บทที่ 4

การเก็บประจุ

มีสารโพลิเมอร์หลายชนิดที่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้นานๆ ประจุไฟฟ้าที่ถูกกักไว้ในสารโพลิเมอร์นั้น จะมีผลทำให้สารโพลิเมอร์พิซโซอิเลคตริกนั้นมีสภาพพิซโซอิเลคตริกเพิ่มขึ้น ประจุไฟฟ้าที่กล่าวถึงนี้ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ประจุจริง (real charge) และประจุโพลาไรเซชัน (polarization charge) ประจุไฟฟ้าที่จะถูกกักไว้จะเป็นชนิดใดขึ้นอยู่กับวิธีการประจุซึ่งจะได้กล่าวต่อไป [3]

1. ประจุจริง แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก). ประจุผิวหน้า (Surface charge) ประกอบด้วยชั้นของพาหะ(carriers) ซึ่งอาจจะเป็นประจุบวกหรือประจุลบ ถูกกักไว้ที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นโพลิเมอร์ หรือบริเวณใกล้ๆกับผิวหน้า

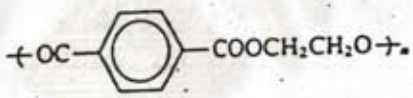
ข). ประจุปริมาตร (volume charge) เป็นประจุที่รวมกันเป็นกลุ่มหมอกประจุอยู่เป็นหย่อมๆในเนื้อสาร

ประจุจริงนี้อาจมีการย้ายตำแหน่งจากตำแหน่งเดิมภายในโมเลกุลหรือในโครงสร้างโดเมนตลอดทั่วเนื้อสาร ทำให้เกิดขั้วคู่โพลาไรเซชัน นอกจากนี้ในบางกรณีอาจเกิดประจุผิวหน้าและประจุปริมาตรในเวลาเดียวกันก็ได้

2. ประจุโพลาไรเซชัน ประกอบด้วยขั้วคู่ที่ถูกตรึงไว้ ประจุชนิดนี้จะกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อสารเป็นฟังก์ชันของความลึกจากผิวหน้าหรือ อาจมีการกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอก็ได้

เสถียรภาพของประจุทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับสภาพนำไฟฟ้า (conductivity) สภาพเคลื่อนได้ของพาหะ (Carriers mobility) ที่ถูกกัก และความถี่ผ่อนคลายของขั้วคู่ (dipole relaxation frequency)

สารที่มีสภาพนำไฟฟ้าและสภาพเคลื่อนได้ของพาหนะต่ำจะกักเก็บประจุจริงได้นาน เช่น เทฟล่อน (Teflon) โพลีเตตระฟลูออร์โรเอทธิลีน (Polytetrafluorocthylene, PTFE) และโพลิเมอร์ร่วม .ของ ฟลูออร์โรเอทธิลีโพรไพลีน (fluorocthylene propylene, FEP) ส่วนสารที่มีความถี่ผ่อนคลายของขั้วคู่ต่ำจะเก็บประจุโพลาไรเซชันได้นาน เช่น PVDF ซึ่งเป็นสารโพลิเมอร์ที่เก็บประจุโพลาไรเซชันได้ดี มีสารโพลิเมอร์หลายชนิดที่เก็บประจุทั้งสองชนิดได้ดี เช่น โพลีเอทธิลีน (Polycthylene, PE) และโพลีเอทธิลีนเทเรฟทาเลท (Polyethylene terephthalate, PET) ในตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลบางอย่างของโพลิเมอร์ที่กล่าวมาแล้ว

Name	Repeat Unit	Acronym	Trade Name
Polyacetylene	$+CH=CH+_n$	$(CH)_n$	
Polyethylene	$+CH_2-CH_2+_n$	PE	
Poly(tetrafluoroethylene)	$+CF_2-CF_2+_n$	PTFE	Teflon
Poly(ethylene terephthalate)		PET	Mylar
Poly(vinylidene fluoride)	$+CH_2CF_2+_n$	PVDF	Kynar

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติบางอย่างของสารโพลิเมอร์ [3]

แผ่นฟิล์มโพลิเมอร์ที่จะถูกนำมาเก็บประจุนั้น ต้องนำไปทำให้เป็นแผ่นบาง ขนาดความหนาประมาณ 5-50μm. ส่วนรูปร่างของแผ่นฟิล์มนั้นขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ แผ่นฟิล์มจะถูกฉาบด้วยโลหะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีวิธีการฉาบได้หลายวิธี อาจฉาบเพียงด้านเดียวหรือสองด้านขึ้นอยู่กับวิธีการประจุ ความหนาของโลหะที่ฉาบที่ผิวหน้าฟิล์มนั้นประมาณ 500-1,000 Å พบว่าโพลิเมอร์ที่เก็บประจุจริงได้นั้น เมื่อทำการประจุแล้ว สามารถโพลาไรซ์ได้ความหนาแน่นประจุถึง 10^{-8} C/cm^2 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับจุดพังทลาย (Breakdown) ของสาร ส่วนประจุโพลาไรเซชันนั้นจะได้ความหนาแน่นประจุถึง 10^{-6} C/cm^2 สารโพลิเมอร์ที่ถูกประจุแล้วเรียกว่า "อิเลคเทรด โพลิเมอร์" (Polymer electrets)

เทคนิคการประจุ [3,5]

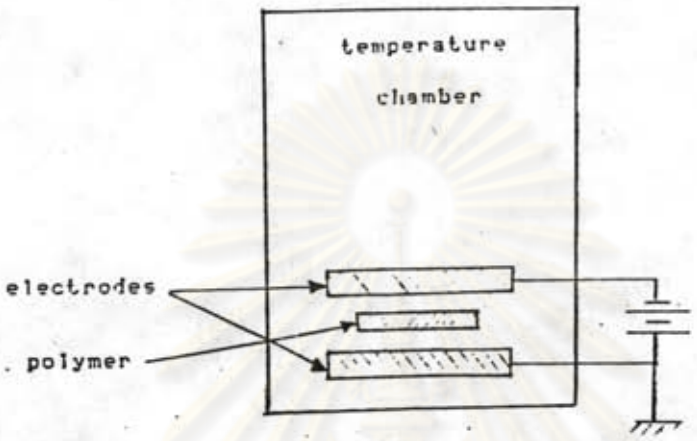
การประจุของโพลิเมอร์ทำได้หลายวิธี เช่น การประจุโดยวิธีความร้อน การประจุโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบเปียก และการประจุแบบโคโรนา การประจุแต่ละวิธีจะให้ประจุจริงและประจุโพลาไรเซชันต่างกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การประจุโดยวิธีความร้อน (Thermal Methods)

การประจุโดยวิธีความร้อนนี้ เป็นวิธีการประจุโดยการให้สนามไฟฟ้าแก่แผ่นฟิล์มแล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปเรื่อย ๆ จากนั้นก็ลดอุณหภูมิลง ในขณะที่ยังคงให้สนามไฟฟ้าอยู่ การที่ให้สนามไฟฟ้าพร้อม ๆ กับการเพิ่มอุณหภูมินี้ เพื่อให้ขั้วคู่ของโพลิเมอร์นั้นปรับแนวตามสนามไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น และให้ประจุไฟฟ้าอิสระฝังอยู่ในเนื้อสารได้ลึกพอ และมีสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น และเมื่อลดอุณหภูมิลง ทำให้ทิศทางของขั้วคู่ถูกตรึงค้างไว้ ผลก็คือแผ่นฟิล์มนั้นจะมีขั้วคู่สุทธิเกิดขึ้น อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการประจุโดยวิธีนี้ จะสูงกว่าอุณหภูมิทรานซิชันแต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารที่ทำการประจุนั้น

ลักษณะการจัดวางเครื่องมือสำหรับการประจุโดยวิธีความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แผ่นฟิล์มโพลิเมอร์ที่นำมาประจุนี้ จะต้องทำขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน ลักษณะของขั้วไฟฟ้ามีอยู่ 2 แบบ คือ ขั้วไฟฟ้าชนิดที่ฉาบติดทั้งสองด้านของแผ่นฟิล์ม ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแบบนี้ จะทำให้ประจุไฟฟ้าจากขั้วไฟฟ้าถูกฉีดแทรกเข้าไปในเนื้อสาร ทำให้มีประจุอิสระฝังอยู่ภายใน และขั้วคู่มีการจัดเรียงตัวกันภายในเนื้อสาร ส่วนขั้วไฟฟ้าอีกแบบหนึ่งนั้น มีลักษณะเป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะแผ่นบาง ประกบติดทั้งสองด้านของแผ่นฟิล์ม ขั้วไฟฟ้าแบบนี้จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างแผ่นฟิล์มกับขั้วไฟฟ้า เมื่อให้สนามไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของอากาศตรงบริเวณช่องว่างนี้เกิดการแตกตัว ประจุอิสระที่เกิดขึ้นจะไปพอกพูนอยู่บริเวณผิวหน้าของแผ่นฟิล์ม

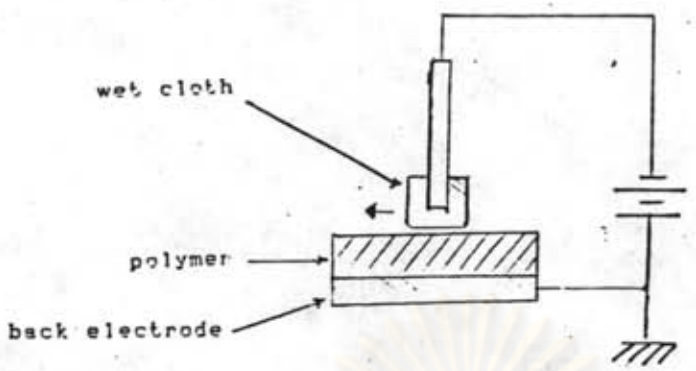
สำหรับเงื่อนไขของการจัดขั้วโดยวิธีความร้อนนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของโพลิเมอร์ที่ทำการประจุ เช่น ในกรณีของ PVDF จะใช้ขั้วไฟฟ้าแบบที่ฉาบติดกับแผ่นฟิล์ม อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ประมาณ 80 - 50 °c ความเข้มสนามไฟฟ้า 2 MV/cm เป็นต้น



รูปที่ 4.1 แสดงการจัดเครื่องมือเตรียมการประจุแผ่นฟิล์ม
ด้วยวิธีความร้อน [3]

2. การประจุโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบเปียก (Liquid-Contact Method)

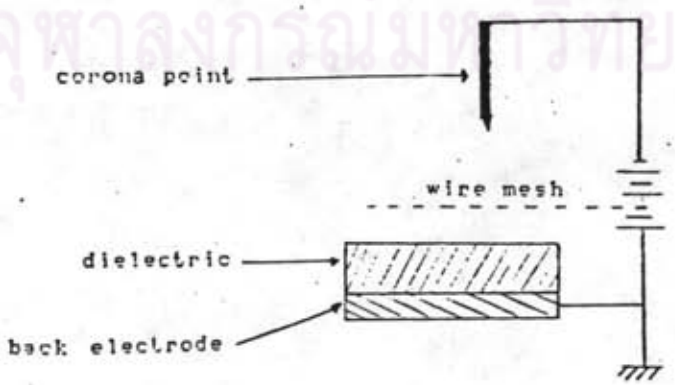
โดยฉาบขั้วไฟฟ้าโลหะที่ผิวของแผ่นฟิล์มเพียงด้านเดียวต่อกับกราวด์ อีกด้านหนึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าแบบเปียก (อาจจะใช้ผ้าชุบของเหลวก็ได้) ของเหลวที่ใช้จะต้องระเหยง่าย เช่น น้ำ และเอทธิลแอลกอออล์ ให้สนามไฟฟ้าขั้วบวกที่ขั้วไฟฟ้านี้ดังรูป 4.2 จนกระทั่งของเหลวนั้นแห้งจึงหยุดให้สนามไฟฟ้า ถ้าหากแผ่นฟิล์มมีขนาดใหญ่อาจใช้วิธีเลื่อนขั้วไฟฟ้าของเหลวนั้นไปจนทั่วแผ่นฟิล์ม การประจุด้วยวิธีนี้จะทำให้อิเลคตรอนถูกฝังในบริเวณใกล้ๆกับผิวหน้าของแผ่นฟิล์ม การที่อิเลคตรอนจะถูกฝังในเนื้อสารลึกเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของโพลิเมอร์และความเข้มของสนามไฟฟ้า เช่น เทฟลอน อิเลคตรอนจะถูกฝังเข้าไปลึก 1.5 และ 5 μm. ที่ขนาดของสนามไฟฟ้า 10 และ 20 Kev ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ไดอะแกรมแสดงการจัดเตรียมการประจุโดยวิธีใช้ขั้วไฟฟ้าแบบเปียก

3. การประจุโดยวิธีโคโรนา (Corona discharge Method)

แผ่นฟิล์มที่จะประจุโดยวิธีนี้จะถูกฉาบด้วยขั้วไฟฟ้าโลหะเพียงด้านเดียว อีกด้านหนึ่งจะมีขั้วโลหะที่มีลักษณะเป็นเข็มสามารถเลื่อนไปมาได้ขั้วโลหะแบบเข็มนี้ จะอยู่ห่างจากผิวหน้าของแผ่นฟิล์มพอสมควร และให้ศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองที่กล่าวมาแล้ว ศักด์ไฟฟ้าที่ให้จะอยู่ในช่วงของกิโลโวลต์ ประจุโคโรนาจะเกิดขึ้นที่ขั้วโลหะแบบเข็ม และประจุที่เกิดขึ้นนี้จะฝังเข้าไปในบริเวณใกล้ๆ กับผิวหน้าของแผ่นฟิล์มประจุที่ถูกประจุเข้าไปในสารด้วยวิธีนี้จะมากกว่าทั้งสองวิธีที่กล่าวมาแล้ว เนื่องจากใช้สนามไฟฟ้าสูงกว่าโดยที่ไม่เกิดการเสียหายแก่แผ่นฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมแสดงวิธีการประจุแบบโคโรนา

ผลจากการประจุ

เมื่อประจุอิสระถูกกักในเนื้อสาร จะมีสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอบๆประจุนี้ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะไปรบกวนขั้วคู่และไอออนต่างๆในโมเลกุลของสารโพลิเมอร์ นอกจากนั้นสนามไฟฟ้าภายนอกที่ให้แก่แผ่นฟิล์มก็จะมีผลต่อการเลื่อนตำแหน่งของโมเลกุลด้วย การประจุนี้ทำให้โมเมนต์ขั้วคู่ซึ่งแต่เดิมที่ทิศทางไม่เป็นระเบียบกลับมีทิศทางชี้ไปทางเดียวกันตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป ดังนั้นโพลิเมอร์ที่ถูกประจุแล้วจึงมีโพลาไรเซชันสุทธิ การประจุนี้บางทีเรียกว่าการจัดขั้ว (poling)

การเรียงตัวของขั้วคู่ (dipole orientation) [3,5]

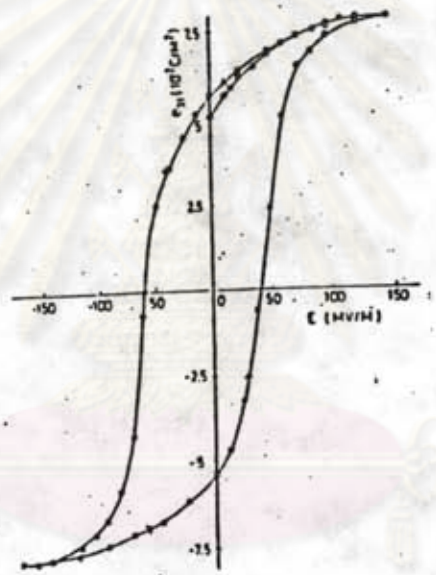
เมื่อแผ่นฟิล์มถูกจัดขั้ว จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งส่วนอนุภาคและมหภาค และมีผลทำให้ค่าคงตัวพิซโซอิเลคตริกเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ดียังไม่มีทฤษฎีใดสามารถบอกได้ว่าอะไรคือสาเหตุใหญ่ที่ทำให้แผ่นฟิล์มโพลิเมอร์เมื่อถูกจัดขั้วแล้วแสดงสภาพพิซโซอิเลคตริกเพิ่มขึ้น สาเหตุใหญ่ๆนี้มีอยู่ 3 ประการ คือ

1. เกิดการหมุนของสายโซ่โมเลกุล (rotation of individual chains) แต่เป็นการหมุนแบบไม่ต่อเนื่องตลอดทั้งเนื้อสาร การหมุนของสายโซ่นั้นหาได้จากการทดลองวิธีเดียว ไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนเกินไป ทาคาฮาชิและโอดะจิมา (Takahashi and Odajima) ได้ทำการทำลอง และพบว่า PVDF มีสายโซ่โมเลกุลหมุนไป 130-180 องศา และมีการเลื่อนไปในแนว c เป็นระยะ c/2 เมื่อถูกจัดขั้ว

2. เกิดการเลื่อนไปของผนังโดเมน (domain wall) ทำให้โพลาไรเซชันเปลี่ยนไป มักจะใช้อธิบายปรากฏการณ์เฟอโรอิเลคตริกมากกว่า สำหรับ PVDF ยังไม่มีคำอธิบายเนื่องจากยังไม่ทราบโครงสร้างของโดเมน

3. เกิดการหมุนของผลึก เมื่อผลึก(ซึ่งปนอยู่ในส่วนอสัณฐาน) ได้รับสนามไฟฟ้าทำให้ผลึกเกิดการหมุนเพื่อวางขั้วคู่ ตามแนวของสนามไฟฟ้า ทิศทางของขั้วคู่นี้จะเสถียรก็ต่อเมื่อทำการจัดขั้วในจะของอุณหภูมิที่พอเหมาะ (เพิ่มและลดอุณหภูมิลง) เนื่องจากการผ่อนคลาย (retaxation) ของผลึก

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันเชื่อว่า สภาพพิซโซอิเลคตริกของ PVDF เกิดจากการหมุนของผลึกเมื่อได้รับสนามไฟฟ้า มากกว่าสาเหตุอื่น ซึ่งฟูกูดะได้ทำการทดลองวัดค่าคงตัวพิซโซอิเลคตริก e_{31} ของ PVDF ที่อุณหภูมิ -50 °c (ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิทรานซิชันมาก ถือได้ว่าส่วนอสัณฐานถูกตรึง มีเพียงส่วนผลึกเท่านั้นที่จัดเรียงตัวตามสนามไฟฟ้าได้) พบว่าเมื่อให้สนามไฟฟ้าความเข้มแตกต่างกัน ค่า e_{31} ก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งแสดงว่าการหมุนของก้อนผลึกมีผลต่อสภาพพิซโซอิเลคตริกของ PVDF มากกว่าสาเหตุอื่น [3,4]



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงฮีสเตอไรซีสของค่าคงตัว
พิซโซอิเลคตริกของ PVDF กับสนามไฟฟ้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย