# บทที่ 6
# การพัฒนาอุปกรณ์ตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริกจากฟิล์ม PVDF

จากที่กล่าวมาแล้วว่าฟิล์มไพโรอิเล็กทริกที่ดีควรจะมีค่าสัมประสิทธิ์ไพโรอิเล็กทริกที่สูง นอกจากนี้ยังต้องมีคุณสมบัติอื่นอีก เช่น มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีที่ต่ำ เพื่อทำให้ฟิล์มดูดกลืนรังสีได้มากขึ้น และควรมีความจุความร้อนต่ำ เพื่อให้ฟิล์มมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีรังสีมาตกกระทบ

โดยทั่วไปอุปกรณ์ตัวรับรู้ไพโรอิเล็กทริก จะใช้ตัวรับรู้ (sensor) ที่จะทำมาจากสารกึ่งตัวนำ หรือไม่ก็เซรามิก ในปัจจุบันได้มีการนำฟิล์ม PVDF ที่ผ่านกระบวนการทางกายภาพดังที่ได้กล่าวมาแล้ว มาประยุกต์ใช้ในทางพาณิชย์ (commercialized applications) หลายอย่าง (Skotheim, 1988) เช่น

-ตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด (infrared detectors)

-ลำโพง (loudspeakers)

-ไมโครโฟน (microphones)

-หูวิทยุหรือโทรศัพท์ (headphones)

ในการวิจัยนี้จะประดิษฐ์เครื่องมือที่ใช้ฟิล์มพอลิเมอร์ไพโรอิเล็กทริกเป็นตัวรับรู้ (polymer sensor) โดยจะนำฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ที่ได้เตรียมมาแล้ว มาพัฒนาเป็นเครื่องมือซึ่งใช้ในบ้านหรือสถานที่ต่าง ๆ ที่มีขนาดเล็ก มีต้นทุนในการผลิตต่ำ ได้แก่ เครื่องตรวจจับผู้บุกรุก (intruder detector) เครื่องเตือนไฟไหม้ (fire alarms)

## 6.1 เครื่องตรวจจับผู้บุกรุก

จากที่ได้ศึกษามาแล้วในหัวข้อ 5.2 พบว่า การตอบสนองความต่างศักย์ของฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ต่อรังสีอินฟราเรดจากตัวคนมีค่าน้อยซึ่งใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน และจากการพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ จากฟิล์มเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากสมการ (5.11) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{dV}{dt} = \frac{b}{\varepsilon_0 K}\left[|p|\frac{dT}{dt} - \frac{V}{RA}\right] \tag{6.1}$$

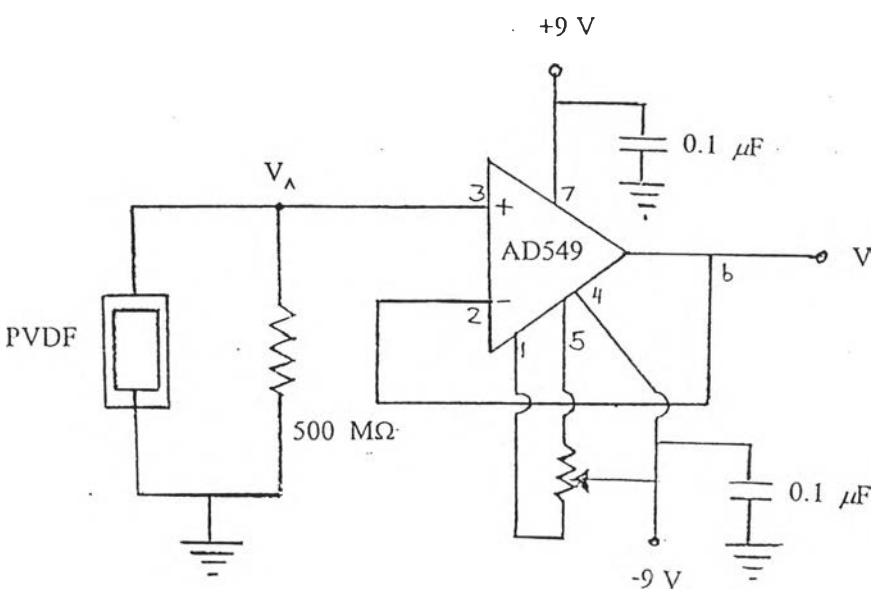
จากสมการ (6.1) จะเห็นได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์จากฟิล์มเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีค่ามาก เมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริก $K$ ต่ำ และสำหรับฟิล์มที่มีพื้นที่อิเล็กโทรดมาก เมื่อใช้ความต้านทานค่าสูง ๆ ต่อขนาน พบว่าในช่วงแรกที่มีรังสีอินฟราเรดตกกระทบอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้จะสูง ดังนั้นในการพัฒนาเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกจะพิจารณาให้ตรวจจับ $\frac{dV}{dt}$

