

เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก

เผ่าเทพ พิษณุภกร

E-mail : paothep@gmail.com

เดี๋ยวนี้อะไรต่อมิอะไรก็ร้อนขึ้น ทั้งหน้าร้อนหน้าหนาวก็ดูเหมือนว่าร้อนขึ้นเรื่อยๆ และก็โดยเฉพาะลมฟ้าอากาศเท่านั้น คอมพิวเตอร์ก็ร้อนขึ้นจนบางทีไม่สามารถวางมันบนตักเราได้ รถที่จอดไว้กลางแจ้งก็ร้อนจนต้องรอให้มันเย็นลงบ้างก่อนที่จะเข้าไปนั่ง คงจะดีไม่น้อยหากเราสามารถนำความร้อนเหล่านี้มาใช้งานได้ และอีกไม่นานนับจากนี้ไป เราก็อาจได้เห็นเทคโนโลยีที่สามารถทำเช่นนั้นได้ นั่นคือ เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric technology) ซึ่งได้เริ่มต้นขึ้นแล้ว

พลังงานความร้อนในของแข็งจะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายในของแข็งนั้น ในเชิงควอนตัมฟิสิกส์ ความสั่นสะเทือนดังกล่าวนี้เรียกว่า โฟนอน (phonon) โดยในวัสดุหลายชนิดความร้อนจะถ่ายเทโดยโฟนอน อย่างไรก็ตามในปี ค.ศ. 1821 โทมัส โยฮาน ซีเบ็ค (Thomas Johann Seebeck) ได้ค้นพบว่าในโลหะหลายชนิด ความร้อนส่วนหนึ่ง (ไม่มากนัก) สามารถถ่ายเทโดยประจุไฟฟ้า ได้แก่ อิเล็กตรอนอิสระ (free Electrons) ปรากฏการณ์นี้ต่อมาเรียกว่า ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Effect) เขียนย่อว่า TE

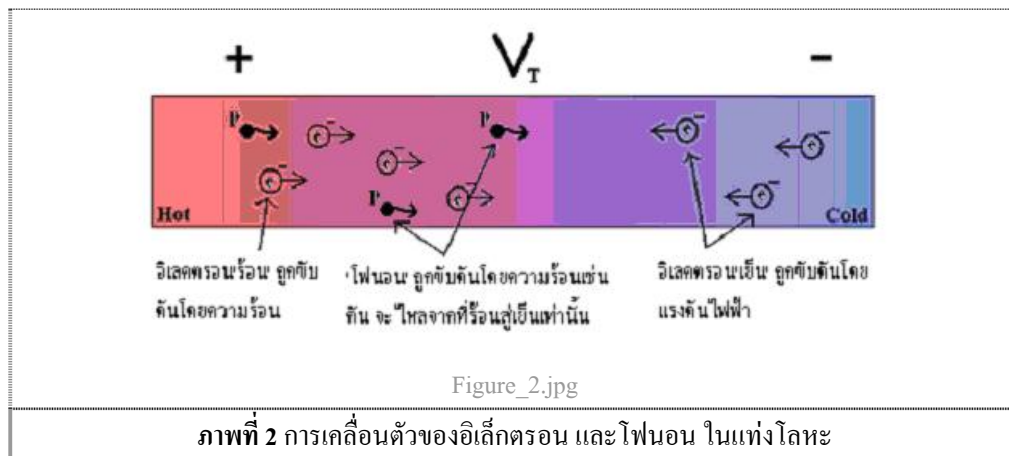


Figure_1-Thomas_Johann_Seebeck.jpg

ภาพที่ 1 โทมัส โยฮาน ซีเบ็ค

กลไกการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในโลหะแสดงไว้ในภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่า โฟนอนเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนกว่าสู่บริเวณที่เย็นกว่า แต่อิเล็กตรอนอิสระสามารถเคลื่อนที่ได้ในทั้งสองทิศทาง โดยอิเล็กตรอนกลุ่มแรก (เรียกว่า อิเล็กตรอน 'ร้อน') จะเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนกว่าสู่บริเวณที่เย็นกว่า เนื่องจากถูกขับเคลื่อนโดยพลังงานความร้อนที่ได้รับ (ในทำนองเดียวกับการที่อากาศร้อนในห้องลอยตัวขึ้นสู่เพดานที่เย็นกว่า)

ต่อมาการสะสมของอิเล็กตรอนร้อนนี้จะทำให้อุณหภูมิในเขตเย็นสูงขึ้นและก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้า (V_T) ระหว่างเขตร้อนที่กลายเป็นขั้วไฟฟ้าบวกและเขตเย็นที่เป็นขั้วลบ แรงขับเคลื่อนนี้ทำให้เกิดกระแสของอิเล็กตรอน 'เย็น' อีกกลุ่มที่ไหลเวียนกลับสู่เขตร้อน ในกรณีเช่นนี้ เราจะเห็นว่าความไม่สมดุลของอุณหภูมิเป็นเหตุให้เกิดแรงดันไฟฟ้า



อย่างไรก็ดี ในทางกลับกันแรงดันไฟฟ้าก็เป็นสามารถเป็นเหตุให้เกิดความไม่สมดุลของอุณหภูมิด้วยเช่นกัน โดยเราสามารถนำพลังงานไฟฟ้าภายนอก เช่น แบตเตอรี่ไฟฟ้าเป็นตัวกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายในแท่งโลหะ ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้จะนำพาความร้อนไปด้วย ทำให้อุณหภูมิที่ขั้วไฟฟ้าลบของแท่งโลหะลดลงในขณะที่ขั้วบวกนั้นกลับเพิ่มสูงขึ้น

ค่าแรงดันไฟฟ้าหารด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิมีชื่อว่า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (Seebeck coefficient) โดยเราจะเรียกวัสดุใดก็ตามที่มีค่าซีเบ็คไม่ใช่นูนขั้วว่าเป็น วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก หรือวัสดุ TE (TE materials) ทั้งนี้ วัสดุ TE ที่ดีจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบ็คมากซึ่งมักจะได้แก่โลหะและสารกึ่งตัวนำ (หรือที่มักจะเรียกทับศัพท์ว่า เซมิคอนดักเตอร์ – semiconductor) เนื่องจากวัสดุทั้งสองประเภทนี้มีประจุไฟฟ้าอิสระจำนวนมาก

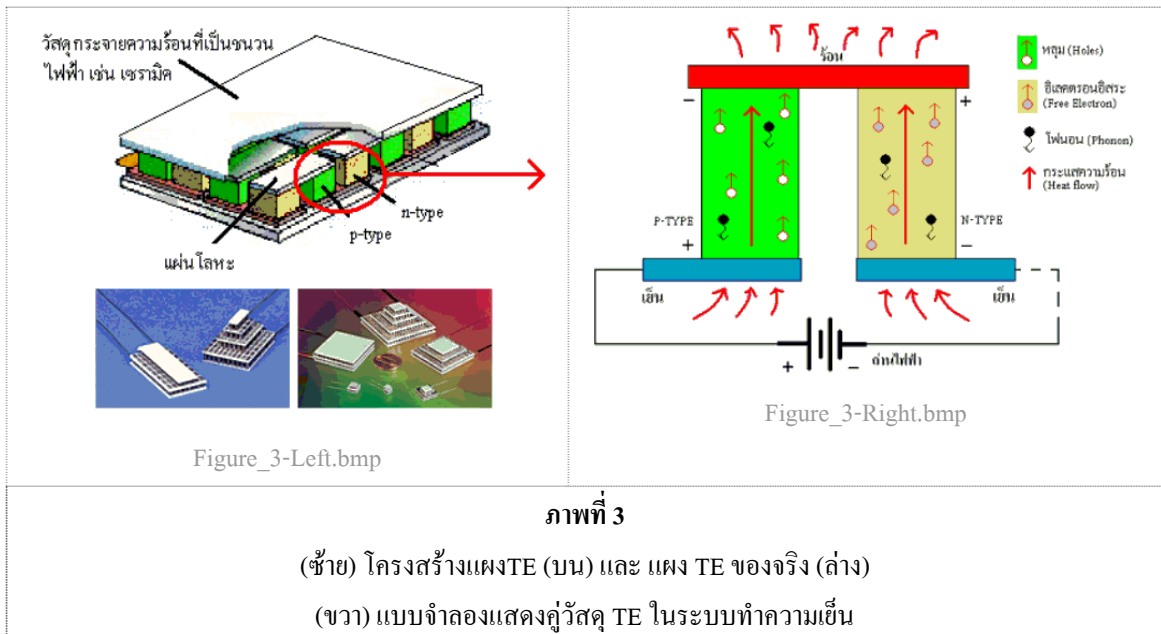
วัสดุ TE ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นสารกึ่งตัวนำผสมโลหะ เช่น SiGe หรือ PbTe ซึ่งมีค่าซีเบ็คที่มากกว่าโลหะล้วนๆ นอกจากนี้ สารกึ่งตัวนำยังมีประจุไฟฟ้าอีกแบบหนึ่งคือ โฮล (holes) ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ในขณะที่โลหะจะมีเพียงแค่อิเล็กตรอนเท่านั้น

โฮลในสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ได้เช่นเดียวกับอิเล็กตรอน และจะ ‘หนี’ จากที่ร้อนกว่าสู่ที่เย็นกว่าเช่นกัน แต่เนื่องจากโฮลมีประจุไฟฟ้าบวก (ซึ่งตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าลบ) ขั้วร้อนที่เคยเป็นขั้วไฟฟ้าบวกจึงกลายเป็นขั้วไฟฟ้าลบแทน สารกึ่งตัวนำอาจมีประจุไฟฟ้าได้ทั้ง 2 แบบ แล้วแต่องค์ประกอบทางเคมี เช่น สาร $(Bi,Sb)_2Te_3$ ที่มีประจุไฟฟ้าแบบโฮลเป็นหลัก และมีค่าซีเบ็คเป็นบวก (positive-type หรือ p-type) ในขณะที่ สาร $Bi_2(Te,Se)_3$ มีประจุไฟฟ้าแบบอิเล็กตรอนเป็นหลัก และมีค่าซีเบ็คเป็นลบ (negative-type หรือ n-type)

วัสดุ TE สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายลักษณะ เช่น ในกรณีของคู่ควบคุมความร้อน (thermocouple) ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ทำงาน โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของเส้นลวดโลหะ และใช้ค่าซีเบ็คของเส้นลวดที่วัดมาก่อนหน้านี้คำนวณว่าปลายหนึ่งร้อนกว่าอีกปลายหนึ่งกี่องศา การวัดอุณหภูมิโดยใช้วัสดุ TE นั้นมีข้อได้เปรียบหลายประการ เนื่องจากเรียบง่ายและมีการใช้งานมานานแล้ว

อย่างไรก็ดี การใช้งานที่น่าสนใจจริงๆ ของวัสดุ TE ได้แก่ การใช้ทำความเย็นและการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนต่างๆ โดยในปัจจุบัน วัสดุ TE ที่ใช้มักจะถูกประกบเป็นคู่ๆ และต่อเข้าเป็นแผงดังเช่นในภาพที่ 3 (ภาพซ้ายบน) เนื่องจากว่าวัสดุ TE แต่ละชั้นมีค่าต้านทานไฟฟ้าต่ำ วัสดุ TE ทุกชั้นในแผงจะนำมาต่อแบบอนุกรมเพื่อลดจำนวนกระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้ โดยต้องระวังการจัดเรียงเพื่อไม่ให้ขั้วร้อนและขั้วเย็นของวัสดุ TE แต่ละชั้น

มาสัมพันธ์กัน แผงเทอร์โมอิเล็กทริกลักษณะนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในการนำไปใช้ในทั้งอุปกรณ์ทำความเย็นและอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้า



ภาพที่ 3 (รูปขวามือ) นี้แสดงการทำงานในระบบทำความเย็นของคู่วัสดุ TE โดยในกรณีนี้แรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไฟฟ้าทำให้เกิดการหมุนเวียนของประจุไฟฟ้าทั้งแบบโฮลในวัสดุแบบ p-type (สีเขียว – ซีนส่วนทางซ้ายมือ) และแบบอิเล็กตรอนในวัสดุแบบ n-type (สีครีม – ซีนส่วนทางขวามือ) ทั้งนี้ ประจุไฟฟ้าทั้งสองแบบนี้จะทำการขนย้ายความร้อนจากขั้วไฟฟ้าไปสู่อีกขั้วหนึ่ง ส่งผลให้อุณหภูมิของขั้วหนึ่งเพิ่มขึ้นแต่ของอีกขั้วหนึ่งลดลง โดยเราสามารถนำด้านที่เย็นลงนี้มาดูดอุณหภูมิสิ่งอื่นๆ อีกต่อหนึ่ง

เมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นทั่วไปแบบระบบคอมเพรสเซอร์ ระบบทำความเย็นแบบ TE จะมีจุดเด่นเนื่องจากมีขนาดเล็กกว่าและมีน้ำหนักเบากว่ามาก ทำให้เหมาะสมในการใช้ในตู้เย็นปิกนิกหรือตู้เย็นในรถยนต์ นอกจากนี้ ระบบ TE ยังไม่มีการสั่นสะเทือน ไม่มีการรั่วของของเหลว อีกทั้งยังมีการตอบสนองที่รวดเร็ว จึงเหมาะสำหรับการทำความเย็นให้แก่ชิ้นส่วนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น ซีพียู (central processing unit, CPU) และเลเซอร์

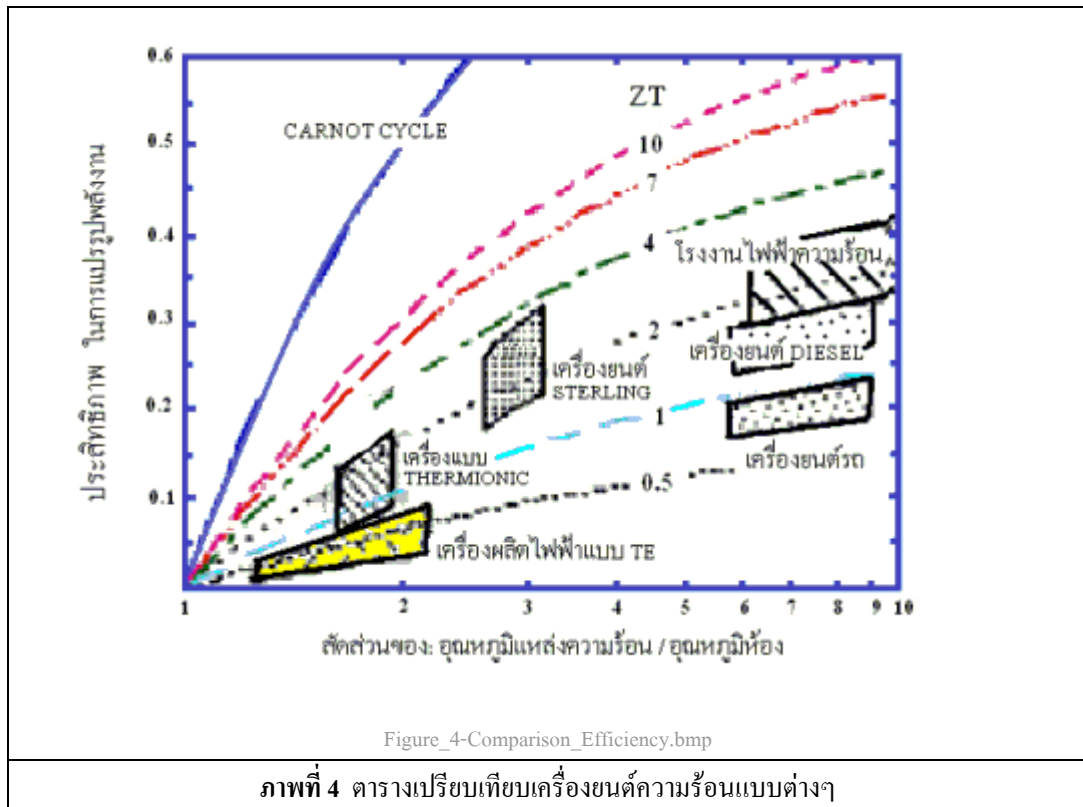
สำหรับการใช้วัสดุ TE ในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้น แผง TE จะถูกจัดตั้งให้ฝากหนึ่งอยู่ติดกับแหล่งความร้อน โดยความไม่สมดุลของอุณหภูมิระหว่างทั้งสองด้านจะก่อให้เกิดพลังงานไฟฟ้าที่เราสามารถนำไปใช้งานได้ การที่แผง TE มีขนาดเล็กไม่ใหญ่มาก มีน้ำหนักเบา และการไม่มีชิ้นส่วนใดเคลื่อนไหว ทำให้เครื่องผลิตไฟฟ้าแบบ TE เหมาะกับการใช้ในยานพาหนะประเภทต่างๆ เช่น ในยานอวกาศบางลำที่ใช้ความร้อนจากกัมมันตภาพรังสีของก้อนพลูโทเนียมในการผลิตไฟฟ้า หรือในรถยนต์ที่ใช้ความร้อนจากคว้น ไอเสีย

น่ารู้ด้วยว่า ไอความร้อนจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ไปจนถึงความร้อนจากร่างกายของคนเรา ก็สามารถนำมาผลิตไฟฟ้าได้ นาฬิกาบางรุ่นของบริษัท Citizen ก็ใช้วัสดุ TE ในการผลิตไฟฟ้าแทนการใช้แบตเตอรี่

ในปัจจุบัน ประสิทธิภาพของวัสดุ TE ยังนับว่าต่ำอยู่ ส่งผลให้เทคโนโลยี TE มีบทบาทเฉพาะใน ‘ช่องโหว่’ ของเทคโนโลยีอื่นๆ ในภาพที่ 4 จะเห็นว่าในบรรดาเทคโนโลยีแปรรูปความร้อนทั้งหมด เครื่องผลิตไฟฟ้าแบบ TE (สีเหลือง) มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด แต่เนื่องจากเครื่องขนต้ความร้อนแบบอื่น เช่น กังหันไอน้ำที่ใช้ใน

โรงงานไฟฟ้า หรือเครื่องยंत्रถ ไม่เหมาะสำหรับการใช้งานกับแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำอย่าง ไอเสีย หรือ ร่างกายมนุษย์ เครื่องผลิตไฟฟ้าแบบ TE จึงยังมีบทบาทในแง่อื่น

อย่างไรก็ดี เนื่องจากระบบ TE มีจุดเด่นเรื่องขนาดและการไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหวดังที่กล่าวมาแล้ว กลุ่มวิจัยหลายๆ กลุ่มจึงยังพยายามพัฒนาวัสดุ TE ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเพื่อนำมาใช้แทนเทคโนโลยีอื่นในงาน บางประเภท



ประสิทธิภาพของวัสดุ TE จะแสดงด้วยค่า “ZT” หรือที่เรียกกันในวงการว่า Figure of Merit (“ค่าความดี”) โดยวัสดุที่มีค่า ZT ที่สูง หรือมีประสิทธิภาพสูงนั้นต้องมีสมบัติ 3 ประการ ได้แก่

1. พลังงานความร้อนของวัสดุนั้นต้องถูกขนย้ายด้วยประจุไฟฟ้าให้มากที่สุด ซึ่งก็ต้องมีค่าซีเบ็กที่สูงนั่นเอง
2. วัสดุนั้นต้องมีแรงต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ ซึ่งก็คือเป็นสื่อไฟฟ้าที่ดี มิเช่นนั้นพลังงานกระแสไฟฟ้าก็จะสูญเสียและเปลี่ยนกลับเป็นความร้อน
3. วัสดุนั้นต้องเป็นสื่อนำความร้อนที่ไม่ดี เพราะจากรูปที่ 3 เราจะเห็นว่า โฟนอนจะขนย้ายความร้อนสวนทางกับประจุไฟฟ้า ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของวัสดุ TE ลดลง

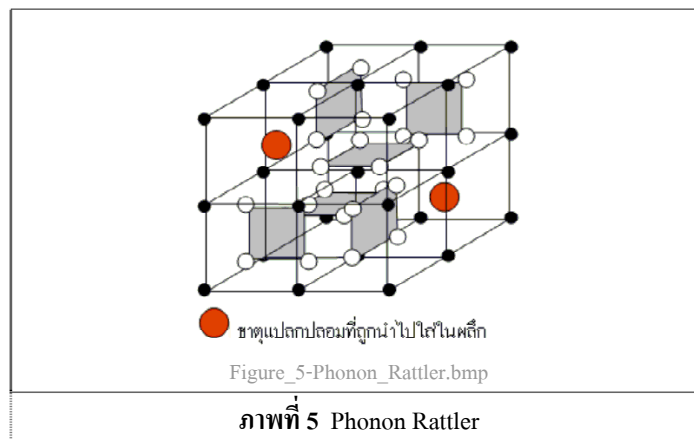
อย่างไรก็ดี สมบัติทั้งสามอย่างนี้มีมักจะมิได้อยู่ไม่พร้อมกันในวัสดุชนิดหนึ่งๆ อย่างเช่น โลหะและสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นทั้งสื่อไฟฟ้าและความร้อนที่ดี ในขณะที่ฉนวนไฟฟ้าส่วนใหญ่ (เช่น ยางหรือพลาสติก) ก็เป็นสื่อนำความร้อนที่ไม่ดี

วัสดุ TE ที่มีกรใช้อย่างแพร่หลายในขณะนี้ มีค่า ZT ประมาณ 1.0 ซึ่งจากรูปที่ 4 เราจะเห็นว่าวัสดุ TE ที่มีค่า ZT 1.0 (เส้นประสีฟ้า) สามารถนำมาสร้างเครื่องยंत्रที่มีประสิทธิภาพเหนือเครื่องยंत्रถ ดังนั้นเป้าหมายสำคัญในขณะนี้คือการค้นหาหรือสังเคราะห์วัสดุ TE ที่มีค่า ZT อย่างน้อย 4.0 (เส้นสีเขียว) ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้วัสดุนั้น

จะสามารถมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าเครื่องชนิดแบบอื่นๆ ในปัจจุบัน ค่า ZT สูงสุดอยู่ที่ 2 กว่าๆ ในขณะที่เมื่อปี ค.ศ. 1990 ค่า ZT สูงสุดอยู่เกือบๆ 1.0

พัฒนาการในช่วงเกือบ 20 ปีที่ผ่านมาถือว่าก้าวกระโดด เพราะหากเรามองย้อนหลังไป อีกเราจะเห็นว่าในช่วงปี ค.ศ. 1950 จนถึง 1990 นั้น ค่า ZT แทบไม่ได้เพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.5 เท่าใดเลย โดย ในช่วง 40-50 ปีที่ผ่านมา นักวิจัยได้พยายามปรับเปลี่ยนส่วนผสมทางเคมีเพื่อให้ได้วัสดุ TE ที่ดีขึ้นมาโดยตลอด แต่พวกเขาก็ไม่สามารถพัฒนาวัสดุที่มีค่า ZT สูงกว่า 0.8-0.9 ได้

ต่อมาในช่วง 2 ทศวรรษสุดท้ายที่แนวการวิจัยได้เปลี่ยนไป โดยแนวการวิจัยสมัยใหม่จะไม่เน้นไปที่ สักส่วนทางเคมี แต่จะมุ่งไปที่การใช้เทคนิคของนาโนเทคโนโลยีในการพัฒนาวัสดุที่มีโครงสร้างและสมบัติพิเศษ ที่ไม่สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคทางเคมี โดยที่กลุ่มวิจัยต่าง ๆ ก็มีแนวคิดที่แตกต่างกันในการสร้างวัสดุที่ดี ขึ้น ตัวอย่างเช่น กลุ่มวิจัยที่ Jet Propulsion Laboratory (JPL) ที่เมืองลอสแอนเจลิส ในสหรัฐอเมริกา เสนอแนวคิด ที่เรียกว่า Phonon Rattler (ดูภาพที่ 5) วัสดุ TE ที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีโครงสร้างแบบผลึกที่ถ่ายทอด แรงสั่นสะเทือนได้ดี และทำให้มันนำความร้อนได้ดี แต่นักวิจัยกลุ่มนี้พบว่าหากนำธาตุที่หนักเข้าไปบรรจุภายใน ผลึก ก็จะทำให้การสั่นของผลึกและการนำความร้อนโดยโฟนอนก็จะลดลงอย่างมาก โดยที่ไม่มีส่งผลกระทบต่อ การนำไฟฟ้ามากนัก กลุ่มวิจัยที่ JPL ได้ใช้วิธีนี้ในการผลิตวัสดุที่มีค่า ZT สูงถึง 1.8 ในปี ค.ศ. 1998

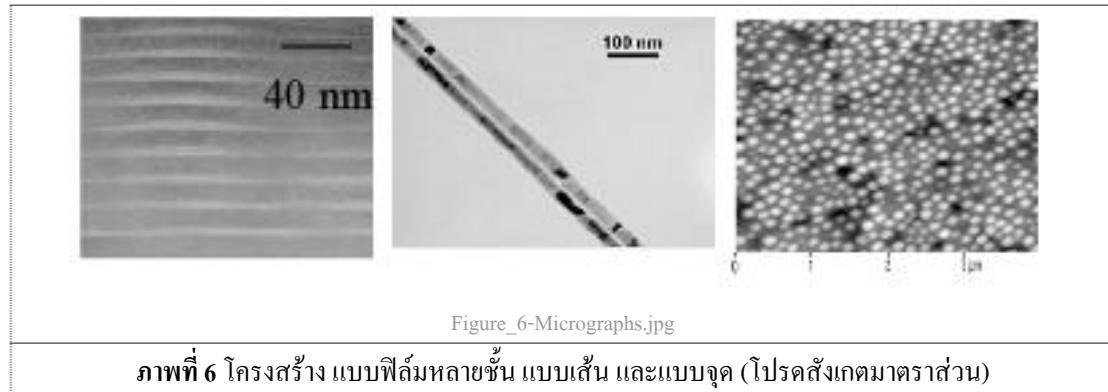


อีกแนวคิดหนึ่งที่เป็นที่นิยมศึกษาในขณะนี้ ได้แก่ การสังเคราะห์วัสดุที่มีโครงสร้างแบบแผ่นฟิล์มหลาย ชั้น (superlattice thin film structure) ที่ประกอบด้วยวัสดุอย่างน้อยสองชนิดที่ถูกสังเคราะห์เป็นแผ่นบางทับกัน สลับไปมาหลายชั้น โดยที่แต่ละชั้นอาจมีความบางเพียงไม่กี่นาโนเมตร ขนาดที่ไม่เท่ากันของผลึกสารกึ่งตัวนำ ที่เป็นองค์ประกอบในแต่ละชั้นจะทำให้เกิดความตึงและความไม่ระเบียบที่ผิวต่อระหว่างชั้น ซึ่งจะเป็นตัว ขัดขวางการสั่นสะเทือน ส่งผลให้การนำความร้อนลดลงโดยไม่มีผลเสียแก่การนำไฟฟ้า (หรือค่าซีเบ็ก) เช่นกัน นอกจากนี้ ในสเกลระดับไม่กี่นาโนเมตร อิทธิพลของทุกๆ อะตอมจะเด่นชัดมากขึ้น ทำให้สมบัติโดยรวมทางอิ เล็กทรอนิกส์ของวัสดุแตกต่างไปมากจากเมื่อเวลามันอยู่ในสเกลที่เราเห็นหรือจับต้องได้

กล่าวคือ มีความเป็นไปได้ที่หากออกแบบถูกต้อง ค่าการนำไฟฟ้า และค่าซีเบ็กก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โครงสร้างแบบแผ่นฟิล์มหลายชั้นนี้กำลังเป็นที่สนใจอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อกลุ่มวิจัยของ Research Triangle Institute (RTI) ได้ประดิษฐ์วัสดุ TE แบบแผ่นฟิล์มหลายชั้นที่มีค่า ZT สูงกว่า 2.0

วัสดุที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร (nanoscale) นี้ถือว่าเป็นอนาคตของวัสดุ TE ซึ่งนอกจากแบบ ฟิล์มแล้วก็ยังยมีแบบอื่นอีก เช่น แบบเส้น (nanowire) ซึ่งได้จากการสังเคราะห์สสารเป็นเส้นยาวที่มี

เส้นผ่านศูนย์กลางไม่กี่นาโนเมตร หรือแบบจุด(quantum dot) ที่มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนสสารที่มีขนาดไม่กี่นาโนเมตร (ภาพที่ 6) นักวิจัยที่ศึกษาทดลอง โครงสร้างทั้งสองแบบนี้ก็หวังที่จะใช้ประโยชน์จากสมบัติพิเศษที่พบได้ในวัสดุที่สเกลนาโนนี้เช่นกัน แต่ในปัจจุบัน งานวิจัยแนวนี้ยังไม่ประสบความสำเร็จนัก



แม้การพัฒนาวัสดุ TE ที่มีค่า ZT อย่างน้อย 4.0 ถือได้ว่าเป็นเป้าหมายหลักในปัจจุบัน แต่นอกจากประสิทธิภาพแล้ว ความสำเร็จของเทคโนโลยี TE นี้ก็ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะเรื่องราคาและความยากง่ายในการผลิต วัสดุแบบฟิล์มหลายชั้นอาจจะมีค่า ZT เกิน 2.0 ก็จริง แต่เนื่องจากผลิตได้ยาก ทำให้การใช้งานยังไม่แพร่หลายเท่าใดนัก

สำหรับเทคนิคที่ใช้ในการผลิตวัสดุนาโนเมตรนั้น ส่วนมากจะยากและแพงเกินกว่าที่จะมาใช้ในการผลิตสินค้าจำนวนมาก นอกจากปัญหาทางการตลาดแล้ว ปัญหาทางการประยุกต์ใช้วัสดุที่อาจเล็กจนตามองไม่เห็น และมีข้อจำกัดไม่ได้ มาทำเป็นอุปกรณ์ที่จับต้องได้ก็ไม่ใช่ปัญหาเล็กๆ เลย

แต่หากมีการค้นพบคำตอบเมื่อใด นอกเหนือจากการใช้งานต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว วัสดุ TE อาจจะได้รับนำมาใช้ในงานที่เราไม่เคยคาดถึงมาก่อน อย่างเช่นในเสื้อคลุมปรับอากาศที่สามารถช่วยให้คุณรู้สึกเย็นสบายในกรุงเทพ แต่อุ่นในนิวยอร์ก และหากอากาศไม่ร้อนไม่เย็นนัก คุณก็อาจเปลี่ยนระบบของเสื้อให้ผลิตไฟฟ้าเพื่อที่จะชาร์จแบตเตอรี่ โดยใช้ความร้อนจากร่างคุณเอง อุปกรณ์แพทย์หลายชนิดเช่นเครื่องช่วยฟังหรือหัวใจเทียมก็อาจใช้อุปกรณ์ TE แทนแบตเตอรี่ไฟฟ้า ซึ่งจะอำนวยความสะดวกและเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ใช้ได้มาก เพราะจะไม่มีปัญหาเรื่องแบตเตอรี่อีกต่อไป คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กก็อาจสามารถทำงานได้นานขึ้น โดยการแปรความร้อนกลับเป็นกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

อนาคตของเทคโนโลยี TE นั้นน่าตื่นเต้น และน่าติดตามเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในเวลานี้ ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดพลิกผันของเทคโนโลยี หลังจาก 50-60 ปีแห่งความล้มเหลว ประตูดุใหม่ๆ ที่จะนำไปสู่วัสดุแห่งอนาคต กำลังถูกเปิดออกแล้ว และหากงานวิจัยบางตัวที่กล่าวมาก่อนนี้ประสบความสำเร็จ ภายในทศวรรษนี้คุณก็อาจได้ใช้อุปกรณ์หลายชนิดที่มีวัสดุ TE โดยที่ไมรู้ตัวเลยก็เป็นได้

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต
ทดสอบออนไลน์	วิดีโอการเรียนการสอน
หน้าแรกในอดีต	แผ่นใสการเรียนการสอน
เอกสารการสอน PDF	กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์
แบบฝึกหัดออนไลน์	สุดยอดสิ่งประดิษฐ์
การทดลองเสมือน	
บทความพิเศษ	ตารางธาตุไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
แบบฝึกหัดกลาง	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
ความรู้รอบตัว	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	

 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 	
1. การวัด	2. เวกเตอร์
3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ	4. การเคลื่อนที่บนระนาบ
5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน	6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
7. งานและพลังงาน	8. การดลและโมเมนตัม
9. การหมุน	10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง
11. การเคลื่อนที่แบบคาบ	12. ความยืดหยุ่น
13. กลศาสตร์ของไหล	14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน
15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก	16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร
17. คลื่น	18. การสั่น และคลื่นเสียง
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 	
1. ไฟฟ้าสถิต	2. สนามไฟฟ้า
3. ความกว้างของสายฟ้า	4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน
5. ศักย์ไฟฟ้า	6. กระแสไฟฟ้า
7. สนามแม่เหล็ก	8. การเหนี่ยวนำ
9. ไฟฟ้ากระแสสลับ	10. ทรานซิสเตอร์
11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ	12. แสงและการมองเห็น
13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	14. กลศาสตร์ควอนตัม
15. โครงสร้างของอะตอม	16. นิวเคลียร์
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

