

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์



โครงการ: การพัฒนาต้นแบบเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

Development the prototype of thermoelectric egg incubator integrated with a thermal energy storage with using electricity from solar cells



คณะผู้วิจัย สังกัด

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รับลงทะเบียน 103๑๔3๑
เลขทะเบียน 2559
เลขเรียกหนังสือ ๑ ๓5
260
03918
2559

- 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัช สุริวงษ์ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เจริญจิตต์สวัสดิ์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพิธาร์ ธนารักษ์ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดา สมกุล วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดย
งบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ปีงบประมาณแผ่นดิน 2559

คำนำ

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย “การพัฒนาต้นแบบเครื่องฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์” โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยนเรศวร ปีงบประมาณแผ่นดิน 2559 ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ออกแบบและพัฒนาเครื่องฟอกไข่ที่ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2) ทดสอบการทำงานของเครื่องฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะของการฟอกไข่ไก่ 3) ศึกษาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเครื่องฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในส่วนของ การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องฟอกไข่ให้สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ห่างไกล แม้ไม่มีระบบไฟฟ้าพื้นฐาน รวมถึงสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยมาพัฒนาต่อยอด นำไปสู่การใช้งานได้จริง ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทน

นอกจากนี้โครงการวิจัยดังกล่าวสามารถสร้างสิ่งประดิษฐ์ต้นแบบเครื่องฟอกไข่ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ มีการเผยแพร่ผลงานวิจัยเพื่อแลกเปลี่ยนเรียนรู้ทางวิชาการ โดยมีการนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการในระดับชาติ รวมถึงการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารต่างประเทศ ซึ่งผลการดำเนินงานในส่วนต่างๆ ถูกนำเสนอในรายงานฉบับนี้เช่นกัน

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้สถานที่ทำการวิจัย อุปกรณ์และเครื่องมือ สุดท้ายคณะผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูงสำหรับมหาวิทยาลัยนเรศวร ที่เป็นผู้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2559 นี้ ตลอดจนสิ้นโครงการ รายงานฉบับนี้ไม่อาจเกิดขึ้นได้หากปราศจากการสนับสนุนในครั้งนี้

คณะผู้วิจัย

26 กรกฎาคม 2560

ชื่อโครงการ การพัฒนาต้นแบบเครื่องฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

คณะผู้วิจัย	ผศ.ดร.ธวัช สุริวงษ์	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร
	ผศ.ดร.สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
	ผศ.ดร.ประพิศารีย์ ธนารักษ์	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร
	ผศ.ดร.ศักดา สมกุล	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

คำสำคัญ เครื่องฟอกไข่, ระบบสะสมความร้อน, เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล, เซลล์แสงอาทิตย์, ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต, ระยะเวลาคืนทุน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาเครื่องฟอกไข่ไก่ที่ไม่มีการใช้พลังงานจากไฟฟ้าพื้นฐาน โดยต้นแบบเครื่องไข่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (TEC1-12710) เป็นแหล่งจ่ายความร้อนในช่วงเวลากลางวัน และสารเปลี่ยนสถานะในระบบสะสมความร้อนเป็นแหล่งพลังงานความร้อนเพื่อดึงมาใช้ในช่วงเวลากลางคืน โดยแหล่งจ่ายความร้อนทั้งสองชนิดได้รับพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแรงดันไฟฟ้าขนาด 120 วัตต์ จำนวน 3 แผง ในช่วงเวลากลางวัน ภายในกล่องระบบสะสมความร้อน มีขดลวดความร้อนขนาด 1500 วัตต์ ยาว 0.55 เมตร จำนวน 3 เส้น และท่อแอสตันเลสนำความร้อนจำนวน 2 ท่อ มีพัดลมช่วยในการไหลเวียนอากาศภายในเครื่องฟอกไข่ มีการติดตั้งถาดน้ำไว้ด้านล่างตู้ฟอกไข่ และระบายอากาศ เพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้ฟอกไข่ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการฟอกไข่ คืออุณหภูมิการฟอกไข่ 36-39°C และความชื้นสัมพัทธ์ 60-70%RH ผลการทดลองพบว่าเครื่องฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้อยู่ในช่วงมาตรฐานการฟอกไข่ได้ 24 ชั่วโมง ตลอด 21 วัน หรือ 1 รอบของการฟอกไข่

ผลการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าเครื่องฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใช้เงินลงทุนเริ่มต้นรวมเท่ากับ 22,020 บาท โดยประมาณ 49% ของเงินลงทุนเริ่มต้นมาจากต้นทุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อคำนวณต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่าเท่ากับ 9,142 บาท การประเมินระยะเวลาคืนทุนโดยพิจารณาระยะเวลาคืนทุนจากผลตอบแทนสุทธิพบว่าเครื่องฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะเวลาคืนทุนที่ได้ผลตอบแทนเท่ากับเงินลงทุนรวมคือ 7.05 ปี

ผลการวิจัยทั้งทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ สรุปได้ว่าเครื่องฟอกไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถนำมาทดแทนเครื่องฟอกไข่แบบขดลวดไฟฟ้าได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ห่างไกลจากระบบสายส่งไฟฟ้าพื้นฐาน และเป็นแนวทางส่งเสริมและพัฒนากาการใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดปัญหาการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

Project title Development the prototype of thermoelectric egg incubator integrated with a thermal energy storage with using electricity from solar cells

Researchers Assistant Prof. Dr. Tawat Suriwong
Assistant Prof. Dr. Somchai Jijitsawat
Assistant Prof. Dr. Prapita Thanarak
Assistant Prof. Dr. Sakda Somkun

Keywords Egg incubator, Thermal storage system, Thermoelectric module, Solar cell, Life cycle cost, Payback period

Abstract

The purpose of this research was to develop a thermoelectric egg incubator (TEI) integrated with a thermal storage system (TES) and using electricity from PV cell, in order to operate without on-grid electricity. A thermoelectric (TE) module was applied as the heat source for daytime use, and a phase change material (PCM) contained inside a thermal energy storage (TES) was supplied heat into TEI at nighttime operation. The primary energy source comprised 3 panels of Photovoltaic (PV) cell generating 120 W of electrical power, according to a load of the incubator in whole day operation. A heating element with three parallel circuit lines was installed inside the PCM box (1500 W and 0.55 m of length). Incubating temperature and relative humidity (RH) inside the TEI-TES were controlled to emulate natural conditions for fertile chicken egg hatching (36-39°C and 60-80%RH), compared with commercial egg incubator (CEI). The results showed that the TEI-TES was achieved and mostly maintained within optimum incubating temperature range and the correct relative humidity under the weather of Thailand (clear sky, rainy and cloudy day) over the 24 hours in the whole chicken-egg hatching period (21 days).

The economic evaluation based on Life cycle cost (LCC) and Payback period (PB) was determined. As the results, an investment cost of the TE incubator was 22,020 Baht and 49% of investment cost was solar cell panels. LCC of the TE incubator was 9,142 Baht which is according to the present value (PV). PB of this TE incubator considered on the net present value (NPV) was evaluated. It is found that PB of the TE incubator was 7.05 years.

Therefore, thermoelectric egg incubator integrated with a thermal storage system using electricity from solar cells can be competitive with commercial egg incubator, and it is especially high potential in remote areas where located far from the electrical infrastructure. In addition, it can be guidelines for widely promoting utilization of renewable energy.

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

การพัฒนาต้นแบบเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อน
ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

Development the prototype of thermoelectric egg incubator integrated with a
thermal energy storage with using electricity from solar cells

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เกษตรกรในประเทศไทยที่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมส่วนใหญ่มีการเลี้ยงไก่เนื้อและไก่ไข่ ควบคู่ไปด้วย และเป็นอาชีพเสริมที่สร้างรายได้ในครัวเรือน โดยปกติแล้วการเลี้ยงดูไก่และการฟักไข่ ส่วนใหญ่ปล่อยเป็นไปตามธรรมชาติ ทำให้มีผลผลิตต่ำเนื่องจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ภูมิอากาศ และความชื้น การฟักไข่ถือเป็นหัวใจสำคัญของการเลี้ยงไก่เพราะถ้าสามารถฟักไข่ ออกมาเป็นตัวไก่ได้เพิ่มขึ้นแสดงถึงการเพิ่มผลผลิตต่อรอบการฟักไข่ (21 วัน) อย่างไรก็ตามการฟักไข่ ตามธรรมชาตินั้นมีผลผลิตค่อนข้างต่ำ เนื่องจากแม่ไก่ไม่สามารถฟักไข่แล้วออกมาเป็นตัวไก่ได้พร้อม กันและทำให้แม่ไก่ละทิ้งการฟักไข่ก่อนกำหนดเพื่อมาเลี้ยงดูลูกไก่ รวมถึงการฟักไข่ตามธรรมชาติไม่ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องเพราะบางช่วงเวลาแม่ไก่ต้องลงออกจากรังเพื่อหาอาหาร ส่งผลให้ปัจจุบันมีผู้คิดค้นการฟักไข่โดยไม่ต้องอาศัยแม่ไก่และสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่ เกี่ยวข้องกับการฟักไข่ให้มีความแม่นยำ และเที่ยงตรงมากขึ้น เช่นควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 36-39°C และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 60-80 % ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องฟักไข่เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่บอกถึง ต้นทุนในการผลิตของไก่ในแต่ละรุ่นเพื่อให้การฟักไข่มีอัตราการฟักเพิ่มขึ้น การพัฒนาเครื่องฟักไข่ใน ปัจจุบันมุ่งเน้นไปที่การใช้ขดลวดความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิซึ่งต้องใช้กระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูง ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานในพื้นที่ห่างไกลที่ไม่มีระบบไฟฟ้าพื้นฐานทำให้ไม่สามารถใช้เครื่องฟักไข่ ชนิดนี้ได้ งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเครื่องฟักไข่ร่วมกับพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ เพื่อ ความยั่งยืนในด้านพลังงานของประเทศ และการพัฒนาด้านนวัตกรรมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน

จากเหตุผลและปัญหาดังกล่าวคณะผู้วิจัยมีแนวคิดที่นำวัสดุที่สามารถทำความร้อนในช่วง อุณหภูมิของการฟักไข่และทำงานได้เทียบเท่าขดลวดความร้อน คือ “แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล” ซึ่ง สามารถให้ความร้อนได้สม่ำเสมอและใช้กับเครื่องฟักไข่ได้ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเป็นอุปกรณ์ที่ทำมา จากสารกึ่งตัวนำ อาศัยหลักการทำงานโดยป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล สารกึ่ง ตัวนำทำการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเป็นความร้อนและความเย็นเกิดขึ้น โดยด้านหนึ่งร้อนและ ด้านหนึ่งเย็น โดยด้านร้อนและด้านเย็นสามารถสลับกันได้ขึ้นอยู่กับทิศทางการจ่ายกระแสไฟฟ้า และ ข้อดีของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล คือ มีสมบัติเป็นปั๊มความร้อน (Heat pump) คือสามารถปรับความ ร้อนที่คุณภาพต่ำให้สูงขึ้นได้ ไม่มีเสียงดังขณะทำงานเพราะไม่มีชิ้นส่วนใดเคลื่อนที่ มีขนาดเล็ก ค่า บำรุงรักษาต่ำ มีอายุการใช้งานนาน และควบคุมอุณหภูมิได้ง่ายเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความ เที่ยง และการควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำ โดยเฉพาะการฟักไข่ ผลงานวิจัยที่คณะผู้วิจัยได้ศึกษามาแล้ว ในด้านการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อนและแบบเทอร์โม อิเล็กทริก พบว่า ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถทำงานได้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงที่ 12 V และ 5

A มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในช่วงที่เหมาะสมกับการฟักไข่มากกว่าตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อน นอกจากนี้ตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยน้อยกว่าตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อนประมาณ 2.14 เท่า และเมื่อคิดค่าใช้จ่ายสำหรับค่าไฟฟ้าแล้วพบว่าตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถลดค่าใช้จ่ายคิดเป็น 53.4% ต่อการฟักไข่หนึ่งรอบ เมื่อพิจารณาทางด้านประสิทธิภาพการทำความร้อนพบว่า ค่า EER ของตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าแบบขดลวดความร้อนประมาณ 1.4 เท่า จากบทความวิชาการและงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มี การนำเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้ร่วมกับระบบสะสมความร้อนเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้กับเครื่องฟักไข่ เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และสนับสนุนพลังงานทดแทนสู่ชนบท

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่พื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ให้สามารถใช้เซลล์แสงอาทิตย์มาทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และข้อจำกัดอีกอย่างคือเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถจ่ายกระแสไฟได้เพียงช่วงตอนกลางวันที่มีแสงอาทิตย์เท่านั้น ทำให้ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิในยามกลางคืนได้ ดังนั้นคณะผู้วิจัยได้มีแนวคิดในการนำระบบสะสมความร้อนมารวมด้วย โดยระบบทำการสะสมความร้อนไว้จากการทำความร้อนของขดลวดความร้อนในยามที่มีแสงอาทิตย์ (กลางวัน) ไว้เป็นพลังงานความร้อนเพื่อจ่ายให้กับเครื่องฟักไข่ในยามที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เพื่อให้การทำงานของเครื่องฟักไข่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดตลอดเวลา 24 ชั่วโมง โดยผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้เป็นส่วนช่วยให้เกษตรกรในชนบทห่างไกลที่ไม่มีไฟฟ้าใช้สามารถประกอบอาชีพเกษตรกรรมการเลี้ยงไก่ได้และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการฟักไข่สามารถช่วยให้เกษตรกรสามารถดำรงอยู่บนพื้นฐานของหลักเศรษฐกิจพอเพียงตามแนวพระราชดำริ ฯ

