การผลิตไฟฟ้าโดยระบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซ

ELECTRICITY GENERATING BY THERMOPHOTOVOLTAIC SYSTEM

*มานนท์ สุขละมัย**

Manon Sooklamai*

ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
Department of Mechanical Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand.

***Corresponding author, E-mail:** manon.san@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนออีกหนึ่งเทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้วัสดุกึ่งตัวนำที่มีแถบช่องว่างพลังงานต่ำเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานรังสีความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่าระบบผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซโดยได้กล่าวถึงหลักการทำงานและองค์ประกอบพื้นฐานของระบบและองค์ประกอบอื่นๆ ทั้งที่ได้ทำการศึกษาทดลองไปแล้ว ที่ยังอยู่ในขั้นของการทดลองในห้องวิจัย และทั้งที่ยังเป็นข้อเสนอในทางทฤษฎีอันจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบได้ รวมไปถึงจุดเด่น จุดด้อย และข้อจำกัดของระบบผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซนี้ การพัฒนาการนำระบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซไปประยุกต์ใช้และทิศทางในการศึกษาวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

คำสำคัญ: การผลิตไฟฟ้าประสิทธิภาพ รังสีความร้อนระบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซ

Abstract

This paper presents an alternative method in electricity generation by using semiconductor material which has low band gap energy to convert radiant heat energy into electric energy; it is known-well as thermophotovoltaicpower generation system. The paper is summarizing explained about principle of system operation and its basic components, also the further components that some of them are already done, some of them are in progress in laboratory, and some of them are just in theory aspect that it would help to improve the overall system efficiency, the advantages, disadvantages and limits of the thermophotovoltaic system, new developments in thermophotovoltaic technology and their applications, also the suitable research direction on improving the energy conversion efficiency of the thermophotovoltaic system with suitable application.

Keywords: Electricity Generation, Efficiency, Radiant Heat Energy, Thermophotovoltaic System

บทนำ

การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนต่างๆ นั้นมีความสำคัญและได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นอย่างมากในช่วงหลายปีมานี้ ซึ่งเทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงก็คือเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขณะใช้งาน และแหล่งพลังงานตั้งต้นก็เป็นพลังงานที่ได้มาฟรีจากแสงอาทิตย์ การติดตั้งใช้งานที่เลือกให้เหมาะสมกับเนื้อที่ได้ และการใช้งานก็ค่อนข้างสะดวกสบาย เมื่อใดที่มีแสงอาทิตย์ตกกระทบตัวเซลล์แสงอาทิตย์ในปริมาณที่เพียงพอก็สามารถผลิตกระแสไฟฟ้ามาให้ใช้งานได้ แต่จุดนี้ก็ยังมีปัญหาอยู่ด้วยกล่าวคือ เซลล์แสงอาทิตย์จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีแสงอาทิตย์มาตกกระทบในปริมาณที่มากพอ และแน่นอนว่าบนพื้นโลกเราจะมีแสงอาทิตย์เฉพาะตอนกลางวันเพียงเท่านั้น และมากน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับภูมิภาคและสภาพอากาศในแต่ละวัน ดังนั้นเพื่อข้ามผ่านข้อจำกัดเรื่องเวลาสำหรับการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงมีการพัฒนาวัสดุกึ่งตัวนำที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้สามารถตอบสนองต่อคลื่นรังสีความร้อนจากแหล่งความร้อนอื่นขึ้นมาทดแทนเพื่อให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวแต่สามารถผลิตได้จากแหล่งพลังงานความร้อนอื่น ซึ่งเป็นได้ทั้งแหล่งความร้อนจากการรวมแสงเพื่อสร้างความร้อน หรือจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ หรือก๊าซชีวภาพ หรือจะเป็นความร้อนจากเตาเผา หรือความร้อนทิ้งจากแหล่งความร้อนอื่นๆ ก็ตาม ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานรังสีความร้อนในช่วงคลื่นแสงสีแดง (Infrared Wavelength) แล้วส่งถ่ายให้กับตัวเซลล์ผลิตไฟฟ้าได้ [1] โดยเรียกกันโดยทั่วไปว่า “ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อน (Thermophotovoltaic Systems)” หากพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าแล้ว ในทางทฤษฎีพบว่าสามารถมีประสิทธิภาพได้สูงถึง 30%-40% [2] และสำหรับระบบเครื่องต้นแบบที่เคยมีการศึกษาและทดสอบพบว่ามีประสิทธิภาพได้สูงกว่า 20% เลยทีเดียว [3] จึงเห็นได้ว่าระบบดังกล่าวมีข้อดีและมีความน่าสนใจอยู่มากบทความนี้จึงเป็นการนำเสนออีกหนึ่งเทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้วัสดุกึ่งตัวนำเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานความร้อนในรูปแบบของคลื่นรังสีความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยได้กล่าวถึงหลักการทำงานและองค์ประกอบพื้นฐานของระบบ รวมไปถึงจุดเด่น ข้อจำกัด การพัฒนาและการนำระบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซนี้ไปประยุกต์ใช้

หลักการทำงานของระบบ (Principle of System Operation)

เช่นเดียวกับระบบผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) ระบบผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซก็มีหลักการทำงานที่เหมือนกัน นั่นคือต้องการพลังงานจากโฟตอนเพื่อกระตุ้นการไหลของอิเล็กตรอนในระบบ แต่แตกต่างกันที่ระดับพลังงานที่ต้องการนั้นต่างกัน กล่าวคือเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งส่วนใหญ่ทำมาจากซิลิกอน (Si) จะมีช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Gap) อยู่ที่ 1.11eV ส่วนเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์นั้นจะใช้วัสดุกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานต่ำกว่า เช่น แกลเลียมแอนติโมไนด์ (GaSb) ซึ่งอยู่ที่ 0.7 eV [4] ระดับช่องว่างแถบพลังงานที่ต่ำกว่าของเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์นี้สะท้อนถึงระดับพลังงานตั้งต้นที่ต่ำกว่าในการกระตุ้นการทำงานของเซลล์ให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอน นั่นหมายความว่าถ้าต้องการให้พลังงานความร้อนแก่เซลล์ทั้งสองเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์ต้องการพลังงานความร้อนที่ต่ำกว่านั่นเอง โดยพิจารณาได้จากสมการ

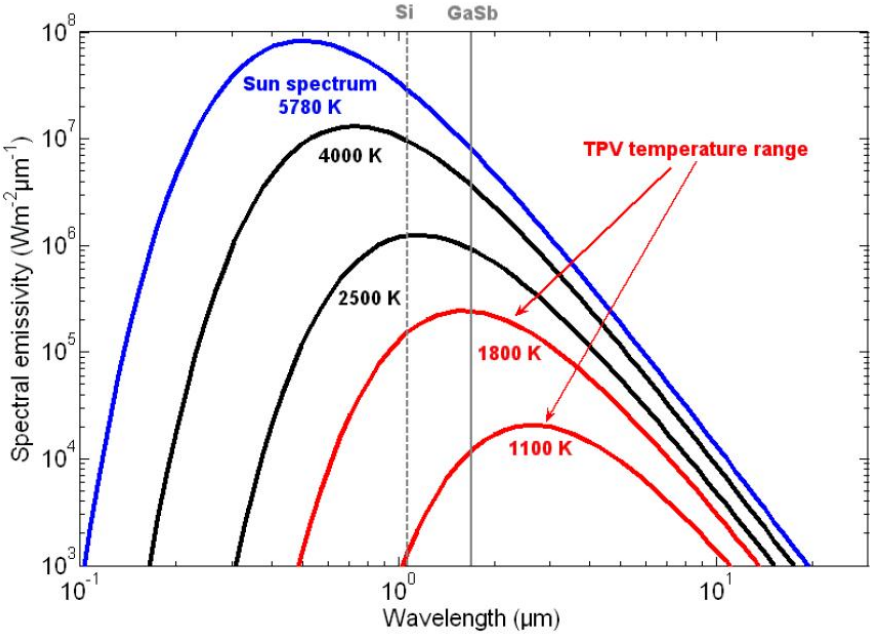
$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

เมื่อ E คือ ค่าพลังงานของโฟตอนในหน่วยอิเล็กตรอนโวลท์ (eV), h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant, h = 4.1356675167x 10^{-15}eV.s), c คือ ความเร็วของแสงในสภาพสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 299, 792, 458 m/s และ λ คือ ความยาวคลื่นรังสี (Wavelength) [5]

จากสมการดังกล่าว เมื่อเราพิจารณาจากค่าช่องว่างแถบพลังงานของเซลล์ทั้งสองชนิด จะพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปที่ทำจากวัสดุกึ่งตัวนำประเภทซิลิกอนจะสามารถตอบสนองได้ดีกับโฟตอนที่ความยาวคลื่นไม่เกิน 1,117 nm และเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์ที่ทำจากวัสดุกึ่งตัวนำประเภทแกลเลี่ยมแอนติโมไนด์จะสามารถตอบสนองได้ดีกับโฟตอนที่ความยาวคลื่นไม่เกิน 1,771 nm จากคุณสมบัติในการตอบสนองต่อความยาวคลื่นของโฟตอนที่ต่างกันนี้ เมื่อพิจารณาถึงแหล่งพลังงานความร้อนตั้งต้นก็ย่อมมีความแตกต่างกันในแง่ของอุณหภูมิ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นรังสีและอุณหภูมิตามกฎการกระจัดของวีน (Wien's Displacement Law) ดังนี้ [5]

$$T = \frac{2.898 \times 10^{-3}\,\text{m} \cdot \text{k}}{\lambda} \quad (2)$$

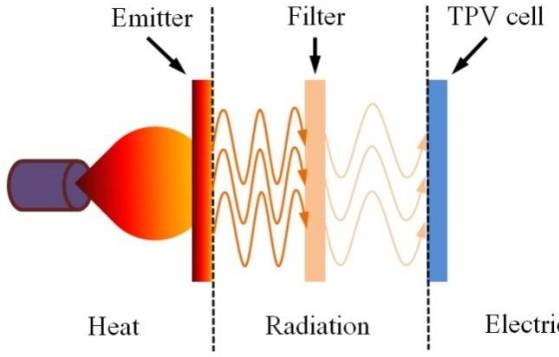
เมื่อ T คือ อุณหภูมิของวัตถุร้อนที่เปล่งรังสีนั้น ดังนั้น เมื่อเราทราบความยาวคลื่นรังสีแล้ว ก็จะสามารถทราบอุณหภูมิของแหล่งความร้อนได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระดับอุณหภูมิ (ภาพที่ 1) ที่ตอบสนองต่อความยาวคลื่นของเซลล์ทั้งสองชนิดแล้วก็จะพบว่าเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์สามารถตอบสนองและให้พลังงานไฟฟ้าได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่านั่นเอง



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ของพลังงานและความยาวคลื่นรังสีความร้อน

ที่มา: Mattarolo, G. (2007). *Development and Modeling of a Thermophotovoltaic System*. Dissertation, Ph.D. (Electrical Engineering and Computer Science). The University of Kassel. [6]

การทำงานของเซลล์นั้นเริ่มจากพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนถูกปลดปล่อยโดยการแผ่รังสีจากตัวเปล่งรังสีไปยังเซลล์เทอร์โมโฟโต้โวลเทซ รังสีความร้อนในความยาวคลื่นที่เหมาะสมจะกระตุ้นให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้ว N ไปยังขั้ว P ของเซลล์อันทำให้ได้กระแสไฟฟ้าขึ้นจากการไหลของอิเล็กตรอน แต่ทั้งนี้ รังสีความร้อนที่แผ่มาจากตัวเปล่งรังสีจะมีทั้งส่วนที่มีความยาวคลื่นแสงที่ตัวเซลล์สามารถดูดกลืนไว้ได้และส่วนที่มีความยาวคลื่นแสงที่เซลล์ไม่สามารถดูดกลืนไว้ได้ โดยเฉพาะในส่วนที่เป็นความยาวคลื่นสั้นซึ่งจะก่อให้ตัวเซลล์เกิดความร้อนสะสมขึ้นมาก อันเป็นผลให้ความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของตัวเซลล์ลดลง ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้ วิธีหนึ่งก็คือการติดตั้งตัวกรองรังสีคั่นไว้ระหว่างตัวเปล่งรังสีและเซลล์ ทั้งนี้เพื่อสะท้อนรังสีความยาวคลื่นสั้นไม่ให้ผ่านไปยังตัวเซลล์ และอีกผลพลอยได้หนึ่งก็คือช่วยให้ตัวเปล่งรังสีรักษาความร้อนไว้ได้ด้วย เนื่องจากรังสีความร้อนคลื่นสั้นที่สะท้อนกลับมาจากตัวกรองรังสีนั้นเอง [7]



ภาพที่ 2 แสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซ

ที่มา: มานนท์ สุขละมัย. (2554). การศึกษาโดยการจำลองสำหรับการกรองรังสีความร้อนโดยวัสดุพรุนขนาดไมโครสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซ. ใน *การประชุมทางวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติครั้งที่ 4*. กรุงเทพฯ. หน้า 30-35.

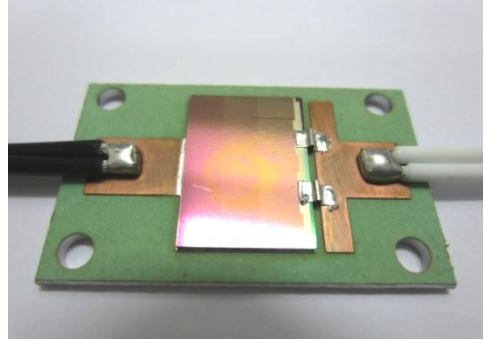
องค์ประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซ

การผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเป็นการเปลี่ยนพลังงานรังสีความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์ผลิตไฟฟ้าที่เรียกว่าเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์ (Thermophotovoltaic Cell) ซึ่งมีการทำงานเช่นเดียวกับเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เพียงแต่สามารถใช้แหล่งพลังงานตั้งต้นที่ต่างไปจากรังสีอาทิตย์ได้ การที่เซลล์เทอร์โมโฟโต้โวลเทซจะทำงานได้จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักๆ ดังต่อไปนี้

- เทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์ (Thermophotovoltaic Cell, TPV Cell)

เป็นวัสดุที่ใช้เปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นการปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้ไหลไปในวงจรไฟฟ้านี้เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่สำคัญ ในยุคแรกๆ ของการพัฒนาจะเน้นไปที่วัสดุประเภทซิลิกอน (Si) อันเนื่องมาจากมีปริมาณวัตถุดิบที่จัดหาได้ง่ายและราคาไม่สูงนัก แต่เนื่องจากช่วงแถบพลังงานของซิลิกอนนั้นไม่เหมาะกับพลังงานความร้อนที่แผ่มาจากแหล่งความร้อนใน

ทางปฏิบัตินัก เพราะแหล่งความร้อนจะต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า 2,000 K จึงจะสามารถให้พลังงานรังสีความร้อนที่เหมาะสมกับแถบพลังงานของซิลิกอนได้ จึงไม่เหมาะสมในเชิงความคุ้มค่าต่อพลังงานความร้อนที่ให้ ดังนั้นวัสดุกึ่งตัวนำอื่นที่มีแถบพลังงานที่ต่ำกว่าซิลิกอนจึงถูกพิจารณาขึ้นมาแทนที่ซึ่งปัจจุบันแกลเลี่ยม แอนติโมไนด์ (Gallium Antimonide, GaSb) และเจอมาเนียม (Germanium, Ge) เป็นวัสดุที่มีความนิยมสูงในการนำมาพัฒนาเป็นเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์ ซึ่งก็เนื่องมาจากวัสดุชนิดดังกล่าวมีเสถียรภาพในการใช้งานที่ดีและมีแถบพลังงานที่เหมาะสมต่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนในการใช้งานจริงนั่นเอง [8-10]

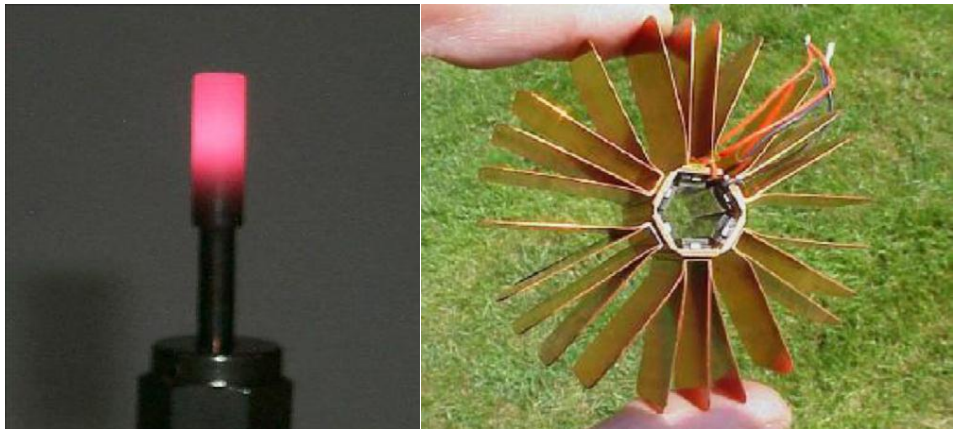


ภาพที่ 3 เทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์ชนิดแกลเลียมแอนติโมไนด์ (Gallium Antimonide, GaSb)

ที่มา: Sooklamai, M.; Karaket, T.; & Duang-Um, T. (2012). Power Generation Potential Study of a Gas-Fired Thermophotovoltaic System. *The 4th KKU International Engineering Conference 2012 (KKU-IENC 2012)*, Khon Kean University. Thailand. *Accepted*.

- แหล่งความร้อน (Heat Source)

การที่เทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์จะทำงานได้นั้นจำเป็นต้องได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อน ซึ่งความร้อนดังกล่าวนี้อาจจะมาจากการเผาไหม้ จากรังสีความร้อนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ จากการรวมความเข้มของแสงอาทิตย์ หรือจากความร้อนทิ้งอุณหภูมิสูงจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้เช่นกัน [11] อย่างไรก็ดีความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงก็ยังคงได้รับความสนใจอยู่อย่างมาก ซึ่งเน้นไปที่ขนาดที่สามารถพกพาได้และพร้อมใช้ในทุกสถานการณ์ [12-13]



ภาพที่ 4 แสดงหัวเผาพร้อมตัวเปล่งรังสีขนาดเล็กสำหรับให้ความร้อนแก่เทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์และเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์พร้อมครีบระบายความร้อนสำหรับใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

ที่มา: Xue, H.; Yang, W.; Chou, S.; Shu, C.; & Li, Z. (2005). Microthermophotovoltaics power system for portable MEMS devices. *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng.* 9: 85–97. (ภาพซ้ายมือ).

ที่มา: Yang, W.; Chou, S.K.; Shu, C.; Xue, H.; & Li, Z. (2004). A prototype microthermophotovoltaic power generator. *Appl. Phys. Lett.* 84: 3864–3866. (ภาพขวามือ).

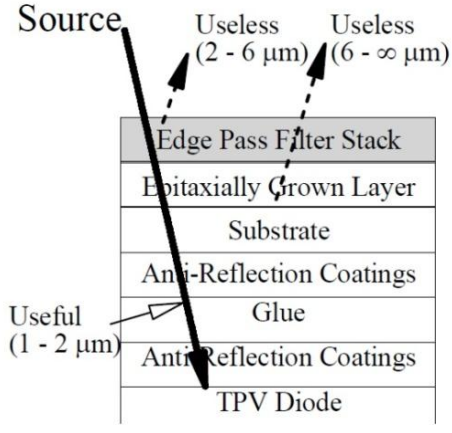
- ตัวเลือกเปล่งรังสี (Selective Emitter)

พลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนจะส่งถ่ายไปยังเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์ในรูปแบบของรังสีความร้อน ดังนั้นส่วนประกอบที่สำคัญอีกชิ้นหนึ่งคือตัวเลือกเปล่งรังสี (Selective Emitter) ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนรูปของพลังงานความร้อนจากเปลวไฟ (Flame) เป็นการเปล่งรังสี (Radiative Emission) ในช่วงความยาวคลื่นรังสีที่เหมาะสมสำหรับเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์ ทั้งนี้จะต้องเป็นวัสดุทนความร้อนสูง วัสดุชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือทังสเตน (Tungsten) อันเนื่องมาจากวัสดุชนิดนี้มีค่าการเปล่งรังสี (Emissivity) ที่สูงในช่วงคลื่นรังสีที่มองเห็นและช่วงคลื่นรังสีใกล้สีแดง (Visible and near IR) นอกจากนี้ วัสดุจำพวกอ๊อกไซด์หายาก (Rear-Earth Oxide) เช่น Ytterbium Oxide (Yb_2O_3) และ Erbium Oxide (Er_2O_3) ก็เป็นวัสดุที่มีความนิยมในการนำมาใช้เป็นวัสดุเปล่งแสงเช่นกัน เนื่องมาจากความสามารถในการเปล่งรังสีที่ดีในช่วงคลื่นรังสีใกล้สีแดง (Near-IR) นั่นเอง อีกเทคโนโลยีหนึ่งสำหรับการพัฒนาตัวเลือกเปล่งรังสีที่ให้ประสิทธิภาพในการเปล่งรังสีความร้อนได้สูงก็คือ การใช้โฟตอนิค คริสตัล (Photonic Crystal) ในการควบคุมการเปล่งรังสีความร้อนในช่วงคลื่นความร้อนที่เหมาะสม [14] แต่อย่างไรก็ตาม การผลิตตัวเปล่งรังสีแบบโฟตอนิค คริสตัลนี้ยังทำได้ยากและใช้เทคโนโลยีในขั้นสูงในการผลิตอยู่ จึงยังไม่สามารถผลิตเป็นสินค้าทั่วไปได้นอกเหนือไปจากนั้น การศึกษาเพื่อพัฒนาตัวเปล่งรังสีโดยพิจารณาออกแบบโครงสร้างให้ละเอียดถึงระดับนาโนเมตรก็มีการนำเสนอออกมาอย่างต่อเนื่องเช่นกัน [15]

- ตัวกรองรังสี (Spectral Filter)

เนื่องจากเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์สามารถตอบสนองต่อคลื่นรังสีความร้อนในช่วงความยาวคลื่นหนึ่งเท่านั้น ซึ่งอยู่ในช่วงแสงสีแดง

(Infrared Wavelength) โดยในรังสีความร้อนในช่วงคลื่นที่สั้นกว่าช่วงคลื่นดังกล่าวไม่ได้ช่วยให้เกิดพลังงานไฟฟ้า แต่กลับกันรังสีความร้อนในช่วงคลื่นสั้นจะทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นที่ตัวเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์และทำให้ความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าลดลงด้วย ดังนั้นเพื่อไม่ให้สูญเสียประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความร้อนสะสมจากรังสีความร้อนคลื่นสั้น การติดตั้งตัวกรองรังสีไว้ระหว่างตัวเปล่งรังสีและตัวเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์เพื่อช่วยกรองรังสีความร้อนคลื่นสั้นจึงเป็นวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวหากปราศจากตัวกรองรังสีนี้แล้ว ประสิทธิภาพสูงสุดเชิงทฤษฎีของเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์ที่ 30% นั้นอาจทำได้เพียง 8% เท่านั้น แต่ในทางกลับกันหากตัวกรองรังสีมีประสิทธิภาพ 80% ก็จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์มีค่าถึง 24% (0.8 × 0.3 = 0.24) [16]



ภาพที่ 5 Tandem Spectral Filter Design สำหรับเซลล์เทอร์โมโฟโต้โวลเทซ

ที่มา: Patrick, M.; Fourspring, D. M.; DePoy, T. D.; Rahmlow, Jr.; Jeanne, E. Lazo-Wasem.; & Edward, J. G. (2004). Optical Coating for Thermophotovoltaic Spectral Control. *Optical Society of America*. 3 Pages. Retrieved February 20, 2012, from http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/824867-U9KI4l/native/824867.pdf

- ตัวสะท้อนรังสี (Reflector)

เนื่องจากตัวเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์ไม่ได้ติดตั้งใกล้ชิดหรือแนบสนิทกับตัวเปล่งรังสี แต่มีระยะที่ห่างกันพอสมควรเพื่อไม่ให้ตัวเซลล์รับความร้อนที่สูงเกินไปอุณหภูมิของตัวเปล่งรังสีที่สูงประมาณ 700-1500°C เมื่อเซลล์และตัวเปล่งรังสีติดตั้งแยกจากกัน การถ่ายเทรังสีความร้อนจากตัวเปล่งรังสีไปยังตัวเซลล์จึงมีส่วนหนึ่งที่จะสูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้น เพื่อลดการสูญเสียพลังงานในส่วนนี้ จึงมีการติดตั้งตัวสะท้อนรังสีเข้าไปกับระบบเพื่อช่วยสะท้อนรังสีความร้อนที่กระจายออกจากทิศทางระหว่างตัวเปล่งรังสีและตัวเซลล์โดยส่วนหนึ่งจะสะท้อนไปยังตัวเซลล์เพื่อผลิตไฟฟ้า ขณะเดียวกันตัวสะท้อนรังสียังช่วยสะท้อนรังสีความร้อนนี้กลับไปยังตัวเปล่งรังสีด้วย ซึ่งจะเป็นการช่วยรักษาอุณหภูมิของตัวเปล่งรังสีให้สูงขึ้นและสามารถรักษาระดับอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ ซึ่งแน่นอนว่าจะส่งผลต่อการประหยัดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ให้ความร้อนแก่ระบบด้วยนั่นเอง

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ (Efficiency Analysis of the System)

เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าเทอร์โมโฟโต้โวลเทซนั้นประกอบไปด้วยหลายองค์ประกอบที่ทำงานร่วมกัน และส่งผลซึ่งกันและกัน ดังนั้น การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของระบบจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ทำงานเกี่ยวเนื่องกันด้วย เช่น ประสิทธิภาพของตัวเปล่งรังสีซึ่งจะประเมินจากความร้อนที่ได้จากการเปล่งรังสีเทียบกับความร้อนของเชื้อเพลิงที่จ่ายให้แก่หัวเผาดังสมการ [6]

$$\eta_{emitter} = \frac{Q_{rad-emitter}}{P_{fuel}} \qquad (3)$$

เมื่อ $Q_{rad-emitter}$ คือ ความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสีของตัวเปล่งรังสี และ P_{fuel} คือ ความร้อนจากเชื้อเพลิงที่จ่ายให้แก่หัวเผา

$$\eta_{optical} = \frac{Q_{rad-cell}}{Q_{rad-emitter}} \qquad (4)$$

เมื่อ $\eta_{optical}$ คือ ประสิทธิภาพเชิงแสงซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ตัวเซลล์ผลิตไฟฟ้าได้รับ $Q_{rad-emitter}$, เทียบกับความร้อนที่ปล่อยมาจากตัวเปล่งรังสี $Q_{rad-cell}$ ซึ่งความร้อนที่สูญเสียตรงส่วนนี้จะเป็นการสูญเสียความร้อนระหว่างการส่งถ่ายความร้อนที่เกิดขึ้นจากทั้งสองส่วนดังกล่าว

$$\eta_{spectral} = \frac{Q_{rad-matching}}{Q_{rad-cell}} \qquad (5)$$

เมื่อ $Q_{rad-matching}$ คือ ประสิทธิภาพเชิงช่วงคลื่นรังสีความร้อนที่เซลล์ผลิตไฟฟ้าสามารถตอบสนองได้ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ตัวเซลล์ผลิตไฟฟ้าสามารถตอบสนองได้ $Q_{rad-matching}$, เทียบกับความร้อนที่ตัวเซลล์ผลิตไฟฟ้าได้รับ $Q_{rad-cell}$ ซึ่งความร้อนที่สูญเสียตรงส่วนนี้จะเกิดจากความร้อนบางส่วนที่แผ่รังสีมายังตัวเซลล์นั้นมีช่วงความยาวคลื่นของรังสีไม่ตรงกับความยาวคลื่นรังสีที่ตัวเซลล์สามารถตอบสนองได้

$$\eta_{PV} = \frac{P_{elec}}{Q_{rad-matching}} \qquad (6)$$

เมื่อ η_{PV} คือ ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังไฟฟ้าที่เซลล์สามารถผลิตได้ P_{elec} เทียบกับความร้อนที่ตัวเซลล์ผลิตไฟฟ้าสามารถตอบสนองได้ $Q_{rad-matching}$ และเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพโดยรวมของระบบจะสามารถพิจารณาได้จากสมการ

$$\eta_{TPV} = \eta_{emitter} \cdot \eta_{optical} \cdot \eta_{spectral} \cdot \eta_{PV} = \frac{P_{elec}}{P_{fuel}} \qquad (7)$$

จะเห็นว่าทุกส่วนมีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบด้วยกันทั้งสิ้น ดังนั้น การพัฒนาในแต่ละส่วนประกอบของระบบเพื่อให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดของระบบนั้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

จุดเด่นและข้อจำกัด (Advantages and Limits of the Thermophotovoltaic System)

เมื่อพิจารณาจุดเด่นที่ทำให้ระบบนี้น่าสนใจจะสามารถสรุปได้คร่าวๆ ดังนี้ [6]

- มั่นคงและเชื่อถือได้องค์ประกอบของระบบไม่มีส่วนใดที่ต้องเคลื่อนที่ในขณะทำงาน ระบบจึงต้องการการบำรุงรักษาที่ต่ำแต่อายุการใช้งานสูงและมีความเชื่อถือได้ในการทำงาน
- ให้กำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ที่สูง ความสามารถของการผลิตกำลังไฟฟ้าที่สูงถึง 1 W/cm^2 ซึ่งมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปถึง 100 เท่า
- สามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย ไม่มีข้อจำกัดด้านเชื้อเพลิง
- เหมาะกับระบบผลิตพลังงานร่วม สำหรับระบบผลิตความร้อนแล้วโดยทั่วไปจะยังคงมี

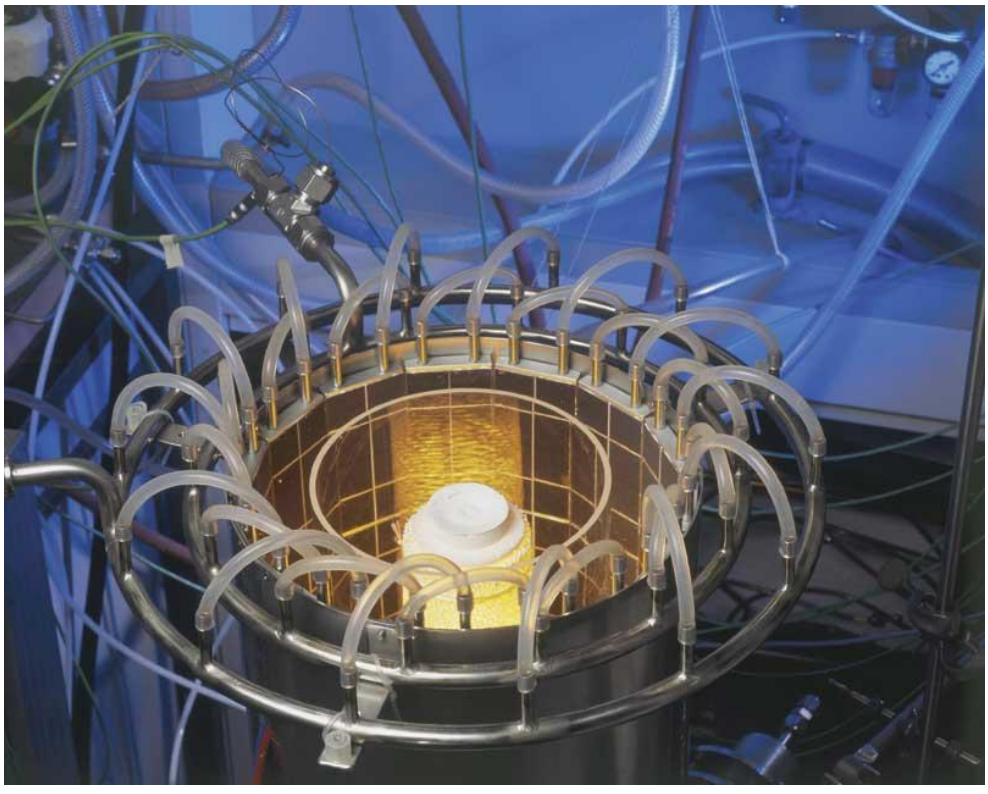
ความร้อนเหลือทิ้งอีกมาก ซึ่งสามารถนำระบบผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซนี้เข้าไปประยุกต์เพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ให้เกิดพลังงานไฟฟ้าได้นั่นเอง

ตารางที่ 1 แสดงจุดเด่นและข้อจำกัดของแต่ละระบบการผลิตไฟฟ้า

ชนิด	จุดเด่น	ข้อจำกัด
เทอร์โมอิเล็กทริก	การบำรุงรักษาต่ำ ทำงานที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ เชื่อถือได้ในการทำงาน	ต้นทุนสูง ประสิทธิภาพไม่สูงนัก
เซลล์เชื้อเพลิง	ประสิทธิภาพสูง ช่วงอุณหภูมิการทำงานที่กว้าง ไม่มีมลภาวะ ให้พลังไฟฟ้าได้สูง	ประเภทเชื้อเพลิงที่จำกัด มีปัญหาเรื่องความเชื่อถือได้ ที่ช่วงอุณหภูมิสูง ต้นทุนสูง
เครื่องยนต์สันดาปภายใน	ประสิทธิภาพสูง มีประสบการณ์ที่ยาวนาน มีความเชื่อถือได้สูง มีความหลากหลาย ทั้งเทคโนโลยีและขนาด	เสียงรบกวนที่สูง มีสมรรถนะที่จำกัดสำหรับ ขนาดกำลังต่ำๆ ต้องการการบำรุงรักษา
เครื่องยนต์สันดาปภายนอก	ประสิทธิภาพสูง เหมาะกับระบบผลิตพลังงานร่วม เสียงรบกวนต่ำ	ต้นทุนสูง ขนาดใหญ่
เทอร์โมโฟโต้โวลเทซ	ปลอดภัยและเชื่อถือได้ ใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย การบำรุงรักษาต่ำ เสียงรบกวนต่ำ	ทำงานที่อุณหภูมิสูง เทคโนโลยีที่ซับซ้อน ประสิทธิภาพไม่สูง ยังอยู่ในขั้นของการพัฒนา

ที่มา: Mattarolo, G. (2007). *Development and Modeling of a Thermophotovoltaic System*. Dissertation, Ph.D. (Electrical Engineering and Computer Science). The University of Kassel.

อย่างไรก็ตาม สำหรับการผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซนี้นอกเหนือจากจุดเด่นนี้ที่เป็นที่น่าสนใจ ตัวระบบเองก็ยังมีข้อจำกัดอยู่เช่นกัน โดยประเด็นหลักนั่นก็คือ ระบบต้องการแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพื่อสร้างรังสีความร้อนในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ (700-1500°C) ซึ่งส่งผลถึงวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบต้องมีความสามารถในการทนต่อความร้อนสูงเช่นกัน



ภาพที่ 6 เครื่องต้นแบบของระบบผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซขนาด 50 W

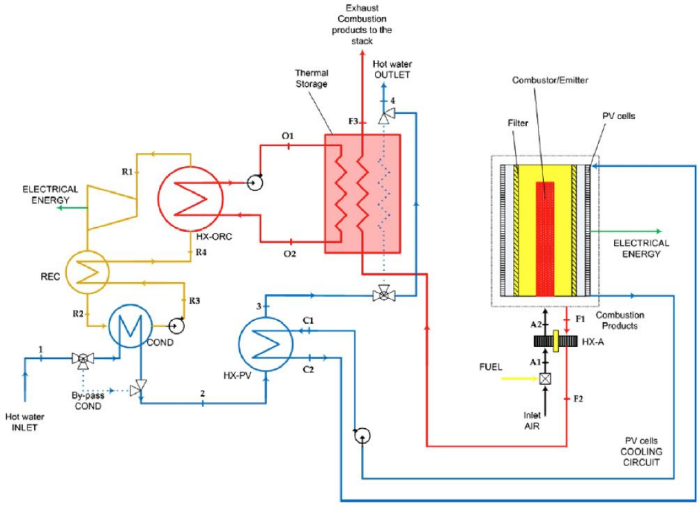
ที่มา: Bitnar, B.; Mayor, J. C.; Durisch, W.; Meyer, A.; Palfinger, G.; Roth, F.; & Sigg H. (2003). Record Electricity-to-Gas Power Efficiency of a Silicon Solar Cell Based TPV System. *Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity. AIP Conference Proceedings*. 653: 18-28.

ตารางที่ 2 ตัวอย่างของระบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซต้นแบบที่ได้มีการศึกษาและประเมินประสิทธิภาพ

TPV system	Design Characteristics	Operating Conditions	Performance
50 W Prototype [17]	Butane fuel, no recuperator, Si cell Yb_2O_3 mantle emitter, Glass with Gold coating mirrors, Tap water cooling (14°C)	$P_{thermal}$ 2 kW $T_{emitter}$ 1735 K T_{cell} 23°C	P_{output} 47.9 W $P_{density}$ 0.1 W/cm^2 η_{burner} 30% η_{TPV} 2.4%
Midnight Sun [18]	Propane fuel, no recuperator, CHP GaSb Cells, SiC emitter, Dielectric filter	$P_{thermal}$ 7.3 kW $T_{emitter}$ 1470 K T_{cell} 75°C	P_{output} 100 W $P_{density}$ 0.4 W/cm^2 η_{TPV} 2.0%
150 W Residential TPV CHP [19, 20]	Propane fuel, Low Nox radiant tube burner, tube-in-tube recuperator, GaSb cells, dielectric filter on a outer quartz glass tube, Inert atmosphere between SiC and glass tube	$P_{thermal}$ 12 kW $T_{emitter}$ 1520 K T_{cell} 50°C	P_{output} 1.5 kW* $P_{density}$ 1 W/cm^2* $\varepsilon_{recuperator}$ 0.75 $\eta_{spectral}$ 75% η_{TPV} 10.8%
5 kW generator tube [21]	Tube placed in a furnace Emitter surrounds cells array GaSb cells, Al_2O_3 tube coated with ARW foil,Dielectric filter	$P_{thermal}$ 200 kW $T_{emitter}$ 1430 K	Whole system not tested $P_{density}$ 0.76 W/cm^2 η_{burner} 75%
Portable Diesel TPV system [22]	Diesel fuel, recuperator, GaSb cells, SiC emitter, infrared FSS band-pass filter, Double wall evacuated quartz tube between emitter and cells, Reflecting gold coating	$P_{thermal}$ 3130 W $T_{emitter}$ 1470 K	P_{output} 185 W $P_{density}$ 0.85 W/cm^2 e recuperator, 0.61 η_{burner} 63% $\eta_{optical}$ 88% η_{TPV} 5.9%
Low Band-gap cell system [23]	Natural gas fuel, partial heat recovering InGaAs cells (0.53 eV), SiC emitter Optical short-pass filter	$P_{thermal}$ 6.9 kW $T_{emitter}$ 1190 K	P_{output} 160 W $P_{density}$ 0.54 W/cm^2 η_{burner} 26% $\eta_{spectral}$ 42% η_{TPV} 2.3%*
Fraunhofer ISE prototype [24]	Metane fuel, partial heat recovering GaSb cells, SiSiC tube coated with tungsten Reflecting titanium shield, inert argon atmosphere	$P_{thermal}$ 1.8 kW $T_{emitter}$ 1470 K T_{cell} 50°C	$P_{density}$ 0.2 W/cm^2 η_{burner} 60% η_{TPV} 1.7%+

การพัฒนาระบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซในปัจจุบัน (Present Developments of Thermophotovoltaic Systems)

ในช่วงหลายปีมานี้ ระบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซได้รับความสนใจและมีการศึกษาในรูปแบบของการจำลองเชิงทฤษฎีเป็นจำนวนมาก แต่มีการสร้างเพื่อทดสอบจริงอย่างเต็มรูปแบบไม่มากนักอย่างไรก็ตาม ความพยายามของนักวิจัยที่จะพัฒนาระบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซให้มีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าก็ยังมีอยู่อย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาให้ตัวระบบเองมีความสามารถในการปรับการทำงานเพื่อให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เหมาะสมกับความต้องการของอุปกรณ์ภายนอก ขณะเดียวกันระบบก็มีการจัดการการใช้พลังงานให้เหลือความร้อนที่ไม่สามารถใช้งานได้น้อยที่สุดด้วย [25] หรือล่าสุด คณะวิจัยจาก 3 สถาบันวิจัยของอิตาลี ได้แก่ The Institute of Materials for Electronics and Magnetism (IMEM), The Engineering Department In Ferrara (ENDIF) และ DIEM-Department of Mechanical Engineering, University of Bologna ได้ศึกษาวิจัยและนำเสนอระบบ Thermophotovoltaic Organic Rankine Cycle Integrated System (TORCIS) ซึ่งเป็นระบบผลิตพลังงานร่วมระหว่างเทอร์โมโฟโต้โวลเทซ (Thermophotovoltaic) และวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle) เพื่อผลิตไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์รับความร้อนจากการเผาไหม้และใช้สารทำงานที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ทั้งหลายเพื่อผลิตไฟฟ้า ความร้อนที่เหลือจะส่งถ่ายไปยังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีสารอินทรีย์ที่มีจุดเดือดต่ำเป็นสารทำงานในการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกลในการขับเคลื่อนเทอร์ไบน์เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อไป ซึ่งจากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของงานวิจัยดังกล่าวพบว่าระบบสามารถให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้สูงถึง 91% และประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่สูงกว่า 6.6% ซึ่งเป็นประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูงทีเดียว แผนภาพของระบบดังกล่าวได้แสดงไว้ดังภาพที่ 7 [26]



ภาพที่ 7 แผนภาพของระบบผลิตพลังงานร่วมระหว่างเทอร์โมโฟโต้โวลเทซและวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

ที่มา: Andrea, D.P.; Claudio, F.; Francesco, M.; Mirko, M.; & Michele, P. (2012). Integration between a thermophotovoltaic generator and an Organic Rankine Cycle. *Applied Energy*. 97: 695-703.

การประยุกต์ใช้เทอร์โมโฟโต้โวลเทซ (Applications of Thermophotovoltaics)

- ระบบผลิตไฟฟ้าแบบไม่ต่อเข้าสายส่ง (Off-Grid Generation System)

สำหรับในชนบทหรือพื้นที่ห่างไกลที่การไฟฟ้าไม่สามารถเดินสายส่งไฟฟ้าไปถึงได้ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือการใช้โซล่าเซลล์นั้นดูจะเป็นวิธีที่เหมาะสมและทำได้ง่ายที่สุด แต่อย่างไรเสียในบางพื้นที่บนพื้นโลกปริมาณแสงอาทิตย์ก็ไม่ได้มีมากหรือเพียงพอในการผลิตไฟฟ้าให้ใช้ได้ในปริมาณที่ต้องการ ดังนั้น การผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีการอื่นๆ จึงมีความจำเป็นต้องใช้ ไม่ว่าจะเป็นการผลิตไฟฟ้าจากพลังน้ำ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม หรือแม้แต่กระทั่งการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ แต่ก็จะพบว่าระบบผลิตไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวไปนี้จะมีขนาดของระบบค่อนข้างใหญ่ ดังนั้น การผลิตไฟฟ้าด้วยระบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีความเป็นไปได้เช่นกัน อันเนื่องมาจากขนาดของระบบที่สามารถปรับได้ตามความต้องการกำลังการผลิต ใช้เชื้อเพลิงเพื่อผลิตความร้อนได้หลากหลายและการบำรุงรักษาที่ต่ำ [27-28]

- ระบบผลิตไฟฟ้าแบบต่อเข้าสายส่ง (Grid-Connected Generation System)

สำหรับการผลิตไฟฟ้าป้อนเข้าสู่สายส่ง ความแน่นอนและความต่อเนื่องของการผลิตเป็นเรื่องสำคัญ ในโรงไฟฟ้าต่างๆ ล้วนจำเป็นต้องมีระบบผลิตไฟฟ้าสำรอง ยิ่งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโซล่าเซลล์ (Solar Farm) ยิ่งต้องการระบบเสริมเพื่อรักษาระดับและความสามารถในการผลิตไฟฟ้า เนื่องจากระดับความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละวันและแต่ละเวลานั้นมนุษย์ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นแล้วระบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซจึงเป็นระบบผลิตไฟฟ้าหนึ่งที่น่าสนใจและเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งที่จะใช้เป็นระบบผลิตไฟฟ้าเสริมในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ [28]

- ระบบผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration System)

ระบบผลิตพลังงานร่วม คือระบบที่สามารถผลิตพลังงานได้สองรูปแบบไปพร้อมๆ กันจากการใช้แหล่งพลังงานเดียวกัน หลักสำคัญของระบบผลิตพลังงานร่วม คือการใช้ประโยชน์จากความร้อนเหลือทิ้งที่เกิดจากการผลิตพลังงานรูปแบบหนึ่งไปใช้เพื่อผลิตพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง เช่น การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนทิ้ง [26, 29] ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการนำความร้อนทิ้งมาผลิตไฟฟ้านั้นสามารถทำได้โดยการนำความร้อนที่เหลือจากกระบวนการผลิตมาต้มน้ำให้เกิดไอน้ำไปขับกังหันของเจนเนอเรเตอร์ผลิตไฟฟ้า อุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์ อุตสาหกรรมผลิตเหล็ก อุตสาหกรรมผลิตแก้ว และอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมเหล่านี้จะใช้อุณหภูมิสูงในกระบวนการผลิต ซึ่งจะมีความร้อนเหลือทิ้งอยู่อีกจำนวนมากจึงยังคงมีความเป็นไปได้ที่จะนำความร้อนทิ้งเหล่านั้นมาเป็นแหล่งพลังงานให้กับระบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเพื่อผลิตไฟฟ้าด้วยอีกทางหนึ่ง เช่น การติดตั้งเซลล์เทอร์โมโฟโต้โวลเทซที่ผนังเตาเผาอุตสาหกรรม เป็นต้น

- ระบบผลิตไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle Generator System)

สำหรับยานยนต์ไฟฟ้ารวมถึงยานยนต์ไฮบริดแล้ว ไฟฟ้าคือพลังงานหนึ่งที่มีสำคัญในการขับเคลื่อน ระบบผลิตไฟฟ้าจึงมีความสำคัญต่อยานยนต์เหล่านี้มาก เพราะหากปราศจากพลังงานไฟฟ้าแล้วยานยนต์เหล่านี้ก็ไม่ต่างอะไรไปจากยานยนต์ทั่วไปที่ต้องอาศัยพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ การพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเหล่านี้จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในเวลานี้ และระบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซก็เป็นระบบหนึ่งที่อยู่ในความสนใจของนักวิจัย เนื่องจากขนาดของระบบที่ไม่ใหญ่โต การทำงานไม่ซับซ้อน ไม่ก่อให้เกิดเสียงรบกวนในการทำงานของระบบ

และที่สำคัญแหล่งพลังงานความร้อนตั้งต้นที่สามารถเลือกใช้ได้หลากหลาย [30]

สรุป

เทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์มีจุดเด่นอยู่ที่สามารถให้กำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ได้สูงเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป สามารถเลือกใช้เชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนแก่ระบบได้หลากหลาย แต่ขณะเดียวกันเนื่องจากเทอร์โมโฟโต้โวลเทซเซลล์ต้องการคลื่นรังสีความร้อนที่มีความยาวเหมาะสมเพื่อกระตุ้นให้เกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งอุณหภูมิของแหล่งความร้อนจะอยู่ในช่วง 700-1,500°C และจุดนี้เองที่เป็นปัญหาด้านการประยุกต์ใช้งานกับแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจะเห็นว่าระบบผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซนั้นจะเหมาะสมกับการเป็นระบบผลิตไฟฟ้าเสริม ระบบผลิตไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ห่างไกลที่สายส่งไม่สามารถเข้าถึง และระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วม (Combined Heat and Power, CHP) ซึ่งจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงขึ้นนั่นเอง

เอกสารอ้างอิง

[1] Nelson, R.E. (2003). TPV Systems and State of the Art Development, *Thermophotovoltaic Generation of Electricity, Fifth Conference, American Inst. Physics Conf. Proc.* 653: 3-17.

[2] Kittl, E. (1974). Unique correlations between blackbody radiation and optimum energy gap for a photovoltaic conversion device, *Conf. Rec. 10th IEEE Photovoltaics Specialists Conf.* pp. 103-106.

[3] Wernsman, B.; Siergiej, R.R.; & Link, S.D. (2004). Greater than 20% radiant heat conversion efficiency of a thermophotovoltaic radiator/module system using reflective spectral control. *IEEE Trans. Electron Devices.* 51(3): 512-515.

[4] Streetman, B. G.; & Sanjay, B. (2000). *Solid State electronic Devices*. 5th ed. New Jersey: Prentice Hall.

[5] Yunus, A. Cengel. (2003). *Heat transfer: A practical approach*. 2nd ed. Boston: McGraw-Hill.

[6] Mattarolo, G. (2007). *Development and Modeling of a Thermophotovoltaic System*. Dissertation, Ph.D. (Electrical Engineering and Computer Science). The University of Kassel.

[7] มานนท์ สุขละมัย. (2554). การศึกษาโดยการจำลองสำหรับการกรองรังสีความร้อนโดยวัสดุพรุนขนาดไมโครสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าแบบเทอร์โมโฟโต้โวลเทซ. ใน *การประชุมทางวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติครั้งที่ 4*. หน้า 30-35. กรุงเทพฯ.

[8] Heide, J.; Posthuma, N.E.; Flamand, G.; Geens, W.; & Poortmans, J. (2008). Development of low-cost thermophotovoltaic cells using germanium substrates. *Proceedings of the 8th world conference on TPV*. Palm Desert CA. USA.

[9] Fraas, L.M.; Avery, J.E.; Sundaram, V.S.; Dinh, V.T.; Davenport, T.M.; & Yerkes, J.W. (1990). Over 35% efficient GaAs/GaSb stacked concentrator cell assemblies for terrestrial applications. *IEEE Conference on Photovoltaic Specialists*. p. 190.

[10] Sooklamai, M.; Karaket, T.; & Duang-Um, T. (2012). Power Generation Potential Study of a Gas-Fired Thermophotovoltaic System. *The 4th KKU International Engineering Conference 2012(KKU-IENC 2012)*, Khon Kean University. Thailand. *Accepted*.

[11] Lindberg, E. (2002). *TPV Optics Studies: On the use of non-imaging optics for improvement of edge filter performance in thermophotovoltaic applications.* Dissertation, Ph.D. Department of Bioenergy, Swedish University of Agricultural Science.

[12] Xue, H.; Yang, W.; Chou, S.; Shu, C.; & Li, Z. (2005). Microthermophotovoltaics power system for portable MEMS devices. *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng*. 9: 85-97.

[13] Yang, W.; Chou, S.K.; Shu, C.; Xue, H.; & Li, Z. (2004). A prototype microthermophotovoltaic power generator. *Appl. Phys. Lett.* 84: 3864–3866.

[14] Lin, S. Y.; Moreno, J.; & Fleming, J. G. (2003). Three-dimensional photonic-crystal emitter for thermal photovoltaic power generation. *Applied Physics Letters*. 83(2): 380-382.

[15] Chen, Y. B.; & Tan, K. H. (2010). The profile optimization of periodic nano-structures forwavelength-selective Thermophotovoltaic emitters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 53: 5542-5551.

[16] Patrick, M.; Fourspring, D. M.; DePoy, T. D.; Rahmlow, Jr.; Jeanne, E. Lazo-Wasem.; & Edward, J. G. (2004). Optical Coating for Thermophotovoltaic Spectral Control. *Optical Society of America*. 3 Pages. Retrieved February 20, 2012, from http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/824867-U9KI4I/native/824867.pdf

[17] Bitnar, B.; Mayor, J. C.; Durisch, W.; Meyer, A.; Palfinger, G.; Roth, F.; & Sigg H. (2003). Record Electricity-to-Gas Power Efficiency of a Silicon Solar Cell Based TPV System. *Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity. AIP Conference Proceedings*. 653: 18-28.

[18] Fraas, L.; Ballantyne, R.; Hui, S.; Ye, S.-Z.; Gregory, S.; Keyes, J.; Avery, J.; Lamson, D.; & Daniels B. (1998). Commercial GaSb cell and circuit development for the midnight sun TPV stove, *AIP Proceedings of the 4th NREL Conference Thermophot. Gen. of Electr.* Denver, pp. 480-487.

[19] Fraas, L.M.; Samaras, J.E.; Huang, H.X.; Minkin, L.M.; Avery, J.E.; Daniels, W.E.; & Hui S. (2001). TPV generators using the radiant tube burner configuration, *17th European PV solar energy conference*. Munich. Germany.

[20] Fraas, L. M.; Avery, J. E.; Malfa, E.; Wuenning, J. G.; Kovacik, G.; & Astle, C. (2003). Thermophotovoltaics for Combined Heat and Power Using Low NOx Gas Fired Radiant Tube Burners, *Fifth Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity. AIP Conference Proceedings*. 653: 61-70.

[21] Fraas, L. M.; Avery, J. E.; Daniels, W. E.; Huang, H. X.; Malfa, E.; Venturino, M.; Testi, G.; Mascalzi, G.; & Wuenning, J. G. (2003). TPV Tube Generators for Apartment Building and Industrial Furnace Applications, *Fifth Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity .AIP Conference Proceedings*. 653: 38-48.

[22] DeBellis, C. L.; Scotto, M. V.; Fraas, L. M.; Samaras, J.; Watson, R. C.; & Scoles, S. W. (1998). Component development for 500 watt diesel fueled portable thermophotovoltaic (TPV) power supply, *AIP Proceedings of the 4th NREL Conference Thermophot. Gen. of Electr*. Denver. pp. 362-370.

[23] Qiu, K.; & Hayden, A. C. S. (2003). Electric Power Generation Using Low Bandgap TPV Cells in a Gas-fired Heating Furnace, *Fifth Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity. AIP Conference Proceedings*. 653: 49-58.

[24] Aicher, T.; Kไstner, P.; Gopinath, A.; Gombert, A.; Bett, A. W.; Schlegl, T.; Hebling, C., & Luther, J. (2004). Development of a NovelTPVPowerGenerator. *Sixth Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity: TPV6. AIP Conference Proceedings*. 738: 71-78.

[25] New Energy and Fuel. (2011). *MITs New Photovoltaic Cell*. Retrieved February 10, 2012, from http://newenergyandfuel.com/http:/newenergyandfuel/com/2011/07/28/a-new-thermal-energy-to-electricity-device/mits-new-thermophotovoltaic-cell

[26] Andrea, D. P.; Claudio, F.; Francesco, M.; Mirko, M.; & Michele, P. (2012). Integration between a thermophotovoltaic generator and an Organic Rankine Cycle. *Applied Energy*. Volume xxx. pp. xxx-xxx (in press).

[27] Fraas, L.; Huang Han Xiang; Samaras, J.; Ballantyne, R.; Williams, D.; Hui, S.; & Ferguson, L.; (1996). Hydrocarbon fired thermophotovoltaic generator prototypes using low bandgap gallium antimonide cells. *Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference.* Washington. DC. USA. pp. 125-128.

[28] Mauk, M.G. (2006). Survey of Thermophotovoltaic (TPV) Devices. *Midinfrared Semiconductor Optoelectronics*. pp. 673-738.

[29] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (ม.ป.ป.). *ระบบผลิตพลังงานร่วม.* สืบค้นเมื่อ 12 มกราคม 2555, จาก http://ee.dede.go.th/knowledge/ContentLevel3.aspx?gt=3&abs=3000000&abs2=3070000

[30] An Alternative to your Alternator. *MIT Technology Review*. (2006, June). Retrieved January 8, 2012, from http://www.technologyreview.com/read_article.aspx?id=16945&ch=nanotech