensor)  $X_{kl}$  คือ ปริมาณทางฟิสิกส์ที่อธิบายพฤติกรรมของวัสดุเมื่อมีแรงภายนอกกระทำ ซึ่งความหมายของความเค้น คือ แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีค่าเท่ากับแรงภายนอกที่กระทำต่อพื้นที่ตั้งฉากของวัสดุ

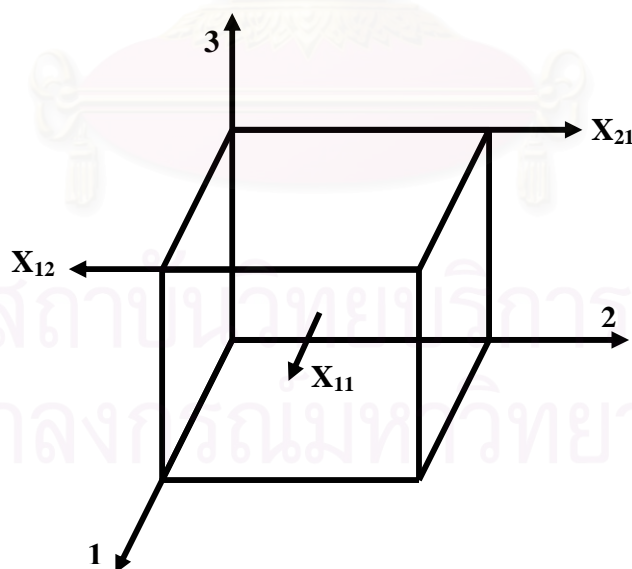
$$X_{kl} = \frac{P_k}{A_l}$$

เมื่อ  $X_{kl}$  คือ เทนเซอร์ความเค้น (stress tensor)(Pa)(1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>)

$P_k$  คือ แรงภายนอกที่กระทำต่อวัสดุ (N)

$A_l$  คือ พื้นที่ที่ถูกกระทำ (m<sup>2</sup>)

ความเค้นมีหลายชนิดขึ้นกับลักษณะของแรงที่กระทำ ได้แก่ ความเค้นดึง (tensile stress) ความเค้นอัด (compressive stress) และความเค้นเฉือน (shear stress) ดังนั้นในทางปฏิบัติความเค้นอาจเกิดขึ้นได้พร้อมๆกัน ตัวดัชนีล่าง  $k, l$  เป็นตัวระบุทิศทางของแรงที่กระทำต่อวัสดุ และพื้นที่ถูกแรงกระทำ ดังรูปที่ 2.2 โดย  $k, l$  มีค่าเป็น 1,2,3 ตามแนว  $x, y, z$  ในปริภูมิสามมิติ ซึ่งจะได้องค์ประกอบความเค้น 9 องค์ประกอบด้วยกัน



รูปที่ 2.2 ทิศทางแรงที่กระทำต่อวัสดุ

$$X_{kl} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} \end{pmatrix}$$

เมื่อพิจารณากรณีที่รูปร่างสมมาตร จะได้  $X_{kl} = X_{lk}$  และจากเทนเซอร์สามารถเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ (Lovell et al., 1981) ความเค้นดึงหรือความเค้นคั้น แทนโดย

$$X_1 = X_{11}$$

$$X_2 = X_{22}$$

และ  $X_3 = X_{33}$

ความเค้นเฉือน แทนโดย

$$X_4 = X_{23} = X_{32}$$

$$X_5 = X_{13} = X_{31}$$

และ  $X_6 = X_{12} = X_{21}$

ดังนั้น เขียนองค์ประกอบของความเค้นในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$X_t = \begin{bmatrix} X_1 & X_6 & X_5 \\ X_6 & X_2 & X_4 \\ X_5 & X_4 & X_3 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น จากสมการ 2.1(ก) อธิบายสมการปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบตรง เขียนใหม่ได้เป็น

$$D_n = d_{nt} X_t \quad 2.3 \text{ (ก)}$$

โดย  $n$  และ  $t$  บอกถึงทิศทางของโพลาริเซชัน และทิศของความเค้นที่กระทำต่อวัสดุ

จากสมบัติไดอิเล็กทริก ค่าการกระจัดทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามค่าโพลาริเซชัน ( $D = \epsilon_0 E + P$ ) และเมื่อให้ความเค้น  $X_t$  ซึ่งอยู่ในรูปเมตริกซ์ที่มีองค์ประกอบ 6 องค์ประกอบ กระทำต่อวัสดุไพโซอิเล็กทริก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันขึ้น ดังนั้น ค่าการกระจัดทางไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปเวกเตอร์ 3 องค์ประกอบ จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณโพลาริเซชันขึ้นกับขนาดและทิศทางของความเค้น ดังนี้

$$\begin{aligned}
 D_1 &= d_{11}X_1 + d_{12}X_2 + d_{13}X_3 + d_{14}X_4 + d_{15}X_5 + d_{16}X_6 \\
 D_2 &= d_{21}X_1 + d_{22}X_2 + d_{23}X_3 + d_{24}X_4 + d_{25}X_5 + d_{26}X_6 \\
 D_3 &= d_{31}X_1 + d_{32}X_2 + d_{33}X_3 + d_{34}X_4 + d_{35}X_5 + d_{36}X_6
 \end{aligned}$$

เทนเซอร์ความเครียด (strain tensor) คือ ปริมาณที่บ่งบอกลักษณะการเปลี่ยนแปลงของวัสดุ เมื่อมีแรงภายนอกกระทำโดย ความเครียด คือ ค่าสัดส่วนเปรียบเทียบระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม

$$x_{ij} = \frac{\partial U_i}{\partial P_j}$$

เมื่อ  $x_{ij}$  คือ เทนเซอร์ความเครียด (m/m)  
 $U_i$  คือ การกระจัดในทิศทาง  $i$  ในแกนผลึก  
 $P_j$  คือ ตำแหน่งอ้างอิงในทิศ  $j$

ดัชนี  $i$  และ  $j$  บอกลถึงทิศทางในระบบผลึกเช่นเดียวกันกับกรณีของเทนเซอร์ความเค้น และเทนเซอร์ความเครียดมีสมบัติความสมมาตรในระบบผลึก ดังนั้น  $x_{ij} = 0$  เมื่อ  $i = j$  และ  $x_{ij} = -x_{ji}$  เมื่อ  $i \neq j$  โดย  $i, j$  มีค่าเป็น 1,2,3 จะได้องค์ประกอบของเทนเซอร์ความเครียด 9 องค์ประกอบด้วยกัน

$$x_{ij} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \end{pmatrix}$$

และสามารถเขียนเทนเซอร์ความเครียดในรูปแบบเมทริกซ์ โดยอาศัยความสมมาตรของเทนเซอร์ ได้เป็น

$$x_s = \begin{bmatrix} x_1 & x_6 & x_5 \\ x_6 & x_2 & x_4 \\ x_5 & x_4 & x_3 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น จากสมการ 2.2 (๗) อธิบายสมการปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบกลับ ซึ่งเขียนใหม่ได้เป็น

$$x_s = d_{is}E_i \quad 2.3 \text{ (ข)}$$

โดย  $s$  และ  $i$  บอถึง ทิศทางการเกิดความเครียดและทิศทางของสนามไฟฟ้าภายนอก เมื่อนำสารวางไว้ในสนามไฟฟ้า  $E_i$  ซึ่งอยู่ในรูปเวกเตอร์ 3 องค์ประกอบ ตามแกน  $x, y, z$  ในระบบปริภูมิ วัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชัน ทำให้มีการหดหรือขยายตัวของผลึกเกิดความเครียด  $x_s$  ซึ่งมีองค์ประกอบอยู่ 6 องค์ประกอบดังนี้

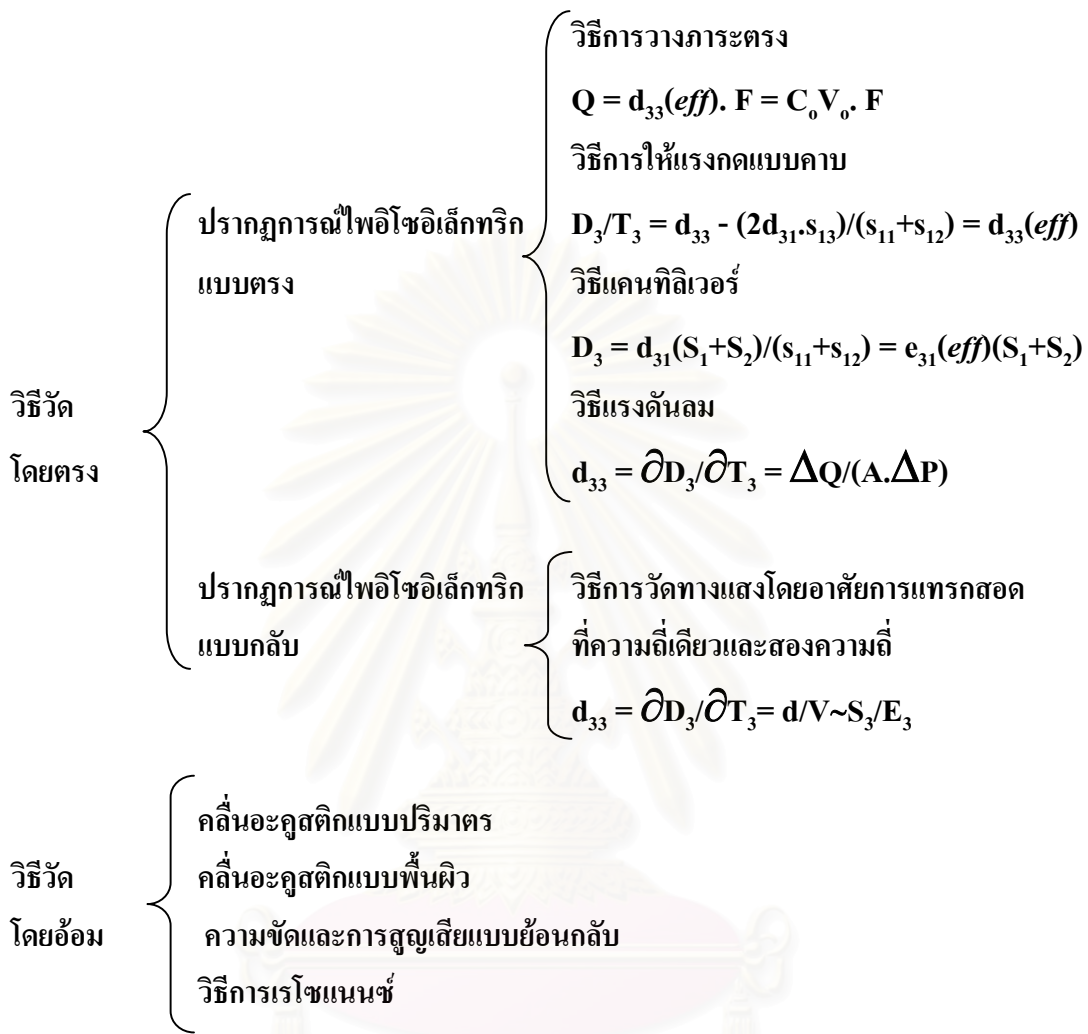
$$\begin{aligned} x_1 &= d_{11}E_1 + d_{12}E_2 + d_{13}E_3 + d_{14}E_4 + d_{15}E_5 + d_{16}E_6 \\ x_2 &= d_{21}E_1 + d_{22}E_2 + d_{23}E_3 + d_{24}E_4 + d_{25}E_5 + d_{26}E_6 \\ x_3 &= d_{31}E_1 + d_{32}E_2 + d_{33}E_3 + d_{34}E_4 + d_{35}E_5 + d_{36}E_6 \end{aligned}$$

ซึ่งในงานวิจัยนี้ส่วนหนึ่งได้อาศัยปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบกลับ จากสมการ 2.3 (ข) เพื่อหาสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก โดยให้สนามไฟฟ้าแก่สารตัวอย่าง วัดความเครียดที่เกิดขึ้นของสารตัวอย่างโดยอาศัยเทคนิคอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์

### 2.3 วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก

การวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกนั้น ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีหลายวิธี แบ่งตามลักษณะการวัดในการเกิดปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก ได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรก เป็นวิธีวัดโดยตรง (direct techniques) ซึ่งปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกสามารถเกิดขึ้นได้โดยตรงทั้งแบบทางตรง (direct effect) และแบบกลับ (reverse effect or indirect effect) และกลุ่มสองเป็นวิธีวัดโดยอ้อม (indirect techniques) ซึ่งอาศัยวิธีการเรโซแนนซ์ (resonance method) แสดงดังรูป 2.3 (Liu et al., 2002)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 วิธีการวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก

2.3.1 วิธีการวางภาระตรง (normal load method)

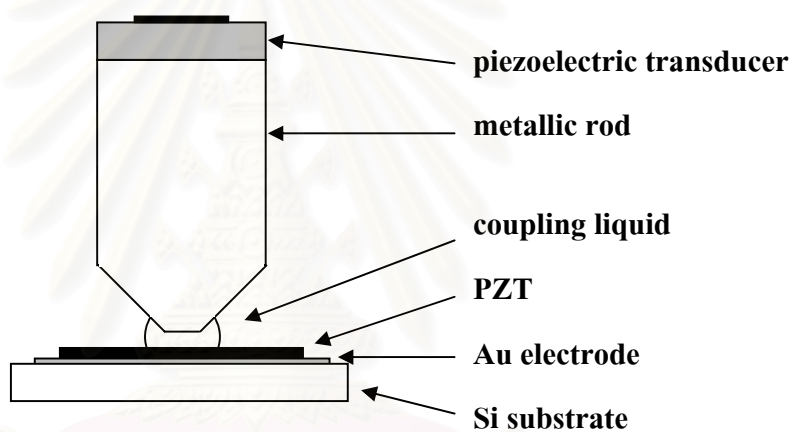
วิธีนี้อาศัยปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบตรง โดยการวางน้ำหนัก (หรือให้แรงกด) กระทำลงบนสารตัวอย่าง วัดและหาค่าประจุที่เกิดขึ้นบนผิวขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่าง โดยใช้อิเล็กโตรมิเตอร์ (electrometer) อัตราส่วนระหว่างประจุที่วัดได้ต่อแรงที่กระทำคือค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและง่าย แต่หากให้แรงกระทำแก่สารตัวอย่างมากเกินไปจะทำให้เกิดความเสียหาย



แก่สารได้ และการวัดประจุนั้นกระทำค่อนข้างยากเพราะเนื่องมาจากมีการรั่วไหลของประจุขณะให้แรงกระทำ ซึ่งวิธีนี้เหมาะกับสารที่เป็นจำพวกเซรามิกส์

### 2.3.2 วิธีการให้แรงกดแบบคาบ (periodic compressional force)

วิธีการนี้เป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีการวางน้ำหนักโดยตรง ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกสามารถหาได้โดยวัดค่าประจูดต่อแรงที่กระทำเช่นเดียวกับวิธีแรก เพียงแต่แรงที่ให้แก่สารตัวอย่างมีลักษณะแบบคาบ โดยอาศัยไพโซอิเล็กทริก แทรนส์ดิวเซอร์เป็นตัวกำเนิดคลื่นคล (pulse) ส่งผ่านแท่งโลหะ (metallic rod) และของเหลวคู่ควบ (coupling liquid) ทำหน้าที่นำส่งพลังงานงานการเปลี่ยนแปลงทางกล เช่น น้ำ ไปยังสารตัวอย่างดังรูปที่ 2.4



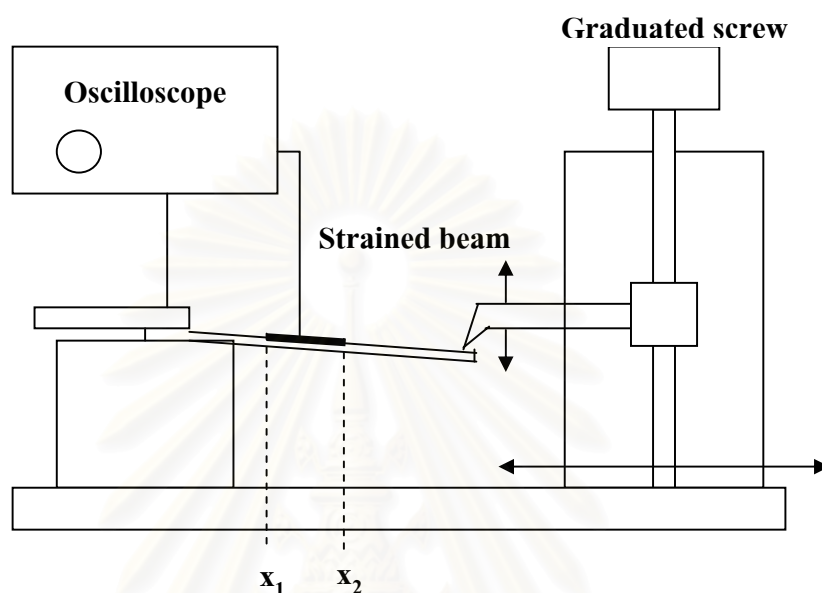
รูปที่ 2.4 การติดตั้งการวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกโดยอาศัยคลื่นเสียง

การวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกวิธีนี้ จำเป็นต้องเทียบประจุกับสารที่ทราบค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกแล้ว สารที่ต้องการวัดจำเป็นต้องมีขนาดและรูปร่างเหมือนกันกับสารอ้างอิง และต้องเป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับ ของเหลวคู่ควบจึงสามารถใช้วิธีนี้ได้

### 2.3.3 วิธีแคนทิลิวอร์ (cantilever method)

วิธีนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมโดยสารตัวอย่างจะถูกนำไปวางไว้บนคานชิลิคอน โดยปลายด้านหนึ่งถูกตรึงไว้และปล่อยอีกด้านหนึ่งไว้อย่างอิสระ ดังรูปที่ 2.5 ด้านบนของแผ่นสารตัวอย่างมีขั้วไฟฟ้า เมื่อให้แรงกระทำตามแนวดิ่งที่ปลายอิสระของคาน ทำให้เกิดความเค้นตามแนวความยาวของสาร

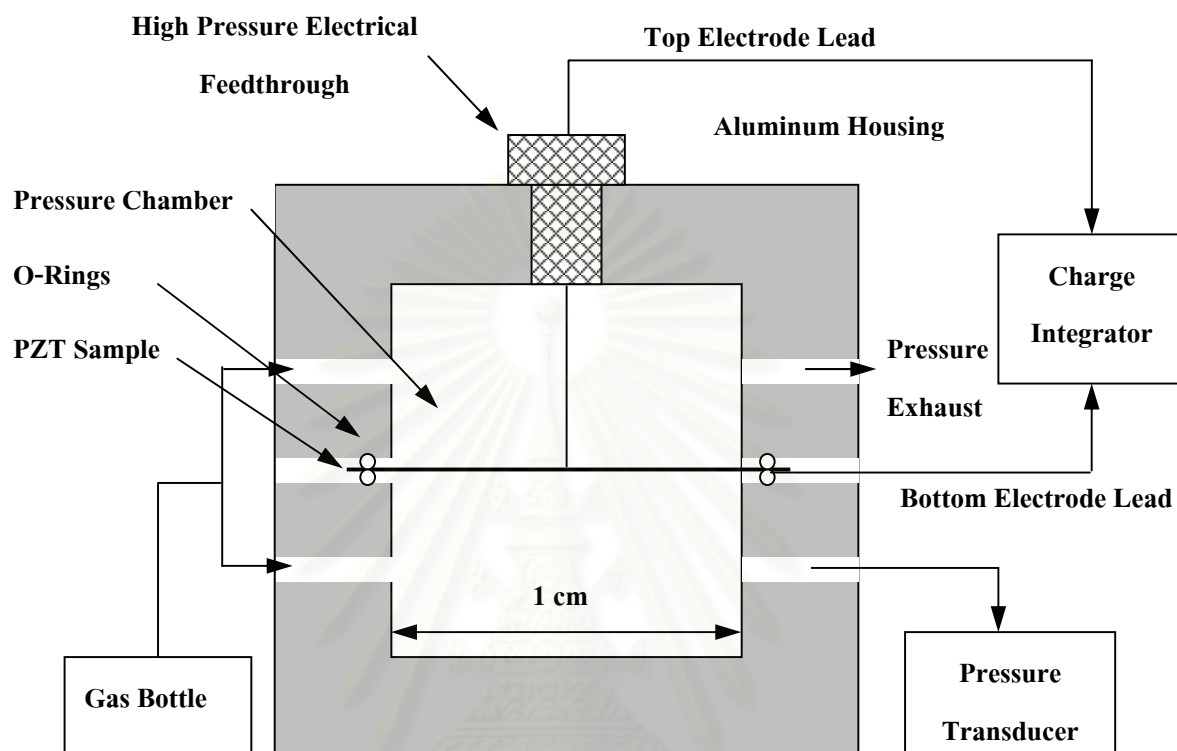
ตัวอย่าง สามารถวัดประจุบนผิวขั้วไฟฟ้านำมาหาค่าสัมประสิทธิ์โพอิโซอิลิกทริกโดยอาศัยปรากฏการณ์โพอิโซอิลิกทริกแบบตรง



รูปที่ 2.5 การติดตั้งการวัดค่าสัมประสิทธิ์โพอิโซอิลิกทริกโดยอาศัยแรงกด

#### 2.3.4 วิธีแรงดันลม (pneumatic pressure rig)

วิธีแรงดันลมเป็นวิธีการใหม่ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์โพอิโซอิลิกทริก โดยอาศัยปรากฏการณ์โพอิโซอิลิกทริกแบบตรง สารตัวอย่างถูกนำไปวางไว้ในช่องและยึดปลายทั้งสองไว้ ให้แรงดันก๊าซกระทำต่อสารตัวอย่างทั้งด้านบนและด้านล่าง เกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายทางไฟฟ้า สามารถวัดความจุที่ผิวของสารตัวอย่างนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์โพอิโซอิลิกทริกได้



รูปที่ 2.6 การติดตั้งการวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโซโซอิเล็กทริกโดยอาศัยแรงดันก๊าซ

### 2.3.5. วิธีการวัดทางแสง (optical interferometry)

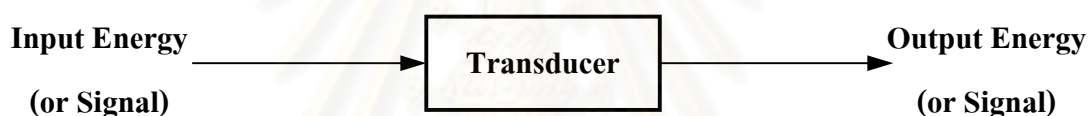
วิธีการวัดทางแสงอาศัยปรากฏการณ์แบบกลับ เป็นวิธีการวัดการกระจัดที่มีขนาดน้อยมากๆ ที่ผิวของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างอยู่ในสนามไฟฟ้า โดยดูจากการแทรกสอดของแสง ซึ่งวิธีนี้ไม่ทำอันตรายต่อสาร (nondestructive) มีความถูกต้องและกำลังแยกสูง (high accurate and resolution) กว่าวิธีข้างต้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีวัดทางแสงในการหาค่าสัมประสิทธิ์ไพโซโซอิเล็กทริก ของฟิล์มพอลิไว นิลิดีน ฟลูออไรด์ ซึ่งรายละเอียดอยู่ในบทที่ 5

### 2.3.6 อาศัยวิธีการเรโซแนนซ์ (resonance method)

วิธีการเรโซแนนซ์เป็นวิธีการวัดโดยอ้อม อาศัยการสั่นของสารตัวอย่างเมื่อป้อนความถี่ให้แก่สารที่ค่าความถี่ค่าหนึ่ง สารตัวอย่างจะสั่นด้วยแอมพลิจูดมากที่สุด ความถี่ค่านั้นจะเป็นความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งสามารถนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ไฟโอโซอิล็กทริก วิธีการนี้อาศัยเครื่องมือวิเคราะห์ค่าความขัด (impedance analyzer) สำหรับสารไฟโอโซอิล็กทริกพอลิเมอร์จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่ละเอียดกว่าสารจำพวกเซรามิกส์เนื่องจากแอมพลิจูดของการสั่นมีขนาดน้อยกว่าสารจำพวกเซรามิกส์มาก

### 2.4 ไฟโอโซแตรนส์ดีวเซอร์ (piezotransducers)

แตรนส์ดีวเซอร์ (transducers) เป็นวัสดุอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากรูปหนึ่งไปยังรูปอื่นๆที่เหมือนกันหรือต่างกันได้ (Ushor and Keating, 1996) แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การทำงานของแตรนส์ดีวเซอร์

โดยรูปแบบพลังงานขาเข้า (input energy) และพลังงานขาออก (output energy) สามารถอยู่ในรูปพลังงานต่างๆดังนี้

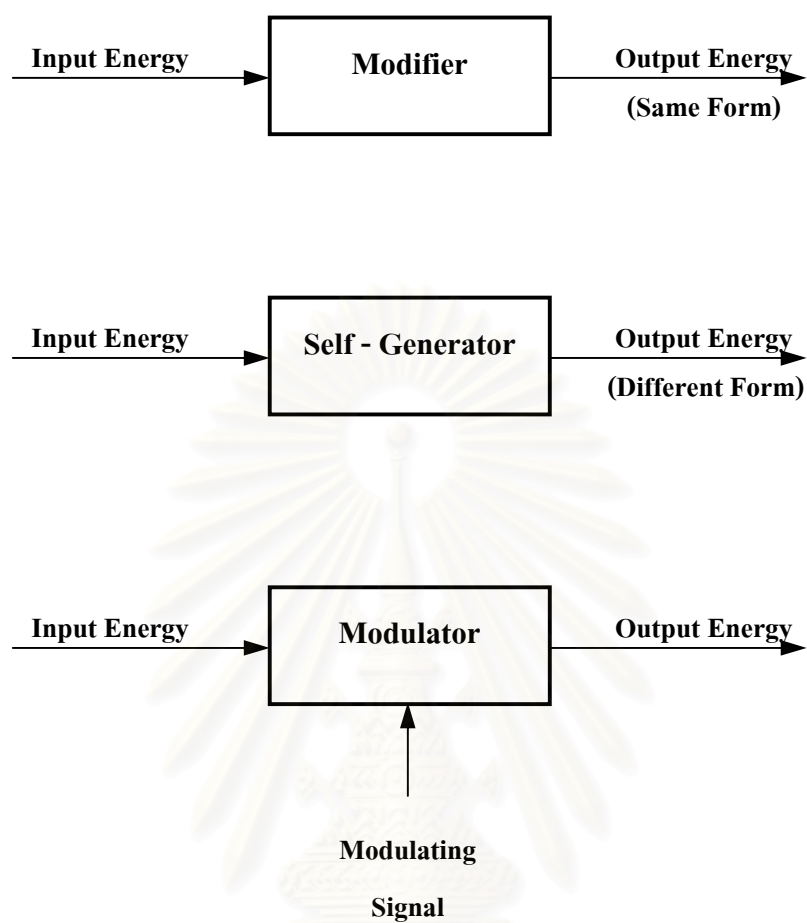
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดพลังงาน	รูปแบบและลักษณะ
พลังงานรูปของการแผ่รังสี	คลื่นช่วงความถี่วิทยุ แสงที่สามารถมองเห็นได้ และอื่นๆ
พลังงานเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	แรงโน้มถ่วง
พลังงานกล	การเคลื่อนที่, แรง และอื่นๆ
พลังงานความร้อน	พลังงานกลของอะตอมและโมเลกุล
พลังงานไฟฟ้า	สนามไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า และอื่นๆ
พลังงานแม่เหล็ก	สนามแม่เหล็ก
พลังงานโมเลกุล	พลังงานพันธะของโมเลกุล
พลังงานอะตอม	แรงระหว่างนิวเคลียสและอิเล็กตรอน
พลังงานนิวเคลียร์	พลังงานพันธะระหว่างนิวเคลียส
พลังงานมวล	พลังงาน ในรูป $E = mc^2$