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 2.1 ออกแบบและพัฒนาเครื่องฟักไข่ที่ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 2.2 ทดสอบการทำงานของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะของการฟักไข่ไก่
- 2.3 ศึกษาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในส่วนของ การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB)

3. ระเบียบวิธีวิจัย

- 3.1 สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง จัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ต่างๆและสารเปลี่ยนเฟสชนิดพาราฟิน
- 3.2 ศึกษาหลักการฟักไข่ไก่ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการฟักไข่ไก่ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการสร้างตู้ฟักไข่ต้นแบบที่ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลร่วมกับระบบสะสมพลังงานที่ใช้พาราฟินเป็นสารสะสมความร้อน
- 3.3 สร้างตู้ฟักไข่ต้นแบบสำหรับใช้ในการทำวิจัย ซึ่งได้ทำการคำนวณ องค์ประกอบสำคัญต่างๆแล้ว ในส่วนของขนาดตู้ฟักไข่มีขนาดเท่ากับตู้ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป ขนาดบรรจุไข่ 24 ฟอง

- 3.4 การเก็บข้อมูล ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้ฟักไข่ต้นแบบ เปรียบเทียบกับตู้ฟักไข่ที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาด ตลอดระยะเวลา 1 รอบการฟักไข่ (ประมาณ 21 วัน)
- 3.5 คำนวณความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในส่วนของ การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB)
- 3.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

สถานที่ทำการทดลอง วิจัย และเก็บข้อมูล

- สวนพลังงาน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

4. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาและสร้างเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกขนาด 24 ฟอง ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้เครื่องฟักไข่สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ห่างไกลจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน โดยใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเป็นแหล่งจ่ายพลังงานความร้อนในเวลากลางวัน และใช้สารเปลี่ยนสถานะชนิดพาราฟินเป็นสารสะสมความร้อนภายในระบบสะสมความร้อนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานความร้อนในช่วงเวลากลางคืน โดยแหล่งความจ่ายความร้อนทั้งสองชนิดได้รับพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน ผลการทดลองพบว่าต้นแบบเครื่องฟักไข่สามารถควบคุมอุณหภูมิการฟักไข่เฉลี่ยในช่วง $36.7 - 38.8^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $66 \pm 0.2\% \text{RH}$ ตลอดระยะเวลา 1 รอบของการฟักไข่ (21 วัน) โดยช่วงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของการฟักไข่ดังกล่าวสอดคล้องกับสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการฟักไข่ให้มีอัตราการฟักไข่สูงสุด (อุณหภูมิฟักไข่ $36-39^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $60-80\% \text{RH}$) รวมถึงมีประสิทธิภาพการทำงานในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้เช่นเดียวกับเครื่องฟักไข่ที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ที่ใช้ขดลวดความร้อนเป็นแหล่งความร้อน อย่างไรก็ตาม บางวันในช่วงบ่ายพบว่าอุณหภูมิการฟักไข่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมเนื่องจากภายในชุดระบบสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากชุดระบบสะสมพลังงานมายังเครื่องฟักไข่ผ่านชุดท่อนำความร้อนแอสแตนเลส โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวันที่ท้องฟ้าโปร่งและมีความเข้มรังสีอาทิตย์สูง

ผลการประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาคืนทุนของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าใช้เงินลงทุนเริ่มต้นของระบบ รวม 22,020 บาท ซึ่งเป็นเงินลงทุนเริ่มต้นที่สูงเมื่อเทียบกับตู้ฟักไข่แบบขดลวดที่มีขนาดเดียวกันและมีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ เนื่องมาจากตู้ฟักไข่ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกมีการทำงานร่วมกับระบบสะสมความร้อนและใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แทนพลังงานไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าพื้นฐาน และเมื่อคำนวณต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (LCC) โดยปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่าเท่ากับ 9,142 บาท สำหรับการประเมินระยะเวลาคืนทุน (PB) โดยพิจารณาระยะเวลาคืนทุนจากผลตอบแทนสุทธิ ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาผลตอบแทนสุทธิจากตู้ฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้าที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าประมาณ 3,861.36 บาทต่อปี ผลการประเมินระยะเวลาคืนทุนพบว่าตู้ฟักไข่

เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะเวลาดำเนินทุนที่ได้ผลตอบแทนเท่ากับเงินลงทุนรวมคือ 7.05 ปี ดังนั้น

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาทดแทนเครื่องฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้าได้ และเป็นแนวทางส่งเสริมและพัฒนาการใช้พลังงานทดแทน เพื่อลดปัญหาการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้อีกทางหนึ่ง

5. การใช้ประโยชน์จากงานวิจัยและการเผยแพร่ผลงานวิจัย

5.1 สิ่งประดิษฐ์จากงานวิจัย

จากงานวิจัยได้สิ่งประดิษฐ์คือ “เครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์” ที่สามารถใช้งานในพื้นที่ห่างไกลจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน และนำมาทดแทนเครื่องฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้าได้ และเป็นแนวทางส่งเสริมและพัฒนาการใช้พลังงานทดแทน เพื่อลดปัญหาการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้อีกทางหนึ่ง

5.2 การเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ

- 1) นักวิจัยได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ 1 ครั้ง

Tawat Suriwong, Sathit Banthuek, Chanon Bunmephiphit, Ekachai Singhadet and Somchai Jiajitsawat, “Development of a thermoelectric egg incubator (TEI) integrated with a thermal energy storage system”, 4th Southeast Asia Conference on Thermoelectrics 2016, 15-18 December 2016, Sea Garden Hotel, Danang, Vietnam.

- 2) นักวิจัยส่งบทความวิจัยเพื่อเข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับชาติ 1 ครั้ง คือในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 (12th Conference on Energy Network of Thailand, E-NET) ณ โรงแรม ว่างจันทร์ ริเวอร์วิว จังหวัดพิษณุโลก ประเทศไทย ระหว่างวันที่ 8-10 มิถุนายน 2559 โดยร่วมเสนอบทความวิจัย 1 บทความคือเรื่อง “ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาดำเนินทุนของตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์”

5.3 การตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการในระดับนานาชาติ

- 1) Tawat Suriwong, Sathit Banthuek, Ekachai Singhadet and Somchai Jiajitsawat, “A new prototype of thermoelectric egg incubator integrated with thermal energy storage and photovoltaic panels”, *Maejo International Journal of Science and Technology*, 11 (2017), 148-157. (Impact Factor : 0.312)

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)	ค
บทที่ 1	1
บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการทำการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	3
บทที่ 2	3
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เครื่องฟักไข่ (Egg incubator)	3
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการฟักไข่	4
2.2.1 อุณหภูมิการฟักไข่ (Incubating temperature)	4
2.2.2 ความชื้น (Humidity)	5
2.2.3 อากาศในเครื่องฟักไข่ (Humidity)	7
2.2.3 การกลับไข่ฟัก (Turning)	7
2.3 เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric)	9
2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก	9
2.3.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module)	13
2.3.3 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric efficiency)	16
2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells)	17
2.4.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์	17
2.4.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	18
2.4.3 การคำนวณหาขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์	19
2.5 ระบบสะสมความร้อน (Thermal energy storage)	20
2.5.1 การเก็บสะสมพลังงานความร้อนในรูปความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage)	21
2.5.2 การสะสมพลังงานความร้อนในรูปความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage)	21
2.5.3 การสะสมพลังงานในรูปความร้อนแฝง (Latent heat storage)	21
2.6 การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Economic evaluation)	24
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature reviews)	25
บทที่ 3	41
วิธีการดำเนินการวิจัย	41

3.1 เครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric egg Incubator, TEI)	41
3.2 ระบบสะสมความร้อน (Thermal energy storage, TES)	42
3.3 เครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์	43
3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์	45
3.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	45
3.4.2 การเก็บข้อมูลประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟักไข่	46
3.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	48
3.5.2 ระยะเวลาคืนทุน (Payback period: PB)	48
บทที่ 4	49
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	49
4.1 การควบคุมอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่	49
4.2 การควบคุมความชื้นภายในตู้ฟักไข่	66
4.3 การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	68
บทที่ 5	73
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	73
5.1 สรุปผลการทดลอง	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
บรรณานุกรม	75
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก	78
ข้อมูลผลการตรวจวัดอุณหภูมิต่างๆ ตลอดระยะเวลา 1 รอบการฟักไข่	78
ภาคผนวก ข	98
ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของเครื่องฟักไข่	98
ภาคผนวก ค	99
คำนวณหาขนาดแบตเตอรี่	99
ภาคผนวก ง	100
คำนวณขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์	100
ภาคผนวก จ	101
การเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการในระดับชาติ/นานาชาติ	101
ภาคผนวก ง	117
การตีพิมพ์ผลงานวิจัยในระดับนานาชาติ	117
ผลสำเร็จของโครงการ	128
ภาคผนวก ง ตัวชี้วัดเพื่อการประเมินผลสำเร็จของโครงการวิจัย	128

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มุมการกลับไข	8
2.2 ผลที่เกิดจากการกลับไขต่ออัตราการฟัก	8
2.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด	19
2.4 ค่า Quality Factor of system	20
2.5 คุณสมบัติของสารสะสมพลังงานความร้อน	22
3.1 ข้อกำหนดการสร้างตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกเปรียบเทียบกับตู้ฟักไข่ขด ลวดความร้อน	41
3.2 คุณสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกผสมซิลิกอนของ Ekarat Solar รุ่น ES20636120	44
4.1 อายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ในเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับ ระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	69
4.2 ผลประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตของเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	70
ตารางภาคผนวก	หน้า
ก ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยต่อชั่วโมงต่าง ๆ สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่อง ฟักไข่	107

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เครื่องฟักไข่ขนาดต่างๆ ที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์	3
2.2	ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเติบโตของเอ็มบริโอของไข่ไก่ตลอดระยะเวลาการฟัก	4
2.3	ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยการฟักไข่ อัตราการฟักไข่เป็นตัว และ อุณหภูมิการฟักไข่	5
2.4	สถานะที่เหมาะสมที่สุดในการเก็บรักษาไข่ไก่	5
2.5	ขนาดของไข่และช่องอากาศ	6
2.6	ประมาณการสูญเสียน้ำของไข่ไก่ตามเวลาการฟักไข่ในเครื่องฟักไข่แบบชั้นเดียว	6
2.7	ประมาณการสูญเสียน้ำของไข่ไก่ตามเวลาการฟักไข่ในเครื่องฟักไข่แบบหลายชั้น	7
2.8	แก๊สที่เกี่ยวข้องกับการฟักไข่	7
2.9	มุมการกลับไข่ในตู้ฟัก 45°	8
2.10	(ก) วงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของความสัมพันธ์ความต่างศักย์ซีเบค (ข) ความต่างศักย์วงจรเปิดของความต่างศักย์ซีเบค	10
2.11	ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า	10
2.12	วงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของปรากฏการณ์เพลทีเยอร์	11
2.13	ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ใช้สำหรับทำความเย็นหรือปั๊มความร้อน	12
2.14	(ก) ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบผลิตกระแสไฟฟ้า และ (ข) แบบทำความเย็นหรือแบบปั๊มความร้อน	12
2.15	ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่แสดงการไหลของประจุภายในตัววัสดุที่สามารถใช้งานได้ทั้งระบบความเย็นและผลิตกระแสไฟฟ้า	13
2.16	เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่สามารถใช้งานได้ทั้งระบบความเย็นและผลิตกระแสไฟฟ้า	13
2.17	ไดอะแกรมการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการผลิตกระแสไฟฟ้า	14
2.18	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการผลิตกระแสไฟฟ้า	14
2.19	ไดอะแกรมการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการทำความเย็นและปั๊มความร้อน	15
2.20	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการทำความเย็นและปั๊มความร้อน	15
2.21	(ก) การหาค่า COP และค่า COP เปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (ข) การหาค่า η ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และ ความสัมพันธ์ของ η กับค่า ZT	16
2.22	โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	17
2.23	ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	18
2.24	ไดอะแกรมส่วนประกอบและต้นแบบของเครื่องฟักไข่ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์	25

รูปที่	หน้า
2.25	ไดอะแกรมระบบ conveyer rotating ต้นแบบของเครื่องฟักไข่ 26
3.1	(a) ตู้ฟักไข่ขนาด 40 x 40 x3.4 มม. (b) แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (TEC1-12710) และ (c) การติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก 42
3.2	ระบบสะสมความร้อน (a) การประกอบขดลวดความร้อนและท่อทำความร้อน (b) การบรรจุพาราฟินในระบบสะสมพลังงานแบบเปลี่ยนสถานะ และ (c) การติดตั้งระบบสะสมความร้อนกับเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก 42
3.3	การติดตั้งพัดลมสำหรับส่งผ่านความร้อนจากระบบสะสมความร้อนไปยังเครื่องฟักไข่ 43
3.4	ไดอะแกรมระบบเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์ 44
3.5	เครื่องมือวัดความชื้น Multifunction environment meter รุ่น DT-8820 ประเทศไทย 45
3.6	เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data recorder) รุ่น Wisco, AI 210 ประเทศไทย 46
3.7	เทอร์มोकัปเปิลชนิด K (Type K thermocouple) 46
3.8	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้ฟักไข่ (a) แบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์ และ (b) เครื่องฟักไข่แบบขดลวด 47
3.9	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกและจุดอุณหภูมิภายในระบบสะสมความร้อน 47
3.10	รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์ 47
4.1	(a) ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตได้ และ (b) การสร้างความร้อนของขดลวดความร้อนภายในระบบสะสมความร้อน 49
4.2	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 1 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน 50
4.3	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 2 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน 51
4.4	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา ช่วงวันที่ 1-2 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน 52
4.5	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 3 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน 53
4.6	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 4 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน 53

รูปที่		หน้า
4.24	อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดวันของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก (TE Incubator) และเครื่องฟักไข่ขดลวดความร้อน (Coil Incubator)	65
4.25	ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, %RH) รายชั่วโมงของวันที่ 1 ของการฟักไข่	67
4.26	ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ต่อวันตลอดหนึ่งรอบการฟักไข่ (21 วัน)	68
4.27	เงินลงทุนเริ่มต้นของเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	69
4.28	ระยะเวลาคืนทุนของเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	71



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เกษตรกรในประเทศไทยที่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมส่วนใหญ่มีการเลี้ยงไก่เนื้อและไก่ไข่ควบคู่ไปด้วย และเป็นอาชีพเสริมที่สร้างรายได้ในครัวเรือน โดยปกติแล้วการเลี้ยงดูไก่และการฟักไข่ส่วนใหญ่ปล่อยเป็นไปตามธรรมชาติ ทำให้มีผลผลิตต่ำเนื่องจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ภูมิอากาศ และความชื้น [1-4] การฟักไข่ถือเป็นหัวใจสำคัญของการเลี้ยงไก่เพราะถ้าสามารถฟักไข่ออกมาเป็นตัวไก่ได้เพิ่มขึ้นแสดงถึงการเพิ่มผลผลิตต่อรอบการฟักไข่ (21 วัน) อย่างไรก็ตามการฟักไข่ตามธรรมชาตินั้นมีผลผลิตค่อนข้างต่ำ เนื่องจากแม่ไก่ไม่สามารถฟักไข่แล้วออกมาเป็นตัวไก่ได้พร้อมกันและทำให้แม่ไก่ละทิ้งการฟักไข่ก่อนกำหนดเพื่อมาเลี้ยงลูกไก่ รวมถึงการฟักไข่ตามธรรมชาติไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องเพราะบางช่วงเวลาแม่ไก่ต้องลงออกจากรังเพื่อหาอาหาร ส่งผลให้ปัจจุบันมีผู้คิดค้นการฟักไข่โดยไม่ต้องอาศัยแม่ไก่และสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการฟักไข่ให้มีความแม่นยำ และเที่ยงตรงมากขึ้น เช่นควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 36-39°C และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 60-80 % [1-3] ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องฟักไข่เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่บอกถึงต้นทุนในการผลิตของไก่ในแต่ละรุ่นเพื่อให้การฟักไข่มีอัตราการฟักเพิ่มขึ้น การพัฒนาเครื่องฟักไข่ในปัจจุบันมุ่งเน้นไปที่การใช้ขดลวดความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิซึ่งต้องใช้กระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูง ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานในพื้นที่ห่างไกลที่ไม่มีระบบไฟฟ้าพื้นฐานทำให้ไม่สามารถใช้เครื่องฟักไข่ชนิดนี้ได้ งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเครื่องฟักไข่ร่วมกับพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ เพื่อความยั่งยืนในด้านพลังงานของประเทศ และการพัฒนาด้านนวัตกรรมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน เช่น ได้มีการพัฒนาเครื่องฟักไข่โดยใช้ระบบน้ำร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [5,6] และใช้ความร้อนที่ได้จากถังหมักก๊าซชีวภาพร่วมกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [7] น้ำมันที่ใช้แล้วหลังจากการประกอบอาหารนำมาเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนให้กับตู้ฟักไข่ขนาด 144 ฟอง ที่มีโครงสร้างทำจากตู้เย็นขนาด 5 คิวฟุตที่เสียแล้ว [8] เครื่องฟักไข่ขนาดบรรจุ 36 ฟอง ถูกควบคุมอุณหภูมิและความชื้นด้วยแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก มีอัตราการฟักเป็นตัวและมีระยะการคืนทุน เท่ากับ 72.22% และ 1.06 ปี/การฟักไข่ 13 รุ่นในหนึ่งปี [9] นอกจากนี้มีการศึกษาผลของการใช้ตู้ฟักไข่เทียบกับการใช้แม่ไก่ฟักไข่ และผลของการเลี้ยงโดยขังไว้ในคอกโดยให้ได้รับอาหารสำเร็จรูป ผลจากการรวบรวมข้อมูล 1 ปี พบว่าการใช้ตู้ฟักไข่มีอัตราการเกิดเฉลี่ยออกเป็นตัว 56.2% เปรียบเทียบกับแม่ไก่ฟักไข่โดยการให้ตู้ฟักไข่เวลาลดลง 20 วัน โดยแม่ไก่แต่ละตัวผลิตลูกไก่ได้เพิ่มจาก 8.4 เป็น 15 ชุด ลูกไก่เพิ่ม 31 ตัวต่อแม่ ดังนั้นควรส่งเสริมให้มีการใช้ตู้ฟักไข่อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น [10] รวมถึงผลงานวิจัยที่คณะผู้วิจัยได้ศึกษามาแล้วในด้านการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อนและแบบเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่าตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในช่วงที่เหมาะสมกับการฟักไข่มากกว่าตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อน นอกจากนี้ตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยน้อยกว่าตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อนประมาณ 2.14 เท่า และเมื่อคิดค่าใช้จ่ายสำหรับค่าไฟฟ้าแล้วพบว่าตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถลดค่าใช้จ่ายคิดเป็น 53.4% ต่อการฟักไข่หนึ่งรอบ เมื่อพิจารณาทางด้าน