วงจรของเครื่องเตือนตรวจจับผู้บุกรุก จะประกอบด้วย

1. วงจรตามแรงดัน โดยฟิล์ม PVDF จะต่อขนานกับความต้านทาน 500 เมกะโอห์ม สัญญาณความต่างศักย์จากฟิล์มจะต่อกับวงจรตามแรงดัน

2. วงจรดิฟเฟอเรนชิเอเตอร์ (differentiator) สัญญาณที่ออกจากวงจรตามแรงดันจะต่อกับขาเข้าของวงจรนี้เพื่อตรวจจับ $\frac{dV}{dt}$

3. วงจรขยายดิฟเฟอเรนเชียล (differential amplifier) ใช้สำหรับระบบเตือนภัย (warning system) สัญญาณจากวงจรดิฟเฟอเรนชิเอเตอร์ จะต่อกับระบบเตือนภัย



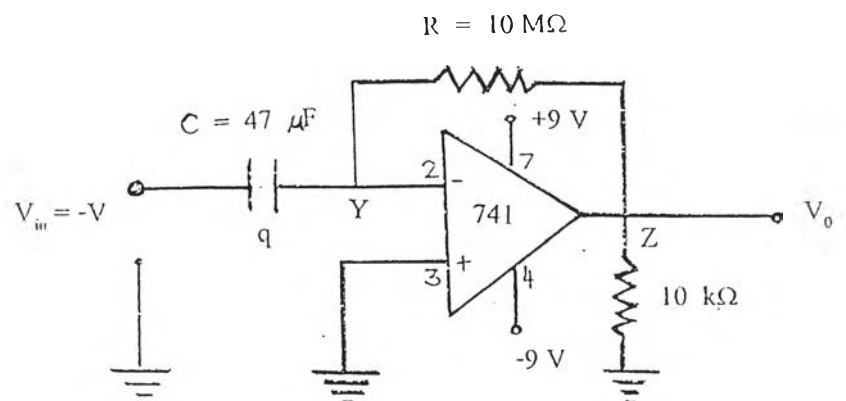

*รูปที่ 6.1 แสดงฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ต่อกับวงจรตามแรงดัน*

จากรูปที่ 6.1 ฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ต่อขนานกับความต้านทาน 500 เมกะ-โอห์ม เมื่อมีรังสีอินฟราเรดตกกระทบฟิล์มเกิดความต่างศักย์ที่อิเล็กโทรดของฟิล์ม จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าค่าต่ำ ๆ ไหลผ่านความต้านทานลงดิน (ground) ความต่างศักย์ที่ออกมาจะอยู่ในย่านมิลลิโวลต์ ตามรูป $V_A$ จะมีค่าเป็นบวกหรือลบ ขึ้นอยู่กับการต่อขั้วของฟิล์ม จากนั้นนำสัญญาณ

ความต่างศักย์จากจุด $A$ ต่อกับวงจรตามแรงดัน ซึ่งวงจรนี้มีค่าความขัดขาเข้าสูงมาก เพื่อไม่ให้ดึงกระแสจากฟิล์ม PVDF ถึงแม้รังสีอินฟราเรดจากตัวคนมีความเข้มน้อย (โดยเฉลี่ยคนเราจะเปรียบเสมือนกับแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนประมาณ 80 วัตต์ แต่ความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีจะน้อยกว่า 80 วัตต์มาก) แต่จากสมการ (6.1) การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์อาจจะมากในช่วงแรก

ในงานวิจัยที่ทำมาแล้ว ใช้ออปแอมป์ Burr Brown OPA121KP ซึ่งเป็นออปแอมป์ที่มีคุณภาพสูง มีความด้านทานภายในสูง (common-mode impedance) คือ $10^{14}$ โอห์ม ทำให้ดึงกระแสไฟฟ้าน้อยมากจนถือได้ว่าเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากออปแอมป์ตัวนี้มีราคาแพง หาซื้อได้ยากตามท้องตลาด และมีความยุ่งยากในการนำมาใช้ต่อวงจร ในงานวิจัยนี้จึงเปลี่ยนมาใช้ออปแอมป์ Analog Devices AD549 ซึ่งมีความด้านทานภายใน $10^{15}$ โอห์ม ถึงแม้จะมีราคาค่อนข้างแพงแต่สามารถหาซื้อได้ง่ายกว่า เมื่อนำมาใช้ก็ได้ผลที่น่าพอใจ

ต่อไปจะนำสัญญาณความต่างศักย์ขาออกจากวงจรตามแรงดันต่อกับขาเข้าของวงจรดิฟเฟอเรนชิเอเตอร์ เพื่อให้ตรวจจับอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ $(\frac{dV}{dt})$ จากฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF ดังรูปที่ 6.2




***รูปที่ 6.2*** *แสดงวงจรดิฟเฟอเรนชิเอเตอร์ เพื่อตรวจจับอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์จากฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF*

จากรูปที่ 6.2 ประจุ $q$ ในตัวจุไฟฟ้า $C$ หาได้จาก $q = CV_{in}$ เนื่องจากศักย์ที่จุด $Y$ มีค่าใกล้ศูนย์มาก ดังนั้น

$$i = \frac{dq}{dt} = C\frac{dV_{in}}{dt} \tag{6.2}$$

แต่เนื่องจากความขัดขาเข้าของออปแอมป์มีค่าสูงมาก ดังนั้นจะไม่มีกระแสไหลเข้าสู่ขา 2 เลย นั่นคือทำให้กระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน $R$ ไปยังจุด $Z$ ซึ่งมีศักย์ $V_Z$ หรือ $V_0$ ดังนั้น

$$\frac{V_Y - V_Z}{R} = \frac{0 - V_0}{R} = i = C\frac{dV_{in}}{dt} \tag{6.3}$$

หรือ
$$V_0 = -RC\frac{dV_{in}}{dt} \tag{6.4}$$

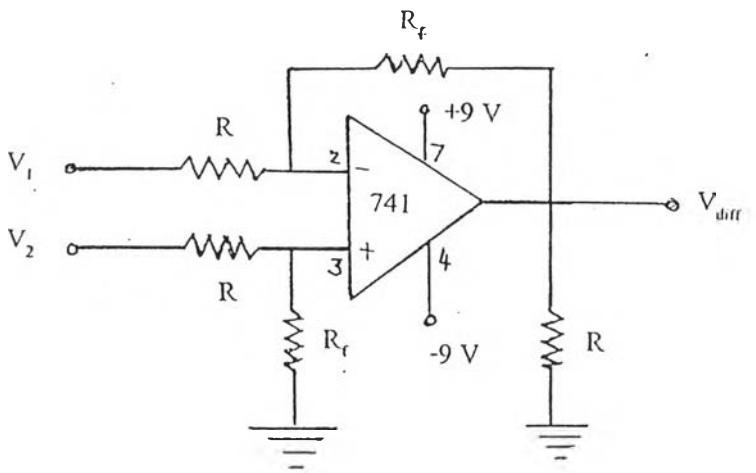
ในที่นี้จะต่ออิเล็กโทรดของฟิล์มในรูปที่ 6.1 ในแบบซึ่งถ้าอุณหภูมิเพิ่ม $V_A$ จะเป็นลบ ดังนั้นอาจจะเขียนได้ว่า $V_{in} = V_A = -V$ เมื่อ $V$ คือความต่างศักย์จากฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF และจากสมการ (6.4) จะได้

$$V_0 = RC\frac{dV_{in}}{dt} \tag{6.5}$$

จากรูปที่ 6.2 ใช้ $R$ เท่ากับ 10 เมกะโอห์ม และ $C$ เท่ากับ 47 ไมโครฟารัด ดังนั้น จะได้

$$V_0 = 470\frac{dV}{dt} \tag{6.6}$$

ส่วนในวงจรภาคแสดงผล จะใช้วงจรขยายดิฟเฟอเรนเชียล (differential amplifier) หรือวงจรขยายค่าแตกต่าง (ของแรงดัน) ซึ่งเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันและวงจรขยายในวงจรเดียวกัน ดังรูปที่ 6.3




*รูปที่ 6.3 แสดงวงจรขยายดิฟเฟอเรนเชียล*

จากรูปที่ 6.3 จะแสดงได้ว่า

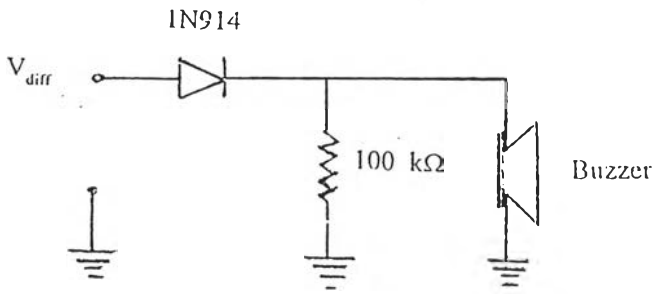
$$V_{diff} = \frac{R_f}{R}\left(V_2 - V_1\right) \tag{6.7}$$

จากสมการ (6.7) จะเห็นได้ว่า

ถ้า $V_2 \rangle V_1$ จะได้ $V_{diff}$ มีค่าเป็นบวก และ

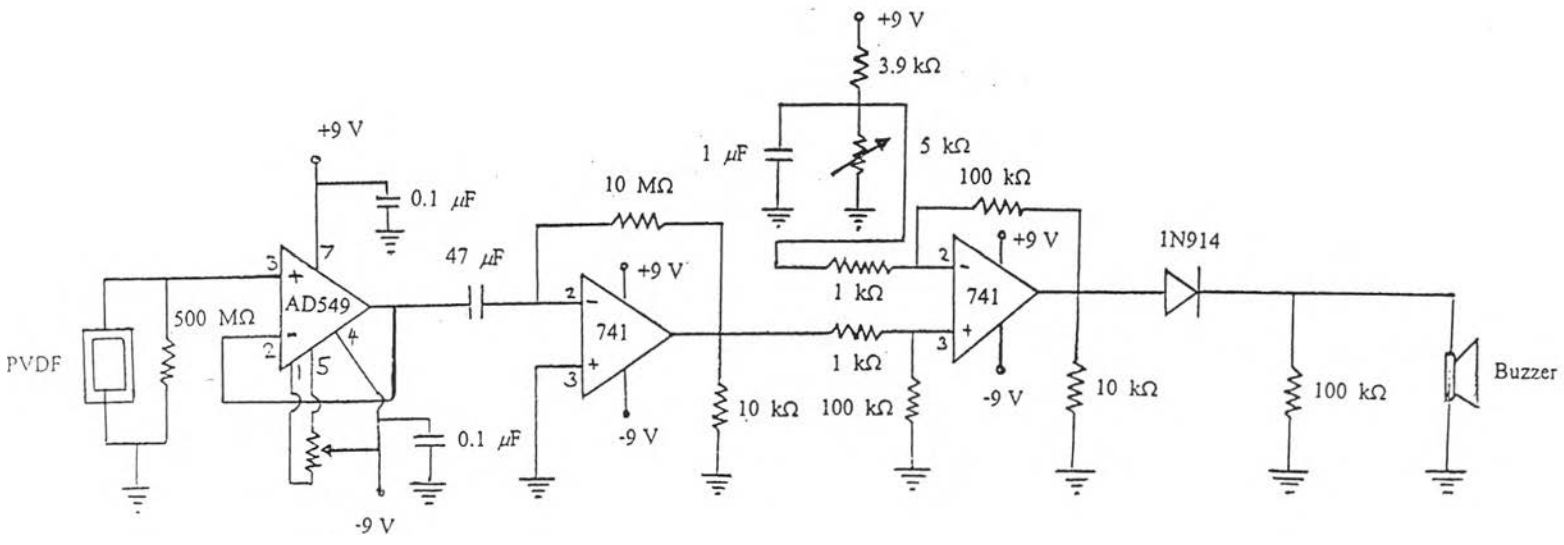
ถ้า $V_2 \langle V_1$ จะได้ $V_{diff}$ มีค่าเป็นลบ

ดังนั้น ถ้าให้ $V_1$ เป็นแรงดันเปรียบเทียบ และให้ $V_2$ เป็น $V_0$ จากวงจรดิฟเฟอเรนชิเอเตอร์ จากสมการ (6.6) โดยปรับ $V_1$ ให้มากกว่า $V_2$ ในขณะที่ไม่มีรังสี-อินฟราเรดจากตัวคนตกกระทบฟิล์ม ก็จะได้ $V_{diff}$ มีค่าเป็นลบตลอดเวลา จนกระทั่งเมื่อมีรังสี-อินฟราเรดตกกระทบ ทำให้ $V_2$ (หรือ $V_0$) เพิ่มขึ้นจนมากกว่า $V_1$ ก็จะทำให้ $V_{diff}$ มีค่าเป็นบวก ซึ่งสามารถนำไปป้อนให้บัซเซอร์ (buzzer) เพื่อให้ส่งสัญญาณเสียงต่อไป




*รูปที่ 6.4 แสดงวงจรของหน่วยเตือนภัย*

จากรูปที่ 6.4 แสดงวงจรของหน่วยเตือนภัย (warning system) ถ้า $V_{diff}$ มีค่าเป็นลบ จะได้ความต่างศักย์ที่คร่อมบัซเซอร์มีค่าเป็นศูนย์ เพราะไดโอด (diode) ได้รับการไบอัสกลับ (reverse bias) ทำให้บัซเซอร์ไม่ส่งสัญญาณเสียงออกมา จนเมื่อ $V_{diff}$ มีค่าเป็นบวก ก็จะเกิดความต่างศักย์คร่อมบัซเซอร์ ทำให้เกิดเสียงดังขึ้น โดยวงจรสมบูรณ์ของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุกแสดงได้ดังรูปที่ 6.5

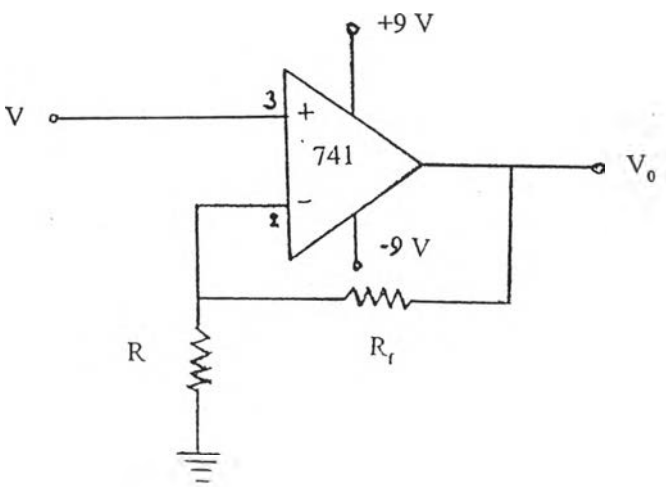



*รูปที่ 6.5 แสดงวงจรสมบูรณ์ของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก*

## 6.2 เครื่องเตือนไฟไหม้

โดยทั่วไป เครื่องเตือนไฟไหม้อาจจะตรวจจับควัน หรือไม่ก็ตรวจจับอุณหภูมิที่สูงขึ้นแบบผิดปกติ จากนั้นก็จะส่งสัญญาณเตือนให้แก่หน่วยรักษาความปลอดภัย อาจจะอยู่ในรูปของการส่งเสียงดัง แต่ในงานวิจัยนี้จะพัฒนาเครื่องเตือนไฟไหม้แบบที่จับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วขณะที่เริ่มเกิดไฟไหม้ เนื่องจากไฟไหม้จะมีปฏิกริยาที่รุนแรง ดังนั้นฟิล์มไพโรอิเล็กทริกที่มีความไวปานกลางก็สามารถทำงานได้ดี

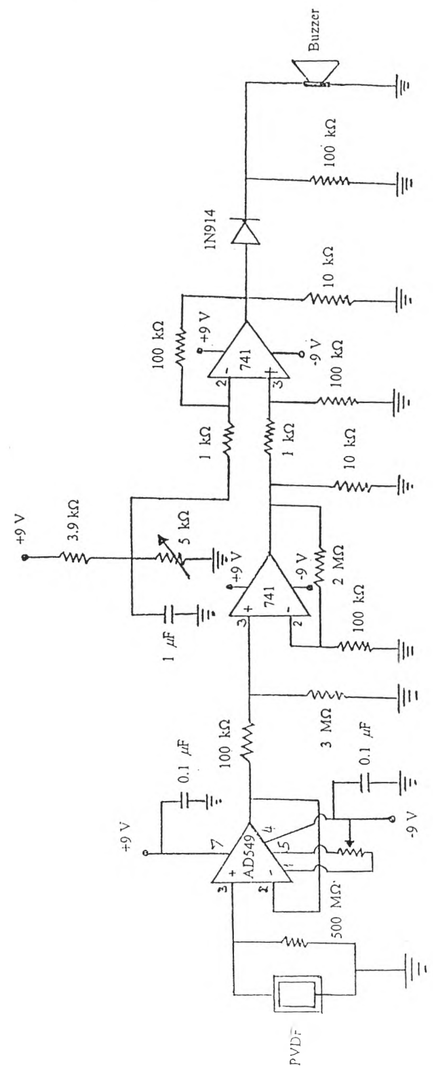
ในการออกแบบนี้จะถือหลักว่า ถ้ามีรังสีอินฟราเรดจากไฟไหม้ความเข้ม 3.54 วัตต์ต่อตารางเมตร หรือมากกว่า ตกกระทบฟิล์ม เครื่องจะส่งสัญญาณเสียงออกมา เนื่องจากจากตารางที่ 5.3 ที่ความเข้มขนาดนี้ ฟิล์มจะให้ความต่างศักย์สูงสุด 35 มิลลิโวลต์ และในการออกแบบไม่จำเป็นต้องใช้วงจรดิฟเฟอเรนชิเอเตอร์เหมือนกับวงจรของเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก (เนื่องจากขณะเกิดไฟไหม้ จะมีรังสีอินฟราเรดตกกระทบฟิล์มอย่างต่อเนื่อง) นั่นคือ จะใช้วงจรขยายธรรมดา (dc amplifier) ก็เพียงพอ ในที่นี้จะขยาย 20 เท่า (ขึ้นกับฟิล์มที่ใช้) โดยวงจรตัวอย่างที่ออกแบบเพื่อเป็นวงจรเตือนไฟไหม้นี้จะแตกต่างกับวงจรตรวจจับผู้บุกรุก กล่าวคือจะนำวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสแทนที่ในวงจรดิฟเฟอเรนชิเอเตอร์ จากนั้นต่อกับวงจรขยายดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสแสดงได้ดังรูปที่ 6.6




*รูปที่ 6.6 แสดงวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส*

จากรูปที่ 6.6 จะได้ $$V_0 = \left(\frac{R_f}{R} + 1\right)V \qquad (6.8)$$

สำหรับวงจรสมบูรณ์ของเครื่องเตือนไฟไหม้แสดงได้ดังรูปที่ 6.7




*รูปที่ 6.7 แสดงวงจรสมบูรณ์ของเครื่องเตือนไฟไหม้*

## 6.3 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์ม PVDF โดยวิธีอัดเบ้าซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและธรรมดาที่สุด ฟิล์มที่ได้จะมีความไม่สม่ำเสมอ อาจจะมีฟองอากาศปนอยู่ด้วย ทำให้ฟิล์มมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน เมื่อนำฟิล์มไปยืดอาจทำให้ฟิล์มฉีกขาดได้ง่าย ดังนั้นจึงควรเลือกฟิล์มส่วนที่มีความหนาเท่ากันไปใช้ การทดสอบฟิล์มโดยใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ทำมาแล้ว แสดงว่าฟิล์ม PVDF ที่เตรียมได้โดยวิธีนี้มีโครงสร้างผลึกเป็น PVDF สำหรับการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก $K$ พบว่าค่า $K$ ที่แม่นยำวัดได้ลำบาก เพราะฟิล์มมีความหนาไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากวิธีการยืดฟิล์ม ดังนั้นควรจะมีการทำวิจัยเพิ่มเติม เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มที่ให้ผลได้ดีกว่าเดิม

ในการวัดค่า $p$ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta Q$ และ $\Delta T$ ไม่ได้ผ่านจุดกำเนิด (ตามทฤษฎี) ส่วนใหญ่กราฟจะตัดใต้แกน อาจจะเกิดจากความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (systematic errors) จากเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลอง ในงานวิจัยนี้ยังไม่ทราบสาเหตุที่แท้จริง ดังนั้นน่าจะมีการทำวิจัยเพื่อศึกษาเพิ่มเติมต่อไป อย่างไรก็ตามค่า $p$ ที่วัดได้ให้ผลที่พอจะเชื่อถือได้พอสมควร

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่าง $p$ และ $E_p$ ที่ $T_p$ ต่างๆ พบว่าค่า $p$ จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อ $E_p$ และ $T_p$ มีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ว่า $E_p$ ที่มีค่าสูง จะสามารถหมุนไดโพลในผลึกเฟสเบตาให้ชี้ไปแนวเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้าได้มากขึ้น เป็นการเพิ่มโพลาไรเซชัน $P$ ในแนว 3 และ $p$ ให้แก่ฟิล์ม ในทำนองเดียวกัน ที่ $T_p$ สูงขึ้น จะทำให้ปริมาตรอิสระของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ไดโพลในผลึกเฟสเบตาหมุนตัวในทิศของสนามไฟฟ้าได้สะดวกยิ่งขึ้น นั่นคือค่า $p$ ซึ่งขึ้นอยู่กับโพลาไรเซชัน $P$ ในแนว 3 เพิ่มขึ้นไปกับค่า $T_p$ ด้วย

จากการที่ทำให้อิเล็กโทรดด้านหนึ่งของฟิล์มเป็นสีดำ แล้วให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบฟิล์ม จะทำให้ความต่างศักย์สูงสุดจากฟิล์มมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากสีดำช่วยลดการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทบฟิล์ม จึงทำให้ฟิล์มจะมีการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้มากขึ้น

เครื่องมือทั้งสองที่ประดิษฐ์ขึ้น จากการทดสอบพบว่าเครื่องเตือนไฟไหม้จะใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิห้อง ส่วนเครื่องตรวจจับผู้บุกรุก การทำงานยังไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนค่อนข้างสูง เช่น ในห้องที่ใช้เครื่องปรับอากาศปิด-เปิดอย่างต่อเนื่อง หรือห้องที่มีแสงสว่างเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา นอกจากนี้ฟิล์มไพโรอิเล็กทริก PVDF มีสมบัติเพียสโซอิเล็ก-ทริกด้วย ดังนั้นการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ก็มีผลต่อการทำงานของฟิล์มด้วย เนื่องจากเครื่องมือที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ได้ออกแบบวงจรให้มีอัตราขยายสูง เพราะต้องการความไวของการตรวจจับ ดังนั้นจะต้องทำการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อศึกษาลดสัญญาณรบกวนจากฟิล์ม เพื่อให้เครื่องมือนี้สามารถทำงานได้ในทุกสภาวะ ถ้าเครื่องมือทำงานได้ดีขึ้น ขั้นต่อไปอาจจะพัฒนาไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ได้