### ตารางที่ 2.1 ชนิดของพลังงาน

เมื่อพิจารณารูปแบบพลังงานขาเข้าและพลังงานขาออกของแตรอนส์คิวเซอร์ สามารถจำแนกได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ 1. แบบ Modifier เป็นรูปแบบพลังงานขาเข้าและขาออกแบบเดียวกัน 2. แบบ Self-generator แตรอนส์คิวเซอร์สามารถเปลี่ยนรูปแบบพลังงานจากรูปหนึ่งไปยังอีกรูปได้ด้วยตัวเอง และ 3. แบบ Modulator แตรอนส์คิวเซอร์จำเป็นต้องอาศัยการป้อนสัญญาณหรือให้ค่าปริมาณทางฟิสิกส์กระทำแก่ตัวแตรอนส์คิวเซอร์ จึงจะสามารถเปลี่ยนรูปแบบพลังงานจากรูปหนึ่งไปยังอีกรูปหนึ่งได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



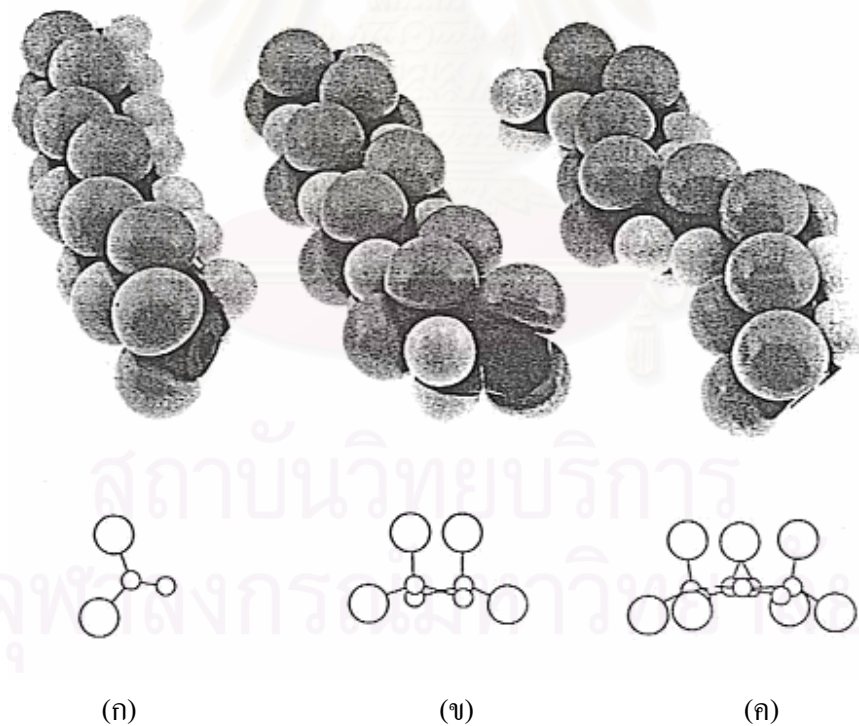
รูปที่ 2.8 รูปแบบของแตรนส์ดีวเซอร์

วัสดุไพโซอิเล็กทริกสามารถอาศัยปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกทั้งแบบตรงและแบบกลับ แสดงการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า (หรือพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานกล) และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลังงานขาเข้าและพลังงานขาออกของแตรนส์ดีวเซอร์ตรงตามแบบ Self-generator ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า สารที่มีสมบัติไพโซอิเล็กทริกสามารถเป็นแตรนส์ดีวเซอร์ได้ หรือเรียกว่า ไพโซแตรนส์ดีวเซอร์ (Ushor and Keating, 1996)

### บทที่ 3

#### ฟิล์มพอลิเมอร์พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงเนื้อหาที่เป็นส่วนของสารไพอิโซอิเล็กทริกที่สนใจคือ ฟิล์มพอลิเมอร์พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ หรือ PVDF เช่น โครงสร้างผลึก วิธีการเตรียมฟิล์ม แบบต่างๆ โดยโครงสร้างโมเลกุล (molecular structure) ของ PVDF มีลักษณะที่ซับซ้อนเนื่องจากมีถึง 6 แบบ แต่โดยทั่วไปพิจารณา 4 แบบ (Guy, 1987) (Wang, 1998) ดังรูปที่ 3.1 โดยมีนักวิทยาศาสตร์ทำการศึกษาเป็นจำนวนมากและได้มีการปรับปรุงแก้ไขต่อเนื่องกันมาตลอด (Hasegawa et al., 1972) (Lovinger, 1983) ทำให้เราทราบถึงโครงสร้างผลึก (crystal structure) และสมบัติต่างๆของ PVDF (Nalwa,1995)



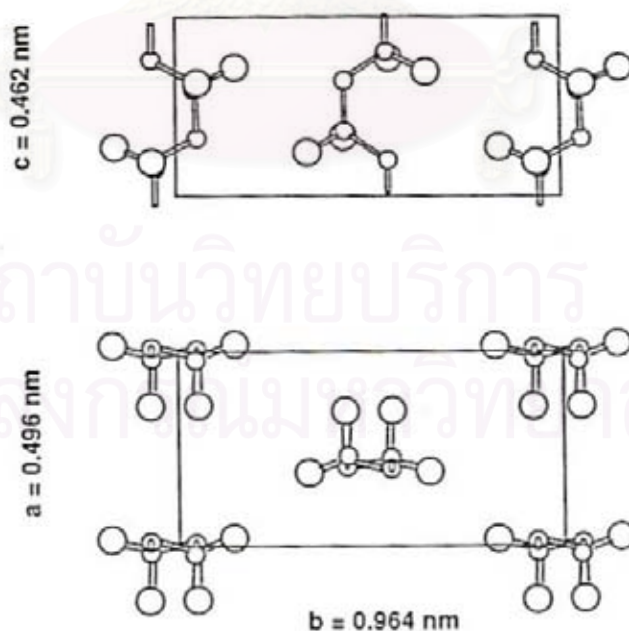
รูปที่ 3.1 โครงสร้างโมเลกุล 4 แบบของ PVDF (ก) เฟสเบตา (ข) เฟสแอลฟาและเดลตา และ (ค) เฟสแกมมา โดยวงกลมใหญ่และวงกลมเล็ก แทนอะตอมของฟลูออรีน และคาร์บอน ตามลำดับ

### 3.1 โครงสร้างผลึกของ PVDF

ฟิล์มพอลิเมอร์ไพโอโซอิเล็กทริกจะมีไดโพลถาวรทางไฟฟ้า (electric permanent dipole) เมื่อมีสนามไฟฟ้าความเข้มสูงทำให้ไดโพลจัดเรียงตัวตามทิศของสนามไฟฟ้า สำหรับ PVDF แสดงสมบัติไพโอโซอิเล็กทริกได้ (Wang,1998) จัดอยู่ในประเภทพอลิเมอร์กึ่งผลึก ประกอบด้วยมอนอเมอร์ (monomer)  $(CF_2CH_2)$  ต่อกันเป็นโซ่ยาว ประมาณ 30,000 ถึง 80,000 มอนอเมอร์ และมีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weights) อยู่ในช่วงตั้งแต่  $2 \times 10^6$  ถึง  $5 \times 10^6$  อุณหภูมิการหลอมเหลว (melt temperature) ที่ประมาณ 175-185 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคูรี อยู่ที่ 120 องศาเซลเซียส (Lovinger et al., 1986) โดยสมบัติทางไฟฟ้าของ PVDF ขึ้นกับลักษณะโครงสร้างผลึก

#### 3.1.1 โครงสร้างผลึกแบบ II หรือ เฟสแอลฟา ( $\alpha$ -phase)

ลักษณะผลึกมีโครงสร้างสเฟียรูไลต์ (spherulite) คือมีส่วนที่เป็นอสัณฐานและผลึกปนกัน โครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก (monoclinic) แบบมุม 90 องศา ( $\beta = 90^\circ$ ) (Kittle,1988) เซลล์หน่วย (unit cell) เป็นผลึกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular lattice) การวางตัวของโซ่คาร์บอน (carbon-carbon chain) เป็นแบบซีสระนาบ  $TGT\bar{G}$  (trans-gauche-trans-gauche) เนื่องจากอะตอมไฮโดรเจน (H) คาร์บอน (C) และ ฟลูออรีน (F) มีสภาพเป็นลบทางไฟฟ้า (electronegativity) เป็น 2.1 2.5 และ 4.1 ตามลำดับ ทำให้แต่ละมอนอเมอร์มีไดโพลถาวรแต่พบว่าในแต่ละเซลล์หน่วยจะมีสารโซ่โมเลกุลสองสาย โดยไดโพลของทั้งสองสายมีทิศสวนทางกัน จึงหักล้างกันหมด ทำให้ไม่มีผลไดโพลถาวรปรากฏ ดังรูปที่ 3.2

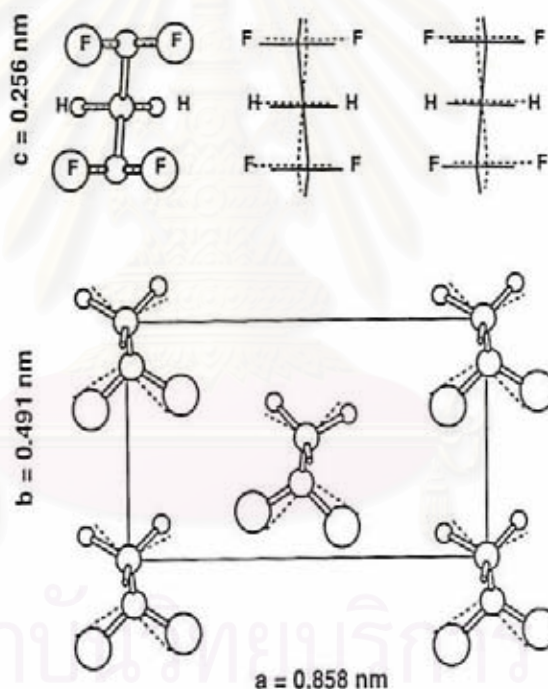


รูปที่ 3.2 โครงสร้างผลึกของ PVDF เฟสแอลฟา



### 3.1.2 โครงสร้างผลึกแบบ I หรือ เฟสเบตา ( $\beta$ -phase)

โครงสร้างผลึกนี้เป็นเฟสที่น่าสนใจมากที่สุด เนื่องจากมีบริเวณการเกิดผลึกมากกว่าเฟสอื่น โดยเฟสเบตา มีโครงสร้างแบบออร์ทอโรมบิก (orthorhombic) การวางตัวของโซ่คาร์บอนจะวางตัวซิกแซก ไซทรานา  $TTTT$  (all-trans : planar zigzag) โดยอะตอมคาร์บอนจะวางตัวอยู่ในระนาบหนึ่ง ส่วนฟลูออรีนและไฮโดรเจนจะวางตัวขึ้นลง จากการศึกษาย่างละเอียดโดยรังสีเอกซ์ เนื่องจากรัศมีแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals radius) ของอะตอมฟลูออรีนมีค่าเท่ากับ 1.35 อังสตรอม และระยะระหว่างจุดกึ่งกลางของอะตอมฟลูออรีนเท่ากับ 2.56 อังสตรอม ซึ่งใหญ่เกินไปที่จะบรรจุในโซ่โมเลกุล ทำให้อะตอมคาร์บอนจึงต้องวางตัวให้โซ่โมเลกุลบิดไปมาเล็กน้อย เพื่อเพิ่มเนื้อที่ให้แก่อะตอมฟลูออรีน มุมที่บิดไป (deflection angle) มีค่าประมาณ 7 องศา (Hasegawa et al.,1972) ดังรูปที่ 3.3



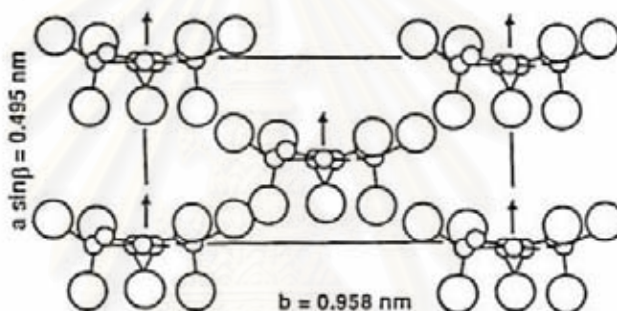
รูปที่ 3.3 โครงสร้างผลึกของ PVDF เฟสเบตา

จากรูปเซลล์หน่วยของผลึกเฟสเบตา แกน  $c$  เป็นแกนของโซ่โมเลกุล แต่ละเซลล์หน่วยประกอบด้วยโซ่โมเลกุล 2 สาย ที่มีแนวแกนขนานกัน แต่ละมอนอเมอร์มีไดโพลประมาณ

2.1 เฮอร์บาย ( $7.06 \times 10^{-30}$  คูบอมบ์เมตร) ทิศตั้งฉากกับโซ่โพลีเมอร์ และทิศของไดโพลแต่ละผลึกเป็นแบบสุ่ม (random) ดังนั้นเพื่อให้ไดโพลมีทิศไปทางเดียวกันจึงนำไปจัดขั้วทางไฟฟ้า (poling) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.2.3

### 3.1.3 โครงสร้างผลึกแบบ III หรือ เฟสแกมมา ( $\gamma$ - phase)

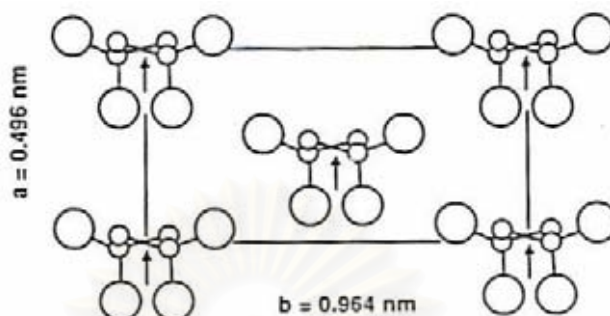
มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.4 เฟสนี้ได้มีการรายงานครั้งแรกโดยทาคาฮาชิ (Takahashi) และทาคาคิโด (Tadokodo) ต่อมาโลวินเจอร์ (Lovinger, 1981) ได้ยืนยันการวางตัวของสายโซ่คาร์บอนเป็นแบบ  $TTT\bar{G}TT\bar{G}$  ( $T_3GT_3\bar{G}$ )



รูปที่ 3.4 โครงสร้างผลึกของ PVDF เฟสแกมมา

### 3.1.4 โครงสร้างผลึกแบบ IV หรือ เฟสเดลตา ( $\delta$ - phase)

การวางตัวของโซ่คาร์บอนเดียวกันกับผลึกเฟสแอลฟา แต่ต่างกันว่าผลึกเฟสเดลตานั้นในแต่ละเซลล์หน่วยจะมีโซ่โพลีเมอร์สองสายโดยไดโพลทั้งสองสายมีทิศทางเดียวกัน ดังรูปที่ 3.5 หากให้สนามไฟฟ้าประมาณ 100 เมกะโวลต์ต่อเมตร ผลึกเฟสแอลฟาจะเปลี่ยนเป็นผลึกเฟสเดลตาได้ โดยที่รูปแบบของโซ่โพลีเมอร์และขนาดของเซลล์หน่วยยังคงสภาพเดิมเพียงแต่ไดโพลมีการจัดเรียงตัวใหม่ให้อยู่ในทิศเดียวกัน และถ้าเพิ่มสนามไฟฟ้าขึ้นไปอีกจนประมาณ 500 เมกะโวลต์ต่อเมตร ผลึกเฟสเดลตาจะเปลี่ยนเป็นผลึกเฟสเบตาได้ (Lovinger, 1981) โดยทั้งเฟสเดลตาและเฟสแกมมามีไดโพลโมเมนต์ถาวรแต่มีขนาดน้อยกว่าเฟสเบตา

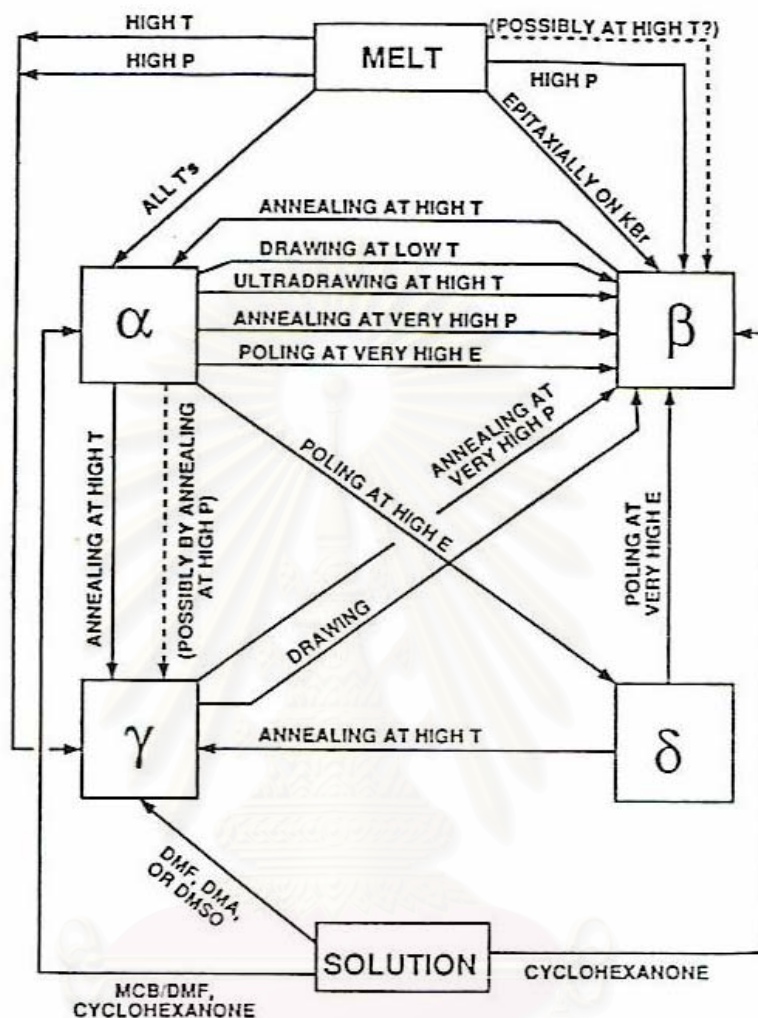


รูปที่ 3.5 โครงสร้างผลึกของ PVDF เฟสเดลตา

### 3.1.5 โครงสร้างผลึกแบบ V และ แบบ VI

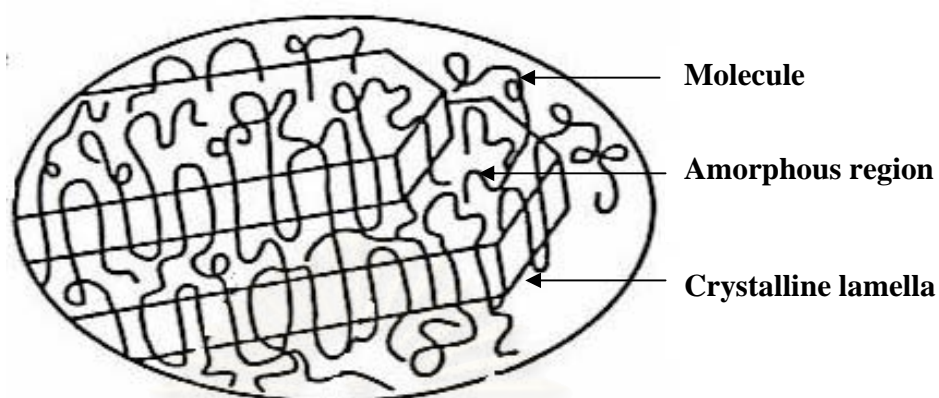
โดยลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V หรือ เฟสเอชซีลอน ( $\epsilon$ -phase) จะมีลักษณะของหน่วยเซลล์เหมือนกันกับเฟสแกมมา  $T_3GT_3G$  แต่การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลโดยที่ทิศทางของโซ่โมเลกุลมีทิศตรงข้ามกัน และโครงสร้างผลึกแบบ VI มีคุณสมบัติคล้ายกับเฟสแอลฟา (Nakamura and Wada, 1971) โครงสร้างผลึกของ PVDF ขึ้นกับวิธีการเตรียมสามารถเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างหนึ่งไปเป็นอีกโครงสร้างหนึ่งได้ขึ้นกับขบวนการเตรียมสาร การจัดซื้อ การยืด ตลอดจนการอบที่อุณหภูมิสูง แสดงได้ดังรูปที่ 3.6

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

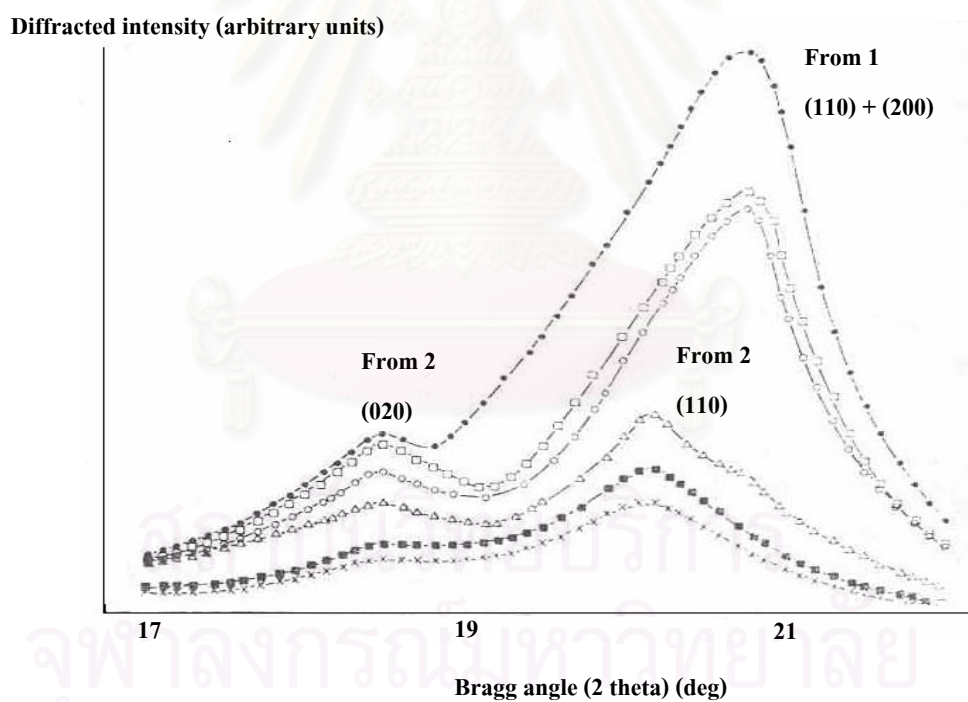


รูปที่ 3.6 การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเฟสต่างๆของ PVDF

ฟิล์ม PVDF จัดอยู่ในประเภทพอลิเมอร์กึ่งผลึก ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ (lamella) มีความหนาประมาณ 10-20 นาโนเมตร ประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลพับทบไปทบมา มีความยาวถึง 100 เท่าของความหนาแผ่นผลึก ดังรูปที่ 3.7 โดยแผ่นผลึกจะอยู่ระหว่างส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Broadhurst et al., 1978) เมื่อทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยอาศัยเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD) แสดงดังรูปที่ 3.8 (Das Gupta and Doughty, 1980)



รูปที่ 3.7 แผ่นผลึกของ PVDF



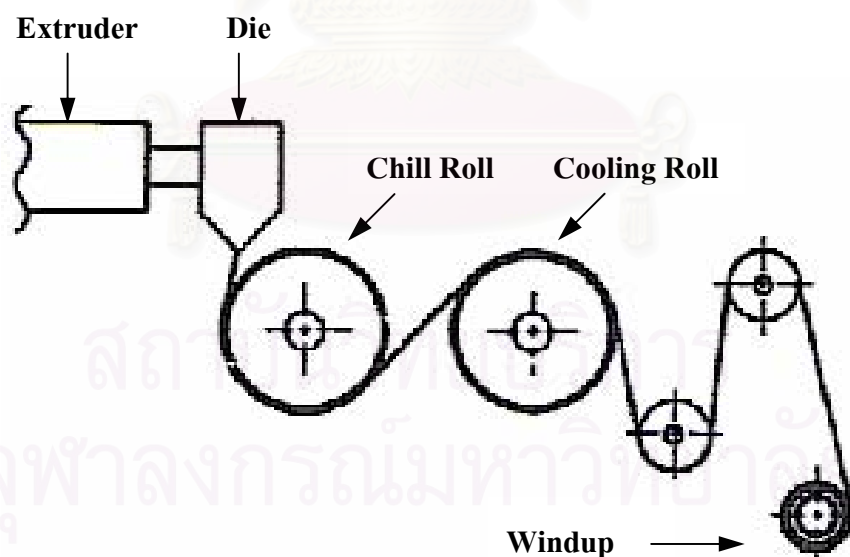
รูปที่ 3.8 การกราฟเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-ray diffractometer scan) ของฟิล์ม PVDF ที่ได้ผ่านการยืด อัตราการยืดเป็นจำนวนเท่าของเดิม ●,7:1; □,6:1; ○,5:1; ▲,3:1; ■,2:1; x,1:1

### 3.2 วิธีการเตรียมไฟโพลิเอทิลีนฟิล์ม

#### 3.2.1 การอัดรีดฟิล์ม (film extrusion)

วิธีการเตรียมฟิล์ม โดยอาศัยวิธีการหลอมซึ่งในการเตรียมวิธีนี้เริ่มต้นสารที่โซอยู่ในรูปเรซินหรือเม็ดพลาสติก ซึ่งจะถูกส่งเข้าไปยังเครื่องอัดรีด (extruder) โดยอาศัยสกรูเป็นตัวทำหน้าที่ส่งเม็ดพลาสติกเข้าไปในท่อร้อน เม็ดพลาสติกจะหลอมเหลวกันหมดตรงปลายของสกรูจากนั้นจึงส่งต่อไปยังส่วนตาย (die)

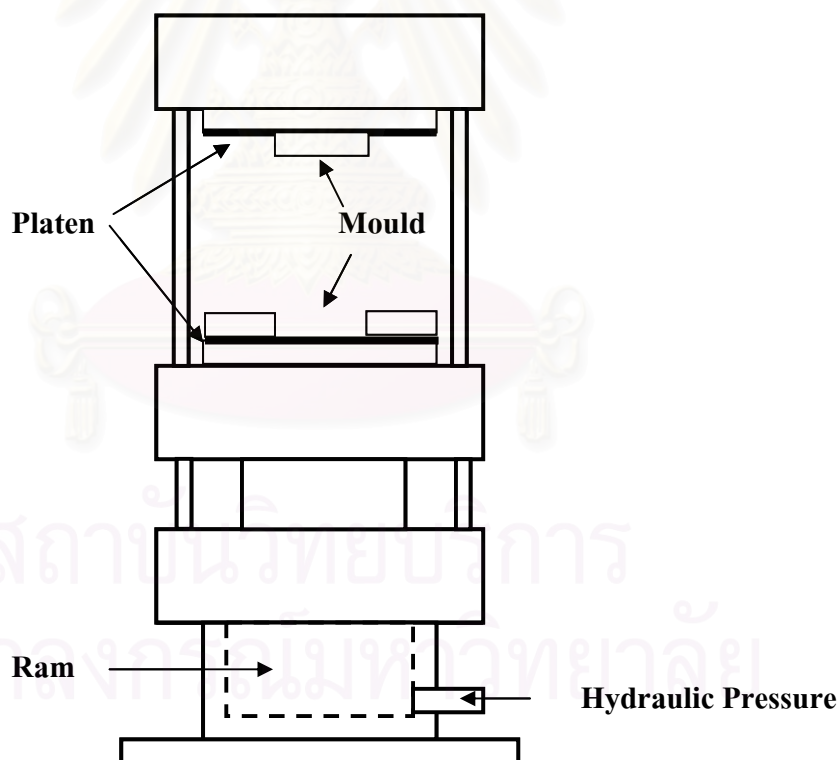
การขึ้นรูปฟิล์มหรือการหล่อ (casting film) โดยการทำให้พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวเย็นตัวลงกลายเป็นแผ่น มีหลายวิธี เช่น การหล่อโดยสล็อต-ตาย (slot-die) การเป่า (blow) และอื่นๆ ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีสล็อต-ตาย แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยเม็ดพลาสติกจะถูกหลอมเหลวด้วยเครื่องหลอมแล้วถูกส่งไปยังลูกกลิ้งเย็น (chill roll) พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวถูกรีดเป็นแผ่นและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว จากนั้นฟิล์มจะถูกส่งไปยังลูกกลิ้งถัดไปเพื่อรีดฟิล์มให้ได้ขนาดตามความต้องการ โดยอัตราเร็วของลูกกลิ้งต้องมีความสัมพันธ์กันทุกๆ ลูกกลิ้งซึ่งมีผลโดยตรงต่อการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของพอลิเมอร์ในแผ่นฟิล์ม วิธีนี้จะให้แผ่นฟิล์มที่ขนาดสม่ำเสมอ แต่ต้องใช้สารตั้งต้นจำนวนมาก จึงไม่เหมาะสำหรับพวกอิเล็กทริกพอลิเมอร์ ที่มีราคาแพง



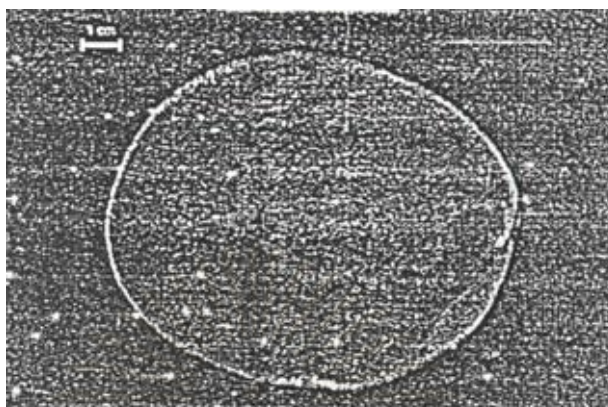
รูปที่ 3.9 การหล่อแบบสล็อต-ตาย

### 3.2.2 วิธีอัดเบ้า (compression moulding)

วิธีนี้มีกระบวนการโดยใช้แรงดัน ขณะเดียวกันก็ให้ความร้อน จนทำให้เม็ดพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยต้องอาศัยเครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic press) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งต้องเตรียมเบ้าสแตนเลสชนิดผิวมัน โดยนำมาวางบนแผ่นเหล็กด้านล่างของเครื่อง (platens) แล้วกดปุ่มให้แผ่นเหล็กดันขึ้นไปติดกับด้านบน (up-stroking) จากนั้นตั้งอุณหภูมิและแรงดัน โดยตั้งที่อุณหภูมิที่ 280 องศาเซลเซียส และความดัน 500 นิวตันต่อตารางเซนติเมตร ใช้เวลา 1.30 ชั่วโมง เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้ว ลดแผ่นเหล็กลงมาที่เดิม (down-stroking) ใส่เม็ดพอลิเมอร์ PVDF ซึ่งมีจุดหลอมเหลวประมาณ 175 องศาเซลเซียสลงไปเบ้า จากนั้นยกเบ้าขึ้นช้าๆ เมื่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์สูงกว่าจุดหลอมเหลว เม็ดพอลิเมอร์ก็จะเริ่มหลอมเหลว กดปุ่มให้แผ่นเหล็กด้านล่างดันขึ้นไปติดกับแผ่นเหล็กด้านบนจนสุดทิ้งไว้ 5 นาที แล้วนำเบ้าออกมาทิ้งไว้ให้เย็น (พุนศักดิ์, 2541) จากนั้นนำแผ่นฟิล์มออกมา โดยฟิล์มจะมีความหนาประมาณ 140-200 ไมโครเมตร แต่มีความหนาไม่เท่ากัน ดังนั้นควรเลือกส่วนที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 3.10 เครื่องอัดไฮดรอลิกที่ใช้เตรียมฟิล์มโดยวิธีอัดเบ้า

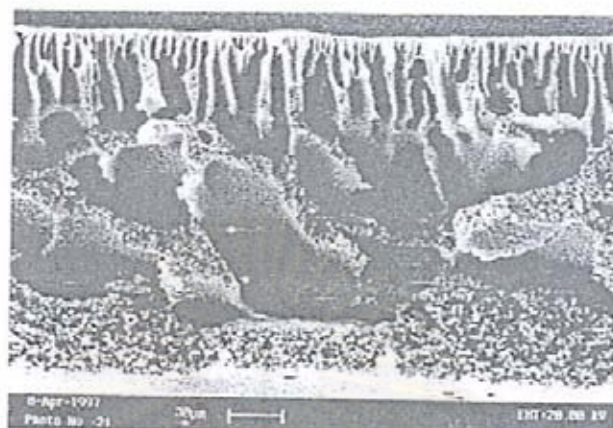


รูปที่ 3.11 แผ่นฟิล์ม PVDF ที่ได้จากวิธีอัดเป่าจากเครื่องอัดไฮดรอลิก

### 3.2.3 วิธีการหล่อในสารละลาย (solvent casting)

การหล่อฟิล์มในสารละลาย โดยนำผง PVDF มาทำละลายกับตัวทำละลาย เช่น ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (dimethylformamide, DMF) ไดเมทิลอะซิตาไมด์ (dimethylacetamide, DMA) ไดเมทิลซัลไฟออกไซด์ (dimethylsulfoxide, DMSO) เมทิลทูลไพโรลิโดน (N-methyl-2-pyrrolidone, NMP) และอื่นๆ (Bottino, 1991) ซึ่งสารละลายที่ได้มีโครงสร้างเฟสแตกต่างกันขึ้นกับตัวทำละลายและเงื่อนไขการทำให้แห้ง กระบวนการเตรียมวิธีนี้เป็นที่นิยมที่ง่ายและสะดวก ทั้งในรูปแบบแผ่นเรียบ (flat sheet) และแบบท่อ (hollow sheet) (Deshmuleh, 1998) ซึ่งเหมาะสำหรับการเตรียมสารในกรณีที่สารมีปริมาณน้อยและราคาแพง สามารถเตรียมได้ในห้องปฏิบัติการพื้นฐาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการหล่อในสารละลายในการเตรียมแผ่นฟิล์ม PVDF โดยใช้ตัวทำละลาย NMP ซึ่งจะให้รูปลักษณะแบบฟิงเกอร์ (Finger-like structure) (Magistris, 2000)





รูปที่ 3.12 ลักษณะแบบฟิงเกอร์ของฟิล์ม PVDF โดยเครื่องสแกนนิ่งไมโครสโคป (SEM micrographs)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

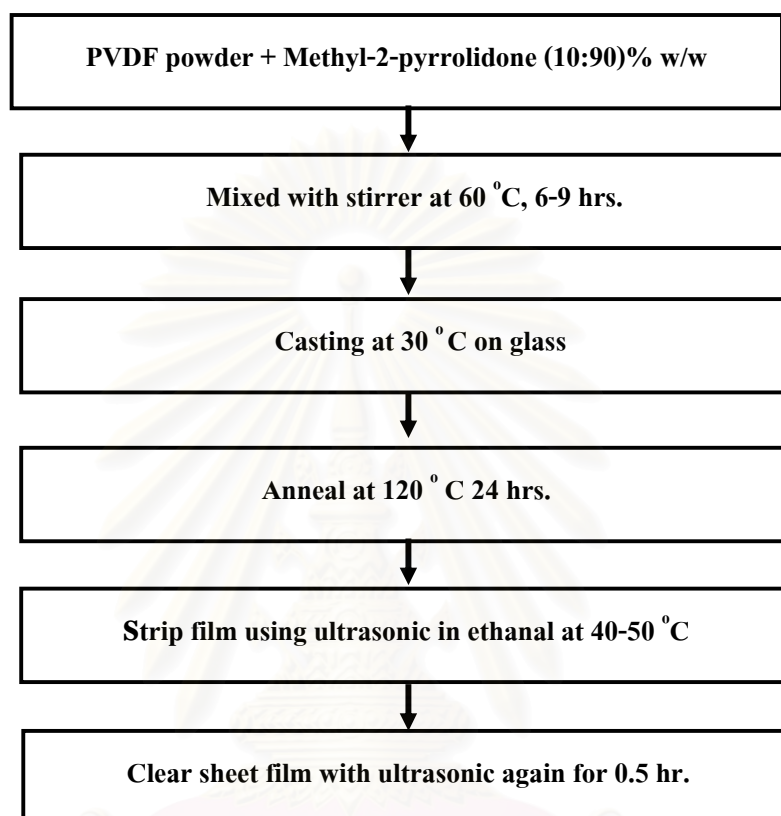
## บทที่ 4

### การเตรียมและพัฒนาแผ่นฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ เป็นทรานส์ดีวเซอร์

การเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF อาศัยวิธีการหล่อในสารละลาย ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวก สามารถใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการพื้นฐาน ฟิล์มพอลิเมอร์ PVDF จำเป็นต้องผ่านกระบวนการพัฒนาพอลิเมอร์ PVDF เพื่อให้มีสภาพไพโอโซอิเล็กทริกเพื่อเป็นทรานส์ดีวเซอร์นั้น ต้องผ่านขั้นตอนหลักๆด้วยกัน 3 ขั้นตอนคือ การยัดฟิล์ม การจัดขั้วไฟฟ้า และการทำขั้วไฟฟ้า จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือและอุปกรณ์หลายชิ้นด้วยกัน เช่น เครื่องยัดฟิล์ม เครื่องกำเนิดความต่างศักย์โวลต์สูง และเครื่องวัด เป็นต้น สำหรับอุปกรณ์สำเร็จรูปดังกล่าวมานี้ค่อนข้างแพง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้สร้างและพัฒนาเครื่องมือบางอย่างขึ้น ส่วนเครื่องมือบางชิ้นที่มีอยู่ก่อนแล้วจะศึกษาวิธีการใช้พร้อมทั้งปรับปรุงให้สามารถใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น

#### 4.1 การเตรียมฟิล์ม PVDF โดยวิธีการหล่อในสารละลาย (solvent casting)

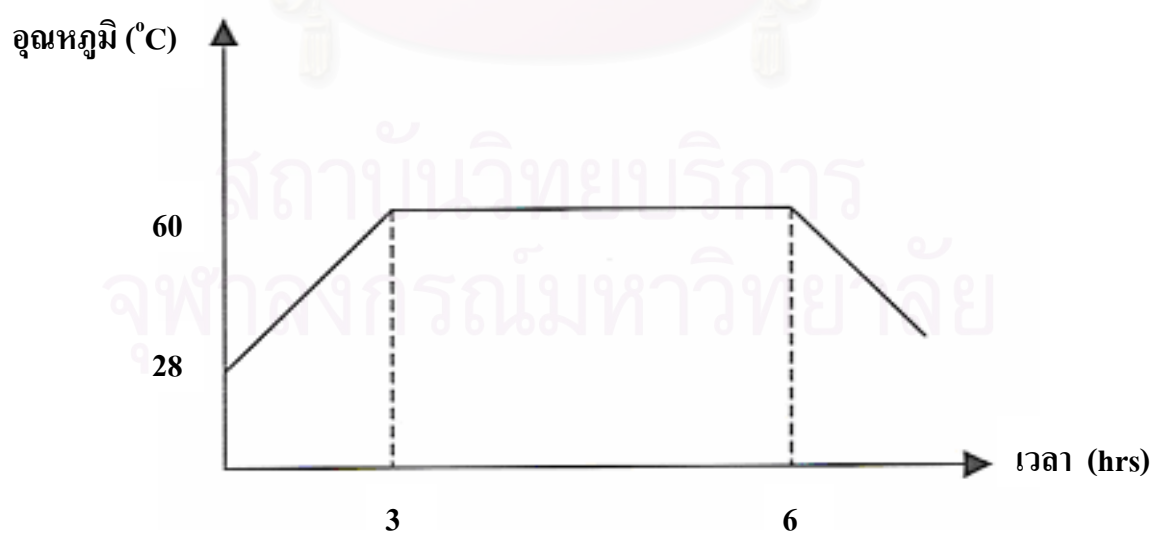
งานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์ม PVDF ใช้ผง PVDF 10% โดยน้ำหนัก ผสมกับตัวทำละลาย เมทิลทูลูโพรลิโดน (N-methyl-2-pyrrolidone, NMP),  $C_5H_9NO$  ที่มีจุดเดือด 202-204 องศาเซลเซียสโดยการนำผง PVDF และตัวทำละลาย NMP มาชั่งตามสัดส่วนที่ต้องการแล้วผสมกันในขวดรูปชมพู่ จากนั้นให้อุณหภูมิแก่สารซึ่งวางอยู่ในกระบะบรรจุน้ำ และกวนให้เข้ากัน โดยใช้เครื่องกวน (magnetic stirrer) รุ่น LABINCO L35 แสดงในรูปที่ 4.2 โดยอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงขณะกวน แสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งตั้งอุณหภูมิคงไว้ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง กระทั่งสารละลายเข้ากันได้สมบูรณ์ จากนั้นนำมาขึ้นรูปบนถาดแก้ว (pyrex) ที่สะอาด ขนาดความกว้าง 10.5 เซนติเมตร และความยาว 15.5 เซนติเมตร วางทิ้งไว้ 12 ชั่วโมงเพื่อให้สารพอลิเมอร์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ขั้นตอนนี้ต้องระมัดระวังไม่ให้มีฟองอากาศ หรือผงฝุ่นขณะขึ้นรูป ซึ่งหากมีฟองอากาศ หรือฝุ่นละออง จะทำให้ฟิล์มเสียหายได้ นำสารไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส (Mikyong, 2003) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเสร็จแล้วนำมาทำการลอกแผ่นฟิล์มในเอทานอล (ethanol)  $C_2H_5OH$  ที่มี Mw 46.07 และจุดเดือด 78 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (ultrasonic bath) ที่อุณหภูมิ 45-50 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 15-20 นาที เมื่อแผ่นฟิล์มหลุดออกมาแล้วให้ล้างต่อด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิคต่ออีก 15 นาที แผ่นฟิล์มที่ได้จะมีสีน้ำตาลใสและมีขนาดความหนาประมาณ 80-120 ไมโครเมตร แสดงในรูปที่ 4.4 และมีขนาดความหนาไม่เท่ากัน ดังนั้นควรเลือกส่วนที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการเตรียม โดยวิธีหล่อฟิล์มในสารละลาย



รูปที่ 4.2 การเตรียมแผ่นฟิล์ม PVDF โดยวิธีการหล่อในสารละลาย



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ขณะกวนสาร

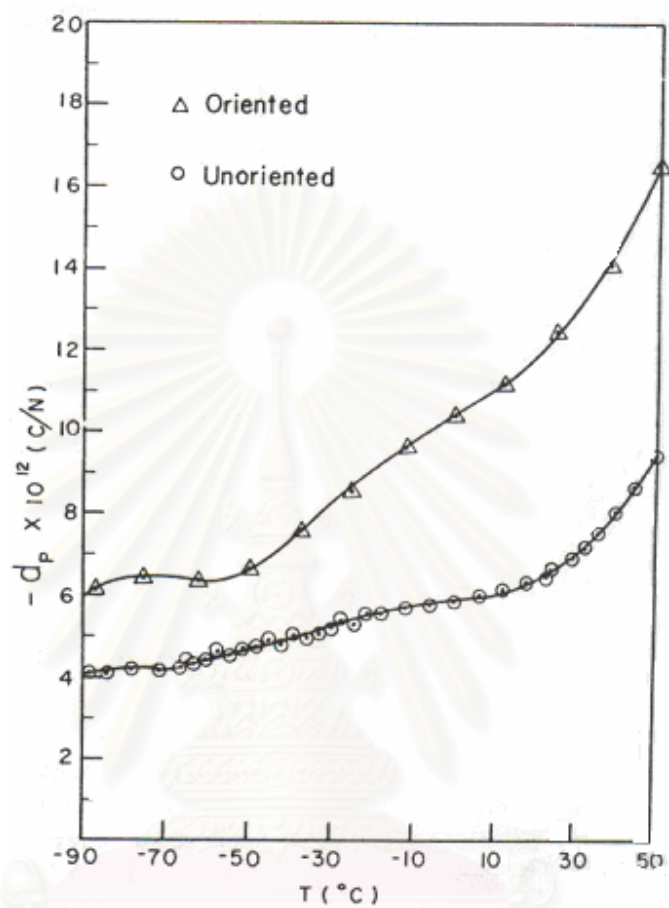


รูปที่ 4.4 แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้โดยวิธีการหล่อในสารละลาย

## 4.2 การพัฒนาแผ่นฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ เป็นแทรนส์ดีวเซอร์

### 4.2.1 การยัดฟิล์ม

ฟิล์ม PVDF ที่เตรียมโดยอาศัยวิธีการหล่อฟิล์มในสารละลาย เมื่อนำไปทดสอบกับเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ (XRD) ลักษณะของโครงสร้างผลึกอยู่ใน เฟสแอลฟา ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกแบบไม่มีขั้ว สารพอลิเมอร์ที่ได้จึงไม่มีสภาพโพธิโซอิเล็กทริก จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการยัดฟิล์มเพื่อให้สายโซ่โพลิเมอร์เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ เนื่องจากพันธะภายในสายโซ่โพลิเมอร์เป็นพันธะโควาเลนต์ และระหว่างสายโซ่โพลิเมอร์เป็นพันธะแวนเดอร์วาลส์ เมื่อฟิล์ม PVDF ได้รับแรงดึงจึงเกิดการเรียงตัวให้สายโซ่โพลิเมอร์อยู่ในแนวเดียวกับแรงที่ดึง มีผลทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนเฟสจากแอลฟาเป็นเบตา ดังนั้นขั้นตอนการยัดฟิล์มจึงมีความสำคัญในการพัฒนาพอลิเมอร์ PVDF ให้มีสภาพโพธิโซอิเล็กทริกเพื่อเป็นแทรนส์ดีวเซอร์ หากไม่ผ่านขั้นตอนการยัด ฟิล์มที่ได้จะมีสภาพโพธิโซอิเล็กทริกต่ำกว่าฟิล์มที่ผ่านการยัด แสดงดังรูปที่ 4.5

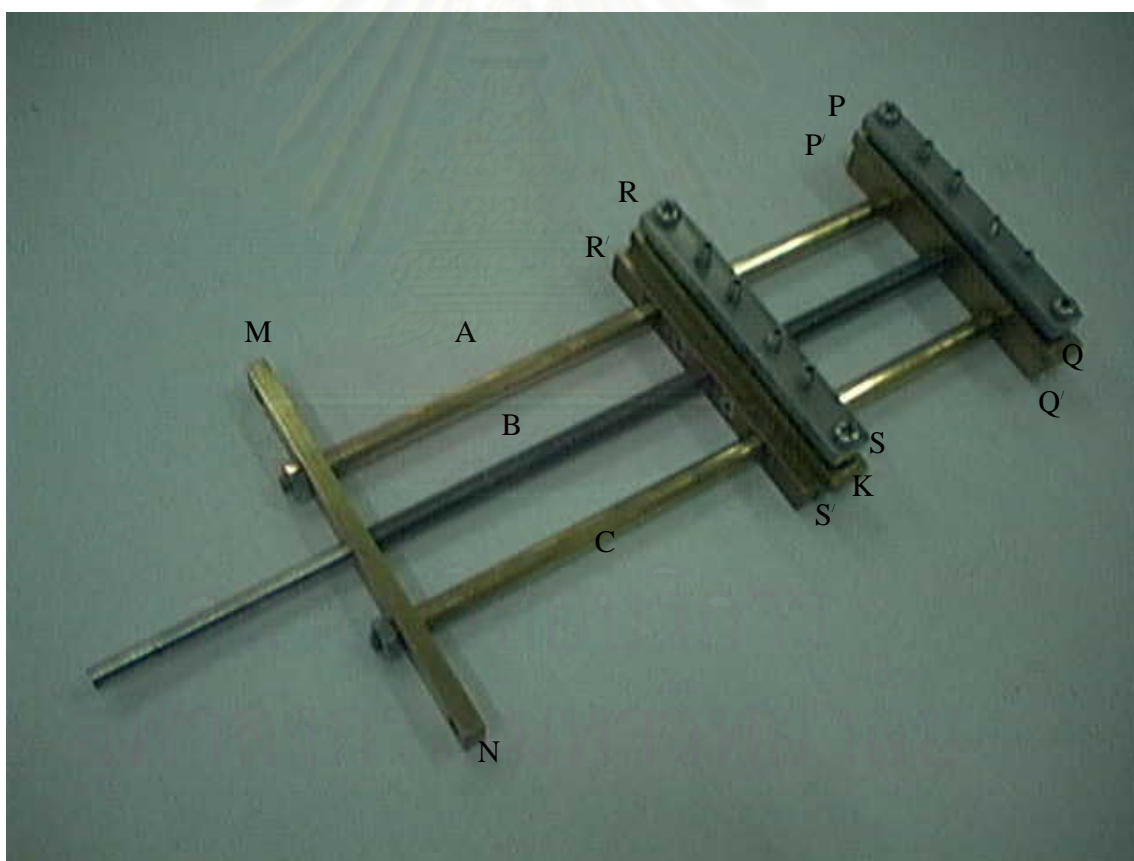


รูปที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF ที่ผ่านการยืด ( $\Delta$ )และไม่ได้ผ่านการยืด (O) ของฟิล์มที่อุณหภูมิต่างๆ (Chung et al.,1982)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.2.1.1 เครื่องยึดฟิล์ม

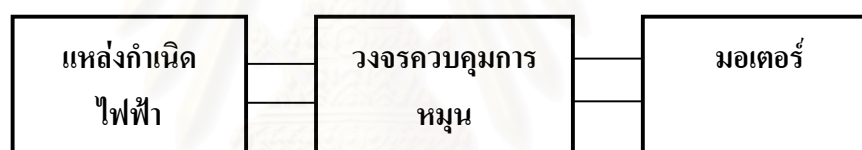
โครงของเครื่องยึดฟิล์มเป็นทองเหลือง แกน M, N จะยึดติดแน่นกับแท่งทองเหลือง P'Q' และ R'S' รูปเหลี่ยม มีความกว้าง 1.3 เซนติเมตร ยาว 9.8 เซนติเมตร และความหนา 0.7 เซนติเมตร ส่วน PQ และ RS เป็น stainless steel รูปเหลี่ยม มีความกว้าง 1.3 เซนติเมตร ยาว 9.8 เซนติเมตรและความหนา 0.6 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ด้านบนส่วนของ P'Q' และ R'S' โดย P'Q' ยึดติดกับ PQ และส่วน R'S' ก็ยึดติดกับ RS เช่นกัน แสดงในรูปที่ 4.6 ส่วนรูปสี่เหลี่ยม K เป็นแผ่นทองเหลือง มีความกว้างและหนาเท่ากับ PQ แต่ยาว 10.5 เซนติเมตร เมื่อขันนอตที่มีขนาด 5 มิลลิเมตร ทั้ง 4 ตัวให้แน่น นอตนี้จะกดแผ่น K ให้ติดกับแผ่น P'Q' โครงสร้างของแผ่น R'S' และ RS และ K ของชุดนี้ก็เหมือนกัน



รูปที่ 4.6 ลักษณะของเครื่องยึด

MN เป็นแผ่นทองเหลือง A, C ซึ่งเป็นทองเหลือง กลมยาวและตัน ทั้งสองตรึงติดแน่นกับ P/Q' และ MN แต่ตลอดทะเล R/S' แบบหลวมๆ ส่วน stainless steel กลมตัน B นั้น ด้านนอกเป็นเกลียวตัวผู้ลอดผ่านตรงกลาง R/S' รูนี้ เป็นเกลียวตัวเมีย ที่กระชับเกลียวของ B พอดี โดย B จะลอดผ่าน MN อย่างหลวมๆ แต่นอต N, N' ที่ติดกับ B จะบังคับไม่ให้ B เลื่อนเข้าออกเมื่อเทียบกับ MN ปลายของ B จมอยู่ในรูตรงกลางของ P/Q' เพียงครึ่งหนึ่ง จึงไม่เห็นรูนี้ เมื่อเกลียว B หมุนจะทำให้ RS และ R/S' เลื่อนห่างออกหรือเลื่อนเข้าหา PQ และ P/Q' ได้

ในขณะที่ใช้มือหมุนแกน B ทำให้ RS และ R/S' เลื่อนออกหรือเลื่อนเข้าหา PQ และ P/Q' ด้วยความเร็วที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อแรงดึงขณะยึดฟิล์มไม่เท่ากันในทุกช่วงการหมุน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาการยึดฟิล์มให้มีอัตราการหมุนคงที่ ได้ออกแบบชุดมอเตอร์ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์วงจรควบคุมการหมุน และแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 4.7



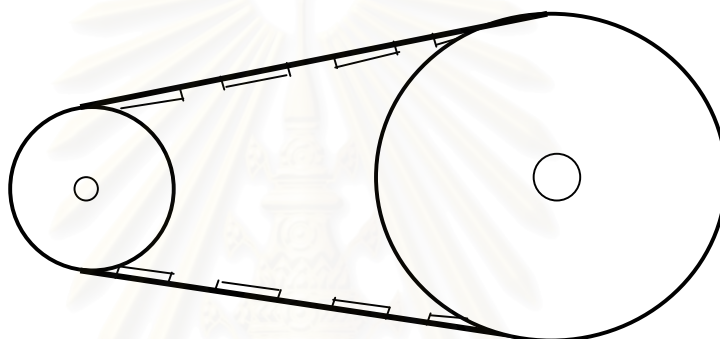
รูปที่ 4.7 แผนภูมิของเครื่องควบคุมมอเตอร์

มอเตอร์ที่ใช้เป็นชนิดกระแสตรง และมีเกียร์ทดรอบอยู่ภายในเพื่อเพิ่มแรงบิดแก่การหมุน มอเตอร์ให้มีความเร็วคงที่เมื่อมีโหลดหรือฟิล์มมาถ่วง แต่ความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้ยังคงมีความเร็วสูงกว่าความเร็วที่ต้องการ ดังนั้นเราจึงทดรอบมอเตอร์ภายนอก โดยอาศัยอัตราทดรอบ ที่มีค่าเท่ากับความเร็วการหมุนของล้อขับ ( $v_1$ ) ต่อความเร็วการหมุนล้อตาม ( $v_2$ ) เท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อตาม ( $d_2$ ) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางล้อขับ ( $d_1$ )

$$\text{จะได้} \quad v_1 d_1 = v_2 d_2$$



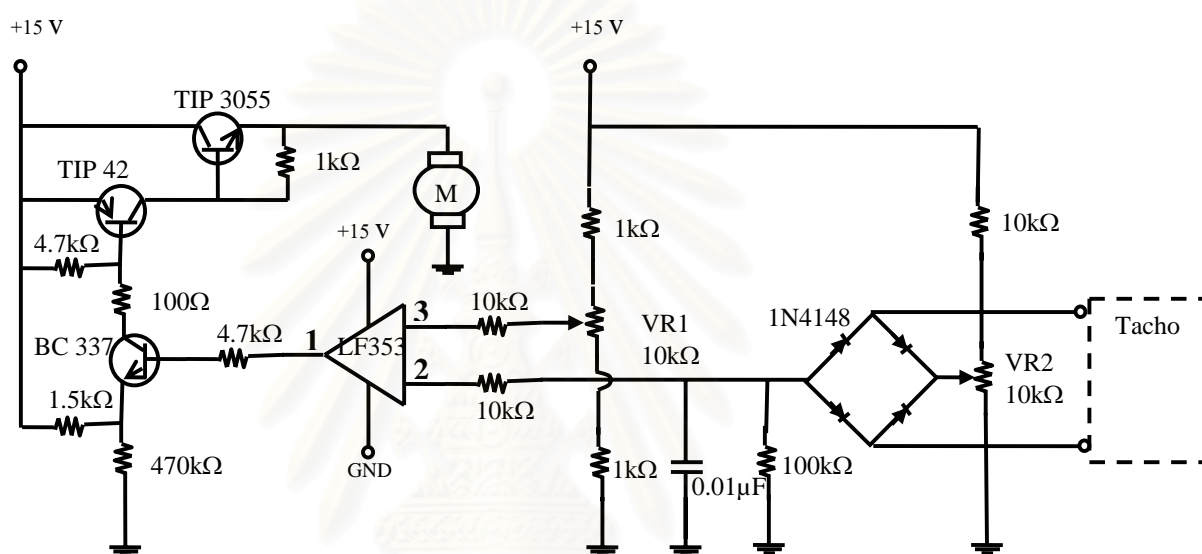
ดังนั้นจึงสามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ให้ลดลงโดยการทดรอบภายนอกด้วยเฟือง 2 ตัว ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกัน โดยเฟืองอันเล็กกว่าจับกับแกนของมอเตอร์ทดรอบ และเฟืองอันใหญ่กว่าจับกับแกน B ของเครื่องยึดฟิล์ม เฟืองอันใหญ่มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น 3 เท่าของเฟืองอันเล็ก ดังนั้นความเร็วที่ใช้หมุนแกนของเครื่องยึดฟิล์มจึงลดลงเป็น 3 เท่าด้วย โดยเฟืองอันเล็กส่งแรงขับไปยังเฟืองอันใหญ่โดยอาศัยสายพานแบบดินตะขาบ เพื่อให้ยึดเกาะได้ดี แสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งจะทำให้แกน B ของเครื่องยึดหมุนอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.8 เฟืองทดรอบระหว่างอันใหญ่และอันเล็กโดยอาศัยสายพานดินตะขาบ

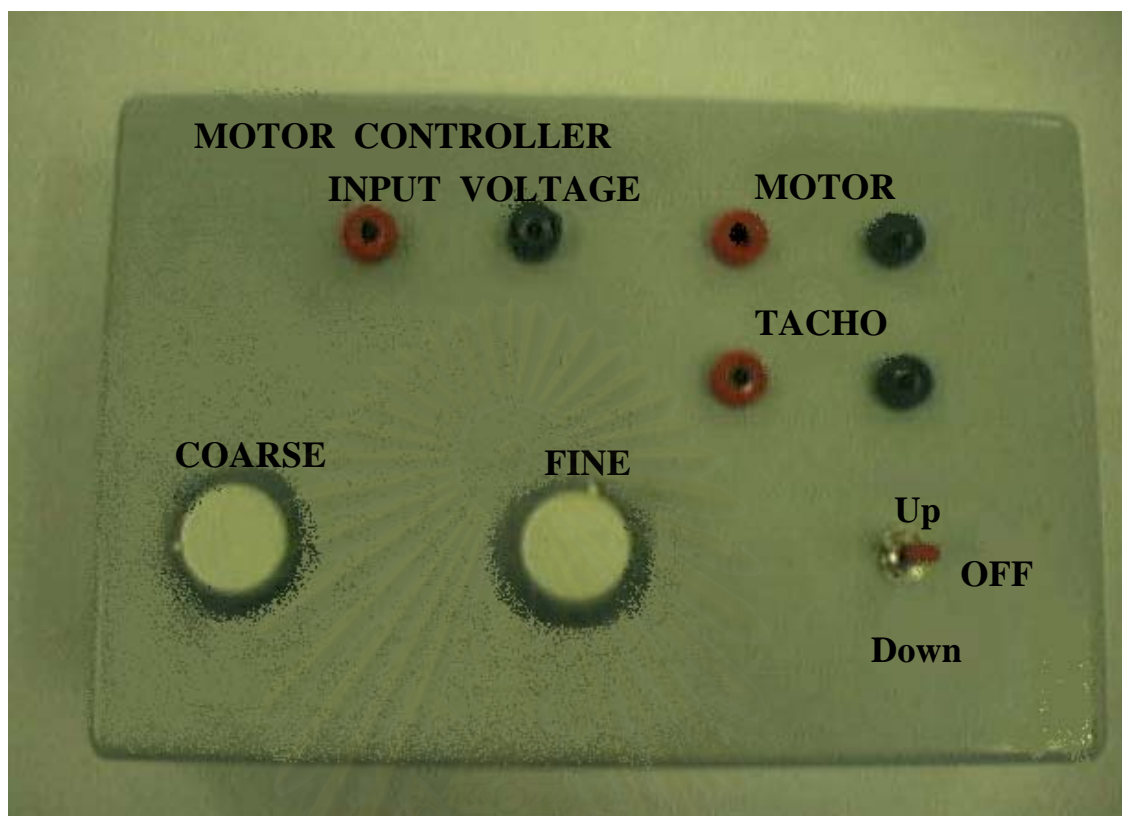
สำหรับวงจรไฟฟ้าของชุดควบคุมมอเตอร์ แสดงวงจรดังรูปที่ 4.9 ซึ่งใช้โอปแอมป์ (operational amplifier, op-amp) ในการควบคุมการหมุนมอเตอร์ ศักย์ไฟฟ้าที่ออกจากขา 1 ของ op-amp เกิดจากผลต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าของขา 2 และขา 3 ทำให้เกิดการหมุนและการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งหากขา 1 มีศักย์ไฟฟ้าค่าเป็นลบ ส่งผลทำให้มอเตอร์ไม่มีการหมุนหรือหยุดหมุน แต่หากค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นค่าบวก ทำให้มีกระแสไหลผ่านตัวทรานซิสเตอร์เข้าสู่มอเตอร์ทำให้มอเตอร์เกิดการหมุนและในส่วนการปรับความเร็วมอเตอร์ ได้อาศัย tachometer ที่ติดมากับมอเตอร์ เป็นตัวกำเนิดสัญญาณกระแสสลับ (ac signal generator) ซึ่งอยู่ติดกับแกนหมุนภายในมอเตอร์ เมื่อต้องการปรับความเร็วของมอเตอร์ สามารถปรับตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (VR) ตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ซึ่งทำให้

เกิดศักย์ไฟฟ้า ทั้งขา 2 และขา 3 ของ op-amp ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าของ tacho และขา 1 ของ op-amp มีค่าเปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อกระแสไหลเข้ามอเตอร์ ทำให้สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้ตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.9 วงจรของเครื่องควบคุมมอเตอร์

สำหรับการกลับทิศการหมุนนั้นทำได้โดยสับสวิทช์สองทาง ทำให้เกิดการสลับขั้วของศักย์ไฟฟ้าก่อนเข้ามอเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศ และทำให้ แท่งทองเหลือง RS และ R'S' ขึ้นลงได้ และด้านหน้าของเครื่องควบคุมมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 เครื่องควบคุมมอเตอร์

#### 4.2.1.2 ขั้นตอนการยึดฟิล์ม

ฟิล์ม PVDF ซึ่งตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะสอดอยู่ใต้แผ่น K สองแผ่นซึ่งวางอยู่บน P/Q และ R/S โดยขอบทั้งสองของแผ่น PVDF จะเสมอขอบซ้ายและขวาของ P/Q และ R/S ตามลำดับ เมื่อขันนอตทั้ง 4 ตัวที่ PQ และ RS ให้ตึงพอเหมาะ นอตที่จะกดแผ่น K ให้กดขอบซ้ายและขวาของแผ่น PVDF ให้ติดแน่นกับ ขอบ P/Q และ R/S ตามลำดับ จากนั้นนำไปจุ่มลงในน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวทำความร้อน (hot plate) และตัวควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) ให้อุณหภูมิคงที่ตลอดการยึดฟิล์ม ปรับความเร็วตามความต้องการบนตัวควบคุมความเร็วซึ่งต่อเข้ากับมอเตอร์ และในงานวิจัยนี้ใช้ความเร็ว 0.66 เซนติเมตรต่อวินาที อัตราส่วนการยึดคือ 3.5 ถึง 4 เท่าของความยาวเดิม ในการยึดฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.11

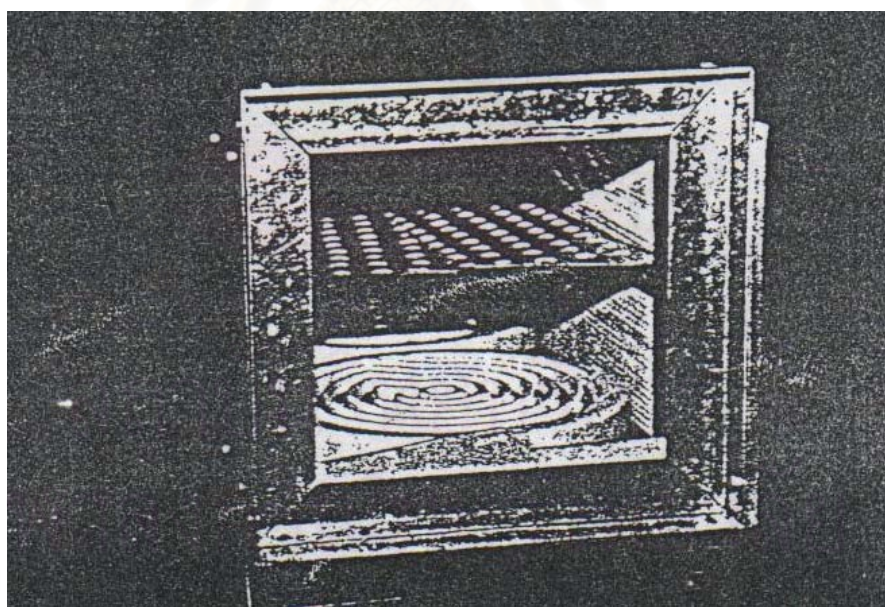


รูปที่ 4.11 ชุดเครื่องมือการยัดฟิล์ม PVDF

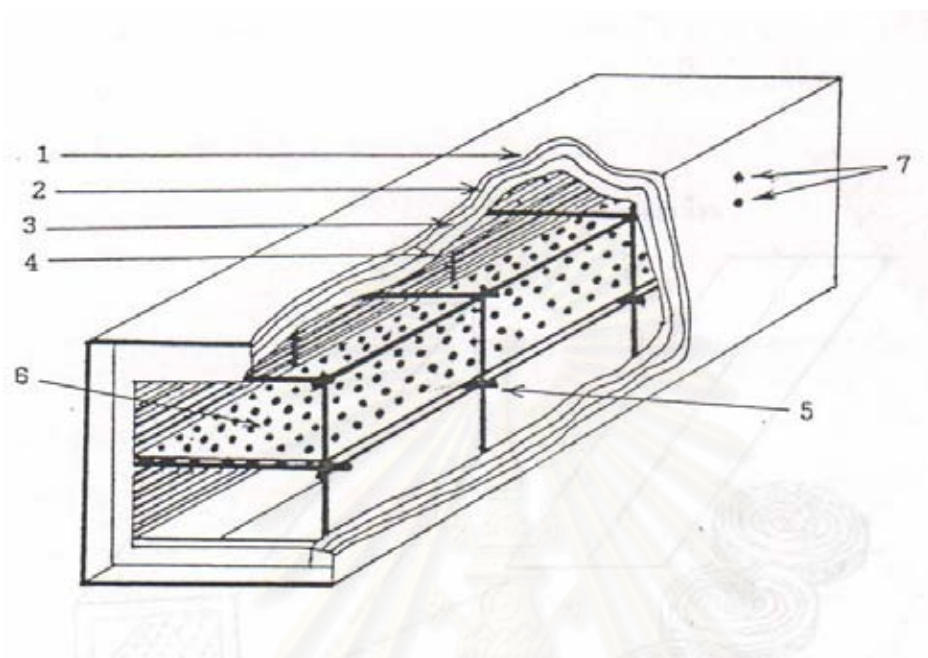
พบว่าท่อนโลหะ PQ และ RS ต้องมีความแข็งแรงสูงมาก กล่าวคือจะไม่เกิดการโก่งหรือโค้งงอ ดังนั้นจึงเลือกใช้แท่ง stainless steel อีกประการคือไม่เป็นสนิมเมื่อใช้ไปนานๆ ผิวของ K , P/Q/ และ R/S/ ต้องมีความเรียบมาก มิฉะนั้นอาจกดฟิล์ม PVDF ไม่ติดที่บางจุดได้ พบว่า ถ้าใช้แผ่นยางมารองบน และล่างของ PVDF อีกชั้นหนึ่งสามารถช่วยฟิล์มยึดติดได้ดีขึ้น และยังช่วยให้แรงที่กดลงบน PVDF เท่ากันทุกๆจุด หากแรงที่กดไม่เท่ากันจะทำให้สัดส่วนการยัดของฟิล์มไม่สม่ำเสมอและฟิล์มเกิดความเสียหายหรือขาดได้ และหากยัดมากกว่า 4 เท่า ฟิล์มขาดได้ง่าย

#### 4.2.2 การอบฟิล์ม

เนื่องจากแผ่นฟิล์มที่ยืดแล้วมีความไม่สม่ำเสมอของเนื้อสาร มีความเครียดเฉพาะแห่งในแผ่นฟิล์ม และผลึกบางส่วนกระจายไม่สม่ำเสมอ การอบจะทำให้ผลึกและสายโซ่โพลิเมอร์เกิดการสั่นไหวทำให้ผลึกเลื่อนตำแหน่งไป ผลึกกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น ความเครียดเฉพาะแห่งลดลง ข้อบกพร่องที่เกิดในขั้นตอนการยืดลดลง ดังนั้นการอบต้องทำในขณะที่แผ่นฟิล์มยังขึงตั้งอยู่กับเครื่องยืด อุณหภูมิที่ใช้อบต้องสูงกว่าอุณหภูมิขณะยืด แต่ไม่สูงเกินไป เพราะอาจทำให้โครงผลึกเปลี่ยนจากเฟสเบตาไปเป็นเฟสแอลฟาได้ ในงานวิจัยนี้การอบฟิล์ม PVDF ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และ เมื่อถอดฟิล์มออกจากเครื่องยืดพบว่าฟิล์มจะหดตัวเพียงเล็กน้อย เนื่องจากสมบัติวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) ของพอลิเมอร์ (มันส์ แซ่ด่าน, 2538) กล่าวคือพอลิเมอร์สามารถแสดงสมบัติผสมกันได้ระหว่างของเหลวหนืด (viscous liquid) และของแข็งยืดหยุ่น (elastic solid) โดยจะอยู่ในปรากฏการณ์ที่สำคัญได้แก่ การคืบ (creep) การผ่อนคลายความเค้น (stress relaxation) การคืนรูป (recovery) เป็นต้น



รูปที่ 4.12 ด้านหน้าของเตาอบ



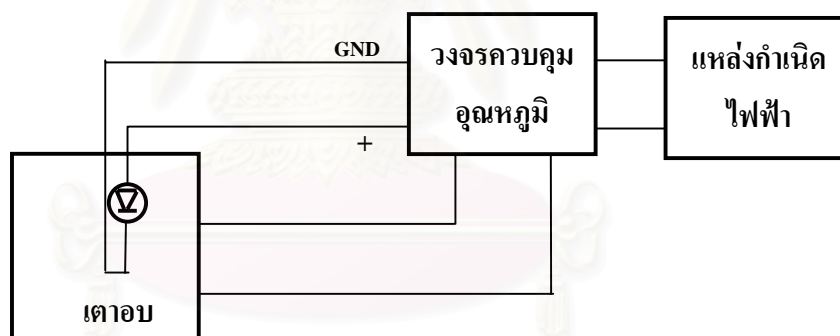
- |                       |                                       |
|-----------------------|---------------------------------------|
| 1. อะลูมิเนียม        | 5. โครงเหล็ก                          |
| 2. ฉนวนกันความร้อน    | 6. ตะแกรงอะลูมิเนียม                  |
| 3. อะลูมิเนียม        | 7. รูสำหรับสอดเทอร์โมคอปเปิลหรือไดโอด |
| 4. กระเบื้องเซรามิกส์ |                                       |

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.13 ส่วนประกอบภายในของเตาอบ

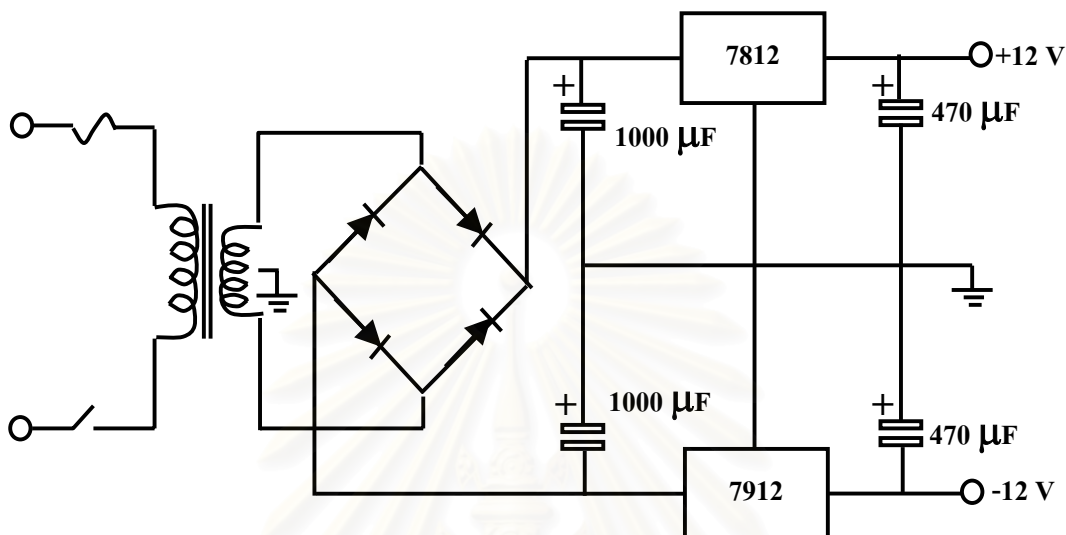
ด้านหน้าและส่วนประกอบภายในของเตาอบแสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ได้พัฒนาจากงานวิจัยครั้งก่อน เตาอบนี้มีความยาว 65.4 เซนติเมตร กว้าง 23.4 เซนติเมตร และสูง 22.0 เซนติเมตร แบ่งเป็น 2 ชั้นด้วยตะแกรงโลหะพื้นด้านล่างเป็นขดลวดให้ความร้อนซึ่งมีความต้านทาน 488 โอห์ม ถ้าใช้กับไฟบ้าน 220 โวลต์ จะให้กำลังความร้อนประมาณ 100 วัตต์ ขนาดความกว้างยาวของเตาอบและความสูงของช่องใช้งานด้านบนออกแบบไว้ให้เหมาะสำหรับใส่เครื่องยึดฟิล์มที่ถูกยึดแล้วติดอยู่เข้าไปในช่องบนของเตาอบได้ ด้านหน้าของเตามีฝาปิดมิดชิด รอบนอกของเตานี้เป็นแผ่นอะลูมิเนียม ถัดเข้าไปเป็นฉนวนกระเบื้องซึ่งหุ้มอยู่โดยรอบ ถัดเข้าไปอีกเป็นโครงเหล็กซึ่งกั้นให้แผ่นกระเบื้องกระชับกับอะลูมิเนียมด้านนอก เตานี้ออกแบบให้ใช้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส

สำหรับงานวิจัยนี้อุณหภูมิที่ใช้ออบ 105 องศาเซลเซียส และได้สร้างเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งให้งานอยู่ที่ 30-150 องศาเซลเซียส ประกอบด้วยกัน 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า วงจรควบคุมอุณหภูมิ และเตาอบดังรูปที่ 4.14



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ 4.14 แผนภูมิของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

สำหรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากวงจรควบคุมอุณหภูมิ จำเป็นต้องใช้แรงดันของแหล่งจ่ายไฟมีค่า +12 และ -12 โวลต์ แสดงวงจรดังรูปที่ 4.15

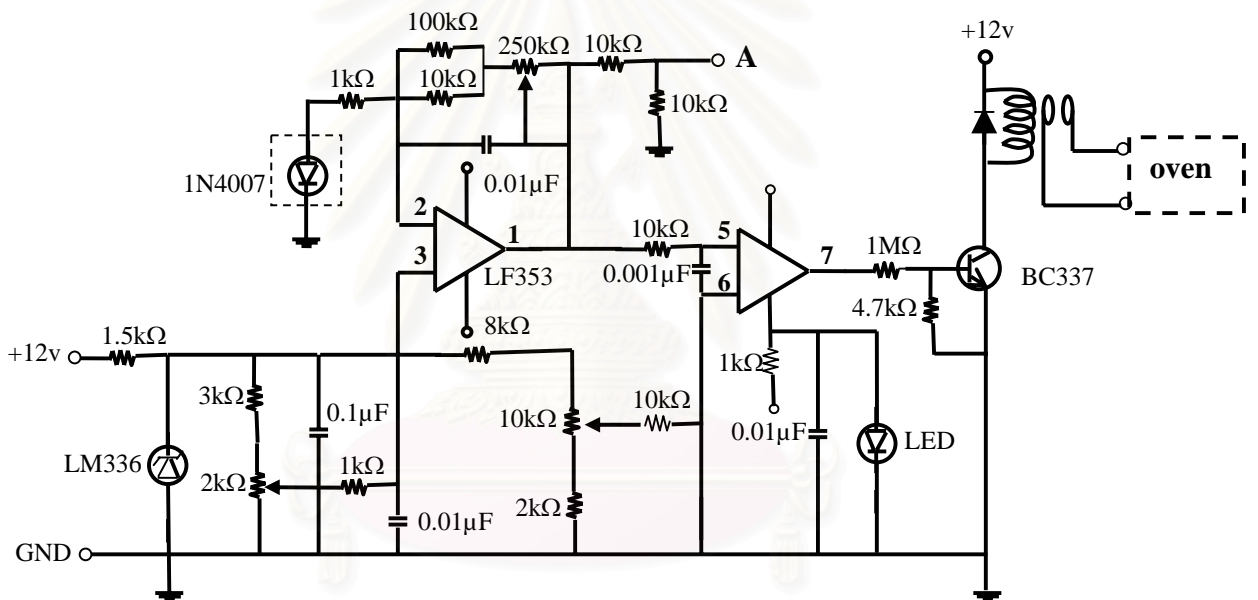


รูปที่ 4.15 วงจรแหล่งจ่ายไฟคู่ขนาด  $\pm 12$  โวลต์

สำหรับวงจรควบคุมอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.16 โดยใช้ไดโอดเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิ โดยอาศัยสมบัติของไดโอดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้กระแสที่ไหลผ่านไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ส่งผลให้ความต้านทานภายในตัวไดโอดเปลี่ยนไปด้วย ทำให้ความต่างศักย์ตกคร่อมไดโอดเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิตั้งไว้ สามารถอ่านค่าอุณหภูมิออกมาได้และสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ โดยการควบคุมการจ่ายกระแสแก่ขดลวดนั่นเอง เมื่อมีอุณหภูมิกระทำต่อไดโอดทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่ขา 2 และเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ขา 3 ของ ออปแอมป์ ตัวที่ 1 ซึ่งผลของการวัดอุณหภูมิอ่านได้จากศักย์ไฟฟ้าที่ขา 1 อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 3.0 โวลต์ และเมื่อผ่านตัวต้านทานศักย์ไฟฟ้าเหลือครึ่งหนึ่งที่ตำแหน่ง A ซึ่งค่าความต่างศักย์ที่ตำแหน่งนี้เท่ากับค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ในช่วง 0.25 ถึง 1.50 โวลต์ หมายถึงช่วงอุณหภูมิที่ 25 ถึง 150 องศาเซลเซียสนั่นเอง แต่ก่อนที่ไดโอดวัดอุณหภูมิได้เท่ากับค่าอุณหภูมิจริงนั้น ต้องสอบเทียบกับอุณหภูมิจริงที่อุณหภูมิ น้ำเดือด ( $100^{\circ}\text{C}$ ) และน้ำแข็ง ( $0^{\circ}\text{C}$ ) ก่อน โดยปรับค่าตัวต้านทานแบบปรับค่าได้  $2\text{ k}\Omega$  และ  $250\text{ k}\Omega$  อ่านค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง A ให้เท่ากับค่าอุณหภูมิจริงของน้ำเดือดและน้ำแข็ง สำหรับการควบคุมอุณหภูมิจะ



อาศัย ออปแอมป์ ตัวที่ 2 ศักย์ไฟฟ้าของขา 6 มาจากศักย์ไฟฟ้าของขา 1 ของออปแอมป์ ตัวแรก ที่อ่านค่าที่ขณะวัด เทียบกับศักย์ไฟฟ้าของขา 5 ซึ่งสามารถปรับได้โดยตัวความต้านทานแบบปรับค่าได้ ซึ่งใช้ในการกำหนดอุณหภูมิที่ต้องการควบคุมเตาอบ ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่ขา 7 ทำให้มีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์ ส่งผลให้สวิตซ์ทางไฟฟ้าทำงาน ให้กระแสไหลเข้าเตาอบ จนกระทั่งอุณหภูมิที่วัดได้เท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ และหากอุณหภูมิที่วัดได้เกินกว่าที่ตั้งไว้ ศักย์ไฟฟ้าที่ขา 7 จะมีค่าเป็นลบ ทำให้สวิตซ์ทางไฟฟ้าตัด จึงไม่มีกระแสเข้าเตาอบ และหากอุณหภูมิที่วัดได้ต่ำกว่าที่ตั้งไว้ สวิตซ์ทางไฟฟ้าทำงาน เพื่อให้กระแสจ่ายเข้าเตาอบอีกครั้ง ซึ่งพบว่าเหมาะกับงานวิจัยนี้และสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลอง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ 4.16 วงจรเครื่องควบคุมอุณหภูมิ



(ก)



(ข)

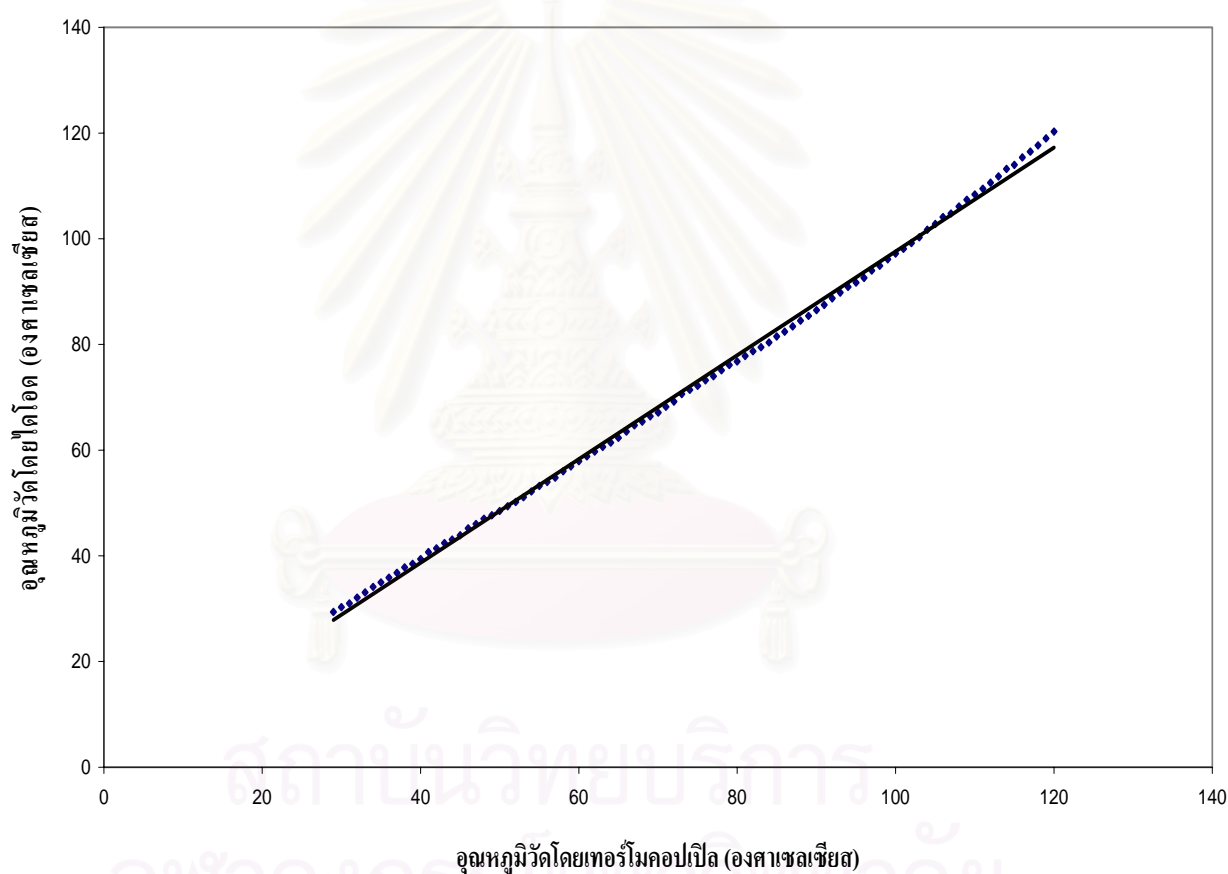
รูปที่ 4.17 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (ก) ด้านหน้า และ (ข) ด้านหลัง

เมื่อนำเครื่องควบคุมอุณหภูมิสอบเทียบค่ากับเทอร์โมคอปเปิลให้ค่าตามตารางที่ 4.1

อุณหภูมิที่ วัดโดย เทอร์โม คอปเปิล (°C)	อุณหภูมิที่ วัดโดย ไดโอด (°C)	อุณหภูมิที่ วัดโดย เทอร์โม คอปเปิล (°C)	อุณหภูมิที่ วัดโดย ไดโอด (°C)	อุณหภูมิที่ วัดโดย เทอร์โม คอปเปิล (°C)	อุณหภูมิที่ วัดโดย ไดโอด (°C)	อุณหภูมิที่ วัดโดย เทอร์โม คอปเปิล (°C)	อุณหภูมิที่ วัดโดย ไดโอด (°C)
29	29.4	53	51.1	77	74.0	101	98.1
30	30.3	54	52.2	78	75.1	102	99.2
31	31.0	55	53.2	79	76.1	103	100.3
32	32.1	56	54.0	80	76.8	104	101.7
33	33.1	57	54.8	81	77.8	105	102.8
34	34.1	58	56.0	82	78.7	106	104.1
35	35.0	59	56.9	83	79.5	107	104.8
36	35.9	60	57.9	84	80.4	108	106.1
37	36.8	61	58.8	85	81.5	109	107.4
38	37.8	62	59.7	86	82.4	110	108.4
39	38.5	63	60.6	87	83.4	111	109.5
40	39.4	64	61.4	88	84.5	112	110.6
41	40.7	65	62.3	89	85.4	113	111.8
42	41.4	66	63.5	90	86.5	114	113.2
43	42.4	67	64.7	91	87.5	115	114.0
44	43.1	68	65.4	92	88.7	116	115.4
45	43.9	69	66.4	93	89.8	117	116.5
46	45.2	70	67.1	94	90.9	118	117.7
47	46.0	71	68.2	95	91.7	119	119.0
48	47.0	72	69.2	96	92.6	120	120.3
49	47.7	73	70.6	97	94.0		
50	48.5	74	71.4	98	94.9		
51	49.4	75	72.2	99	96.1		
52	50.2	76	73.2	100	97.2		

ตาราง 4.1 ค่าอุณหภูมิที่วัดได้โดยใช้ไดโอดและเทอร์โมคอปเปิล

พบว่าเมื่อนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเทอร์โมคอปเปิลเขียนกราฟแสดงดังรูปที่ 4.18 ค่าที่วัดได้จากเครื่องควบคุมอุณหภูมิจะใกล้เคียงกับค่าจากเทอร์โมคอปเปิลดังสมการ  $y = 0.982 x - 0.592$  โดยมีผลต่างกันเป็น 0.587 องศาเซลเซียส เป็นค่าที่ต้องบวกเข้าไปเพื่อให้เท่ากับอุณหภูมิที่เทอร์โมคอปเปิลวัดได้

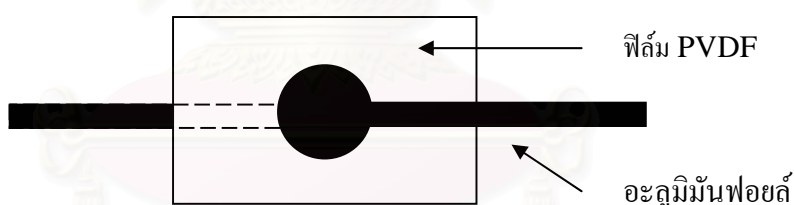


รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่วัดโดยไอโอดและเทอร์โมคอปเปิล

### 4.2.3 การจัดขั้วไฟฟ้า

ฟิล์มที่ผ่านกระบวนการยึดแล้วจะมีโครงสร้างแบบเบตา ซึ่งมีสภาพขั้วสูงสุด แต่ผลึกมีทิศของโมเมนต์ขั้วคู่อย่างสุ่ม ทำให้โพลาริเซชันรวมเป็นศูนย์ จำเป็นต้องผ่านการจัดขั้ว โดยการผ่านสนามไฟฟ้าความเข้มสูงเข้าไปในเนื้อของฟิล์ม โมเมนต์ขั้วคู่เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าก็就会被แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ากระทำให้ชี้ไปในทิศของสนาม แผ่นฟิล์มจึงมีโพลาริเซชันไม่เป็นศูนย์ ซึ่งมีวิธีการจัดขั้วดังขั้นตอนต่อไปนี้

เริ่มแรกตัดแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminum foil) เป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร 2 แผ่น ให้มีลักษณะเหมือนกัน และมีส่วนที่ยื่นยาวออกมาเพื่อทำเป็นขั้วต่อไฟฟ้า (electrode) ต่อกับเครื่องกำเนิดความต่างศักย์สูง (high-voltage-dc supply) จากนั้นนำแผ่นแก้ว 2 แผ่น ที่มีขนาดใหญ่กว่าฟิล์ม PVDF โดยวางแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์แผ่นแรกบนแผ่นแก้ว แล้วตามด้วยฟิล์ม PVDF อะลูมิเนียมฟอยล์ และแผ่นแก้วที่เหลือแล้วหนีบแผ่นแก้วด้วยคลิปหนีบกระดาษ (double clip) ซึ่งจะช่วยให้อะลูมิเนียมฟอยล์กดทับฟิล์ม PVDF ดีขึ้น ระวังอย่าให้แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ทั้งสองแตะกันเพราะจะทำให้ลัดวงจร แล้วต่อปลายอะลูมิเนียมฟอยล์ทั้งสองเข้ากับขั้วไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดความต่างศักย์สูง



รูปที่ 4.19 การวางแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ในการจัดขั้วไฟฟ้า

ขณะจัดขั้วใช้อุณหภูมิ  $T_p$  ประมาณ 80 องศาเซลเซียส จึงต้องทำการจัดขั้วในซิลิโคนเหลว (silicon oil) ดังรูปที่ 4.20 ความต่างศักย์ที่ใช้หาได้จากสมการ  $E_p = \frac{V}{b}$  โดย  $b$  เป็นความหนาของฟิล์ม ในการเตรียม ปรับเพิ่มความต่างศักย์อย่างช้าๆ จนถึงความต่างศักย์ที่ต้องการ คงไว้ 20 นาที แล้วลด

อุณหภูมิภายในซิลิโคนเหลวจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วลดความต่างศักย์ลงจนเป็นศูนย์ และทำการ ถัดวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งสองของฟิล์มด้วยตัวต้านทาน  $1\text{ k}\Omega$  หลังจากนั้นนำฟิล์มออกจากแผ่นแก้วและ อะลูมิเนียมฟอยล์ ขณะจัดขั้วแผ่นฟิล์ม ถ้าเกิดสปาร์ก (spark) จะทำให้ฟิล์มเสียไป ซึ่งจุดที่เกิดการสปาร์ก ง่ายที่สุดคือบริเวณรอยย่นเป็นริ้วบนแผ่นฟิล์ม วิธีแก้ไขคือทาซิลิโคนเหลวทั้งสองด้านของฟิล์ม จะมีผล ทำให้การสปาร์กลดน้อยลง เพราะจะทำให้ฟิล์มมีความสม่ำเสมอในแง่ของไฟฟ้าสถิต (electrostatics)



สถาบันวิจัยและพัฒนา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.20 การจัดขั้วของฟิล์ม PVDF

#### 4.2.3.1 การเตรียมอิเล็กโทรดของฟิล์ม

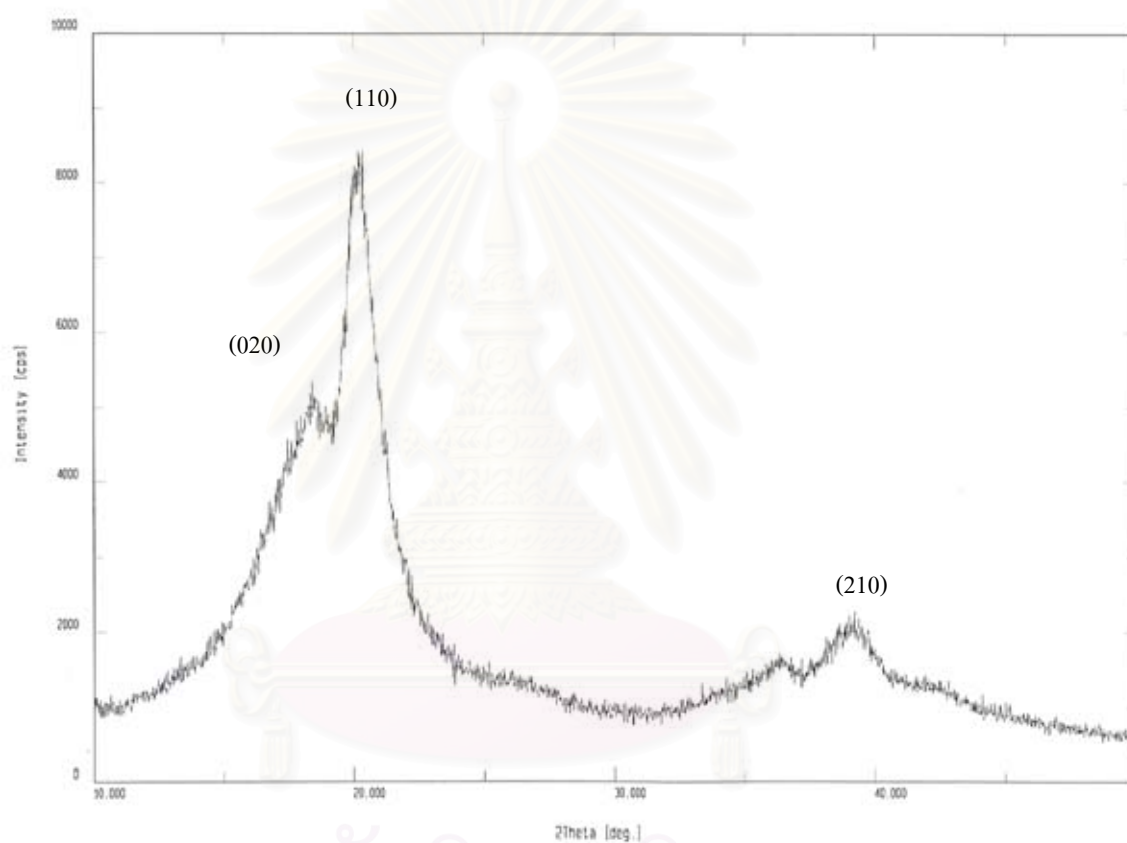
ในงานวิจัยที่ผ่านมา การเตรียมอิเล็กโทรดของฟิล์มใช้วิธีระเหยไออะลูมิเนียมในสุญญากาศ (high vacuum evaporation) ซึ่งวิธีการนี้หากไม่มีระบบหล่อเย็น จะทำให้อุณหภูมิภายในโถสุญญากาศสูงมากขณะเตรียมขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งไม่เหมาะสมต่อสารตัวอย่างจำพวกพอลิเมอร์หรือฟิล์ม PVDF ฉะนั้นวิธีการเตรียมอิเล็กโทรดโดยใช้กาวเงิน (silver conductive paint) ซึ่งประกอบด้วยผงเงินละเอียดมากแขวนลอยอยู่ในกาว โดยใช้ตัวทำละลายบิวติลอะซิเตต (butylacetate) วิธีนี้ต้องทาบางอย่างระมัดระวังข้อเสียคือขั้วอิเล็กโทรดมีความหนาไม่สม่ำเสมอ และไม่สะท้อนแสง

สำหรับในงานวิจัยนี้การเตรียมอิเล็กโทรดของฟิล์มใช้วิธี sputter โดยอาศัยเครื่อง ion sputter โดยระเหยไอทองในสุญญากาศเข้าจับแต่ละด้านซึ่งต้องวางให้ตรงกัน รูปร่างอิเล็กโทรดทำได้โดยการทำหน้ากาที่มีรูปร่างเหมาะสม การเตรียมเริ่มจากการสูบล้างอากาศออกจากโถแก้วโดยปั๊มโรตารี (rotary pump) ซึ่งสามารถลดความดันของอากาศลง กระทั่งเหลือ 0.1 บาร์ ซึ่งเพียงพอสำหรับการฉาบผิวโลหะ จากนั้นปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าไป และให้กระแสไฟฟ้า 15 มิลลิแอมแปร์ ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วบวกหรือแอโนด ซึ่งมีฟิล์ม PVDF วางอยู่ และขั้วลบหรือแคโทด ซึ่งมีเป้า (target) เป็นทองก๊าซอาร์กอนแตกตัวเกิดอาร์กอนประจุบวก ซึ่งจะเคลื่อนที่เข้าชนเป้าด้วยโมเมนตัมสูง แล้วถ่ายเทโมเมนตัมแก่เป้า อะตอมที่ผิวของเป้าทองได้รับพลังงานมากพอที่จะกระแทกให้หลุดออกจากเป้าในรูปของไอทองตกลงบนฟิล์ม PVDF ซึ่งใช้เวลาในการเคลือบ 5 นาที พบว่า บนฟิล์ม PVDF ถูกฉาบด้วยทองซึ่งแว ทำการฉาบทองทั้งสองหน้า จากนั้นนำฟิล์มที่ผ่านการฉาบแล้วไปวัดค่าไดอิเล็กทริก และสัมประสิทธิ์โพไอโซอิเล็กทริก ที่จะกล่าวในบทถัดไป

#### 4.3 การทดสอบฟิล์ม PVDF ที่เตรียมขึ้นโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

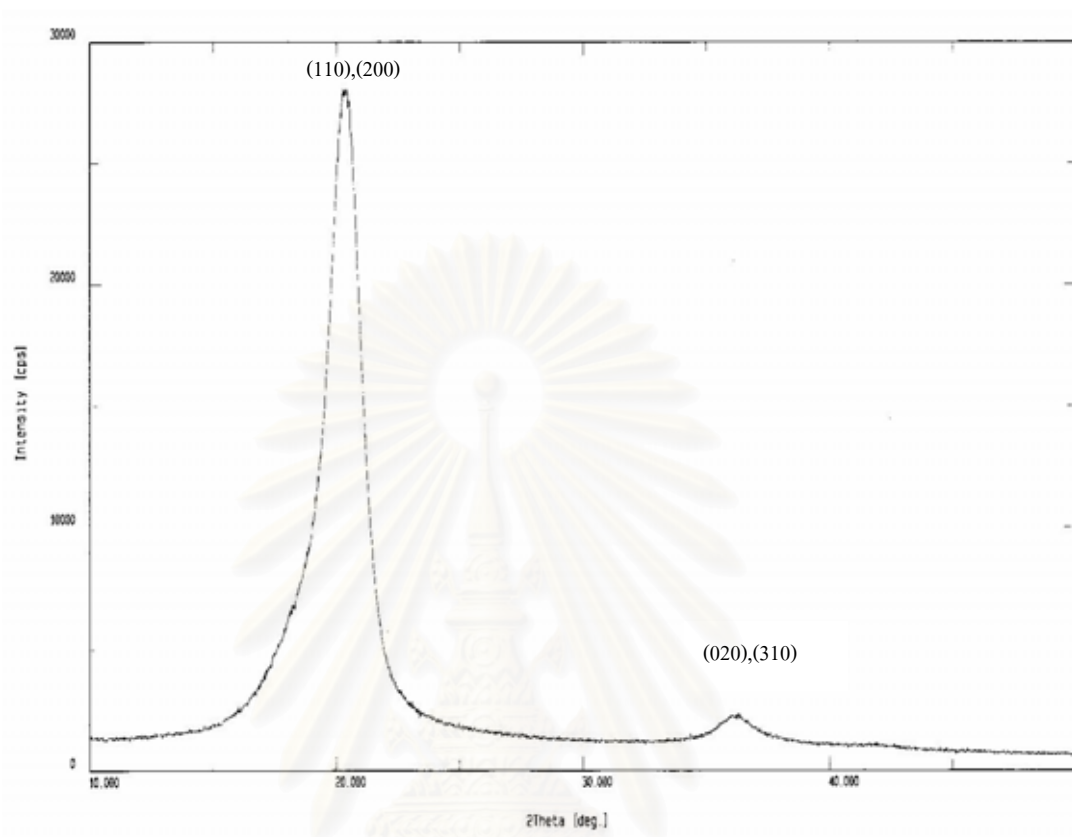
จากการที่ได้ทดลองวิธีการเตรียมฟิล์ม PVDF เพื่อศึกษาว่าการเตรียมฟิล์มโดยวิธีการหล่อในสารละลายให้ผลอย่างไร ดังนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึกโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ นั่นคือ ฟิล์ม PVDF ที่เตรียมได้ซึ่งมีความหนา 120 ไมโครเมตร ไปทดสอบกับเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD ) ซึ่งใช้ Cu K radiations แบบโหมดการส่งผ่าน (transmission mode) เพื่อต้องการจะเปรียบเทียบมุมแบรกก์ (Bragg angle :  $2\theta$ ) (Kittel, 1986) ในการทดลองมุมแบรกก์มีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 50 องศา พบว่าฟิล์ม PVDF โดยอาศัยวิธีการหล่อฟิล์มในสารละลาย ที่ไม่ได้ผ่านขั้นตอนการยัด ระนาบ(020) และระนาบ(110) มุมแบรกก์มียอด (peak) ที่ 18.40 องศา และ 20.16 องศา ดังรูปที่ 4.21 ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกับรายงาน (Das Gupta and Doughty, 1980)

(Wang and West, 1982) คือที่ระนาบ(020) และระนาบ(110) มุมแบรกก์มียอดที่ 18.40 องศา และ 20.12 องศา ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ผลการกวาดเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-ray diffractometer scan) ของฟิล์ม PVDF ที่ไม่ได้ยัด โดย 2θ คือ มุมแบรกก์ และ (020), (110) คือระนาบ(hkl)





รูปที่ 4.22 ผลการกวาดเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ (X-ray diffractometer scan) ของฟิล์ม PVDF ที่ได้ผ่านการยัด โดย  $2\theta$  คือ มุมแบรกก์ และ  $(110),(200)$  คือระนาบ(hkl)

แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ผ่านขบวนการยัด นำไปทดสอบกับเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ พบว่าได้ระนาบผสม (composite) คือ  $(110),(200)$  มุมแบรกก์มีขนาดที่ 20.48 องศา แสดงดังรูปที่ 4.22 เมื่อเปรียบเทียบกับรายงาน มุมแบรกก์มีขนาดที่ 20.8 องศา (Das Gupta and Doughty, 1980) ดังนั้น ฟิล์มที่เตรียมได้โดยวิธีหล่อในสารละลายเมื่อนำไปทดสอบด้วยวิธีดังกล่าว พบว่า โครงสร้างผลึกของฟิล์ม PVDF ก็สอดคล้องกับรายงานที่มีผู้วิจัยมาแล้ว

## บทที่ 5

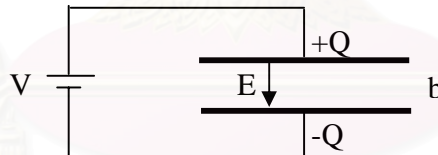
### สมบัติไดอิเล็กทริกและสมบัติไพโซอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF

จากบทที่ 4 เมื่อฟิล์มได้ผ่านพัฒนาทางกายภาพโดยการยืด การอบ และการจัดขั้วไฟฟ้า เป็นฟิล์มที่มีสมบัติไพโซอิเล็กทริก PVDF ในบทนี้จะพิจารณาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์ม ทั้งที่ยังไม่ผ่านและผ่านการจัดขั้วไฟฟ้าแล้ว ตลอดจนศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ใช้จัดขั้วไฟฟ้าต่อค่าไดอิเล็กทริกและแฟกเตอร์สูญเสียพลังงาน และการวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF โดยอาศัยเทคนิคทางแสง ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกกับสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้ว

#### 5.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

สารไดอิเล็กทริกเป็นฉนวนทางไฟฟ้า คือไม่มีพาหะอิสระ จะไม่นำไฟฟ้า แต่มีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมสาร เนื่องจากโพลาริเซชันและมีสนามไฟฟ้าภายในสาร

พิจารณาดั้วเก็บประจุชนิดแผ่นขนาน ประกอบด้วยแผ่นโลหะพื้นที่  $A$  วางห่างกันเป็นระยะ  $b$  และเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า  $V$



ในกรณีที่ช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะเป็นสุญญากาศ เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า  $V$  แก่แผ่นโลหะ ที่แผ่นโลหะหนึ่งจะมีประจุสุทธิเป็น  $+Q$  และ อีกแผ่นโลหะแผ่นหนึ่งเป็น  $-Q$  โดยประจุบนผิวโลหะมีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า

$$\text{ดังสมการ} \quad Q = \epsilon_0 EA \quad (5.1.1)$$

และ สนามไฟฟ้าสัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้า

$$E = \frac{V}{b}$$

พิจารณาการกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement )

$$D = \frac{Q}{A} = \epsilon_o \frac{V}{b} \quad (5.1.2)$$

พิจารณา ความจุ (capacitance, C) ของตัวเก็บประจุเป็นค่าคงที่ โดยค่าความจุของตัวเก็บประจุเป็นค่าวัดความสามารถในการเก็บประจุทางไฟฟ้า กล่าวคือถ้าค่าความจุมีค่าสูงประจุที่ถูกเก็บไว้ในแผ่นโลหะก็จะมากด้วย ค่าความจุมีค่าเท่ากับ ค่าความจุต่อศักย์ไฟฟ้า

นั่นคือ

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon_o \frac{A}{b} \quad (5.1.3)$$

ถ้าช่องว่างระหว่างโลหะถูกใส่ด้วยวัสดุไดอิเล็กทริกจะเกิดประจุที่ผิวของวัสดุ (surface charge,  $Q_B$ ) เพิ่มขึ้นมา ดังนั้นประจรรวม  $Q'$  เท่ากับผลรวมของประจุเดิมที่ผิวโลหะ  $Q$  กับประจุที่ผิว  $Q_B$  เท่ากับผลคูณของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric,  $k$ ) กับประจุเดิมที่ผิวโลหะ

ได้เป็นสมการ

$$Q' = Q + Q_B = kQ \quad (5.2.1)$$

จะได้ การกระจัดทางไฟฟ้า

$$D = \frac{Q'}{A} = \epsilon_o k \frac{V}{b} \quad (5.2.2)$$

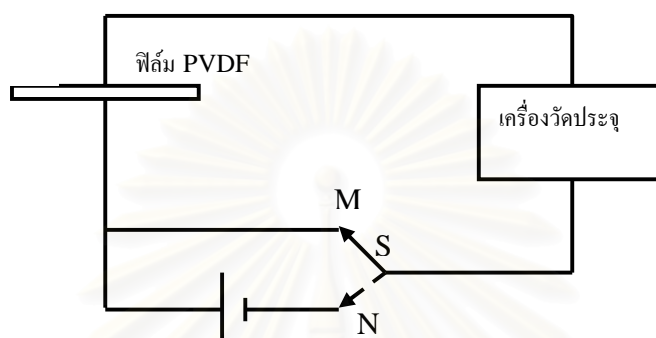
ดังนั้น ค่าความจุเท่ากับ

$$C = \frac{Q'}{V} = \epsilon_o k \frac{A}{b} \quad (5.2.3)$$

พลังงานที่ถูกเก็บสะสมในตัวเก็บประจุในปริมาณที่กำหนดและที่ค่าความต่างศักย์ค่าหนึ่งโดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเมื่อมีวัสดุไดอิเล็กทริกอยู่ วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะสามารถผลิตตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็กลงได้ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก  $k$  สามารถหาได้เมื่อทราบค่าความจุ  $C$

## 5.2 การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF

การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก  $k$  ของฟิล์ม PVDF นั้น ทำโดยการวัดความจุ (capacitance,  $C$ ) ของฟิล์ม และจากพื้นที่ของอิเล็กโทรดและความหนาของฟิล์ม ก็จะคำนวณค่า  $k$  ได้ การวัดค่า  $C$  ทำได้ทั้งวิธีไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) สำหรับการวัดโดยวิธี DC แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การวัดความจุของฟิล์ม PVDF โดยวิธีไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อสับสวิตช์  $S$  มาที่จุด  $M$  อิเล็กโทรดของฟิล์มจะถูกตัดวงจร หลังจากรอสักครู่ reset เครื่องวัดประจุให้อ่านศูนย์ และเมื่อสับสวิตช์  $S$  ไปที่  $N$  สนามไฟฟ้า  $E$  ในฟิล์มหนา  $b$  จะเท่ากับ  $V/b$

และจากสมการ

$$D = \epsilon E$$

จะได้รับการจัดทางไฟฟ้า

$$D = \epsilon_0 k E = \epsilon_0 k \frac{V}{b}$$

จะเกิดการถ่ายเทประจุเท่ากับ

$$D = \frac{Q}{A}$$

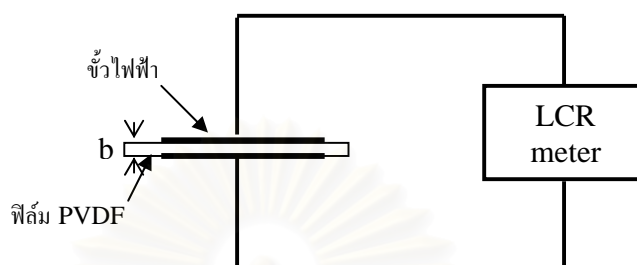
$A$  คือพื้นที่ของอิเล็กโทรด ดังนั้นจะได้

$$\frac{Q}{A} = \epsilon_0 k \frac{V}{b}$$

จาก  $Q$  สุดท้ายที่อ่านได้จากเครื่องวัดประจุ สามารถหาค่า  $k$  ที่กระแสไฟฟ้าตรงของฟิล์ม PVDF ได้

การวัดตามรูปข้างบนเป็นวิธีตรงไปตรงมา จากการทดลอง (พูนศักดิ์, 2541) พบว่า เนื่องจากฟิล์มมีขนาดเล็ก ค่า  $C$  ของฟิล์มอยู่ในย่าน 300 pF ประจุที่ถ่ายเทมีขนาดน้อยมาก เนื่องจากสัญญาณ

รบกวนต่างๆ มีค่ามาก ผลการทดลองที่ได้จึงมีความคลาดเคลื่อนมาก ในงานวิจัยนี้จึงไม่วัด C ด้วยวิธีนี้ แต่วัดโดยวิธี AC แทน อาศัยเครื่องวิเคราะห์ค่าความขัด (impedance analyzer) ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การวัดความจุของฟิล์ม PVDF โดยวิธีไฟฟ้ากระแสสลับ

วิธีไฟฟ้ากระแสสลับนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์ค่าความขัด (Hewlett Packard 4192A) เป็นเครื่องมือเชิงตัวเลขที่สามารถทำงานในช่วงความถี่ 5 Hz ถึง 13 MHz ในการทำงานสามารถวัดค่าความจุ C ความเหนี่ยวนำ L ของขดลวด และความต้านทานไฟฟ้า R และยังสามารถวัดมุมเฟส เช่น วัดความต่างเฟสของความต่างศักย์คร่อมอุปกรณ์ไฟฟ้าสลับสองอุปกรณ์และวัดค่าความขัดไฟฟ้า (impedance, Z) ได้อีกด้วย

นอกจากนี้เครื่องวิเคราะห์ค่าความขัดยังสามารถให้ความถี่สัญญาณไฟฟ้าสลับในช่วง 5 Hz ถึง 13 MHz ซึ่งมีความละเอียดถึง 1000 Hz และมีแอมพลิจูด 5 มิลลิโวลต์ (rms) ถึง 1.1 โวลต์ (rms) โดยมีความละเอียดถึง 1 มิลลิโวลต์ (rms) สามารถให้ความต่างศักย์กระแสตรงในช่วง 35 โวลต์ ถึง -35 โวลต์ มีความละเอียด 1 มิลลิโวลต์

สำหรับการวัดฟิล์มไดอิเล็กทริก PVDF หรือฟิล์ม PVDF ธรรมดา ก่อนผ่านกระบวนการทางกายภาพ จะได้

$$D = \frac{Q}{A} = \epsilon_0 k \frac{V}{b}$$

โดย V เป็นความต่างศักย์ระหว่าง electrode ทั้งสอง ซึ่งห่างเป็นระยะ b และ  $\pm Q$  เป็นประจุบนขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ที่มีพื้นที่ A

จากสมการ 5.2.3 ข้างบนจะได้ความจุไฟฟ้า ของฟิล์ม

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 k A}{b}$$

ในการวัดค่า C โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ค่าความขัดจะวัดโดยวิธีทางไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งอาจใช้ความถี่ได้ตั้งแต่ 1 kHz ขึ้นไป เนื่องจากที่ความถี่ต่ำกว่า 1 kHz ค่า  $k$  จะเป็นค่าเกือบคงที่ แต่ที่ความถี่สูงมากๆ โมเลกุลของไดโพล ผ่อนคลายไม่ทันกับการเปลี่ยนแปลงของสนาม ค่า  $k$  จะเปลี่ยนไป

สำหรับ ฟิล์มไพโซอิเล็กทริก PVDF อาศัยจากสมการ

$$D = D_r + \epsilon_0 k \frac{V}{b} \quad (5.3)$$

ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ  $V$  จะได้

$$dD = \frac{dQ}{A} = \epsilon_0 k \frac{dV}{b}$$

จะได้

$$\frac{dQ}{dV} = \epsilon_0 k \frac{A}{b} = C$$

ดังนั้นเมื่อวัดค่า C สามารถหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

$$k = \frac{bC}{\epsilon_0 A} \quad (5.4)$$

จากการผ่อนคลายไดอิเล็กทริก (dielectric relaxation)

$$k = k' - jk'' \quad , \quad j = \sqrt{-1} \quad (5.5)$$

โดย  $k', k''$  แสดงค่าจริงและค่าจินตภาพของไดอิเล็กทริก ตามลำดับ

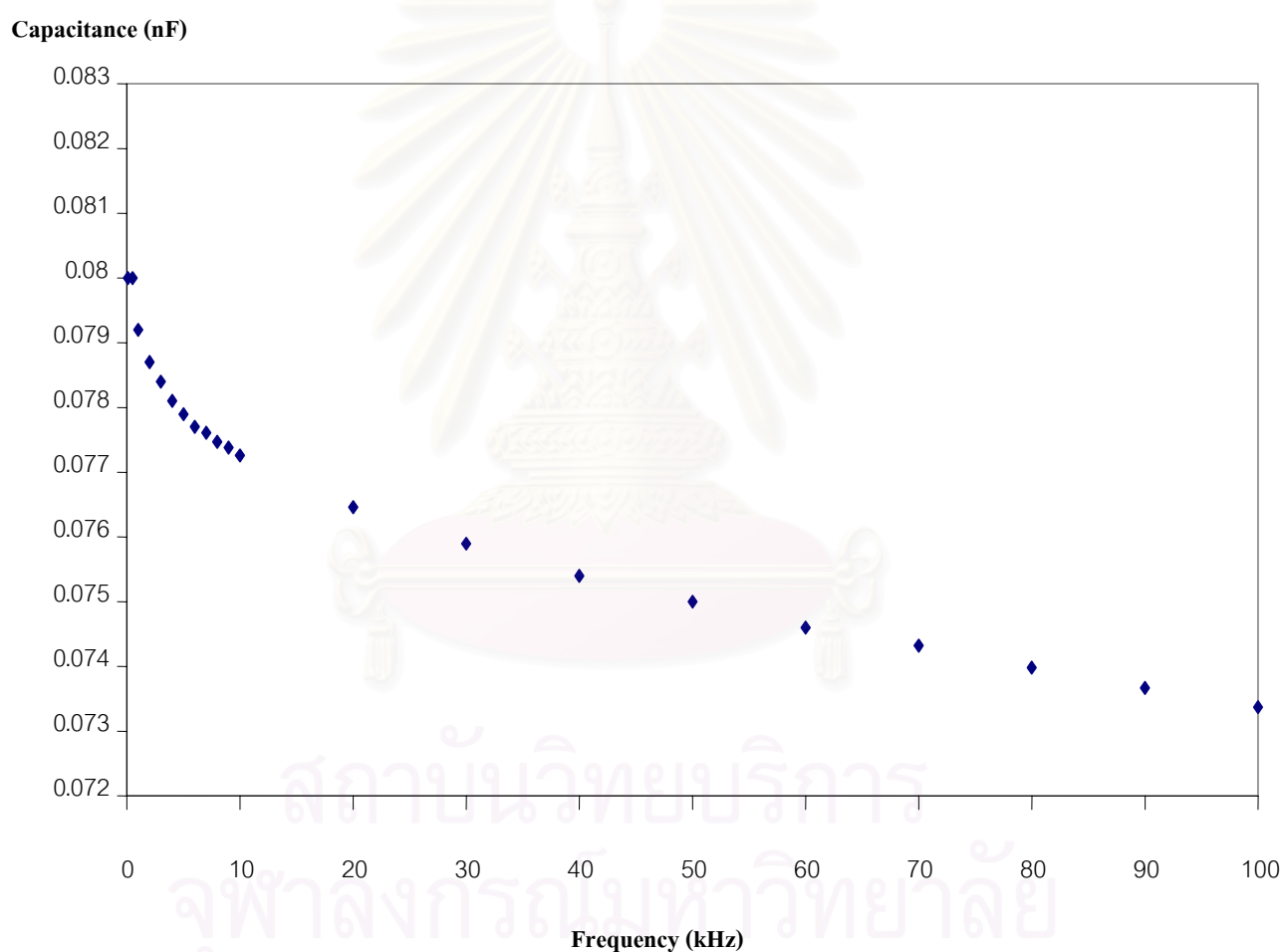
และแฟกเตอร์สูญเสียพลังงาน (loss tangent,  $\tan \delta$ ) จะมีค่าเท่ากับ ส่วนค่าจินตภาพต่อส่วนค่าจริง

$$\tan \delta = \frac{k''}{k'} \quad (5.6)$$

ในการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์ค่าความขัด ลองวัดค่าความจุไฟฟ้า C ของฟิล์ม PVDF ทั้งที่ยังไม่ได้จัดขั้วไฟฟ้า และฟิล์มที่จัดขั้วไฟฟ้า (poling) แล้วในแต่ละความเข้มของสนามไฟฟ้าหรือสนามจัดขั้ว

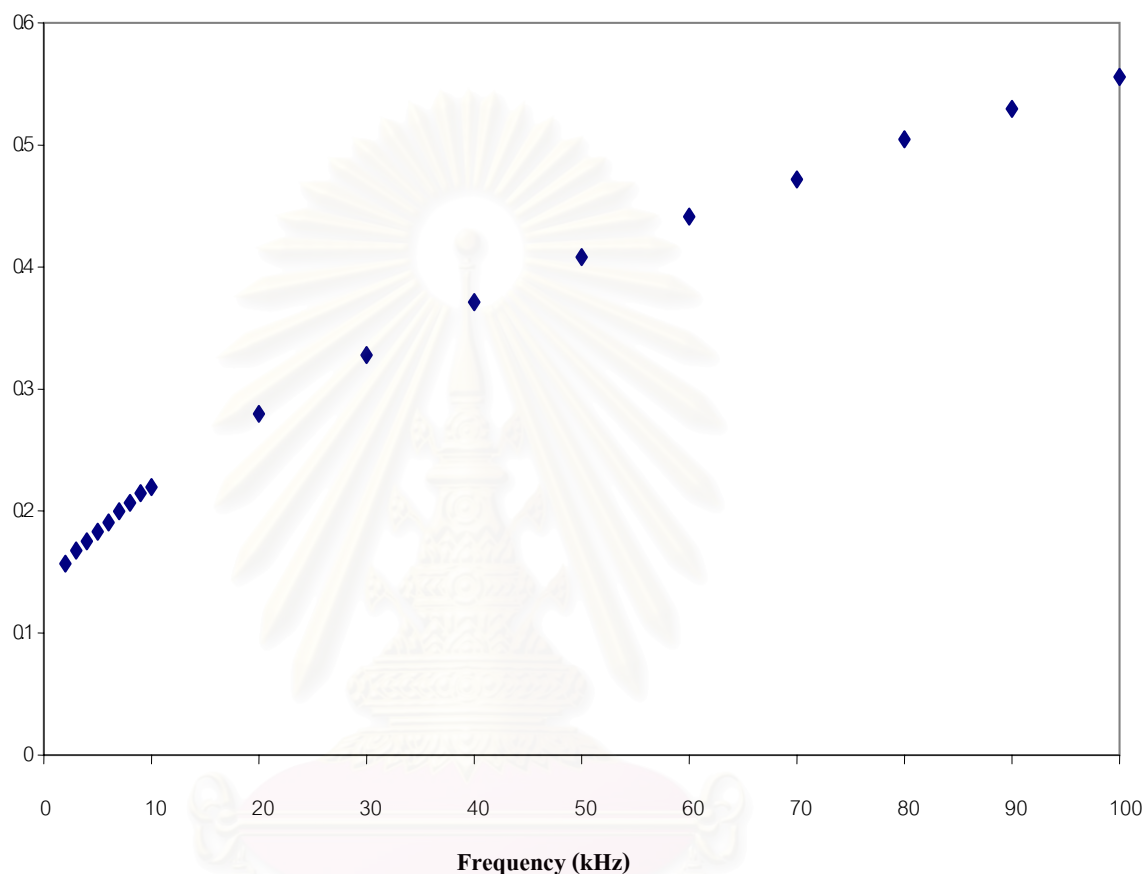
(poling field) เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่ได้ไอเล็กทริกกับสนามจัดขั้ว และ  $\tan \delta$  กับสนามจัดขั้ว ของฟิล์ม PVDF โดยทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง 27 องศาเซลเซียส ซึ่งคาดว่าเท่ากับหรือใกล้เคียงอุณหภูมิขณะใช้งานของฟิล์ม

ทำการวัดค่า C ที่ความถี่ต่างๆตั้งแต่ 1 kHz จนถึง 100 kHz โดยเพิ่มครั้งละ 500 Hz จะได้ข้อมูลทั้งหมด 166 ค่า แล้วทำการวัดซ้ำ จากนั้นนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุและความถี่ที่ได้ แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ค่าความจุไฟฟ้าของฟิล์มไพเอโซอิเล็กทริก PVDF ที่ความถี่ 1-100 กิโลเฮิร์ตซ์

### Dissipation factor



รูปที่ 5.4 ค่าตัวประกอบ (Dissipation) ของฟิล์มไพโซอิเล็กทริก PVDF ในช่วงความถี่ 1-100 กิโลเฮิร์ตซ์

จากการที่ได้ทดลองวัดค่า C ของฟิล์มไพโซอิเล็กทริก ที่ความถี่ต่ำมากๆ เช่นต่ำกว่า 500 เฮิร์ตซ์ การวัดจะทำได้ลำบาก เนื่องจากสัญญาณรบกวนต่างๆ (พุนศักดิ์, 2541) ดังนั้นจึงวัดค่า C ในช่วงตั้งแต่ 1-100 กิโลเฮิร์ตซ์ และนำมาคิดค่าไดอิเล็กทริก เลือกที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่าความจุที่วัดได้อยู่ในช่วง 0.0366 นาโนฟารัด เนื่องจากฟิล์มนี้มีพื้นที่อิเล็กโทรด 15 ตารางมิลลิเมตร และหนา 30 ไมโครเมตร

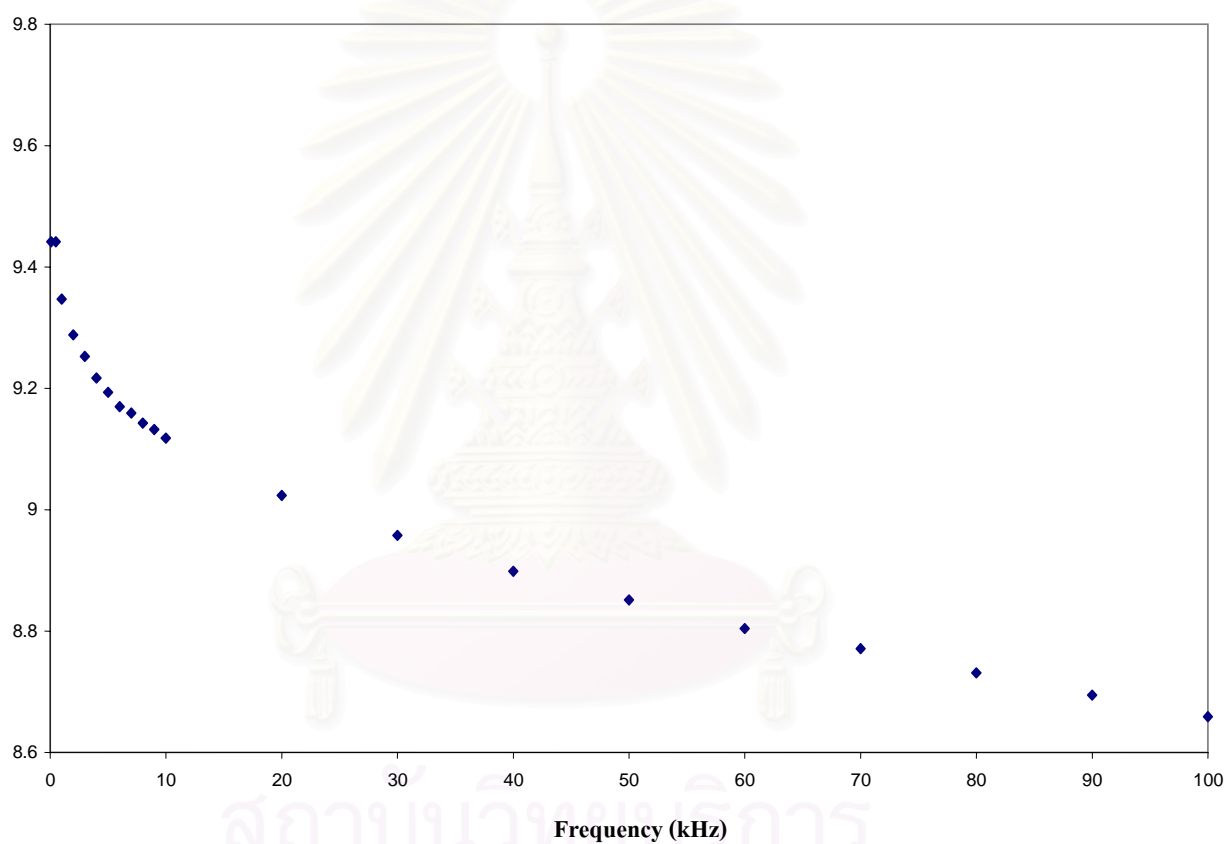


ดังนั้น จากสมการ (5.4)

$$k = \frac{bC}{\epsilon_0 A} = \frac{(30 \times 10^{-6})(0.0366 \times 10^{-9})}{(8.854 \times 10^{-12})(15 \times 10^{-6})}$$

$$= 8.28$$

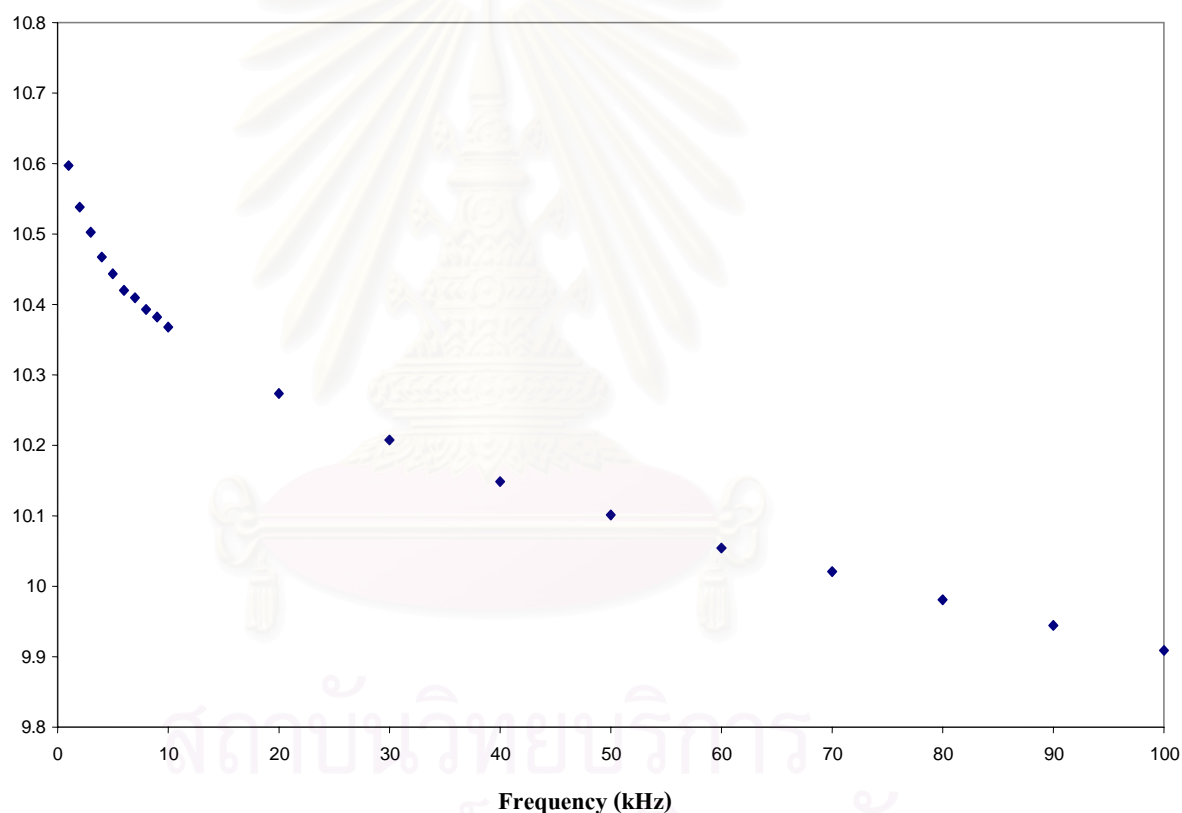
### Dielectric constant



รูปที่ 5.5 ค่าไดอิเล็กตริกของฟิล์มไพเอโซอิเล็กตริก PVDF ในช่วงความถี่ 1-100 กิโลเฮิร์ตซ์

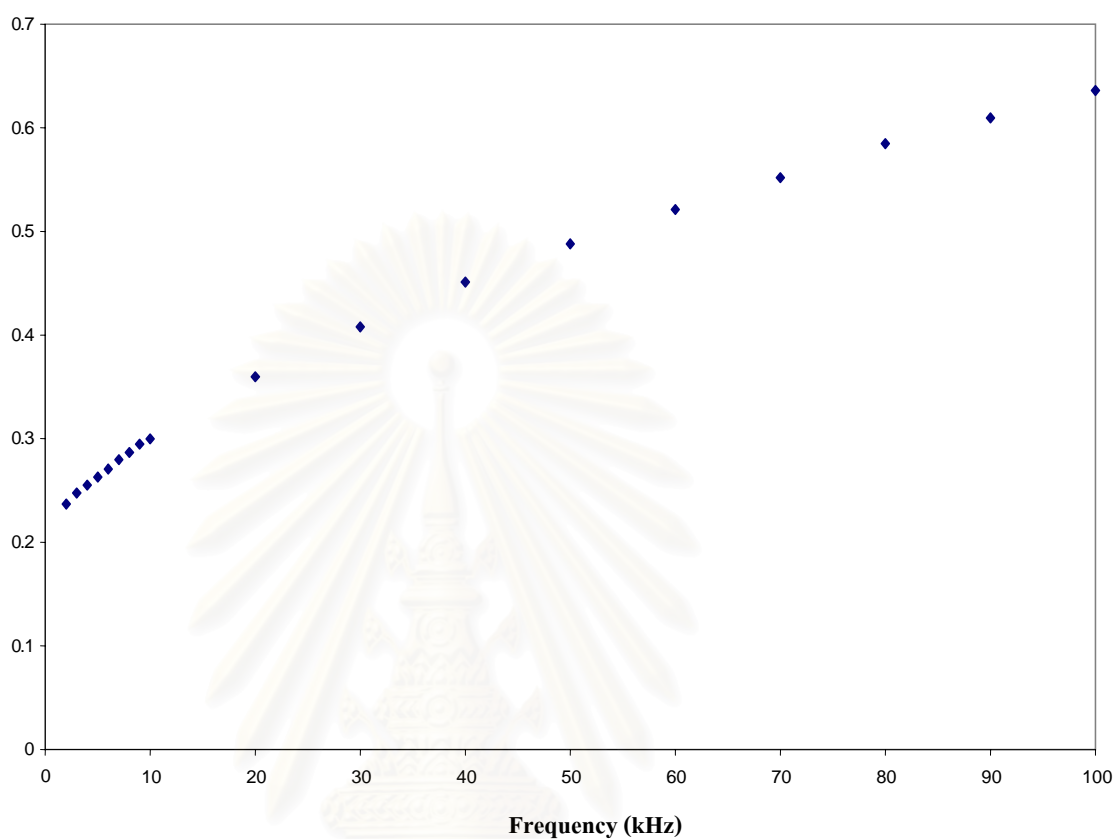
ในการวิจัยนี้ ได้หาค่าไดอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF อีก 6 ตัวอย่าง ซึ่งฟิล์มแต่ละฟิล์มจะทราบเงื่อนไขในกระบวนการพัฒนาฟิล์มในขั้นตอนการจัดขั้วไฟฟ้า คือ สนามไฟฟ้า ( $E_p$ ) อุณหภูมิ ( $T_p$ ) และเวลาในการจัดขั้วไฟฟ้า ( $t_p$ ) เท่ากันหมดคือ  $80^\circ\text{C}$  และ 20 นาที ตามลำดับ เพื่อดูว่าสนามไฟฟ้าข้างต้นมีผลต่อค่าไดอิเล็กทริกอย่างไร โดยจัดขั้วไฟฟ้าแต่ละแผ่นฟิล์มมีสนามไฟฟ้าที่ 0, 40, 50, 60, 70 และ 80 เมกะโวลต์ต่อเมตร แสดงได้ดังตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.5-5.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าไดอิเล็กทริกส่วนจริงและส่วนจินตภาพกับความถี่ ที่สนามไฟฟ้า 40 เมกะโวลต์ต่อเมตร ตามลำดับ

Dielectric constant



รูปที่ 5.6 ค่าไดอิเล็กทริกส่วนจริงของฟิล์มโพซิโอดีอิเล็กทริก PVDF ตัวอย่าง B1 ที่สนามไฟฟ้าขณะจัดขั้ว 40 เมกะโวลต์ต่อเมตร

### Imaginary part of dielectric constant

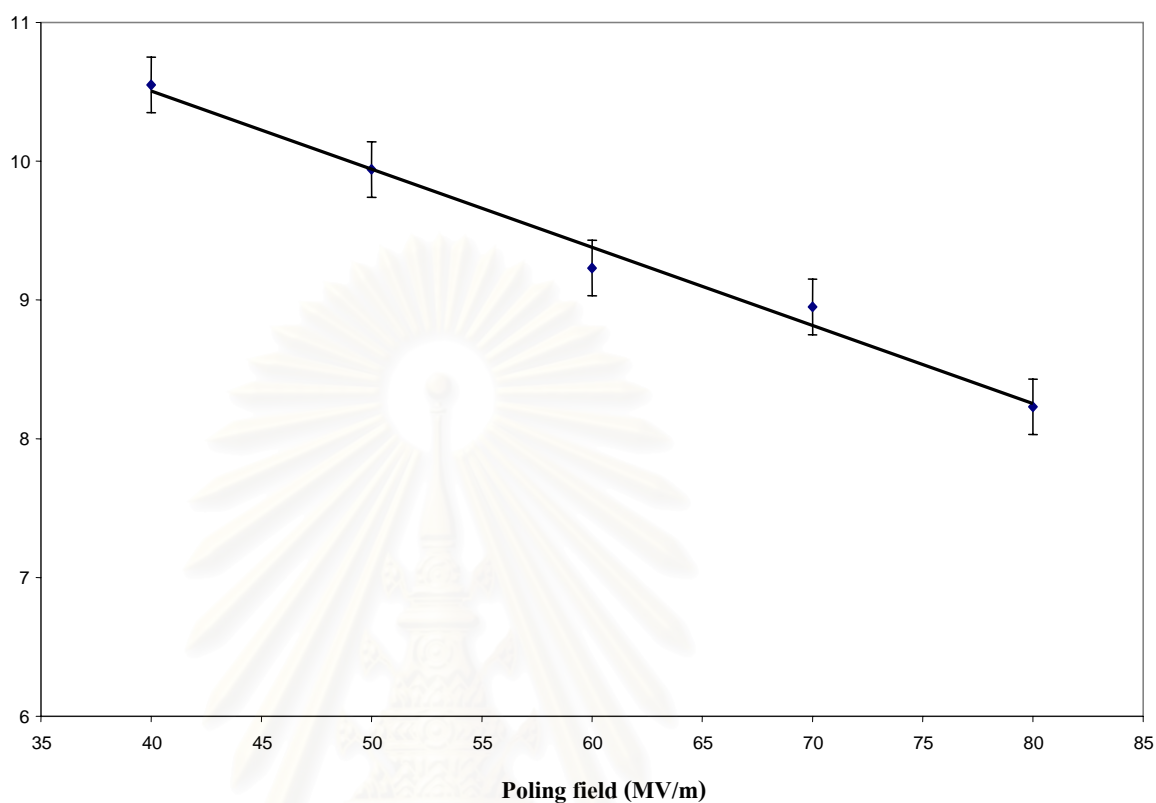


รูปที่ 5.7 ค่าไดอิเล็กทริกส่วนจินตภาพของฟิล์มไพโซอิเล็กทริก PVDF ตัวอย่าง B1 ที่สนามไฟฟ้าขณะจัดหัว 40 เมกะโวลต์ต่อเมตร

สนามไฟฟ้า $E_p$ (MV/m)	Dielectric constant
0	12.26
40	10.55
50	9.94
60	9.23
70	8.95
80	8.23

ตารางที่ 5.1 ค่าไดอิเล็กทริกสัมพันธ์กับการจัดหัวไฟฟ้าของฟิล์มที่มีความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์

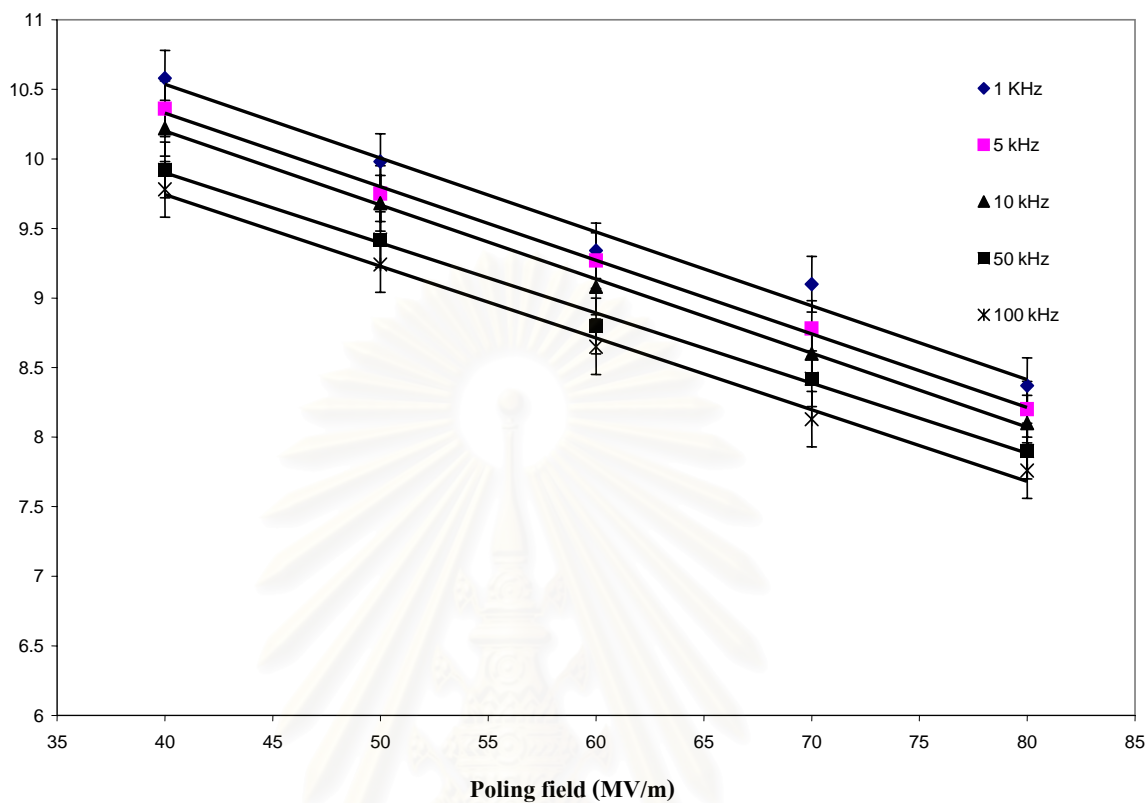
Dielectric constant



รูปที่ 5.8 ค่าไดอิเล็กทริกของฟิล์มไพโซอิเล็กทริก PVDF ใช้สนามไฟฟ้าขณะจัดขึ้น 40-80 เมกะโวลต์ ต่อเมตร ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Dielectric constant



รูปที่ 5.9 ค่าไดอิเล็กทริกของฟิล์มไพโซอิเล็กทริก PVDF ใช้สนามไฟฟ้าขณะจัดจั่ว 40-80 เมกะโวลต์ต่อเมตรที่ความถี่ต่างๆ

จากการทดลอง เมื่อนำแผ่นฟิล์มไพโซอิเล็กทริก PVDF วัดค่าไดอิเล็กทริกได้เท่ากับ 12.26 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ของผู้ทำวิจัยอื่นๆ โดยค่าไดอิเล็กทริกขึ้นกับความถี่ ซึ่งเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่าไดอิเล็กทริกลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อนำมาจัดจั่วไฟฟ้า เมื่อให้สนามที่ใช้ในการจัดจั่วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าไดอิเล็กทริกมีค่าลดลง โดยค่าความเป็นผลึกของฟิล์มถึงผลึกซึ่งบ่งบอกโดยขนาดของผลึกและความหนาของ lamella เกิดจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอก หรือมีความเค้นมากกระทำซึ่งการจัดจั่วไฟฟ้า อาจทำให้ค่าความเป็นผลึกสูงขึ้น ทำให้ส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริกลดลง

### 5.3 ทฤษฎีของระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์

#### 5.3.1 การแทรกสอดของแสงและการประยุกต์ใช้ระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์วัดสัมประสิทธิ์โพซิซิโอเล็กทริก

อินเทอร์เฟอโรมิเตอร์แบบไมเคิลสันเป็นระบบทางแสงที่มีรูปแบบเรียบง่ายในการจัดวางอุปกรณ์ ในงานวิจัยนี้ใช้ลำแสงความถี่เดียวกัน ตกกระทบผิวหน้าสารตัวอย่างและกระจกอ้างอิงก่อนที่จะแทรกสอดกัน หลักการเบื้องต้นคือลำแสงจากแหล่งกำเนิดจะถูกแบ่งที่ตัวแบ่งแสง (beam splitter) ออกเป็นสองลำแสงย่อยเดินทางตั้งฉากซึ่งกันและกัน ไปตกกระทบผิวหน้ากระจกเรียบและสะท้อนกลับไปที่ตัวแบ่งแสงอันเดิม ลำแสงทั้งสองจะมีการแทรกสอดกัน (interference) เกิดริ้ว (fringe) รูปวงกลมหลายวงที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน (fringe of equal inclination) แต่ละลำมีทางเดินแสง (optical path length) แตกต่างกันเล็กน้อย ถ้า  $\Delta d$  เป็นผลต่างของทางเดินแสงทั้งสอง (path length difference)  $I$  คือความเข้มแสงของริ้วแทรกสอด จะได้ว่า

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi\Delta d}{\lambda}\right) \quad (5.7)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่นแสงเลเซอร์ จากสมการ 5.7 (Muensit and Guy, 1998) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความเข้มแสงที่มีค่าสูงสุด ( $I_{\max}$ ) และ ต่ำสุด ( $I_{\min}$ ) ได้ดังนี้

$$I = \frac{1}{2}(I_{\max} + I_{\min}) + \frac{1}{2}(I_{\max} - I_{\min}) \cos\left(\frac{4\pi\Delta d}{\lambda}\right) \quad (5.8)$$

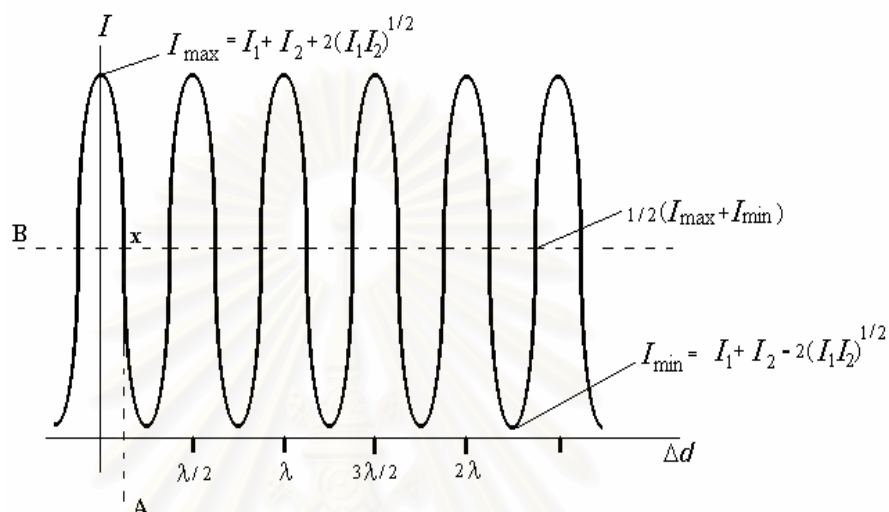
เมื่อ  $\cos\left(\frac{4\pi\Delta d}{\lambda}\right) = 0$  ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่มากที่สุด (maximum change) ของความเข้มแสง ค่าความเข้มแสงที่เงื่อนไขนี้คือ

$$I = \frac{1}{2}(I_{\max} + I_{\min}) \quad (5.9)$$

และค่า  $\Delta d$  ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าวคือ

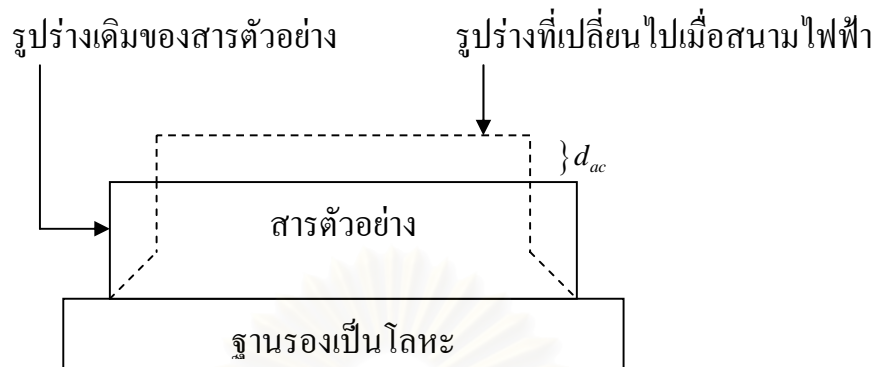
$$\Delta d = (2n+1)\frac{\lambda}{8} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (5.10)$$

สามารถเขียนรูปเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและ  $\Delta d$  ได้ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ความเข้มแสงที่จุดศูนย์กลางของริ้วแทรกสอดที่  $\Delta d$  ต่างๆ

จากหลักการของระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ดังกล่าว มีการพัฒนาระบบ โดยให้ลำแสงหนึ่งตกกระทบกับสารที่ต้องการวัดสัมประสิทธิ์โพซิโชนิก อีกลำแสงหนึ่งตกกระทบกับแผ่นแทรกสลิตเวออร์ (พร้อมทั้งกระจกอ้างอิง) จะสั่นและเคลื่อนที่สัมพันธ์กัน การสั่นในแนวความหนาของสารตัวอย่างเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกแสดงดังรูปที่ 5.11 ซึ่งจำเป็นที่จะต้องปรับให้ระบบทำงานสอดคล้องกับสมการที่ 5.9 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่แสดงว่าระบบมีสภาพไว (sensitivity) สูงสุด ค่า  $\Delta d$  ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในระดับเศษส่วนของ  $\lambda$  ของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ สามารถบ่งชี้กำลังแยกระยะการกระจัด (displacement resolution) ของระบบได้จากค่า  $\Delta d$  ถ้าระบบทำงานด้วยความเร็วสูงสุดคงที่สม่ำเสมอตลอดเวลาในขณะที่ผลการทดลองแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพ (stability)



รูปที่ 5.11 การสั้นในแนวความหนาของสารตัวอย่างเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก

จากรูป  $d_{ac}$  คือ แอมพลิจูดการสั้นของผิวหน้าสารตัวอย่างเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก การเปลี่ยนแปลงของผิวหน้าสารตัวอย่างทำให้ค่า  $\Delta d$  ในสมการที่ 5.10 เปลี่ยนไปดังสมการที่ 5.11

$$\Delta d = d_{ac} + \frac{(2n+1)\lambda}{8} \quad (5.11)$$

ค่า  $d_{ac}$  ในสมการที่ 5.11 อยู่ในรูปของ  $d_{ac} = d_o \cos \omega t$  (Zhang et al., 1987) ดังนั้นความเข้มแสงที่ขึ้นอยู่กับการสั้น  $\Delta d$  ในสมการที่ 5.9 สามารถเขียนใหม่ได้ให้ขึ้นอยู่กับการสั้น  $d_{ac}$  ได้ดังนี้

$$I = \frac{1}{2}(I_{\max} + I_{\min}) + \frac{1}{2}(I_{\max} - I_{\min}) \sin\left(\frac{4\pi d_{ac}}{\lambda}\right) \quad (5.12)$$

ถ้าการกระจัดของผิวหน้าสารตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าระยะที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนเร็วแทรกสอดมากๆ สามารถประมาณค่า  $\sin\left(\frac{4\pi d_{ac}}{\lambda}\right) \approx \frac{4\pi d_{ac}}{\lambda}$  ได้ และสมการที่ 5.12 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I = \frac{1}{2}(I_{\max} + I_{\min}) + \frac{1}{2}(I_{\max} - I_{\min}) \left(\frac{4\pi d_{ac}}{\lambda}\right) \quad (5.13)$$



จากสมการที่ 5.13 จะเห็นได้ว่าความเข้มแสงแปรผันโดยตรงกับค่า  $d_{ac}$  หรือแปรผันกับการกระจัดของผิวหน้าสารตัวอย่าง และส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ที่หัววัดแสงวัดได้ ( $V_{out}$ ) ซึ่งบันทึกค่าโดยเครื่องขยายสัญญาณลือกอนิน (model princeton 5210) มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับ  $d_{ac}$  ดังสมการที่ 5.14

$$V_{out} = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) V_{pp} d_{ac} \quad (5.14)$$

โดย  $V_{pp}$  เป็นความต่างศักย์จากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (sinusoidal peak-to-peak voltage) ที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจากรีวหนึ่งไปยังรีวถัดไป ซึ่งค่าความเข้มแสงที่หัววัดแสงวัดได้มีองค์ประกอบของกระแสตรงอยู่ด้วย องค์ประกอบนี้คือค่าความเข้มแสงในพจน์แรกของสมการที่ 5.13 นั่นเอง ความต่างศักย์ที่ปรากฏบนเครื่องขยายสัญญาณลือกอนินเป็นความต่างศักย์กระแสสลับเท่านั้น ค่าที่อ่านได้จึงเป็นค่าความต่างศักย์ของพจน์ที่สองในสมการที่ 5.13 ซึ่งสอดคล้องกับการกระจัด  $d_{ac}$  จากคำนิยามของสัมประสิทธิ์โพอิโซเอิลเล็กทริกในแนวความหนา คือ อัตราส่วนระหว่างการกระจัดต่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนจะได้สมการที่ใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์โพอิโซเอิลเล็กทริกดังกล่าว ดังนี้

$$d_{ii} = \frac{d_{ac}}{V_{rms}} \quad (5.15)$$

เมื่อ  $V_{rms}$  คือศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับสารตัวอย่าง สมการที่ 5.14 และสมการที่ 5.15 สามารถเขียนรวมกันเพื่อนำไปใช้งานจริง ดังนี้

$$d_{ii} = \frac{\lambda V_{out}}{2\pi V_{pp} V_{rms}} \quad (5.16)$$

ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์วัดการกระจัดในแนวความหนาของสารตัวอย่าง โดยการบันทึกค่า  $V_{out}$  จากเครื่องขยายสัญญาณลือกอนิน และใช้สมการที่ 5.16 ในการคำนวณสัมประสิทธิ์โพอิโซเอิลเล็กทริก ( $d_{33}$ ) ของสารตัวอย่าง

### 5.3.2 ความเสถียรภาพของระบบอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์

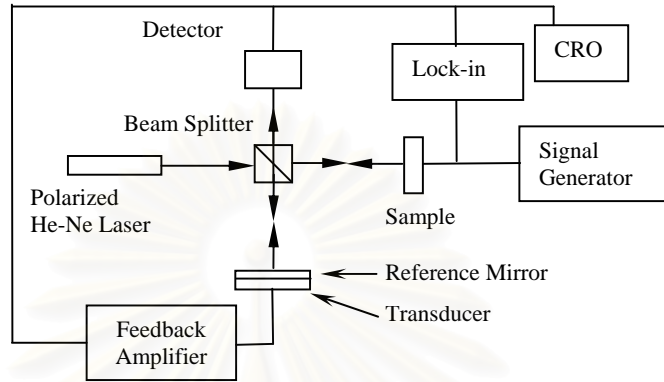
ความน่าเชื่อถือของผลการทดลองขึ้นอยู่กับความแม่นยำและความเที่ยงตรงของผลการทดลองที่ได้ นอกจากนี้ความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวัดที่จะส่งผลถึงความเที่ยงตรงของผลการวัดก็เป็นส่วนสำคัญในการสร้างความน่าเชื่อถือให้กับผลการทดลอง ความน่าเชื่อถือของระบบอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์หมายถึงระบบอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์ มีความแม่นยำและเที่ยงตรงตลอดการบันทึกข้อมูล หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าระบบอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์มีเสถียรภาพ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กำลังแยกความแตกต่างระยะทาง (resolution) และความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง (sensitivity)

กำลังแยกความแตกต่างระยะทางของระบบอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์โดยทฤษฎีหาได้จากเงื่อนไขในสมการที่ 5.13 แต่ในความเป็นจริงระบบอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์มีกำลังแยกความแตกต่างของระยะทางไม่ถึงขีดจำกัดดังกล่าว เพราะในขณะที่กำลังวัดการกระจัดอยู่หากมีการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้ระบบสูญเสียสถานะที่มีเสถียรภาพนั้นไป ในทางปฏิบัติการรักษาสถานะที่ระบบมีเสถียรภาพสังเกตได้จากค่าความต่างศักย์ในตอนเริ่มต้น ( $V_{pp}$ ) จะเปลี่ยนไปเมื่อถูกรบกวน

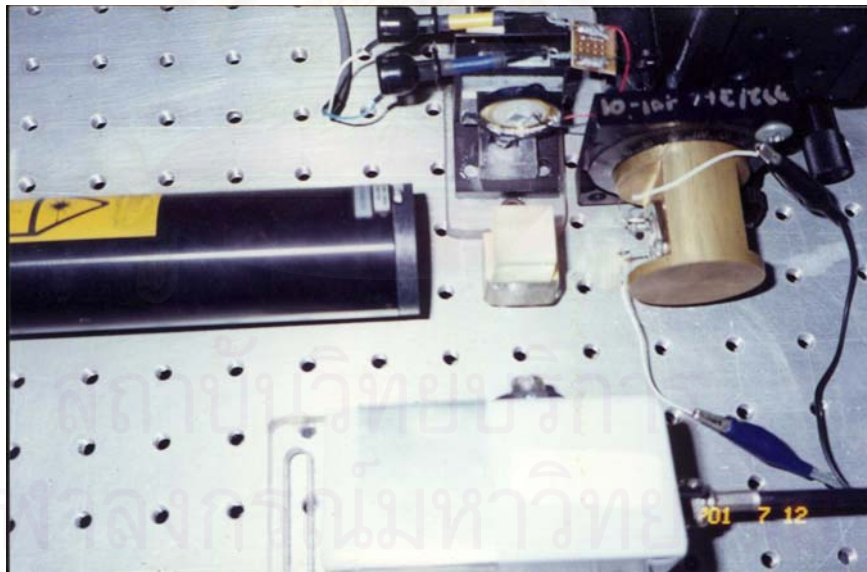
สำหรับความไวต่อการตอบสนองความเข้มแสงนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของหัววัดแสง ระยะทางเดินของแสง และ ค่าคงที่เวลา (time constant) ที่กำหนดให้เครื่องขยายสัญญาณลือกอินอ่านสัญญาณระยะทางเดินของแสงที่มีค่าน้อยๆจะทำให้ระบบมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงได้ดีกว่าระยะทางเดินแสงที่มาก และถ้ากำหนดให้ค่าคงที่เวลาน้อยๆ ก็จะทำให้เครื่องขยายสัญญาณลือกอินตอบสนองต่อสัญญาณ (อ่านค่าสัญญาณ) เร็วกว่าค่าคงที่เวลาที่มีค่ามาก สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ค่าคงที่เวลาที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสารตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

ในงานวิจัยนี้แผนผังระบบอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์แสดงดังรูปที่ 5.12 และการติดตั้งอุปกรณ์ในระบบอินเทอร์เฟียร์โรมิเตอร์โดยตัวจับยึดสารตัวอย่าง แทนวางตัวแบ่งแสง และกระจกอ้างอิงดังรูปที่ 5.13 ซึ่งชุดการทดลองตั้งอยู่ในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์วัสดุชั้นใต้ดินเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเนื่องจากสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อม ในขณะที่ทำการทดลองปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดลอง และเคลื่อนย้ายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองแต่ก่อนให้เกิดสัญญาณรบกวน เช่น เครื่องกำเนิดสัญญาณ เครื่องขยายสัญญาณลือกอิน และวงจรป้อนสัญญาณย้อนกลับ ให้ห่างจากชุดอุปกรณ์ทางแสง และจับยึดสารตัวอย่างโดยใช้ที่จับยึดสารตัวอย่าง (sample holder) เป็นแท่งทองเหลืองรูปทรงกระบอกตันมีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเท่ากันคือ  $3.5 \pm 0.1$  เซนติเมตร เสาะผิวด้านข้างเป็นร่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้าง  $3.0 \pm 0.1$  เซนติเมตร สำหรับวางและยึดสารตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 5.14

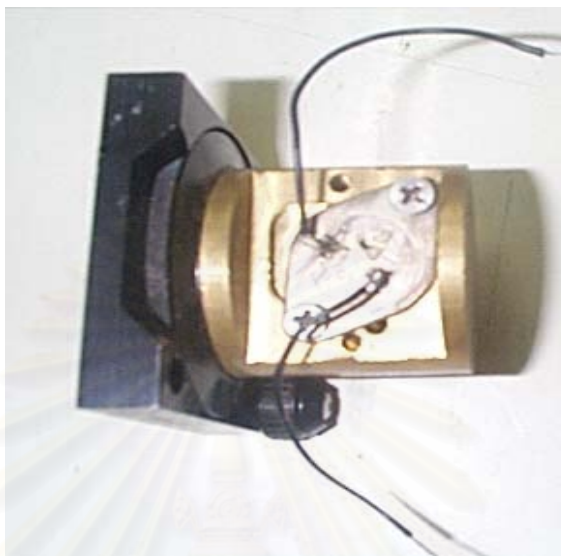
โดยสารตัวอย่างถูกวางบนฐานรองซึ่งประยุกต์มาจากฐานทรานซิสเตอร์ ก่อนนำไปวางไว้บนตัวยึด แสดงดังรูปที่ 5.15



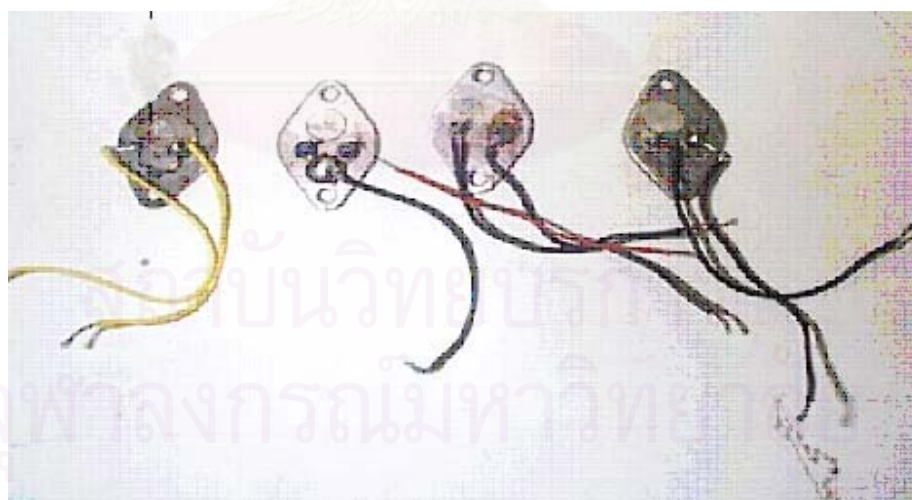
รูปที่ 5.12 แผนผังอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์



รูปที่ 5.13 ที่จับยึดสารตัวอย่าง แทนวาง ตัวแบ่งแสง และกระจกอ้างอิง



รูปที่ 5.14 การยึดจับสารตัวอย่างของที่จับยึดสาร



รูปที่ 5.15 สารตัวอย่าง PVDF บนฐานรอง

#### 5.4 วิธีการวัดสัมประสิทธิ์โพโซอิเล็กทริก

เมื่อนำสารตัวอย่างที่ผ่านการเตรียมสารตัวอย่างมาติดตั้งที่ระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์โดยใช้สกรูยึดฐานทรานซิสเตอร์ (ที่มีสารตัวอย่างติดอยู่ด้วย) ติดบนแท่งทองเหลืองและเป็นหมุน จากนั้นนำเป็นหมุนยึดติดกับแท่นทรานสเลชัน ปรับหามุมและตำแหน่งที่สามารถสะท้อนแสงเลเซอร์ได้ดีที่สุด จากนั้นทำตามขั้นตอนดังนี้

1. เปิดแสงเลเซอร์ หัววัดแสง และออสซิลโลสโคป
2. ปรับทางเดินแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากสารตัวอย่าง และแผ่นกระจกอ้างอิงให้รวมเป็นจุดเดียวกัน
3. เปิดวงจรป้อนสัญญาณย้อนกลับและให้ทำงานในปุ่มปรับเทียบ (calibrate knob) ในระหว่างนี้สามารถปรับมุมตกกระทบของเลเซอร์บนสารตัวอย่างหรือปรับมุมของกระจกอ้างอิงได้เล็กน้อย บันทึกค่าความต่างศักย์เนื่องจากความเข้มแสงที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป ( $V_{pp}$ )
4. ปรับวงจรป้อนสัญญาณย้อนกลับให้ทำงานในปุ่มป้อนสัญญาณย้อนกลับ (feedback knob)
5. ป้อนสนามไฟฟ้ากระแสสลับให้แก่สารตัวอย่าง(เครื่องกำเนิดสัญญาณ)โดยมีความถี่คงที่ 80 kHz และแอมพลิจูดตั้งแต่ 2-20 โวลต์
6. วัดความต่างศักย์และมุมเฟสของสัญญาณจากเครื่องขยายสัญญาณล็อกอินในแต่ละแอมพลิจูด ของความต่างศักย์ของสัญญาณที่ป้อนให้แก่สารตัวอย่าง ในขณะที่อ่านค่าความต่างศักย์จากเครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน
7. ในระหว่างการอ่านค่าจากเครื่องขยายสัญญาณล็อกอินค่า  $V_{pp}$  ต้องคงที่ตลอดการบันทึก
8. คำนวณค่าการกระจัดที่ผิวหน้าสารตัวอย่าง จากสมการที่ 5.14 ได้  $d_{ac}$
9. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $d_{ac}$  และสัญญาณที่ป้อนให้กับสารตัวอย่าง ความชันของกราฟจะเป็นการกระจัดต่อความต่างศักย์ที่ให้ หรือเป็นค่าสัมประสิทธิ์โพโซอิเล็กทริกในแนวความหนาของสารตัวอย่าง

หลังจากติดตั้งระบบดังกล่าวแล้วทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์โพโซอิเล็กทริก ของสารตัวอย่างที่ทราบค่าสัมประสิทธิ์โพโซอิเล็กทริกคือ  $\text{LiNbO}_3$  ปรากฏว่าผลการทดลองที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน 2 เปอร์เซ็นต์ และระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ มีกำลังแยกกระยะความแตกต่างของระยะทางในระดับ  $10^{-13}$  เมตร

### 5.5 สัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริกของฟิล์มโพธิโซอิเล็กทริก PVDF

ในการวิจัยนี้จะวัดสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF ที่ซื้อมา และ ฟิล์มที่เตรียมในห้องปฏิบัติการที่ผ่านกระบวนการพัฒนาฟิล์ม PVDF ได้แก่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและใช้เวลาในการจัดจั่ว 20 นาที เท่ากันหมด และสนามไฟฟ้าที่ค่า 60, 70, 80 เมกะ โวลต์ต่อเมตร เพื่อดูว่าสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดจั่วไฟฟ้าในกระบวนการพัฒนาฟิล์ม PVDF มีผลต่อสัมประสิทธิ์โพธิโซอิเล็กทริกอย่างไร

หลังจากฟิล์มโพธิโซอิเล็กทริก PVDF ผ่านการทำจั่วไฟฟ้าและนำมายึดติดกับระบบอินเทอร์เฟอโรมิเตอร์ ป้อนสัญญาณให้กับฟิล์มและวัดความต่างศักย์ที่ผ่านลือกอินของฟิล์มที่เตรียมในห้องปฏิบัติการที่สนามไฟฟ้าในการจัดจั่วไฟฟ้าค่าต่างๆ แสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5.2

ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับ สารตัวอย่าง $V_{rms}$ (V)	ความต่างศักย์ของฟิล์มที่สนามจัดจั่วต่างๆ $V_{out}$ ( $\mu V$ )			
	60 MV/m	70 MV/m	80 MV/m	ฟิล์มพาณิชย์
2	28	25	50	170
4	46	61	104	300
6	69	90	146	420
8	80	130	203	520
10	91	165	254	730
12	106	196	304	870
14	121	230	353	1020
16	135	268	407	1180
18	144	293	445	1320
20	153	332	490	1560

ตารางที่ 5.2 ความต่างศักย์ของฟิล์ม ขณะป้อนศักย์ไฟฟ้า ที่สนามจัดจั่วต่างๆ

จากตารางที่ 5.2 สามารถนำมาหาค่าระยะการกระจัด  $d_{ac}$  หาได้จากสมการ 5.14 โดยความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ของแหล่งกำเนิดแสงเท่ากับ 632.8 นาโนเมตร และพื้นที่ของอิเล็กโทรด 0.2 ตารางเซนติเมตร โดยความต่างศักย์  $V_{pp}$  ของฟิล์มที่สนามไฟฟ้าที่ใช้จัดขั้ว 60, 70 และ 80 เมกะโวลต์ต่อเมตร วัดได้เท่ากับ 0.4, 0.8 และ 0.8 โวลต์ ที่ความถี่ 80 กิโลเฮิร์ตซ์

ดังนั้น

$$d_{ac} = \frac{\lambda}{2\pi} \left( \frac{V_{out}}{V_{pp}} \right)$$

และศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้  $V_{out}$  เป็นรากที่สองของค่าโวลต์เฉลี่ย ดังนั้น

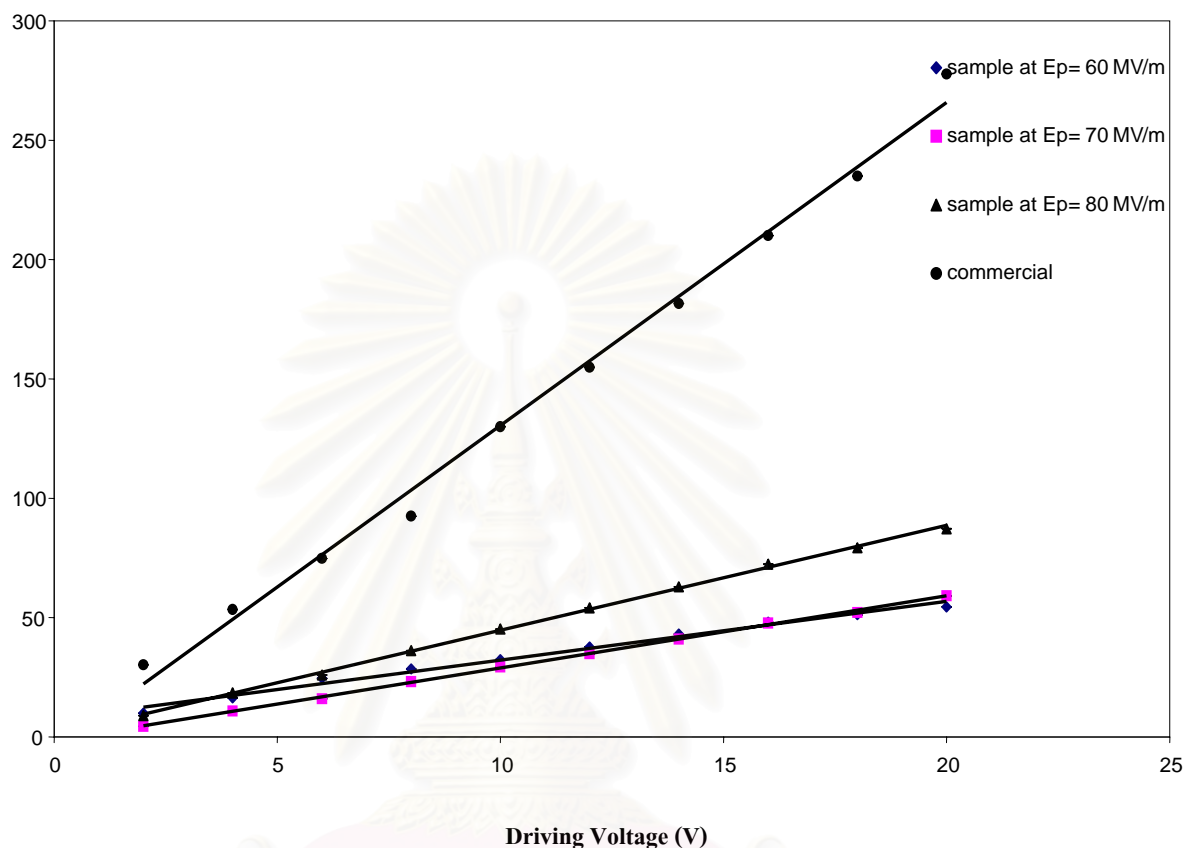
$$\begin{aligned} d_{ac} &= \frac{632.8 \text{ nm}}{2\pi} \left( \frac{V_{out}}{V_{pp}} \right) \\ &= (142.40 \text{ nm}) \left( \frac{V_{out}}{V_{pp}} \right) \end{aligned}$$

ที่ค่าความต่างศักย์  $V_{pp}$  เท่ากับ 0.4 โวลต์ และศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้  $V_{out}$  เท่ากับ 28 ไมโครโวลต์

$$\begin{aligned} d_{ac} &= (142.40 \text{ nm}) \left( \frac{28 \mu\text{V}}{0.4 \text{ V}} \right) \\ &= (0.14240 \text{ pm}) \left( \frac{28}{0.4} \right) \\ &= 9.968 \text{ pm} \end{aligned}$$

ดังนั้น การกระจัดของผิวหน้าฟิล์มเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ เท่ากับ 9.97 พิโคเมตร และการกระจัดของผิวหน้าฟิล์มที่เตรียมขึ้นที่สนามที่ใช้จัดขั้วต่างๆ และฟิล์มที่เชื่อมมา มีความสัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้ฟิล์ม  $V_{rms}$  แสดงดังรูปที่ 5.16

Displacement (pm)

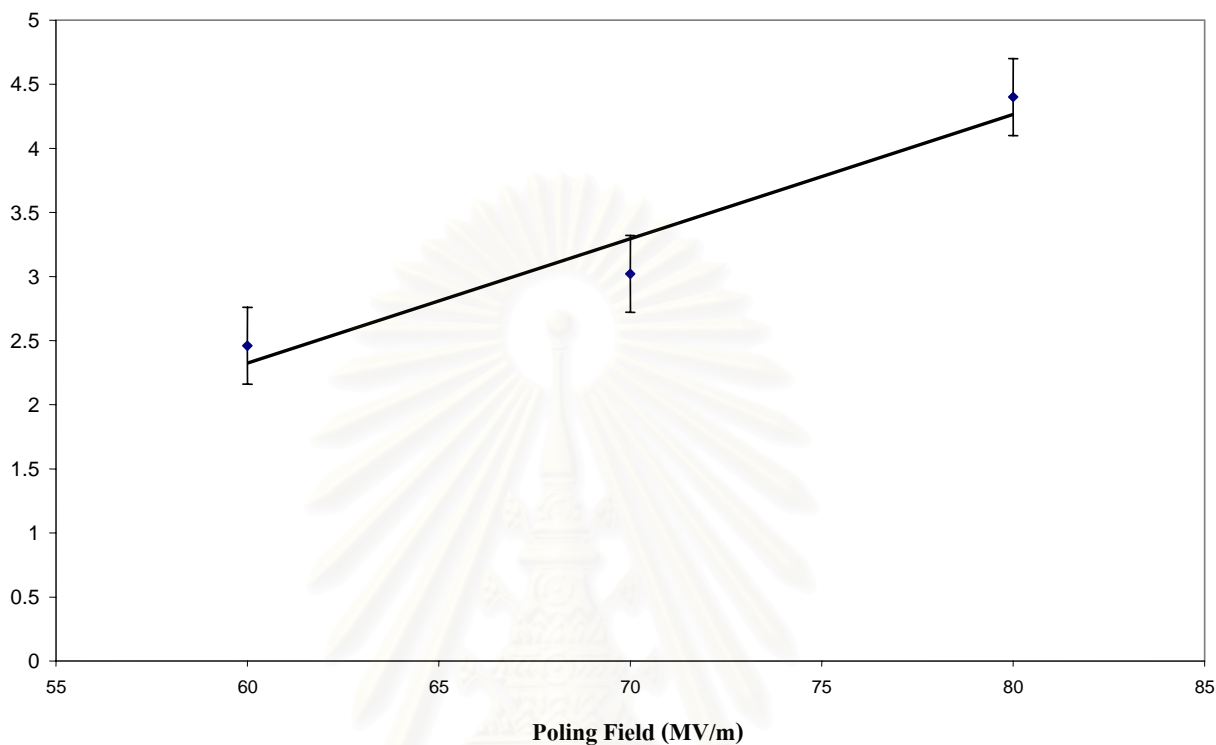


รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นทางไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้ฟิล์ม

จากกราฟที่ 5.16 แสดงว่าสารตัวอย่างมีพฤติกรรมทางไพโซอิเล็กทริก ความชันของกราฟคืออัตราส่วนระหว่างการกระตุ้นต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกในแนวความหนาของฟิล์ม PVDF โดยฟิล์มที่สนามไฟฟ้าที่ใช้จัดขึ้น 60, 70 และ 80 เมกะโวลต์ต่อเมตร วัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกเท่ากับ 2.5, 3.0 และ 4.4 pm/V ตามลำดับ และฟิล์มที่เชื่อมมาวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกเท่ากับ 13.5 pm/V



Piezoelectric coefficient (pm/V)



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกและสนามไฟฟ้าที่ให้แกฟิล์มขณะจัดจั่ว

ฟิล์ม PVDF ที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการมีลักษณะของปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าให้ตกคร่อมแกฟิล์ม PVDF เกิดการกระจัดของฟิล์ม เป็นไปตามปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริกแบบแปรผกผัน และเมื่อนำศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมแกฟิล์ม PVDF กับการกระจัดของฟิล์มมาเขียนกราฟ ค่าความชันที่ได้คือค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกมีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดจั่ว เมื่อให้อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการจัดจั่วจะเท่ากัน แสดงดังรูปที่ 5.17 ปรากฏว่าค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อให้สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดจั่วเพิ่มขึ้น

## 5.4 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์ม PVDF โดยวิธีการหล่อในสารละลายซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและสามารถเตรียมได้ในห้องปฏิบัติการ ฟิล์มที่ได้จะมีความไม่สม่ำเสมอ อาจมีฟองอากาศปนอยู่ ทำให้ฟิล์มมีความหนาไม่เท่ากัน เมื่อนำฟิล์มไปยืดอาจทำให้ฟิล์มฉีกขาดได้ง่าย ดังนั้นจึงควรเลือกฟิล์มส่วนที่มีความหนาเท่ากันไปใช้

สำหรับการยืดฟิล์ม ควรยืดฟิล์มอย่างช้าๆ ใช้อัตราเร็วของการหมุนที่ความเร็วต่ำๆ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และอัตราการยืด  $1/1_0$  เท่ากับ 3.5 - 4.0 เท่า ถ้าหากใช้อัตราเร็วของการหมุนและอัตราการยืดที่มากขึ้น ฟิล์มจะยืดได้ยากและเกิดการฉีกขาดของฟิล์มได้ง่าย

ฟิล์ม PVDF ที่เตรียมขึ้นและฟิล์ม PVDF ที่ผ่านขั้นตอนการยืด เมื่อนำไปทดสอบโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ทำมาแล้ว แสดงว่าฟิล์ม PVDF ที่เตรียมได้มีการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากแบบแอลฟามาเป็นแบบเบตาเมื่อผ่านการยืดฟิล์ม ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกที่แสดงสมบัติไพโซอิเล็กทริกได้ดี

สำหรับการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกค่าที่ความถี่ 1 kHz วัดได้ค่าเท่ากับ 12.26 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่อ้างอิงในวารสาร และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับสนามไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการจัดขั้ว ปรากฏว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกลดลง เมื่อให้สนามไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนการจัดขั้วมีค่ามากขึ้น ซึ่งสาเหตุอาจมาจากส่วนที่เป็นผลึกภายในแลมเมลล่ามีการขยายตัวขึ้น เมื่อให้สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้วไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานพอลิเมอร์กิ่งผลึกมีค่าน้อยลง

ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกได้ใช้เทคนิคอินเทอร์เฟอร์โรมิเตอร์ ฟิล์ม PVDF ที่ซึ่มาสามารถวัดได้ 13.5 pm/V และฟิล์ม PVDF ที่เตรียมขึ้น โดยให้อุณหภูมิขณะจัดขั้ว 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาที และ สนามไฟฟ้าที่ใช้ขณะจัดขั้ว 60, 70 และ 80 MV/m ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกมีค่าเท่ากับ 2.5, 3.0 และ 4.4 pm/V ตามลำดับ ค่าที่วัดได้มีปริมาณน้อยซึ่งอาจเกิดจากการวัดเนื่องจากกระจกบนผิวหน้าอิเล็กโทรด แม้ว่าผิวหน้าของอิเล็กโทรดที่ฉาบด้วยทองจะเงาแววแต่ถ้าแสงที่สะท้อนออกมาไม่คมชัด ทำให้ยากต่อการวัด ทำการแก้ไขโดยติดกระจกที่เล็กมากๆ ขนาด 2 x 2 มิลลิเมตร และมีน้ำหนัก 0.001 กรัม ทำให้ฟิล์มสะท้อนแสงเลเซอร์ได้ดีขึ้น แต่อาจส่งผลต่อการสั่นของฟิล์ม ทำให้ค่าการกระจัดลดลง แต่ถึงอย่างไรค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อให้สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้วสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่า สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการจัดขั้วที่มีค่าสูงขึ้น จะสามารถหมุนไดโพลในผลึกเฟสเบตาให้ชี้ไปแนวเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้าได้มากขึ้นเป็นการเพิ่มโพลาริเซชัน ทำให้เกิดการกระจัดทางไฟฟ้าได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ไพโซอิเล็กทริกมีค่าสูงขึ้น

### 5.5 งานที่สามารถทำต่อในอนาคต

ส่วนงานวิจัยในอนาคต ควรพัฒนาระบบการวัดทางแสงนี้ระบบการวัดควรอยู่ในห้องเฉพาะ ซึ่งสามารถป้องกันและลดสิ่งรบกวนระบบจากสิ่งแวดล้อม และผิวของสารที่นำมาวัดควรสะท้อนแสงเลเซอร์ได้ดี ซึ่งหมายถึงสารที่เตรียมได้ควรมีผิวเรียบมากๆ สามารถอาศัยการขึ้นรูปได้โดยวิธี spin coater เพื่อให้ผิวเรียบสม่ำเสมอและสามารถเตรียมฟิล์มให้มีขนาดความหนาในระดับนาโนเมตร (nano scale) ซึ่งสามารถจัดอยู่ในวัสดุนาโน (nano materials) ศึกษาพฤติกรรมในระดับนาโนและทดลองจนนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์ต่างๆ หากมีการสนับสนุนอย่างต่อเนื่องก็สามารถพัฒนาในเชิงพาณิชย์ได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- พูนศักดิ์ สัตตวิทย์. การพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริกโดยใช้พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- มนัส แซ่ด่าน. รีโอโลยีเบื้องต้น(ศาสตร์แห่งการไหลของพอลิเมอร์). กรุงเทพมหานคร: โฟร์เพช, 2538.

### ภาษาอังกฤษ

- Bottino, A.; Roda, G. C.; Capannelli, G. and Munari, S. The Formation of Microporous Polyvinylidene difluoride Membrane by Phase Separation. *J.Membrane Science* 57 (1991): 1-20.
- Broadhurst, M. G.; Davis, G. T.; Cinney, J. E. and Collins, R. E. Piezoelectricity and Pyroelectricity in Polyvinylidene Fluoride – A model. *J.Appl.Phys.* 49 (1978): 4992-4997.
- Buchanan, R. C. *Ceramic Materials for Electronics*. 2<sup>nd</sup> ed. New York ; Marcel Dekker, 1991.
- Chung; K. T.; Newman, B. A.; Scheinbeim, J. I. and Pae, K. D. The Pressure and Temperature dependence of Piezoelectric and Pyroelectric Response of Poled Unoriented Phase I Poly(vinylidene fluoride). *J.Appl.Phys.* 53 (1982): 6557-6562.
- Das Gupta, D. K. and Doughty K. Piezoelectricity in Uniaxially Stretched and Corona Poled Polyvinylidene Fluoride. *J.Phys.D : Appl.Phys.* 13 (1980): 95-105.
- Deshmukh, S. P. and Li, K. Effect of Ethanol Composition in Water Coagulation Bath on Morphology of PVDF Hollow Fiber Membranes. *J.Membrane Science* 150 (1998): 75-85.
- Guy, I. L. An Investigation of aspects of Polarisation Reversal in Some Ferroelectric Polymers. *Ph.D thesis*, Macquarie University, 1987.
- Hasegawa, R.; Takahashi, Y.; Chatani, Y.; and Tadokoro, H. Crystal Structure of Three Crystalline Forms of Poly(vinylidene fluoride). *J. Polymer Science* 3 (1972): 600-610.
- Kittel, C. *Introduction to Solid State Physics*. 6<sup>th</sup> ed. New York : John Wiley & Sons, 1988.

- Liu, J. M.; Pan, B.; Chan, H. L. W.; Zhu, S. N.; Zhu, Y. Y. and Liu, Z. G. Piezoelectric Coefficient Measurement of Piezoelectric Thin Films: an Overview. J. Materials Chemistry and Physics 75 (2002): 12-18.
- Lovinger, A. J. Ferroelectric Polymers. Science 220 (1983): 1115-1121.
- Lovinger, A. J. Unit Cell of the  $\gamma$  Phase of Poly(vinylidene fluoride). Macromolecules 14 (1981): 322-325.
- Lovinger, A. J.; Davis, D. D.; Cais, R. E. and Kometani, J. M. On the Curie Temperature of Poly(vinylidene fluoride). Macromolecules 19 (1986): 1491-1494.
- Magistris, A.; Mustarelli, P.; Parazzoli, F.; Quartarone, E.; Piaggio, P. and Bottino, A. Structure, Porosity and Conductivity of PVdF Films for Polymer Electrolytes. J. Power Sources 97-98 (2001): 657-660.
- Mikyong, Y.; Frank, C. W.; Mori, S. and Yamaguchi, S. Effect of Poly(vinylidene fluoride) Binder Crystallinity and Graphite Structure on the Mechanical Strength of the Composite Anode in a Lithium Ion Battery. J. Polymer (2003): 1-8.
- Muensit, S. and Guy, I. L. The Piezoelectric Coefficient of Gallium Nitride Thin Films. J. Appl. Phys. Lett. 72 (1998): 1896-1898.
- Nakamura, K.; and Wada, Y. Piezoelectricity, Pyroelectricity, and the Electrostriction Constant of Poly(vinylidene fluoride). J. Polymers Science 9 (1971): 161-173.
- Nalwa, H. S. Ferroelectrics Polymers : Chemistry, Physics and Application. New York : Marcel Dekker, 1995.
- Nye, J, F. Physics Properties of Crystals. London : Oxford University Press, 1957.
- Smith, W. F. Materials Science and Engineering. 2<sup>nd</sup> ed. McGraw-Hill, 1993.
- Usher, M. J. and Keating D. A. Sensors and Transducers. 2<sup>nd</sup> ed. Houndmills : Macmillan press, 1985.
- Wang, T. T.; Herbert, J. M. and Glass, A. M. The Application of Ferroelectric Polymers. Glasgow : Blackie and Son, 1988.
- Zhang, Q. M.; Pan, W. Y. and Cross, L. E. Laser Interferometer for the Study of Piezoelectric and Electrostrictive Strains. J. Appl. Phys. 63 (1988): 2492-2496.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### สมบัติทางกายภาพและไฟฟ้าของฟิล์มที่ซื้อมา

#### Properties of KF Piezo Film

**Thickness :** 9, 30 micrometer

#### **Piezoelectric Strain Constant :**

**d31 :** 20-30

**d32 :**  $4-5 * 10^{(-12)}$  coul/N at 10 Hz

**Electromechanical Coupling Factor (k31) :** 13-16 % at 10 Hz

**Pyroelectric Coefficient (p) :**  $4-5 * 10^{(-9)}$  coul/(cm<sup>2</sup>)(deg)

**Density :** 1.78-1.79 g/cm<sup>3</sup>

**Volume Resistivity :**  $8-10 * 10^{(14)}$  Ohm-meter

**Dielectric constant :** 12-13 at 1kHz

**Dielectric Loss Factor :** 0.015-0.02 at 1kHz

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลของออปแอมป์ LF353



www.fairchildsemi.com

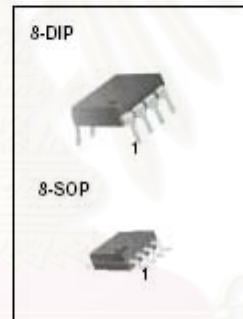
## LF353 Dual Operational Amplifier (JFET)

### Features

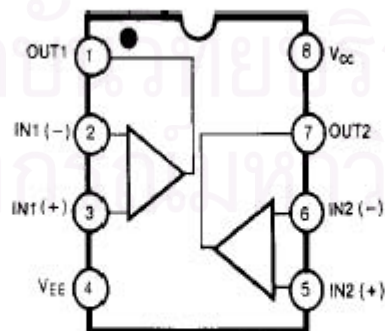
- Internally trimmed offset voltage: 10mV
- Low input bias current: 50pA
- Wide gain bandwidth: 4MHz
- High slew rate: 13V/ $\mu$ s
- High Input impedance:  $10^{12}\Omega$

### Description

The LF353 is a JFET input operational amplifier with an internally compensated input offset voltage. The JFET input device provides wide bandwidth, low input bias currents and offset currents.



### Internal Block Diagram



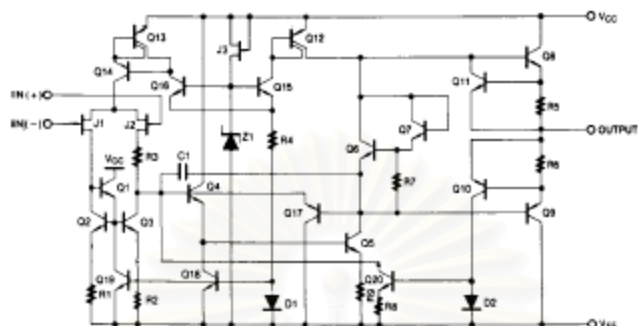
Rev. 1.0.0



LF353

## Schematic Diagram

(One Section Only)



## Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage	VCC	±18	V
Differential Input Voltage	V <sub>I(DIFF)</sub>	30	V
Input Voltage Range	V <sub>I</sub>	±15	V
Output Short Circuit Duration	-	Continuous	-
Power Dissipation	P <sub>D</sub>	500	mW
Operating Temperature Range	T <sub>OPR</sub>	0 – +70	°C
Storage Temperature Range	T <sub>STG</sub>	-65 – +150	°C

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Electrical Characteristics

(VCC = +15V, VEE = -15V, TA = 25 °C, unless otherwise specified)

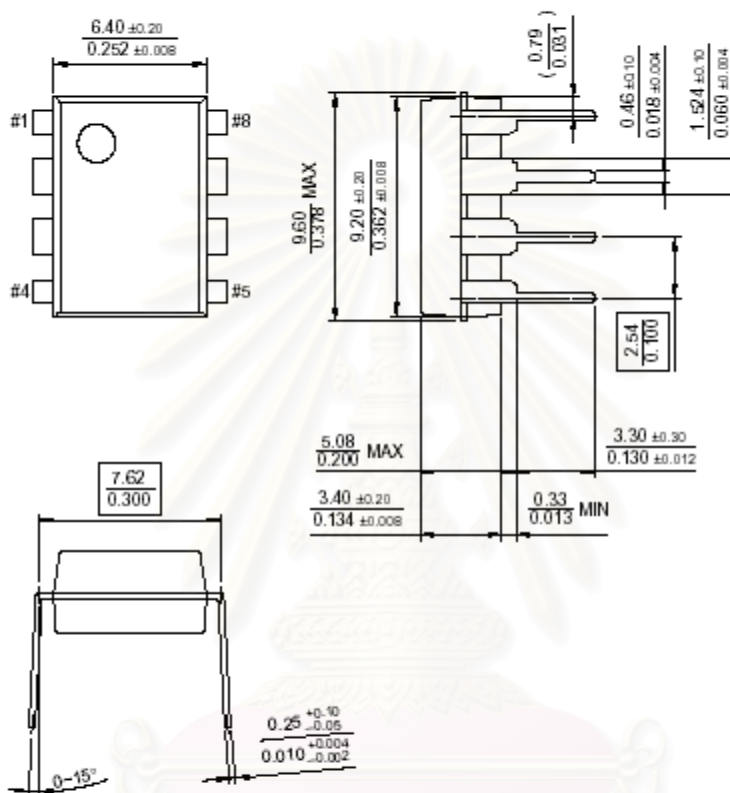
Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Input Offset Voltage	V <sub>IO</sub>	RS=10KΩ	-	5.0	10	mV
		0 °C ≤ TA ≤ +70 °C	-	-	-	-
Input Offset Voltage Drift	ΔV <sub>IO</sub> /ΔT	RS=10KΩ	-	10	-	μV/°C
Input Offset Current	I <sub>IO</sub>		-	25	100	pA
		0 °C ≤ TA ≤ +70 °C	-	-	4	nA
Input Bias Current	I <sub>BIAS</sub>		-	50	200	pA
		0 °C ≤ TA ≤ +70 °C	-	-	8	nA
Input Resistance	R <sub>I</sub>	-	-	10 <sup>12</sup>	-	Ω
Large Signal Voltage Gain	G <sub>V</sub>	V <sub>O(P-P)</sub> = ±10V	25	100	-	V/mV
		R <sub>L</sub> = 2KΩ	15	-	-	-
Output Voltage Swing	V <sub>O(P-P)</sub>	R <sub>L</sub> = 10KΩ	±12	±13.5	-	V
Input Voltage Range	V <sub>I(R)</sub>	-	±11	±15/-12	-	V
Common Mode Rejection Ratio	CMRR	R <sub>S</sub> ≤ 10KΩ	70	100	-	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	R <sub>S</sub> ≤ 10KΩ	70	100	-	dB
Power Supply Current	I <sub>CC</sub>	-	-	3.6	6.5	mA
Slew Rate	SR	G <sub>V</sub> = 1	-	13	-	V/μS
Gain-Bandwidth Product	GBW	-	-	4	-	MHz
Channel Separation	CS	f = 1Hz ~ 20KHz (Input referenced)	-	120	-	dB
Equivalent Input Noise Voltage	V <sub>NI</sub>	R <sub>S</sub> = 100Ω f = 1KHz	-	16	-	nV/ √Hz
Equivalent Input Noise Current	I <sub>NI</sub>	f = 1KHz	-	0.01	-	pA/ √Hz

LF353

## Mechanical Dimensions

Package

## 8-DIP

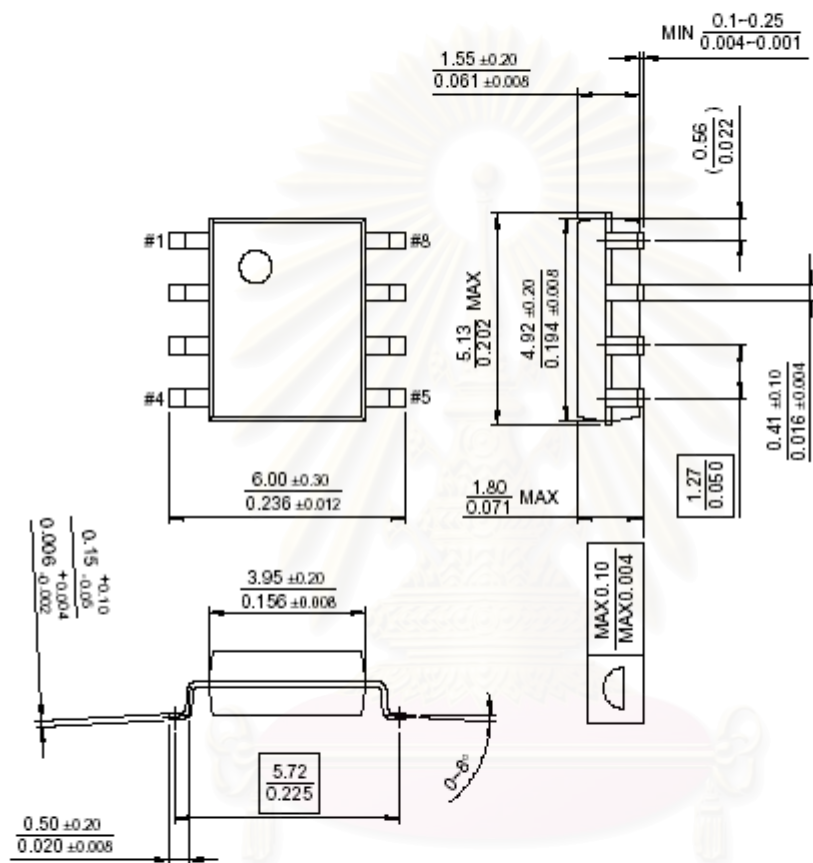


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Mechanical Dimensions

Package

### 8-SOP



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LF353

## Ordering Information

Product Number	Package	Operating Temperature
LF353N	8-DIP	0 ~ + 70°C
LF353M	8-SOP	

### DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

### LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury of the user.
2. A critical component in any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

[www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com)

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ	นายชัชชัย พุทซ้อน
วัน เดือน ปี เกิด	10 มกราคม 2521
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2543
ทุนการศึกษา	ทุนโครงการพัฒนาอาจารย์ ของทบวงมหาวิทยาลัย ประจำปีการศึกษา 2544-2546 ทุนอุดหนุนงานวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปีการศึกษา 2547
ผลงานวิชาการ	เสนอผลงานวิชาการแบบบรรยาย ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยีวัสดุแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 วันที่ 10-11 สิงหาคม 2547 ณ โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวนชั่น
ปัจจุบัน	เข้ารับตำแหน่งอาจารย์ สังกัดภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย