

การศึกษาเปรียบเทียบเทคโนโลยีความเย็นสำหรับตู้เย็นพลังแสงอาทิตย์ขนาดครัวเรือน

A comparative study of cooling technology for domestic-size solar refrigerator

ไพบุณย์ ศรีภาคาร

Paiboon Sripakagorn

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท วังใหม่ ปทุมวัน กทม 10330

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Phaya Thai Road, Wang Mai, Pathum Wan, Bangkok, Thailand 10330

Tel. +66 (0)-2218-6610 Fax. +66 (0)-2252-2889

Corresponding author: Paiboon.S@Chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้รายงานถึงการศึกษาเปรียบเทียบเทคโนโลยีความเย็นสามแบบคือ ระบบอัดไอ ระบบ thermoelectric และระบบสเตอร์ลิง ถึงศักยภาพต่อการนำมาใช้ในตู้เย็นพลังแสงอาทิตย์ขนาดครัวเรือน การเปรียบเทียบพบว่า สมรรถนะของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนมีผลอย่างสำคัญต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบ ในการทำงานกับแสงอาทิตย์ที่มีการแปรเปลี่ยนไปในระหว่างวัน การปรับภาระความเย็นที่เหมาะสมและการเริ่มทำงานด้วยระดับกำลังที่ต่ำเป็นสิ่งสำคัญ ถึงแม้ระบบอัดไอจะถูกใช้กันอยู่มากที่สุดในครัวเรือน แต่ระบบอัดไอแสดงออกถึงข้อจำกัดในการทำงานกับพลังแสงอาทิตย์ ระบบ thermoelectric ด้วยประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ต่ำ ทำให้ไม่สามารถถูกใช้งานได้อย่างเหมาะสม และพบว่าระบบทำความเย็นแบบสเตอร์ลิงมีความเหมาะสมที่สุดในการใช้งานในตู้เย็นพลังแสงอาทิตย์ ด้วยประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ดีกว่า และความสามารถในการปรับภาระความเย็นให้เหมาะสมได้อย่างโดดเด่นเฉพาะตัว

คำหลัก ตู้เย็นพลังแสงอาทิตย์ ระบบอัดไอ Thermoelectric สเตอร์ลิง

Abstract

This article reports a comparative study of 3 refrigeration technology viable for use in domestic-size solar refrigerator namely vapor-compression, thermoelectric, and Stirling refrigerator. The steady-state performance in terms of the coefficient of performance is compared where the strong influence of the performance of heat exchangers is revealed. Due to the uneven nature of solar insolation, transient performance during start-up and the optimum cooling load modulation are also determining factors. Despite the prevalent use of vapor-compression devices in domestic systems, limitations are revealed in terms of transient performance and system autonomy.

Thermoelectric system, hindered by its inherent low efficiency, can not make up with its mechanical simplicity and controllability to be a viable choice in autonomous solar refrigerator. With its superior thermal performance and unique capability for cooling load modulations, Stirling refrigerator stands out as a credible choice for the use in solar refrigerator.

Keywords: solar refrigerator, vapor compression, Thermoelectric, Stirling

1. บทนำ

การทำความเย็นเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญในการยกระดับการดำรงชีวิตในยุคปัจจุบัน โดยในมุมมองของการใช้พลังงานแล้ว การทำความเย็นเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญต่อการใช้พลังงานเป็นอย่างมาก นอกเหนือจากความสะดวกสบายจากการใช้เครื่องปรับอากาศแล้ว การทำความเย็นจากตู้เย็นยังมีความสำคัญสำหรับการเก็บรักษาอาหาร รวมทั้งยาโรค ในส่วนนี้ ยังมีพื้นที่ที่ไฟฟ้ายังเข้าไม่ถึงอีกมากในบริเวณห่างไกลจากตัวเมือง ระหว่างปี พ.ศ.2547-2548 รัฐบาลไทยได้ทำการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อขยายการมีไฟฟ้าใช้ให้แก่พื้นที่ห่างไกลจากสายส่งที่ขนาด 120 วัตต์ต่อหลังคาเรือน ด้วยงบประมาณกว่า 7900 ล้านบาท บทความนี้จะวิเคราะห์ว่าเทคโนโลยีใดเหมาะที่จะเป็นทางเลือกสำหรับการทำความเย็นด้วยไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์

2. ทางเลือกของเทคโนโลยีการทำความเย็น

เทคโนโลยีที่จะพิจารณาประกอบด้วย ระบบอัดไอ (Vapor compression system) ระบบ Thermoelectric และระบบสเตอร์ลิง (Stirling cooler) ในการจำกัดอยู่ที่เทคโนโลยีทั้งสามนี้ ก็ด้วยการจำกัดอยู่ที่ระบบที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า (จากแผงโซลาร์เซลล์) และมีความพร้อมเชิงเทคโนโลยีและระดับของสมรรถนะในการเข้าสู่การใช้งานจริงได้ สำหรับการศึกษเปรียบเทียบอุปกรณ์ทำความเย็นทั้งสามนี้ ได้รับ

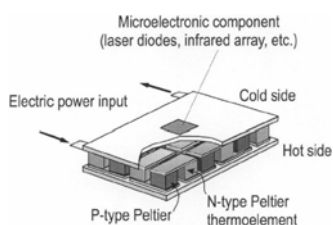
การศึกษามาก่อนในหลายรูปแบบด้วยกัน [1-4] แต่สิ่งที่ไม่ได้ระบุถึงในการศึกษาเหล่านี้ คือการบ่งชี้สมรรถนะจากข้อมูลของระบบจริง และการวิเคราะห์หาข้อบ่งชี้ถึงศักยภาพและข้อจำกัดที่นำมาสู่ระดับของสมรรถนะที่แสดงถึงนั้นๆ ในหัวข้อต่อไป จะได้กล่าวถึงพื้นฐานของเทคโนโลยีการทำความเย็นทั้งสาม เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบต่อไป

3. พื้นฐานของเทคโนโลยีการทำความเย็น

3.1 ระบบอัดไอ (Vapor compression system)

ระบบอัดไอใช้การเปลี่ยนสถานะของสารทำงานในการแลกเปลี่ยนความร้อนด้านเย็นและด้านร้อนกับช่องเย็นและบรรยากาศตามลำดับ [5] ระบบอัดไอเป็นระบบที่ทราบกันดีว่ามีประสิทธิภาพได้สูงและทนทาน โดยมีค่า COP (Coefficient of performance) ที่ประมาณ 2-3 สำหรับการทำงานในตู้เย็น ในอีกด้านหนึ่ง อาจมองได้ว่าด้วยความที่เป็นเทคโนโลยีเก่า ระบบอัดไอก็ได้มาถึงขีดจำกัดของประสิทธิภาพของเทคโนโลยีแล้ว เป็นการยากที่จะปรับปรุงสมรรถนะขึ้นไปได้อีก

3.2 ระบบ Thermoelectric

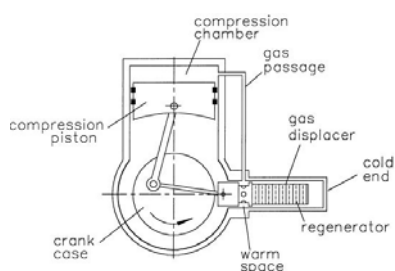


รูปที่ 1 ส่วนประกอบของระบบ Thermoelectric (ตัดตอนมาจาก [6])

ระบบ Thermoelectric มีพื้นฐานมาจากปรากฏการณ์ Peltier โดยเมื่อมีไฟฟ้ากระแสตรงวิ่งผ่านวงจรที่เกิดจากการนำวัสดุกึ่งตัวนำที่แตกต่างกันสองชนิดมาต่อกัน จะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นที่จุดต่อ ยังผลให้เกิดการส่งถ่ายความร้อนจากปลายด้านเย็นไปสู่ปลายด้านร้อน เกิดภาวะความเย็นขึ้นได้ รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของระบบ Thermoelectric โดยคู่ของวัสดุกึ่งตัวนำ จะถูกต่อกันอยู่ด้วยแถบทองแดง และถูกประกบทั้งสองด้านด้วยแผ่นฉนวนเซรามิก

ถึงแม้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ต่ำจะเป็นสิ่งที่ทราบกัน แต่ระบบ Thermoelectric ก็ถูกนำไปใช้งานในเตาทำความเย็นขนาดเล็กอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากในระดับกำลังไฟฟ้ระดับนี้ ความไม่มีประสิทธิภาพไม่มีผลมากนักเกี่ยวกับการใช้งานได้ ความทนทาน ระดับเสียงรบกวนที่ต่ำมาก และขนาดอันกะทัดรัด

3.3 ระบบสเตอร์ลิง (Stirling cooler)



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของระบบสเตอร์ลิง (ตัดตอนมาจาก [7])

ระบบสเตอร์ลิงทำงานบนพื้นฐานของวัฏจักรสเตอร์ลิง [8] (รูปที่ 2) โดยแก๊สฮีเลียมจะถูกส่งถ่ายไปมาระหว่างปริมาตรสองส่วนซึ่งต่อกันด้วยอุปกรณ์เก็บกักความร้อนที่เรียกว่า regenerator ในปริมาตรหนึ่ง สารทำงานจะถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอก ในขณะที่ในอีกปริมาตรหนึ่ง สารทำงานจะดูดความร้อนเข้า ให้ภาวะความเย็นที่ต้องการ ความสามารถในการทำความเย็นของอุปกรณ์สเตอร์ลิงเป็นที่ทราบกันมานานมากแล้ว แต่การพัฒนาเพื่อใช้งานเพิ่งจะเริ่มขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1990 ด้วยการริเริ่มของบริษัท General Electric ที่ต้องการเทคโนโลยีเพื่อทดแทนระบบอัดไอในตู้เย็นเนื่องจากปัญหาของสาร CFC ถึงแม้ว่า General Electric จะละทิ้งเทคโนโลยีไปเมื่อมีการค้นพบ R134a แต่อย่างไรก็ดี การศึกษาต่อมาได้ก็บ่งชี้ถึงศักยภาพของระบบสเตอร์ลิงที่จะมีค่า COP ได้สูงเทียบได้หรือดีกว่าระบบอัดไอ โดยเฉพาะที่ภาวะความเย็นต่ำ [9,10]

4. การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการทำความเย็น

4.1 ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของอุปกรณ์ทำความเย็น

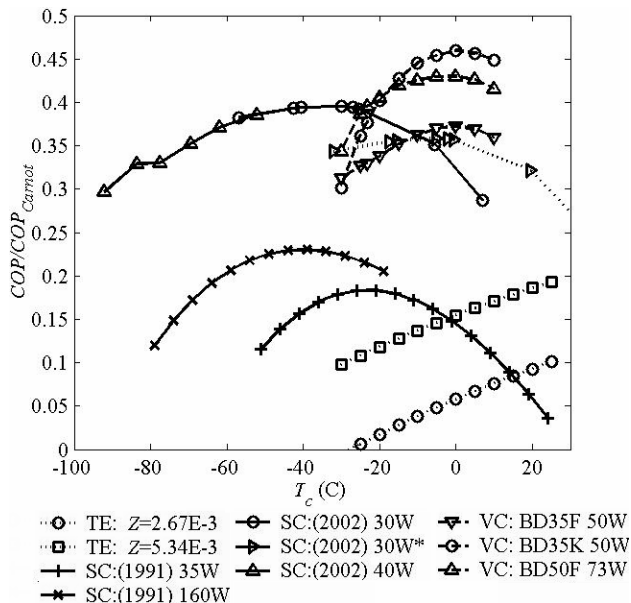
ในส่วนนี้ ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของอุปกรณ์ทำความเย็นจะถูกเปรียบเทียบในรูปแบบของค่า COP โดยเป็นการพิจารณาเน้นเฉพาะที่อุปกรณ์ทำความเย็น โดยไม่นำอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนเข้ามามีผล (ระบบทำความเย็น=อุปกรณ์ทำความเย็น+อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน) รูปที่ 3 แสดงถึงค่าสัดส่วนของ COP ของอุปกรณ์ทำความเย็นทั้งสามเทียบกับค่า COP แบบคาร์โนต์ โดยมีนิยามว่า

$$COP_{Carnot} = T_c / (T_h - T_c) \quad (1)$$

โดยกำหนดให้อุณหภูมิของอุปกรณ์ด้านร้อน T_h มีค่าคงที่อยู่ที่ 55 °C และค่าสัดส่วนของ COP ที่อุณหภูมิด้านเย็น T_c ค่าต่างๆ โดยสำหรับระบบอัดไอ รูปที่ 3 แสดงถึงค่า COP จากตัวอย่างเครื่องอัดไอที่ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อการใช้งานในตู้เย็นแสงอาทิตย์ คือ Danfoss BD35F (ใช้ R134a) BD35K (ใช้ R600a) และ BD50F (รุ่นที่ใหญ่ขึ้นมาจาก BD35F) โดยจะเห็นว่าถึงแม้จะมีค่าสัดส่วน COP ต่างกันไปบ้าง แต่ทั้งสามรุ่นต่างก็มีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับอุณหภูมิด้านเย็นในทิศทางเดียวกัน คือมีการลดลงของค่า COP อย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิด้านเย็นลดต่ำลงใกล้ -30 °C ซึ่งเป็นข้อจำกัดของระบบอัดไอโดยปกติ

สำหรับอุปกรณ์สเตอร์ลิงนั้น ได้แสดงค่าสัดส่วน COP จากสองชุดอุปกรณ์ โดยชุดแรกคือ (1991) ในรูปที่ 3 เป็นข้อมูลจากตัวต้นแบบของบริษัท Sunpower [11] ซึ่งถือเป็นช่วงต้นของการพัฒนาอุปกรณ์สเตอร์ลิง ในขณะที่ชุดที่สองคือ (2002) แสดงถึงสมรรถนะของอุปกรณ์ที่ทำการการค้า รุ่น M100B ของบริษัท Global cooling [12] ซึ่งแสดงให้เห็นว่า จากช่วงปี ค.ศ. 1990 มาถึงปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์สเตอร์ลิงซึ่งมีพื้นฐานมาจากการทำความเย็นระดับเยือกแข็งให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและทำงานได้ดีขึ้นที่ระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น และในระดับอุณหภูมิของตู้เย็นและช่องแช่แข็ง (ประมาณ -25 °C) อุปกรณ์สเตอร์ลิงสามารถมีสมรรถนะเทียบเคียงได้กับระบบอัดไอ รวมทั้ง ยังสามารถทำงานได้ที่ระดับของประสิทธิภาพที่สูงในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าระบบอัดไออย่างชัดเจน หมายเหตุในที่นี้ว่าในข้อมูลทั้งสองชุดอุณหภูมิด้านร้อนของอุปกรณ์สเตอร์ลิงจะอยู่ที่ 30 °C ซึ่งต่างไปจากอุปกรณ์อื่นในรูปที่ 3 แต่ด้วยลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์สเตอร์ลิงที่ค่า

COP แทบจะไม่แปรผันกับค่าอุณหภูมิ หากคงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและเย็นเอาไว้ [13] เพื่อเป็นการเปรียบเทียบ จึงได้ทำการปรับเลื่อนค่าอุณหภูมิด้านเย็นจากข้อมูลของเครื่อง M100B ที่ 30 วัตต์ความเย็น โดยคงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและเย็นเอาไว้ ได้เป็นเส้นกราฟ 30W* ในรูปที่ 4 ซึ่งก็แสดงว่าค่าสัดส่วน COP มีแนวโน้มเดิมแต่ลดระดับลงไปเล็กน้อย



รูปที่ 3 อัตราส่วนของค่า COP ต่อค่า COP แบบคาร์โนต์เทียบกับอุณหภูมิด้านเย็นของอุปกรณ์ทำความเย็น ค่าวัดที่ห้ายข้อมูลบอกถึงขนาดภาระความเย็นที่สภาวะ ASHRAE (54.4°C/23.3°C) (อุณหภูมิด้านร้อนอยู่ที่ 55 °C ยกเว้นอุปกรณ์สเตอร์ลิงอยู่ที่ 30 °C)

สำหรับในรูปที่ 3 สมรรถนะของอุปกรณ์ Thermoelectric จะถูกประมาณด้วยชุดสมการในภาคผนวก ก ที่สภาวะเหมาะสมที่สุด (optimum condition) สำหรับค่า COP ที่อุณหภูมิด้านเย็นหนึ่งๆ ผลในรูปที่ 3 บ่งชี้ว่าค่าสัดส่วน COP ของอุปกรณ์ Thermoelectric มีค่าต่ำกว่าอุปกรณ์ทั้งสองข้างต้นอยู่มาก แม้แต่ในกรณีที่ค่า figure of merit (Z) ที่สูงเป็นสองเท่าจากปัจจุบันก็ยังไม่สามารถเทียบเคียงได้

4.2 ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบทำความเย็น

จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 3 จำเป็นจะต้องตระหนักว่าถึงแม้ว่าอุปกรณ์ทำความเย็นจะมีประสิทธิภาพเท่าใด แต่หากไม่สามารถนำความร้อนเข้ามาที่ด้านเย็นและออกไปที่ด้านร้อนได้ดี ระบบทำความเย็นก็ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลกระทบของสมรรถนะของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนต่อประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นจะถูกเปรียบเทียบในหัวข้อนี้ เนื่องจากระบบอัดไอเป็นเทคโนโลยีที่เติบโตเต็มที่แล้ว และโดยระบบเองมีอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน คือ condenser และ evaporator ที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในที่นี้จึงจะพิจารณาเฉพาะสำหรับระบบสเตอร์ลิงและระบบ Thermoelectric ซึ่งมีลักษณะรูปร่างที่คล้ายกัน คือมีขนาดเล็กกว่า และมีพื้นที่จำกัดในการติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน

สถานการณ์ของการวิเคราะห์อยู่ในรูปที่ 4 นั่นคือในสภาวะคงตัวขณะที่อุปกรณ์ทำความเย็น (ชุด Peltier ในกรณีนี้) เห็นความแตกต่าง

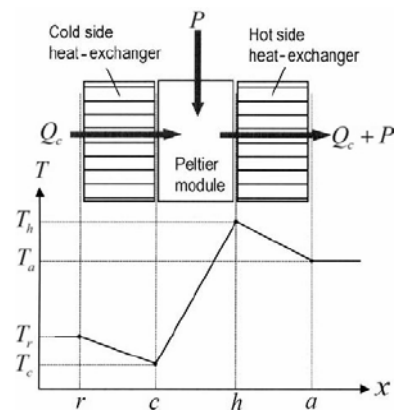
ของอุณหภูมิที่ $T_h - T_c$ การนำความร้อนจากช่องแช่เย็นเข้าสู่อุปกรณ์ทำความเย็นต้องการอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนด้านเย็น ซึ่งทำงานกับความแตกต่างของอุณหภูมิ $T_r - T_c$ เช่นเดียวกัน ในด้านร้อน อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนด้านร้อนก็ทำงานกับความแตกต่างของอุณหภูมิ $T_h - T_o$ ดังนั้นระบบทำความเย็นจะเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ที่ $T_o - T_r$ ดังนั้น หากพิจารณาให้ค่าการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนด้านเย็นและด้านร้อนเป็น K_c และ K_h (W/K) ตามลำดับ อัตราการทำความเย็นและการถ่ายความร้อนออกจะเป็น

$$Q_c = K_c (T_r - T_c) \quad (2)$$

$$Q_h = K_h (T_h - T_o) \quad (3)$$

โดยที่กำลังขาเข้าอุปกรณ์ทำความเย็น P หาได้จาก

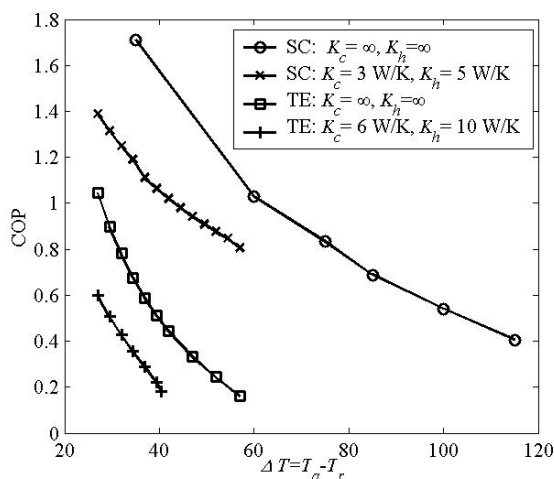
$$Q_h = Q_c + P \quad (4)$$



รูปที่ 4 แผนภาพในอุดมคติของตำแหน่งอุณหภูมิและการส่งถ่ายความร้อนผ่านระบบทำความเย็น (ดัดแปลงมาจาก [14])

สำหรับรูปที่ 5 พิจารณาสถานการณ์ที่ระบบทำความเย็นกำลังทำงานที่อัตราการขับความร้อน Q_c เท่ากับ 25 วัตต์ ที่อุณหภูมิของบรรยากาศ T_o ที่ 32 °C และกำหนดให้อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนด้านเย็นมีค่า K_c ที่ 3 W/K และด้านร้อนมีค่า K_h ที่ 5 W/K [13] (สอดคล้องกับช่วงของค่าการนำพาความร้อนในกรณีของเครื่องระบายความร้อนพร้อมพัดลมซึ่งจะอยู่ในช่วง 2-50 W/K) จากสมการทั้งสามข้างต้น ด้วยตัวแปรจำนวน 4 ตัวคือ T_c, T_h, Q_h และ P ข้อมูลอีกหนึ่งชุดที่เชื่อมระหว่างชุดของตัวแปรดังกล่าวก็จะนำไปสู่การประเมินสมรรถนะของระบบทำความเย็นได้ สำหรับระบบสเตอร์ลิง Kwon และ Berchowitz[13] ให้ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_h - T_c$ และกำลังขาเข้าอันเป็นผลจากการทดลองกับระบบสเตอร์ลิงรุ่น TB40 ขนาด 40 วัตต์ความเย็น (สภาวะ ASHRAE) ของบริษัท Twinbird ส่วนสำหรับระบบ Thermoelectric สามารถใช้ชุดของสมการในภาคผนวก ก ที่สภาวะเหมาะสมที่สุดสำหรับค่า COP เช่นเดียวกับในรูปที่ 3 ดังนั้น ก็จะได้ผลของค่า COP ที่อุณหภูมิของช่องแช่เย็น T_r ต่างๆกันดังรูปที่ 5

สำหรับในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าที่ช่วงระหว่าง $T_r = -25$ ถึง 5 °C ซึ่งสะท้อนการทำงานในช่องแช่แข็งถึงตู้เย็น การมีอยู่ของอุปกรณ์ถ่ายเท



รูปที่ 5 ค่า COP ของอุปกรณ์ ($K_c = \infty, K_h = \infty$) เทียบกับของระบบทำความเย็น ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิต่างๆ สำหรับระบบสเตอร์ลิง (SC) และระบบ Thermoelectric (TE) ภาระความร้อนอยู่ที่ 25 วัตต์ และอุณหภูมิบรรยากาศอยู่ที่ 32 °C

ความร้อน (ด้วยค่า K_c และ K_h ที่กำหนด) ทำให้ค่า COP ของระบบลดลงต่ำกว่าค่าของอุปกรณ์ประมาณ 30% การลดลงมีแนวโน้มที่ลดลงกับ ΔT ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนมีผลต่อระบบสเตอร์ลิงน้อยลงที่ ΔT ที่เพิ่มขึ้น จากนั้น สำหรับระบบ Thermoelectric จากการคำนวณได้พบว่าเมื่อใช้ค่า K_c และ K_h ที่กำหนดข้างต้น ระบบ Thermoelectric จะไม่สามารถทำงานส่งถ่ายความร้อนที่อัตรา 25 วัตต์ที่กำหนดได้ ต่อเมื่อเพิ่มค่า K_c และ K_h เป็นสองเท่า (ดังรูปที่ 5) ระบบจึงสามารถทำงานได้ แต่ก็ทำงานได้ในช่วง $T_r = -8.5$ ถึง 5 °C เท่านั้น ทั้งนี้ก็เนื่องด้วยค่า COP ของอุปกรณ์เอง (ข้อมูลคำนวณที่สภาวะดีที่สุดสำหรับค่า COP แล้ว) ที่ต่ำกว่าระบบสเตอร์ลิงอยู่มาก โดยยกตัวอย่างที่ 5 °C ระบบสเตอร์ลิงต้องการเพียง 18 วัตต์ในการส่งถ่ายความร้อน 25 วัตต์ แต่ระบบ Thermoelectric ต้องการถึง 42 วัตต์ ดังนั้นหากอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนด้านร้อนไม่สามารถถ่ายค่าความร้อนที่รวมไว้ด้วยการทำความเย็นและกำลังไฟฟ้าได้ดี ก็จะมีผลเป็นความแตกต่างของอุณหภูมิ $T_h - T_c$ ที่สูงเกินที่ระบบจะทำงานได้ นอกจากนั้นแล้ว ค่าความชันของค่า COP ต่อความแตกต่างของอุณหภูมิที่มีค่าสูงกว่าของระบบ Thermoelectric เมื่อเปรียบเทียบกับระบบสเตอร์ลิงก็บ่งชี้ว่าสมรรถนะของระบบขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่มาก

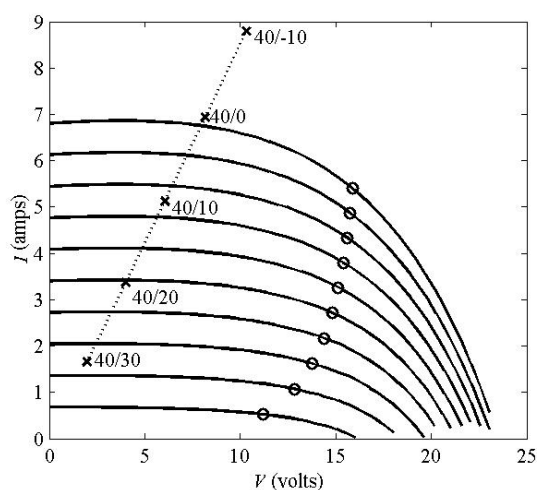
4.3 ความสามารถในการปรับภาระการทำความเย็น

ถึงแม้ว่าระบบอัตโนมัติจะแสดงถึงสมรรถนะในการทำความเย็นที่สูง (รูปที่ 3) แต่เมื่อถูกนำมาใช้กับพลังงานแสงอาทิตย์ ปัญหาหลักสองปัญหาที่เกิดขึ้นคือ หนึ่ง ด้วยการมีอยู่อย่างจำกัดของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงโซลาร์เซลล์ ทำอย่างไรจึงจะปรับภาระการทำความเย็นให้ทำงานได้ตั้งแต่ขณะมีแสงอาทิตย์น้อยในช่วงเช้าและเย็น และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในช่วงเที่ยง สองคือด้วยความเป็นไปได้ของการมีเมฆเข้าบดบัง หากไม่มีชุดแบตเตอรี่เข้า

สำรองไฟฟ้า ระบบจะหยุดทำงานลง และสำหรับระบบอัตโนมัติที่ใช้ในครัวเรือนปกติ การเริ่มทำงานจะต้องการกำลังขับเริ่มต้นที่สูงกว่ากำลังเดินเครื่องปกติมาก [15] ซึ่งมีผลต่อระบบช่วยเหลือเช่นระบบแบตเตอรี่สำรอง หรือขนาดของแผงโซลาร์เซลล์ที่จำเป็นจะต้องใหญ่ขึ้น

เพื่อแก้ปัญหาทั้งสอง วิธีหนึ่งในการปรับภาระการทำความเย็นได้แก่การปรับความเร็วของเครื่องอัดไอ ซึ่งอาจทำได้ด้วยการใช้ inverter กับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ หรือด้วยการใช้มอเตอร์กระแสตรงให้ทำงานกับไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มาจากแผงโซลาร์เซลล์ แต่อย่างไรก็ดีวิธีนี้มีข้อจำกัด อยู่ในช่วงของการปรับภาระความเย็นที่เป็นไปได้ ตัวอย่างเช่นเครื่องอัดไอของ Danfoss รุ่น BD35F จะปรับความเร็วได้ตั้งแต่ 2000-3500 รอบต่อนาทีซึ่งหมายถึงการปรับภาระความเย็นได้ระหว่าง 33-50 วัตต์เท่านั้น สำหรับปัญหาของกระแสที่สูงขณะระบบเริ่มทำงาน Kattakayam และ Srinivasan[16] ทำให้มีการหน่วงเวลาหลังจากการดับเครื่องและก่อนเดินเครื่องใหม่ ทั้งนี้เพื่อให้ความดันระหว่างด้านดูดและด้านจ่ายของระบบได้มีการเข้าสู่สมดุลย์และลดระดับกำลังไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อการเริ่มทำงาน นอกจากนั้น ยังอาจติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อชดเชยระดับกระแสที่จำเป็นต่อการเริ่มทำงานพร้อมการปรับตำแหน่งของลูกสูบเพื่อการเริ่มทำงานอย่างง่ายขึ้น ซึ่งสำหรับ Danfoss รุ่น BD35F ได้ถูกแสดงว่าระดับกระแสขณะเริ่มทำงานมีค่าเพียงเท่าเทียมกันกับระดับกระแสขณะทำงานอย่างสม่ำเสมอ

สำหรับปัญหาของกระแสขณะเริ่มทำงาน ด้วยความเป็นระบบทางไฟฟ้า ระบบ Thermoelectric จึงไม่มีปัญหา แต่สำหรับการปรับภาระความเย็นที่ระดับการส่องสว่างที่เปลี่ยนไปนั้น ระบบ Thermoelectric ค่อนข้างจะมีปัญหามาก ทั้งนี้เนื่องจากกลไกของการทำความเย็นมีกลไกของการทำความร้อนผ่านค่ากระแสในเทอมของ $I^2 R$ อยู่ นั่นคือความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้า (สมการ ก3 ภาคผนวก ก) โดยหลักจะอยู่ในรูปแบบของความต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 6 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันจากแผงโซลาร์เซลล์ (เส้นที่บดจากบนลงล่างที่ระดับการส่องสว่าง 100-10%) พร้อมแนวของตำแหน่ง maximum power point (MPP, วงกลม) จุดทำงานของอุปกรณ์ Thermoelectric ถูกแสดงด้วยเส้นประพร้อมกากบาท แสดงค่าอุณหภูมิด้านร้อน/ด้านเย็น (°C)

ในรูปที่ 6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันจากแผงโซลาร์เซลล์ตัวอย่าง (ตารางที่ 1) ซึ่งให้แรงดันสูงสุด 23.5 โวลต์ที่ กำลังสูงสุด 92 วัตต์ จากรูปที่ 6 จะพบว่าจากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันจากแผงโซลาร์เซลล์ (ใช้แบบจำลองของ Akbaba[17]) จะมีตำแหน่งการทำงานที่ให้กำลังสูงสุดอยู่ ซึ่งเรียกว่า maximum power point (MPP) แต่การทำงานของระบบ Thermoelectric หากทำการคำนวณกับตัวอย่างของอุปกรณ์รุ่นสมรรถนะสูง UT15-12-40-F2 ของ Melcor ในสภาวะเหมาะสมที่สุดสำหรับค่า COP ที่ผลต่างของอุณหภูมิต่างๆ (เส้นประ) จะไม่สามารถวิ่งตามแนวตำแหน่ง MPP นี้ได้อย่างใด ทำให้เป็นไปได้ที่ในเวลาของวันที่มีกำลังมากที่สุด ระบบ Thermoelectric จะทำงานที่ประสิทธิภาพต่ำ [18] ดังนั้นจึงเป็นไปได้ยากที่ระบบ Thermoelectric จะสามารถเก็บรวบรวมพลังงานของแสงอาทิตย์ในระหว่างวันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 ลักษณะเฉพาะของแผงโซลาร์เซลล์ตัวอย่าง

ลักษณะเฉพาะของเซลล์เดี่ยว [17]			
Array constant	Light-generated current	Reverse saturation current	Series resistance
G (1/V)	I_{ph} (A)	I_o (A)	R (Ω)
13.7	0.756	0.5e-3	0.05
ลักษณะเฉพาะของแผงโซลาร์เซลล์			
number of parallel strings		number of cell per string	
9		44	

ถึงแม้ความพยายามในการตอบสนองตำแหน่ง MPP ข้างต้นทำได้ในระดับหนึ่งผ่านระบบอัตโนมัติที่ใช้เครื่องอัตโนมัติที่ปรับความเร็วรอบได้ แต่สำหรับระบบสเตอร์ลิงแบบลูกสูบอิสระแล้ว สามารถปรับภาระการทำงานได้จากการปรับช่วงชักของลูกสูบ ซึ่งช่วงชักนี้จะแปรผันตรงโดยประมาณกับแรงดันไฟฟ้า และด้วยลักษณะเฉพาะของระบบสเตอร์ลิงที่พบว่าค่า COP มีค่าที่ค่อนข้างคงที่ ไม่ขึ้นกับภาระความเย็นมากนักสำหรับอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นหนึ่งๆ กำลังขับระบบสเตอร์ลิงจึงเกือบจะขึ้นโดยตรงกับภาระความเย็น ชุดควบคุมจึงสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ให้ส่งมาได้อย่างเต็มที่ไม่ขึ้นกับระดับการส่องสว่างมากนัก [2] นั่นคือความดันและกระแสสามารถถูกกำหนดแยกเฉพาะจากกัน(เช่นผ่าน DC-DC converter)เพื่อใช้กำลังไฟฟ้าที่มีให้อย่างคุ้มค่าที่สุด โดยพบว่าแม้ที่ระดับการส่องสว่างต่ำ ด้วยกำลังไฟฟ้าเพียง 5 วัตต์ ระบบสเตอร์ลิงก็สามารถทำความเย็นได้ [19] และสำหรับระบบสเตอร์ลิง ด้วยการใช้มอเตอร์เชิงเส้นพร้อมกับกลไกแบบลูกสูบอิสระ ก็ทำให้มีกระแสเริ่มทำงานที่ต่ำมาก เช่นสำหรับรุ่น TB40 สามารถปรับภาระความเย็นได้ตั้งแต่ 8-50 วัตต์ ด้วยกระแสเริ่มต้นทำงานเพียง 0.05 แอมป์ [13]

5. สรุป

ในการออกแบบตู้เย็นพลังแสงอาทิตย์นั้น ความพยายามในปัจจุบันมุ่งอยู่ที่แนวคิดของการใช้แผงโซลาร์เซลล์ต่อตรงกับระบบทำความเย็น ทั้งนี้ก็เพื่อลดความซับซ้อนและราคาของระบบ โดยแบตเตอรี่

นั้นนอกจากจะมีการสูญเสียระหว่างการชาร์จและใช้กระแสแล้ว ยังมีอายุการใช้งานจำกัดซึ่งส่งผลทางลบต่อราคาของระบบ รวมทั้งการบำรุงรักษาอีกด้วย ดังนั้นแทนที่จะเก็บพลังงานในรูปไฟฟ้า จะใช้ระบบเก็บกักพลังงานเชิงความร้อนแทน เช่นให้น้ำที่เป็นน้ำแข็งจากการทำความเย็นในช่วงกลางวันเป็นตัวให้ความเย็นแก่ช่องแช่เย็นในเวลา กลางคืน หากแนวคิดนี้เป็นไปได้ ตู้เย็นต้องมีประสิทธิภาพสูงทั้งในตัวอุปกรณ์เองและในเชิงความสามารถในการเก็บพลังงานในระหว่างวัน

จากการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์สเตอร์ลิงมีสมรรถนะสูงเทียบเคียงได้กับระบบอัดไอ รวมทั้งยังคงสมรรถนะที่สูงนั้นได้ในการทำงานของอุณหภูมิที่กว้างกว่า ในขณะที่ระบบ Thermoelectric มีสมรรถนะที่ต่ำกว่าระบบทั้งสองอยู่มาก มากไปกว่านั้น โดยเปรียบเทียบแล้ว ความมีประสิทธิภาพของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนมีความสำคัญต่อการทำงานได้ และการมีประสิทธิภาพของระบบ

Thermoelectric มากกว่าระบบสเตอร์ลิงเป็นอย่างมาก

ปัญหาของระบบ Thermoelectric ได้ถูกแสดงในรูปที่ 6 ในการทำงานกับแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเทคนิคต่างๆของระบบอัดไอเพื่อเพิ่มความสามารถในการเก็บพลังงานในระหว่างวันก็ทำได้ใน

ขีดจำกัดหนึ่งเท่านั้น ตราบใดที่ระบบไม่สามารถเก็บพลังงานแสงอาทิตย์อันน้อยนิดระหว่างช่วงต้นและช่วงท้ายของวัน หรือช่วงที่เมฆเข้าบังได้ พลังงานเหล่านั้นก็จะกลับมาเป็นภาระความร้อนให้แก่ระบบแทน ดังนั้นความแตกต่างที่อาจดูไม่มากนัก อาจส่งผลแตกต่างระหว่างการใช้งานได้หรือไม่ได้ให้แก่แนวคิดของการใช้แผงโซลาร์เซลล์ต่อตรงกับระบบทำความเย็น ซึ่งในมุมมองนี้ลักษณะเฉพาะตัวของระบบสเตอร์ลิงที่สามารถปรับช่วงชักของลูกสูบรวมถึงกำลังขับได้อย่างอิสระ รวมทั้งการใช้มอเตอร์เชิงเส้นที่ทำให้มีระดับกระแสเพื่อเริ่มทำงานที่ต่ำ ทำให้ระบบสเตอร์ลิงมีข้อได้เปรียบอย่างชัดเจนในการทำงานกับตู้เย็นพลังแสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามข้อได้เปรียบที่ชัดเจนย่อมได้มาจากการทดสอบกับระบบจริงเท่านั้น ซึ่งยังไม่มีข้อมูลเปิดเผยในวงกว้าง

เอกสารอ้างอิง

- [1] W.P. Graebel, *et.al.* "A comparative study of four air conditioning technologies," AES-Vol. 34, Heat Pump and Refrigeration Systems Design, Analysis and Applications ASME (1995) 217-223
- [2] Ewert, M.K., *et.al.* 1998, "Experimental Evaluation of a Solar PV Refrigerator with Thermoelectric, Stirling and Vapor Compression Heat Pumps," ASES Solar 98 Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, June 14-17.
- [3] P.K. Bansal, A. Martin, "Comparative study of vapour compression, thermoelectric and absorption refrigerators," Int. J. Energy Res. 24 (2000) 93-107.
- [4] S.B. Riffat and G. Qiu, "Comparative investigation of thermoelectric air-conditioners versus vapour compression and absorption air-conditioners," Appl.Therm.Eng.24(2004) 1979-1993
- [5] C.P. Arora. Refrigeration and air-conditioning. Boston, McGraw-Hill. 2001

- [6] G.Min and D.M.Rowe "Cooling performance of integrated thermoelectric microcooler," Solid-State Electr. 43 (1999) 923-929
- [7] B.J. Huang, H.Y. Chen, "Modeling of integral-type Stirling refrigerator using system dynamics approach," Int. J. Refrigeration 23 (2000) 632-641
- [8] G. Walker. Stirling engines. Clarendon Press; 1980
- [9] D.M. Berchowitz, 1998, "Maximized Performance of Stirling Cycle Refrigerator," IIR Conference. Oslo, Norway, 1998
- [10] D.M. Berchowitz, D. Kiiikka and B.D. Mennink, "Recent Advances in Stirling Cycle Refrigeration," August 20-25, 1995, 19th IIR Conference, The Hague, The Netherlands.
- [11] M.J. Fabien, "Evaluation of the free-piston Stirling cycle for domestic cooling applications," Int. Congr. of Refrig. Montreal, Quebec, Canada 1991.
- [12] M. Janssen and P. Beks, "Measurement and Application of Performance Characteristics of a Free-Piston Stirling Cooler", IIR Conference 2002, Purdue, USA.
- [13] Y.R. Kwon and D.M. Berchowitz, "Operational characteristics of Stirling machinery", International Congress of Refrigeration 2003, Washington, D.C.
- [14] G. Min Gao and D.M. Rowe, "Improved model for calculating the coefficient of performance of a Peltier module," Energ Convers Manage 2000;41:163-71.
- [15] T.A. Kattakayam and K. Srinivasan "Uninterrupted power supply for autonomous small refrigerators," Energ Convers Manage 1998;39(1/2):21-26.
- [16] T.A. Kattakayam and K. Srinivasan "Photovoltaic generator based autonomous power sources for small refrigerator units," Solar Energy 1996;56(6):543-552.
- [17] M. Akbaba and A.A. Alattawi, Mohamed, "A new model for I-V characteristic of solar cell generators and its applications," Solar Energy Materials and Solar Cells, 37 (1995) 123-32.
- [18] Y.J. Dai, R.Z. Wang and L. Ni, "Experimental investigation and analysis on a thermoelectric refrigerator driven by solar cells," Solar Energy Materials & Solar Cells 77 (2003) 377-391
- [19] D.M. Berchowitz, "Stirling coolers for solar refrigerators," International Appliance Technical Conference, West Lafayette, US, 1996.
- [20] R. Chein and Y.Chen, "Performances of thermoelectric cooler integrated with microchannel heat sinks," International Journal of Refrigeration, In press as of July 2005
- [21] X.C. Xuan "Investigation of thermal contact effect on thermoelectric coolers," Energy Conversion and Management 44 (2003) 399-410

ภาคผนวก ก การประเมินสมรรถนะของระบบ Thermoelectric

สมการทางทฤษฎีต่อไปนี้จะให้การประมาณสมรรถนะของระบบ Thermoelectric จริงได้อย่างพอเพียง [6,20] โดยเกี่ยวข้องกับตัวแปร จำนวนแปดตัว ได้แก่ $Q_c, P, V, Q_h, COP, \Delta T, T_c$ และ I อัตราการทำความเย็น

$$Q_c = 2N \left[\alpha IT_c - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho}{G} - kG\Delta T \right] \quad (n1.1)$$

โดย N คือจำนวนของคู่ของวัสดุที่กึ่งตัวนำ α คือสัมประสิทธิ์ของ Seebeck(V/K) I คือค่ากระแส(A) ρ คือ electrical resistivity (Ωm) k คือ thermal conductivity(W/m.K) G คือตัวคูณเชิงเรขาคณิต(m) โดยในด้านขวามือ เทอมแรกคืออัตราการทำความเย็นจากปรากฏการณ์ Seebeck และอีกสองเทอมคือความร้อนที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ Joule และผลจากการนำความร้อน [21] ในบางกรณี สมการจะอยู่ในรูป

$$Q_c = \alpha' IT_c - \frac{1}{2} I^2 R - KG\Delta T \quad (n1.2)$$

กำลังในการทำความเย็น

$$P = VI \quad (n2)$$

โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าหาได้จาก

$$V = 2N \left[\alpha \Delta T + I \frac{\rho}{G} \right] \quad (n3)$$

เมื่อพิจารณาว่า

$$Q_h = Q_c + P \quad (n4.1)$$

ก็จะได้

$$Q_h = 2N \left[\alpha IT_h - \frac{1}{2} I^2 \frac{\rho}{G} - kG\Delta T \right] \quad (n4.2)$$

และโดยนิยาม

$$COP = \frac{Q_c}{P} \quad (n5)$$

ท้ายที่สุดนี้ ค่า figure of merit ถูกนิยามว่า

$$Z = \frac{\alpha^2}{KR} \quad (n6)$$

สภาวะเหมาะสมที่สุดสำหรับค่า COP

จากชุดของสมการข้างต้น ค่ากระแสที่ให้ค่า COP ที่มากที่สุดจะเท่ากับ

$$I_{opt} = k\Delta TG \left(1 + \sqrt{1 + Z\bar{T}} \right) / (\alpha\bar{T}) \quad (n7)$$

โดยที่ $\bar{T} = (T_h + T_c) / 2$ และค่า COP ที่สภาวะนั้นหาได้จาก

$$COP_{opt} = \left(\bar{T} / \Delta T \right) \left(\frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + 1} \right) - 1 \quad (n8)$$

ด้วยสมการ (n7) เป็นสมการที่หาค่า I พร้อมด้วยการกำหนดค่า ΔT และ T_c ชุดสมการทั้งแปดก็สามารถหาค่าตัวแปรทั้งแปดได้ครบ

ตารางที่ ก1 ข้อมูลของระบบ Thermoelectric: Melcor UT15-12-40-F2

N	G (m)	k (W/m.K)	ρ (Ω m)	α (V/K)
127	0.291	1.51e-2	1.01e-3	2.02e-4