



# การพัฒนาและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก

## DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THERMOELECTRIC TECHNOLOGY

อารีย์ ศุภสุธิกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

### บทคัดย่อ

จากผลกระทบทางด้านพลังงานในปัจจุบันเมื่อความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงขยับตัวสูงขึ้น เป็นสาเหตุให้เกิดงานวิจัยเพื่อหาแหล่งพลังงานทดแทน พร้อมทั้งช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับความสนใจและการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากนักวิจัยจำนวนมาก เนื่องจากข้อดีทางรูปทรงและประโยชน์ของการนำไปประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกนั้นไม่เพียงแต่สามารถทำงานเพื่อเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนเท่านั้น ในทางกลับกันก็ยังสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อนได้อีกด้วย ซึ่งความร้อนที่นำมาใช้นั้นอาจมีต้นกำเนิดเป็นความร้อนเหลือทิ้งจากการใช้งานประจำวัน บทความเรื่องนี้นำเสนอถึงพัฒนาการและการนำเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้ในปัจจุบัน โดยทำการรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลักตามลักษณะของการประยุกต์ใช้ โดยแบ่งออกเป็นการทำงานทำความเย็น การผลิตกระแสไฟฟ้า และการใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัด นอกเหนือไปจากการรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วนั้น บทความชิ้นนี้ยังได้นำเสนอตัวอย่างการใช้งานของเทอร์โมอิเล็กทริกในแต่ละลักษณะของการประยุกต์ใช้ เพื่อเป็นประโยชน์ในการค้นคว้าและวิจัยต่อไป

**คำสำคัญ:** เทอร์โมอิเล็กทริก, การทำความเย็น, การผลิตกระแสไฟฟ้า, ซีเบ็ค, เพลเทียร์

### Abstract

Rapid growth on the energy demand increases the use of energy and the energy price. This leads to the development of a number of researches in seeking for alternative energy resources and sustaining the environment. Thermoelectric technology has gained attention and has been developed for many years according to its figure, functionality, and applicability. Thermoelectric technology is not only able to convert the electricity to heat energy, but also does generate electricity from heat energy. This means that, by using the thermoelectric technology, the heat sources can be obtained from discarding heat in everyday's life. This article presents the development and applications of thermoelectric technology by collecting and reviewing the extensive literatures. The use of thermoelectric technology can be

divided into 3 main categories which are cooling, electricity generation, and sensor application. In addition to the review of previous researches, this article also presents examples of thermoelectric technology according to their categories for further applied research in this field.

**Keywords:** Thermoelectric, Cooling, Electric Generation, Seebeck, Peltier

## บทนำ

ในช่วงต้นคริสต์ศตวรรษที่ 19 โทมัส ซีเบ็ค (Thomas Seebeck) และจอห์น เพลเทียร์ (Jean Peltier) นักวิทยาศาสตร์ ได้ค้นพบปรากฏการณ์สำคัญที่นำมาซึ่งความรู้พื้นฐานสำหรับอุตสาหกรรมเทอร์โมอิเล็กทริกในปัจจุบัน โดยซีเบ็คได้ค้นพบว่าเมื่อมีอุณหภูมิที่ต่างกันเกิดที่ปลายข้างของโลหะที่ต่างกัน 2 ชนิดซึ่งเชื่อมติดกัน จะก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในวงจร และเพลเทียร์ก็เป็นผู้ค้นพบด้านกลับกันของปรากฏการณ์นี้ โดยพบว่าเมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรซึ่งทำมาจากโลหะที่ต่างกัน 2 ชนิดซึ่งเชื่อมติดกัน จะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกมาจากปลายข้างหนึ่ง และในขณะเดียวกัน ที่ปลายอีกข้างจะเกิดการดูดซับความร้อน

แม้ว่าจะมีการค้นพบปรากฏการณ์ดังกล่าวมาข้างต้นตั้งแต่ช่วงต้นคริสต์ศตวรรษที่ 19 แต่การนำเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม ก็มีได้เกิดขึ้นจนกระทั่งช่วงกลางของคริสต์ศตวรรษที่ 20 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์ได้รับการพัฒนา ด้วยการนำเทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์และเทคโนโลยีทันสมัยอื่นๆ มาใช้ในการผลิตเทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมสามารถผลิตเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีประสิทธิภาพเพื่อใช้ในการทำความร้อนและทำความเย็น รวมไปถึงสามารถใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อการผลิตไฟฟ้ากระแสตรง (DC)

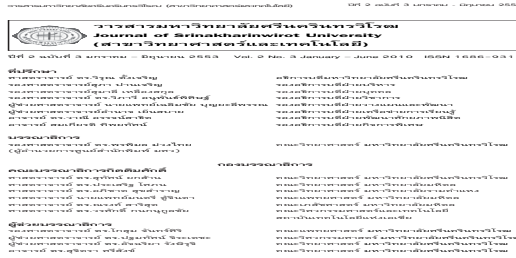
ได้ การพัฒนาและการนำเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้ก็มีความหลากหลายเพิ่มขึ้น

## ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Effect) เป็นปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือในทางตรงกันข้ามพลังงานไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน โดยปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถอธิบายได้ตามหลักการทำงานโดย 2 ปรากฏการณ์สำคัญ คือ ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect) และปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect)

ในปี ค.ศ. 1821 Thomas Johann Seebeck นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ได้ค้นพบว่าเมื่อปลายทั้งสองที่เชื่อมต่อกันของขดลวดโลหะ ซึ่งทำมาจากโลหะ 2 ชนิดที่ต่างกัน ถูกรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 1 จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Open Circuit Electromotive Force, E) ขึ้นในวงจร หรือเรียกว่า ซีเบ็คโวลต์เทจ (Seebeck Voltage) และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ซีเบ็ค (Seebeck Effect) โดยค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ ( $\Delta T$ ) [1] ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

$$E = \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$



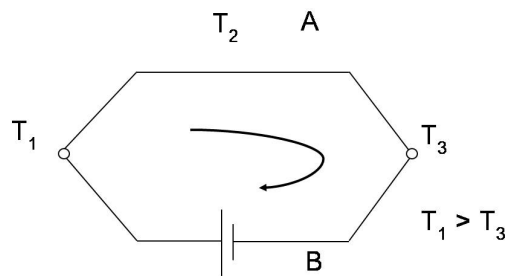
ภาพที่ 1 ปรากฏการณ์ของซีเบ็คทางเทอร์โมไดนามิกส์

โดยที่  $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) มีหน่วย โวลต์/เคลวิน V/K) หรือ โดยส่วนมากจะพบในรูปไมโครโวลต์/เคลวิน ( $\mu\text{V}/\text{K}$ ) ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (Seebeck Coefficient) บอกระดับความต่างศักย์ที่โลหะเหนี่ยวนำเมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองของ ขดลวดต่างชนิดกันในวงจรแบบเปิด ณ อุณหภูมิที่กำหนด เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมีค่าสูงขึ้น ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ต่อมาในปี ค.ศ. 1834 Jean Charles Athanase Peltier พบว่า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวงจรลักษณะเดียวกับซีเบ็คสร้างขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2 จะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ปลายขั้วทั้งสอง โดยที่ปลายข้างหนึ่งจะร้อนและปลายอีกข้างหนึ่งจะเย็น และ ได้เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) ค่าการทำความเย็นที่ปลายขั้วด้านเย็น ( $Q$ ) ตามหลักทฤษฎีเพลเทียร์ผันแปรโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าในวงจร ( $I$ ) ดังสมการที่ (2)

$$Q = \Pi \cdot I \quad (2)$$

โดยที่  $\Pi$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์ (Peltier Coefficient) มีหน่วย วัตต์ต่อแอมแปร์ (W/A) หรือ วัตต์ต่อโวลต์ (W/V)



ภาพที่ 2 ปรากฏการณ์ของเพลเทียร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์

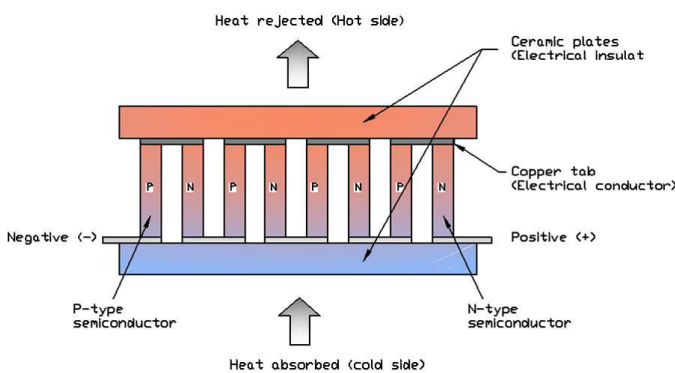
ในปี ค.ศ.1854 William Thomson หรือต่อมารู้จักโดยทั่วไปในนาม Lord Kelvin ศึกษาพบความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบ็คและสัมประสิทธิ์เพลเทียร์โดยพบว่าสัมประสิทธิ์เพลเทียร์

คือ ผลคูณระหว่างสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค และอุณหภูมิสัมบูรณ์ที่ปลายขั้วของขดลวดโลหะ ( $T$ ) ดังสมการที่ (3)

$$\Pi = \alpha \cdot T \quad (3)$$

### หลักการการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก

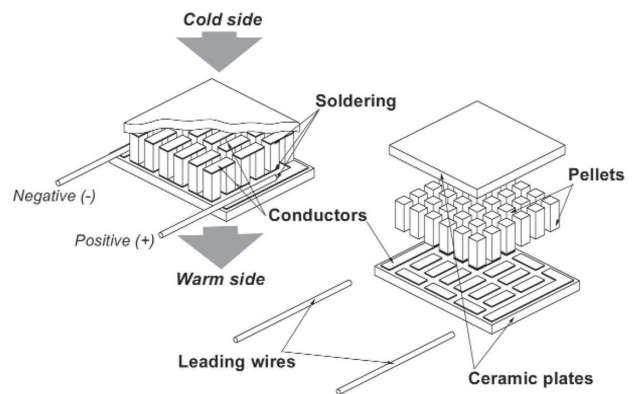
เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเป็นอุปกรณ์ในสถานะของแข็ง (Solid-State) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ทำงานโดยการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ และสามารถเรียกได้อีกชื่อว่า เพลเทียร์โมดูล (Peltier Module) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลนั้นถูกสร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ Bismuth Telluride แบบ พี-เอ็น (P-N Type) จำนวนมากซึ่งเรียงต่อกันทางไฟฟ้าแบบอนุกรม และทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแบบขนานระหว่างแผ่นเซรามิกทั้งสอง ซึ่งแผ่นเซรามิกทั้งสองนี้ไม่เพียงแต่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดของชิ้นสารกึ่งตัวนำเท่านั้น แต่ยังทำหน้าที่เป็นฉนวนกันระหว่างสารกึ่งตัวนำและตัวระบายความร้อนหรือฮีตซิงค์ (Heat Sink) ซึ่งติดตั้งไว้ทั้งทางด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลอีกด้วย ภาพที่ 3 แสดงภาพตัดขวางของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล



ภาพที่ 3 ภาพตัดขวางของตัวนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลหนึ่งตัวอาจประกอบไปด้วยเทอร์โมคัปเปิลจำนวนมากที่ถูกจัดวางเป็นแบบเมตริกซ์ซึ่งโดยทั่วไปเป็นสารกึ่งตัวนำแบบ พี-เอ็น (P-N Type) ตั้งแต่ 3 ถึง 127 คู่ ลักษณะของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเป็นดังแสดงในภาพที่ 4 เทอร์โมอิเล็กทริก 1 โมดูล สามารถ

ทำงานที่อุณหภูมิแตกต่างกันได้มากถึง 70 องศาเซลเซียส และสามารถถ่ายเทความร้อนได้อัตรามากถึง 125 วัตต์ [2] นอกจากนั้นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลยังสามารถนำมาติดตั้งซ้อนกันเป็นชั้นทรงปริมาตรเพื่อเพิ่มความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและเย็น การทำเช่นนี้จะสามารถให้เกิดอุณหภูมิแตกต่างระหว่างได้สูงถึง 130 องศาเซลเซียส โดยสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP) จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นมากกว่า 70 องศาเซลเซียส [3]



ภาพที่ 4 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Gromov, 2002)

### การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก

เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้โดยที่ไม่มีส่วนใดเป็นส่วนเคลื่อนไหวทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานในงานที่ต้องการหลีกเลี่ยงการสั่นสะเทือนจากเครื่องจักรกล เทอร์โมอิเล็กทริกจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม อีกทั้งมันยังสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงทิศทางของการติดตั้งและมีขนาดเล็กกระทัดรัด จึงเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งที่จะใช้เทอร์โมอิเล็กทริกในงานที่ต้องคำนึงถึงขนาดและน้ำหนักเป็นสำคัญ เช่น การใช้งานอุปกรณ์บนยานอวกาศ การใช้เทอร์โมอิเล็กทริกในการทำความเย็นไม่จำเป็นต้องใช้สารทำความเย็นเป็น

ตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน จึงไม่ทำลายชั้นบรรยากาศและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมจากความสามารถที่โดดเด่นของเทอร์โมอิเล็กทริกทำให้มันถูกนำไปใช้ในงานต่างๆ หลากหลายประเภท เช่น การแพทย์ อากาศยาน อุตสาหกรรม โทรคมนาคม ฯลฯ เนื่องจากความหลากหลายของรูปแบบการใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้การจัดกลุ่มลักษณะการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกถูกแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ การทำความเย็น การผลิตกระแสไฟฟ้า และการใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับ

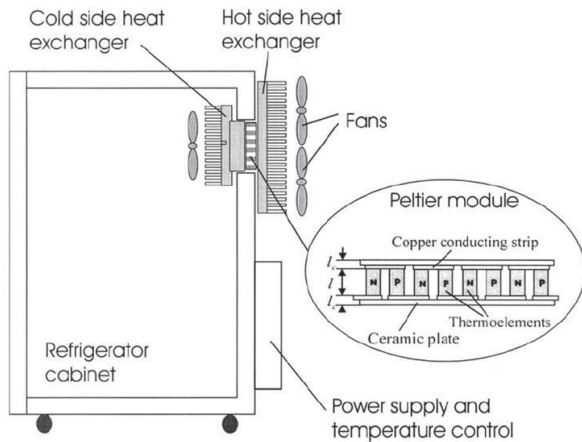
### การทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก

การใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อการทำความเย็นหรือเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (Thermoelectric Cooler, TEC) นั้น เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะทำงานตามหลักปรากฏการณ์เพลเทียร์ โดยทั่วไปจะถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานที่ต้องการเครื่องทำความเย็นที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีความแม่นยำ และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การทำความเย็นให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ อุปกรณ์ทางการสื่อสาร อุปกรณ์ในห้องทดลอง [5-10] โดยเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ถูกนำไปใช้ในการทำความเย็นตั้งแต่ขนาด มิลลิวัตต์ไปจนถึงขนาด กิโลวัตต์

เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์มีบทบาทสำคัญเป็นอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมทำความเย็นให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากข้อได้เปรียบทางด้านรูปทรงจึงทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์มีความเหมาะสม ในการนำไปใช้มากกว่าเครื่องทำความเย็นแบบเดิมที่มีขนาดใหญ่ ในการทำความเย็นให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เทอร์โมอิเล็กทริกจะถูกใช้เพื่อทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีอุณหภูมิคงที่หรือใช้ในการลดอุณหภูมิของอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้อุปกรณ์นั้นสามารถทำงานได้อย่างปกติ โดยใช้หลักการดึงความร้อนออกจากอุปกรณ์ เพื่อทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกสูงสุด จึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ช่วยถ่ายเทความร้อนหรือฮีตซิงค์ (Heat Sink) เข้ากับทั้งทางด้านฝั่งร้อนและเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกนอกเหนือไปจากการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์เพื่อการทำความเย็นให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ยังถูกใช้อย่างกว้างขวางในการทำเครื่องเย็นเชิงพาณิชย์ โดยในปัจจุบันเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ยังเป็นเพียงอุปกรณ์เพียงอย่างเดียวที่มีการทำเชิงพาณิชย์ เพื่อใช้เป็นตู้เย็นขนาดเล็กหรือขนาดพกพา

การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อการทำความเย็นเริ่มขึ้นในช่วงปีคริสต์ศักราช 1950 [11-12] นับจากนั้นเป็นต้นมา ได้มีนักวิจัยจำนวนมากทำการศึกษาเกี่ยวกับการทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกอย่างต่อเนื่อง [13-15] Dai และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาและทดลองเครื่องทำความเย็น/ตู้เย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าสามารถรักษาอุณหภูมิของช่องแช่เย็นไว้ได้ที่อุณหภูมิตั้งระหว่าง 5-10 องศาเซลเซียส โดยมีสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP) เท่ากับ 0.3 Min และ Rowe [17] นำเสนอการศึกษาเครื่องทำความเย็น/ตู้เย็นเพื่อการใช้งานภายในอาคารที่อยู่อาศัยด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก ดังแสดงในภาพที่ 5 โดยรายงานสัมประสิทธิ์สมรรถนะระหว่าง 0.3-0.5 ที่อุณหภูมิสถานะทำงานเท่ากับ 5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิภายนอกอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส



**ภาพที่ 5** ภาพแสดงโครงร่างของตู้เย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก โดย Min และ Rowe [17]

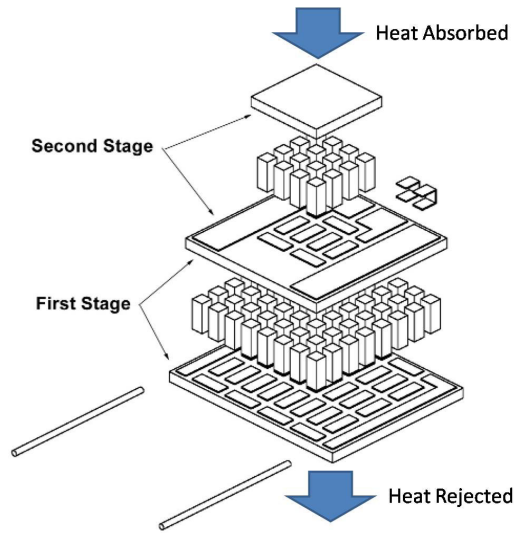
แม้จะพบการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นเครื่องทำความเย็นอย่างแพร่หลาย แต่การประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อการปรับอากาศนั้นกลับไม่ได้รับความสนใจและพัฒนามากนัก โดยตัวอย่างของการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อการปรับอากาศปรากฏดังแสดงต่อไปนี้ Bojic และคณะ [18] ทำการศึกษาการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์และเครื่องฟั่นฟูความเย็นในการปรับอากาศภายในตู้โดยสารรถไฟ

นอกเหนือไปจากการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วนั้น ยังได้มีการนำเทอร์โมอิเล็กทริกไปใช้ในการทำความเย็นหรือความเย็นเฉพาะด้าน ดังเช่นการศึกษาการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำความเย็นภายในหมวกโดย Hara และคณะ [19] ซึ่งพบว่า การทำความเย็นโดยใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งไว้บริเวณปีกหมวกนั้นเพียงพอต่อการผลิตความเย็นเพื่อใช้ในการลดอุณหภูมิของศีรษะ

ถึงแม้การศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องมาหลายทศวรรษ แต่เนื่องจากสัมประสิทธิ์สมรรถนะของ

เทอร์โมอิเล็กทริกอยู่ในระดับที่ต่ำมาก คือ ในช่วง 0.3-0.6 ทำให้การใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นไปอย่างจำกัด จึงมีนักวิจัยจำนวนมากสนใจและทำการทดลองค้นคว้าเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเทอร์โมอิเล็กทริก โดยการที่จะเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น จะทำได้โดยการลดอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิทางฝั่งร้อน หรือการเพิ่มอุณหภูมิทางฝั่งเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล การศึกษาวิจัยเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถแบ่งออกได้ตามจุดประสงค์หลัก คือ เพื่อทำการศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่นำมาใช้ในการผลิตเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เพื่อพัฒนารูปร่างและรูปทรงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล [20-25]

ประสิทธิภาพและความสามารถในการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น ขึ้นอยู่กับค่าความสามารถ (Figure-of-Merit) ของวัสดุที่นำมาใช้ทำเทอร์โมอิเล็กทริก นักวิจัยทางด้านวัสดุจำนวนมากจึงได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ที่จะนำมาใช้ผลิตเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและสมรรถนะความเย็นที่เพิ่มขึ้น ดังเช่น  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  และ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  [26]  $\text{Ru}_2\text{Si}_3$  [27]  $\text{Zn}_4\text{Sb}_3\text{-Cd}_4\text{Sb}_3$  [28] วัสดุผสม  $\text{NaTaO}_3$  [29]



ภาพที่ 6 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบชั้น

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบชั้น ดังแสดงในภาพที่ 6 ประกอบไปด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกหลายโมดูลเรียงต่อกันเป็นชั้นรูปทรงปริมาตร ด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลตัวที่ติดตั้งอยู่ด้านล่างจะทำหน้าที่เป็นฝั่งร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลชั้นถัดไป การถ่ายเทความร้อนจะเป็นไปในแนวทางเดียวคือ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะดูดซับความร้อนจากสิ่งแวดล้อมทางด้านเย็นซึ่งอยู่ชั้นบนสุด แล้วถ่ายเทความร้อนออกทางด้านร้อนซึ่งอยู่ชั้นล่างสุด การทำเช่นนี้จะส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและเย็นมากขึ้น แต่ในทางกลับกันการเรียงเทอร์โมอิเล็กทริกแบบชั้นจะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดน้อยลงกว่าการทำงานโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพียงชั้นเดียว การศึกษาเทอร์โมอิเล็กทริกแบบ 2 ชั้น ที่ชั้นแรกประกอบไปด้วยเทอร์โมคัปเปิลเพียงชั้นเดียว และชั้นที่สองประกอบไปด้วยเทอร์โมคัปเปิลหลายชั้นเรียงต่อกัน โดย Yu และคณะ [30] พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ปลายหัวของเทอร์โมคัปเปิลในชั้นที่สอง การเพิ่มความยาวและจำนวนของเทอร์โมคัปเปิลในชั้นแรกจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความเย็นของ

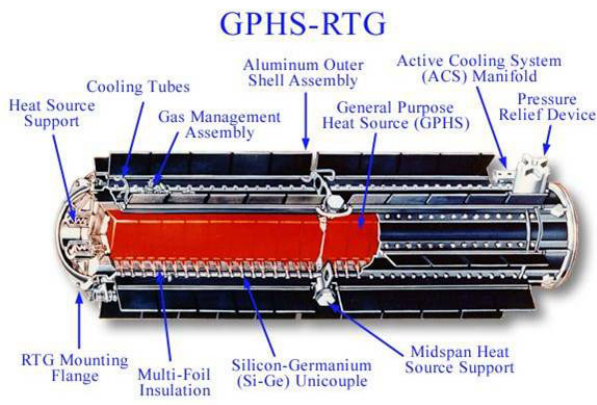
โมดูลได้ เนื่องมาจากการที่ค่าความสามารถ (Figure-of-Merit) ของวัสดุของ เทอร์โมอิเล็กทริกในแต่ละชั้นนั้นแตกต่างกันออกไปตามความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและเย็น ทำให้การออกแบบและการคำนวณหาภาวะการทำงานที่ดีที่สุด (Optimum Point) ของเทอร์โมอิเล็กทริกแบบชั้นนั้นทำได้ไม่ยุ่งยาก

### การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก

การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกหรือเรียกว่าเทอร์โมอิเล็กทริกเงินเนอเรเตอร์ (Thermoelectric Generator, TEG) สามารถอธิบายได้ตามหลักทฤษฎีปรากฏการณ์ของซีเบ็ค เมื่อมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเกิดขึ้นที่ปลายหัวทั้งสองของวัสดุ 2 ชนิดที่เชื่อมต่อกัน จะก่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นภายในวงจร หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเงินเนอเรเตอร์คล้ายกับเครื่องจักรความร้อน โดยมีการไหลเวียนของประจุอิเล็กตรอนในวงจรแบบปิดระหว่างปลายหัวด้านร้อนและด้านเย็นแทนของไหลทำงานในเครื่องจักรความร้อน

ตั้งแต่ช่วงปลายคริสต์ทศวรรษที่ 1960 ปัจจัยหลักที่ส่งผลให้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก คือ ความต้องการในการใช้งานด้านการอวกาศ [31] ในภารกิจทางด้านอวกาศของสหรัฐอเมริกา เรดิโอไอโซโทปเทอร์โมอิเล็กทริกเงินเนอเรเตอร์ (Radioisotope Thermoelectric Generators, RTG) เป็นอุปกรณ์หลักในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ในยานอวกาศองค์ประกอบของ RTG ดังแสดงในภาพที่ 7 ประกอบไปด้วย แหล่งพลังงานความร้อนนิวเคลียร์และเทอร์โมอิเล็กทริกเงินเนอเรเตอร์ โดยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเทอร์โมอิเล็กทริกเงินเนอเรเตอร์

ทั่วไปแล้ว Unicouple ที่ใช้ใน RTG จะทำมาจาก อัลลอยของซิลิกอน เจอร์มาเนียม ( $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$  และ  $\text{Si}_{0.63}\text{Ge}_{0.38}$ )



ภาพที่ 7 เรดิโอไอโซโทปเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ (RTG) [32]

EI-Genk และคณะ [32] ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง Si-Ge และ Skutterudite Segmented Thermoelectric Unicouples (STUs) พบว่าที่อุณหภูมิด้านร้อน 973K การใช้ STU แทน Si-Ge ที่อุณหภูมิด้านเย็น ( $T_c$ ) ต่างๆ ตั้งแต่  $T_c < 300\text{K}$  ไปจนถึง  $T_c \sim 673\text{K}$  จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดย RTG ได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิด้านเย็น  $T_c < 300\text{K}$  และประมาณ 41 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิด้านเย็นประมาณ  $T_c \sim 673\text{K}$

นอกเหนือไปจากการใช้เทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับยานอวกาศแล้ว เทอร์โมอิเล็กทริกยังสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงาน ให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และระบบอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้อีกด้วย การจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์หรือระบบอิเล็กทรอนิกส์ในแบบ ดังเดิมนั้น โดยทั่วไปจะทำโดยการใช้แบตเตอรี่ เป็นหลัก ซึ่งการนำไปประยุกต์ใช้จะถูกจำกัดโดย อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ราคา และปัญหาทาง

สิ่งแวดล้อม การใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจในการนำไปใช้ แทนที่การใช้แบตเตอรี่ในระบบวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยจำนวนมากได้ให้ความสนใจในการพัฒนาเทอร์โมอิเล็กทริก เจเนอเรเตอร์เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์และระบบอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก Glosh และคณะ [33] ทำการศึกษาการใช้ซิลิกอน เทคโนโลยีในเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ และ รายงานผลว่าเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ขนาด 1.5 ไมโครวัตต์ ที่อุณหภูมิความแตกต่างเท่ากับ 10K ซึ่งกำลัง ไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้จากเทอร์โมอิเล็กทริก เจเนอเรเตอร์นี้มากเพียงพอที่จะนำไปใช้กับ เครื่องขยายกำลังสัญญาณ (Pre-amplifier) และ เซ็นเซอร์ขนาดเล็ก Strasser และคณะ [34] ทำการ ศึกษาการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ขนาดเล็ก (Micro-scale) เพื่อใช้ในการเปลี่ยน ความร้อนที่เสียเปล่าเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเสนอ ว่าการใช้ Poly-Si เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ ขนาด 1 ตารางเซนติเมตร จะสามารถผลิตกำลัง ไฟฟ้าได้ขนาด 1 ไมโครวัตต์ ซึ่งกำลังไฟฟ้าจำนวน นี้เพียงพอที่จะใช้สำหรับการทำงานของนาฬิกาข้อมือ โดยใช้ความร้อนจากร่างกายของคนเป็นตัวขับเคลื่อน

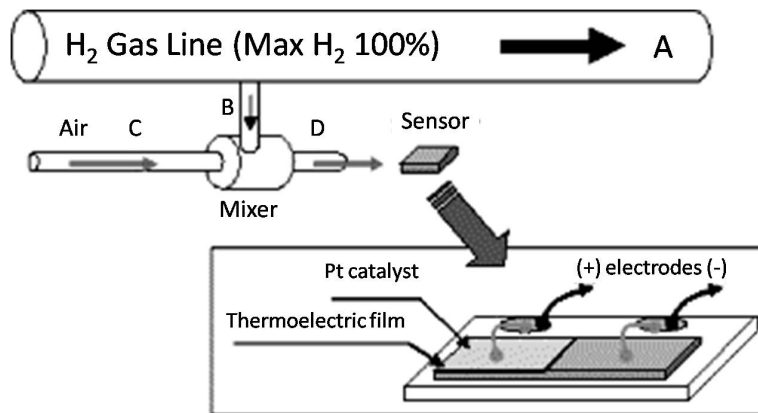
### เทอร์โมอิเล็กทริกเซ็นเซอร์

เซ็นเซอร์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการของ เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถพบได้ในหลากหลายการ ประยุกต์ใช้ เช่น เซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซ เซ็นเซอร์ ตรวจวัดรังสี เซ็นเซอร์ตรวจวัดพลังงานความร้อน สำหรับเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดก๊าซ เทอร์โม อิเล็กทริกไฮโดรเจนเซ็นเซอร์เป็นชนิดที่ได้รับความ สนใจจากนักวิจัยเป็นอย่างมาก โดยเซ็นเซอร์ชนิดนี้ จะใช้เพื่อการตรวจวัดความเข้มข้นของระดับ



ก๊าซไฮโดรเจนในอากาศหรือเพื่อตรวจจับการรั่วซึมของไฮโดรเจนจากสถานที่กักเก็บ [35-37] Shin และคณะ [38] ศึกษาและพัฒนาวิธีการและอุปกรณ์ตรวจวัดไฮโดรเจนระดับเข้มข้นโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแสดงในภาพที่ 8 เทอร์โมอิเล็กทริกเซ็นเซอร์ถูกสร้างขึ้นโดยการถลุงตัวทำปฏิกิริยาแพลทตินัม

ชนิดฟิล์มบางลงบนผิวครึ่งหนึ่งของนิเกิลออกไซด์ชนิดฟิล์มหนา เซ็นเซอร์ที่ได้สามารถตรวจวัดระดับความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่ปนเปื้อนในอากาศได้ตั้งแต่ 0.025 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ โดยให้ความสำคัญสัมพันธ์ของค่าสัญญาณความต่างศักย์และความเข้มข้นของก๊าซเป็นเส้นตรง



ภาพที่ 8 ภาพแสดงโครงสร้างของระบบตรวจจับเทอร์โมอิเล็กทริกไฮโดรเจนเซ็นเซอร์ โดย Shin และคณะ [38]

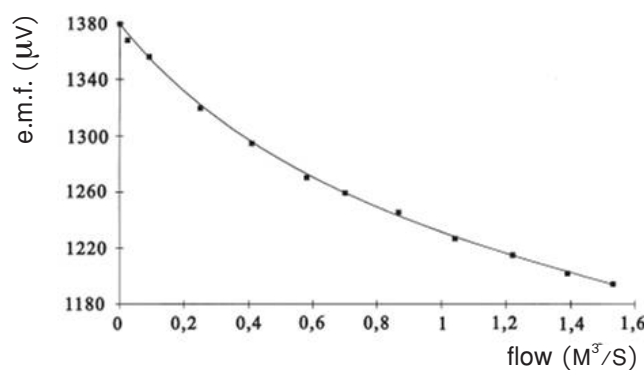
การนำเทอร์โมอิเล็กทริกเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัดรังสีไปประยุกต์ใช้ สามารถพบได้อย่างแพร่หลายทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมในความหลากหลายของโครงสร้างเทอร์โมอิเล็กทริกเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัดรังสีโครงสร้างอย่างบาง (Thin-Film) ซึ่งใช้ไมโครอิเล็กทรอนิกส์เทคโนโลยีนั้นเป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพตัวหนึ่งของเทอร์โมอิเล็กทริกเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัดรังสี [39] Kozlov [40] ได้นำเสนอจุดสมดุลด้านโครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัดรังสีที่ใช้โครงสร้างอย่างบางกับการถลุงแยกชั้นของชั้นดูดซับและซีของเทอร์โมอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ตามภาพที่ 8 และได้ทำการสรุปผลว่า โครงสร้างของเทอร์โมอิเล็กทริกเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจวัดรังสีที่ใช้โครงสร้างอย่างบางกับการถลุงแยกชั้นของชั้นดูดซับและซีของเทอร์โมอิเล็กทริก

ทรานสดิวเซอร์นั้นเหมาะสมกับการใช้งานมากกว่าโครงสร้างที่ประกอบด้วยซีของเทอร์โมอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ซึ่งวางไว้ที่ชั้นดูดซับ นอกจากนี้ยังสรุปว่า โมเดลการวิเคราะห์จุดสมดุลของเทอร์โมอิเล็กทริกเซ็นเซอร์สามารถนำมาใช้เพื่อการทราบถึงค่าที่มากที่สุดของค่าจำเพาะรวมการผันแปรของโวลท์-วัตต์ภายใต้เงื่อนไขค่าเวลาในการสร้างอุณหภูมิ (Thermal Time) คงที่

หลากหลายการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดพลังงานความร้อน โดยอาศัยหลักปรากฏการณ์ซีเบ็คและเพลเทียร์ได้รับการศึกษาและพัฒนา ดังเสนอต่อไปนี้ เป็นตัวอย่างของการนำเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกไปใช้เพื่อเป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดพลังงานความร้อน Vancauwenberghe และคณะ [41] ทำการศึกษาและพัฒนาไมโครเซ็นเซอร์ชนิดใหม่เพื่อป้องกัน

และตรวจจับการก่อกวนตัวของหยดน้ำไมโครเซ็นเซอร์ชนิดนี้ได้รับการพัฒนาเพื่อจุดประสงค์ของการป้องกันการเกิดไอน้ำบนกระจกรถยนต์เป็นหลัก และทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์เพลเทียร์ Stachowiak และคณะ [42] ได้วิจัยและพัฒนาเซ็นเซอร์รวมถึงไปถึงวิธีการตรวจวัดความเร็วและอัตราการไหลของของเหลวที่มีความเร็วต่ำขึ้นมา โดยได้เสนอแนะว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะใช้

เซ็นเซอร์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักปรากฏการณ์ซีเบ็คและเพลเทียร์สามารถตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวที่มีความเร็วต่ำมาก โดยเซ็นเซอร์ที่ได้ทำการศึกษานั้นจะส่งสัญญาณตอบกลับโดยมีความกว้างของช่วงสัญญาณประมาณ 185 ไมโครโวลท์ ( $\mu V$ ) และสามารถตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวได้ในระดับ 0-1.5  $m^3/s$  ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 สัญญาณจากเทอร์โมอิเล็กทริกไมโครเซ็นเซอร์สำหรับการใช้ในเครื่องตรวจวัดอัตราการไหล วิจัยและพัฒนาโดย Stachowiak และคณะ [42]

**บทสรุป**

เนื่องมาจากความตื่นตัวทางด้านเศรษฐกิจและพลังงาน ส่งผลให้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับความสนใจและการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากนักวิจัยจำนวนมาก ทำให้เกิดความหลากหลายของการนำเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้ โดยการศึกษา วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก สามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะของการนำไปใช้ คือ การทำความเย็น การผลิตกระแสไฟฟ้า และการใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัด โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อทำความเย็นนั้น พบได้โดยมากในการใช้งานเพื่อทำความเย็นให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการใช้เป็นเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก การนำเทคโนโลยี

เทอร์โมอิเล็กทริกไปใช้เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าได้รับการพัฒนาอย่างกว้างขวางเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับงานกิจการด้านการอวกาศ และเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กจากการเปลี่ยนพลังงานความร้อนสูญเสียไปจากการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อเป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดสามารถพบได้อย่างแพร่หลายในงานตรวจวัดระดับการปนเปื้อนของก๊าซพิษ เช่น ไฮโดรเจนในอากาศ หรือการตรวจวัดรังสีและพลังงานความร้อนจากข้อได้เปรียบทางด้านขนาด รูปทรง ความถูกต้อง แม่นยำ ความน่าเชื่อถือ และการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมของเทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่ควรได้รับการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Rowe, D.M. (2006). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. USA, CRC Press.
- [2] Melcor Company. *ThermaTEC Series Specifications*. [online]. Available: <http://www.melcor.com/thermtec.html>. 2007.
- [3] Lindler, K.W. (1998). Use of multi-stage cascades to improve performance of thermoelectric heat pumps, *Energy conversion and Management*, 39(10), 1009-1014.
- [4] Gromov, G. (2002). *Thermoelectric Cooling Modules*. *Business briefing: Global photonics applications & technology*, RMT Ltd.
- [5] Chien R. and Huang G. (2004). Thermoelectric cooler application in electronic cooling, *Applied Thermal Engineering*, 24, 2207-2217.
- [6] Chen, J., Zhou, Y., Wang, H. and Wang, J. T. (2002). Comparison of the optimal performance of single- and two-stage thermoelectric refrigeration systems, *Applied Energy*, 73(3-4), 285-298.
- [7] Khattab, N.M. and El Shenawy, E.T. (2006). Optimal operation of thermoelectric cooler driven solar thermoelectric generator, *Energy Conversion and Management*, 47(4), 407-426.
- [8] Pan, Y., Lin, B., and Chen, J. (2007). Performance analysis and parametric optimal design of an irreversible multi-couple thermoelectric refrigerator under various operating conditions. *Applied Energy*, 84(9), 882-892.
- [9] Li, T., Tang, G., Gong, G., Zhang, G., Li, N., and Zhang, L. (2009). Investigation of prototype thermoelectric domestic-ventilator, *Applied Thermal Engineering*, 29(10), 2016-2021.
- [10] Vián, J.G. and Astrain, D. (2009). Development of a thermoelectric refrigerator with two-phase thermosyphons and capillary lift, *Applied Thermal Engineering*, 29(10), 1935-1940.
- [11] Lindenblad, N.E. (1958). Thermoelectric refrigerator, US Patent No. 2,837,899.
- [12] Lindenblad, N.E. (1959). Thermoelectric cooling apparatus, US Patent No. 2,872,788.
- [13] Reed Kingstone, L.H. and Hatcher, I. (1982). Compact thermoelectric refrigerator, US Patent No. 4,326,383.
- [14] Watanabe, H. and Kiya, F. (1999). Thermoelectric refrigerator, US Patent No. 5,927,078.
- [15] Gilley, M.D. and Webb, R.L. (1999). Thermoelectric refrigerator with evaporating/condensing heat exchanger, US Patent No. 6,003,319.
- [16] Dai, Y.J, Wang, R.Z., and Ni, L. (2003). Experimental investigation and analysis on a thermoelectric refrigerator driven by solar cells, *Solar Energy Material& Solar Cells*, 77, 377-391.
- [17] Min, G. and Rowe, D.M. (2006). Experimental evaluation of prototype thermoelectric domestic-refrigerators, *Applied Energy*, 83, 133-152.

- [18] Bojic, M., Savanovic, G., Trifunovic, N., Radovic, L., and Saljic, D. (1997). Thermoelectric cooling of a train carriage by using a coldness-recovery device, *Energy*, 22(5), 493-500.
- [19] Hara, T., Azuma, H., Shimizu, H., Obora, H., and Sato, S. (1998). Cooling performance of solar cell driven, thermoelectric cooling prototype headgear, *Applied Thermal Engineering*, 18, 1159-1169.
- [20] Wang, W., Jia, F., Huang, Q., Zhang, J. (2005). A new type of low power thermoelectric micro-generator fabricated by nanowire array thermoelectric material, *Microelectronic Engineering*, 77(3-4), 223-229.
- [21] Pramanick, A.K., and Das, P.K. (2006). Constructal design of a thermoelectric device, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(7-8), 1420-1429.
- [22] Nylén, J., Lidin, S., Andersson, M., Liu, H., Newman, N., Häussermann U. (2007). Effect of metal doping on the low-temperature structural behavior of thermoelectric  $\beta$ -Zn<sub>4</sub>Sb<sub>3</sub>, *Journal of Solid State Chemistry*, 180(9), 2603-2615.
- [23] Yu, J., Zhao, H., Xie, K. (2007). Analysis of optimum configuration of two-stage thermoelectric modules, *Cryogenics*, 47 (2), 89-93.
- [24] Yamashita, O. (2008). Effect of temperature dependence of electrical resistivity on the cooling performance of a single thermoelectric element, *Applied Energy*, 85(10), 1002-1014.
- [25] Chen, L., Li, J., Sun F., and Wu, C. (2005). Performance optimization of a two-stage semiconductor thermoelectric-generator, *Applied Energy*, 82(4), 300-312.
- [26] Goncalves, L.M., Cout, C., Alpuim, P., Rowe, D.M., Correia, J.H. (2006). Thermoelectric microstructures of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> for a self-calibrated micro-pyrometer, *Sensors and Actuators, A* 130-131, 346-351.
- [27] Simkin, B.A., Hayashi, Y., and Inui, H. (2005). Directional thermoelectric properties of Ru<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>, *Intermetallics*, 13, 1225-1232.
- [28] Kuznetsov, V.L. and Rowe, D.M. (2004). Solid solution formation in the Zn<sub>4</sub>Sb<sub>3</sub>Cd<sub>4</sub>Sb<sub>3</sub> system, *Journal of Alloys and Compounds*, 372, 103-106.
- [29] Wunderlich W. (2009). NaTaO<sub>3</sub> composite ceramics - A new thermoelectric material for energy generation, *Journal of Nuclear Materials*, 389(1), 57-61.
- [30] Yu, J., Zhao, H., and Xie, K. (2007). Analysis of optimum configuration of two-stage thermoelectric modules, *Cryogenics*, 47, 89-93.
- [31] Rowe, D.M. (1999). Thermoelectrics; An environmentally-friendly source of electrical power, *Renewable energy*, 16, 1251-1256.
- [32] El-Genk, M.S., Saber, H.H., and Caillat, T. (2003). Efficient segmented thermoelectric uncouples for space power applications, *Energy Conversion and Management*, 44, 1755-1772.

- [33] Glosch, H., Ashauer, M., Pfeiffer, U., and Lang, W. (1999). A thermoelectric converter for energy supply, *Sensors and Actuators*, 74, 246-250.
- [34] Strasser, M., Aigner, R., Franosh, M., and Wachutka, G. (2004). Miniaturized thermoelectric generators based on poly-Si and poly-SiGe surface micromachining, *Sensors and Actuators*, A 97-98, 535-542.
- [35] Qiu, F., Shin, W., Matsumiya, M., Izu, N., and Murayama, N. (2003). Hydrogen-sensing properties of multi-layer device Pt/SiGe sputtered on oxidized silicon substrate, *Materials Chemistry and Physics*, 82(3), 575-582.
- [36] Qiu F., Shin W., Matsumiya M., Izu N., Matsubara I., and Murayama N. (2004). Miniaturization of thermoelectric hydrogen sensor prepared on glass substrate with low-temperature crystallized SiGe film, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 103(1-2), 252-259.
- [37] Sawaguchi, N., Shin, W., Izu, N., Matsubara, I., and Murayama, N. (2006). Enhanced hydrogen selectivity of thermoelectric gas sensor by modification of platinum catalyst surface, *Materials Letters*, 60, 313-316.
- [38] Shin, W., Matsumiya, M., Qiu, F., Izu, N., and Murayama, N. (2004). Thermoelectric gas sensor for detection of high hydrogen concentration, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 7(2-3), 344-347.
- [39] Kozlov, A.G. (1999). Optimization of thin-film thermoelectric radiation sensor with comb thermoelectric transducer, *Sensors and Actuators*, 75, 139-150.
- [40] Kozlov, A.G. (2000). Optimization of thin-film thermoelectric radiation sensor with separate disposition of absorbing layer and comb thermoelectric transducer, *Sensors and Actuators A: Physical*, 84(3), 259-269.
- [41] Vancauwenberghe, O., Short, J., Giehler, E., Bildstein P., Ancy, P., and Gschwind, M. (1996). Microsensor for the preventive detection of water condensation: operating principle and interface electronics, *Sensors and Actuators*, A 53, 304-308.
- [42] Stachowiak, H., Lassue, S., Dubernard, A., and Gaviot, E. (1998). A thermoelectric sensor for fluid flow measurement. principles, calibration and solution for self temperature compensation, *Flow Measurement and Instrumentation*, 9, 135-14.