ประสิทธิภาพการทำความร้อนพบว่า ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) ของตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าแบบขดลวดความร้อนประมาณ 1.4 เท่า [11]

จากเหตุผลและปัญหาที่พื้นที่ชนบทห่างไกลจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ให้สามารถใช้เครื่องฟักไข่ได้ โดยนำเซลล์แสงอาทิตย์มาทำการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และข้อจำกัดอีกอย่างคือเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถจ่ายกระแสไฟได้เพียงช่วงตอนกลางวันที่มีแสงอาทิตย์เท่านั้น ทำให้ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิในยามกลางคืนได้ ดังนั้นคณะผู้วิจัยได้มีแนวคิดในการนำระบบสะสมความร้อนมารวมด้วย โดยระบบทำการสะสมความร้อนไว้จากการทำความร้อนของขดลวดความร้อนในยามที่มีแสงอาทิตย์ (กลางวัน) ไว้เป็นพลังงานความร้อนเพื่อจ่ายให้กับเครื่องฟักไข่ในยามที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เพื่อให้การทำงานของเครื่องฟักไข่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดตลอดเวลา 24 ชั่วโมง โดยไม่มีการใช้ไฟฟ้าพื้นฐาน ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และสนับสนุนพลังงานทดแทน รวมถึงมีการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ในส่วนของ การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดความคุ้มค่าในการลงทุนสร้างระบบและใช้งานให้กับเกษตรกรหรือผู้ที่ประกอบอาชีพเลี้ยงไก่และฟักไข่ที่สนใจในการสร้างและใช้งานตู้ฟักไข่นี้ โดยผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้เป็นส่วนช่วยให้เกษตรกรในชนบทห่างไกลที่ไม่มีไฟฟ้าใช้สามารถประกอบอาชีพเกษตรกรรมการเลี้ยงไก่ได้ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการฟักไข่เพื่อส่งเสริมให้เกษตรกรสามารถเข้าถึงการใช้พลังงานทดแทนและดำรงอยู่บนพื้นฐานของหลักเศรษฐกิจพอเพียงตามแนวพระราชดำริ ฯ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ออกแบบและพัฒนาเครื่องฟักไข่ที่ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) ทดสอบการทำงานของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะของการฟักไข่ไก่
- 3) ศึกษาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในส่วนของ การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB)

1.3 ขอบเขตการทำกรวิจัย

- 1) พัฒนาระบบของเครื่องฟักไข่ต้นแบบสำหรับไข่ไก่ ขนาดบรรจุ 24 ฟอง โดยระบบใช้แหล่งความร้อนจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและระบบสะสมความร้อนที่ใช้สารทำงานเป็นพาราฟิน
- 2) ประยุกต์ใช้ขดลวดความร้อนเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อถ่ายเทและสะสมความร้อนให้กับสารเปลี่ยนสถานะ (พาราฟิน) ที่บรรจุอยู่ในระบบสะสมความร้อน
- 3) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและขดลวดความร้อนมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 120 วัตต์ จำนวน 3 แผง

- 4) การศึกษาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในส่วนของการประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1) ต้นแบบเครื่องฟอกไข่ต้นแบบสำหรับไข่ไก่ ที่ใช้ความร้อนจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ร่วมกับระบบสะสมความร้อน
- 2) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องฟอกไข่ที่ใช้พลังงานทดแทน ให้เกิดประโยชน์ต่อเกษตรกรในชนบทห่างไกล ไม่มีระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ธุรกิจการเกษตร และผู้สนใจในการเลี้ยงไก่
- 3) มีการเผยแพร่ผลงานวิจัยสู่ชุมชน เกษตรกร รวมถึงการตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารนานาชาติในต่างประเทศหรือในประเทศได้
- 4) หน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนสามารถนำผลงานวิจัยไปส่งเสริมและต่อยอดการใช้งานจริงในภาคเกษตรและภาคอุตสาหกรรมต่อไป

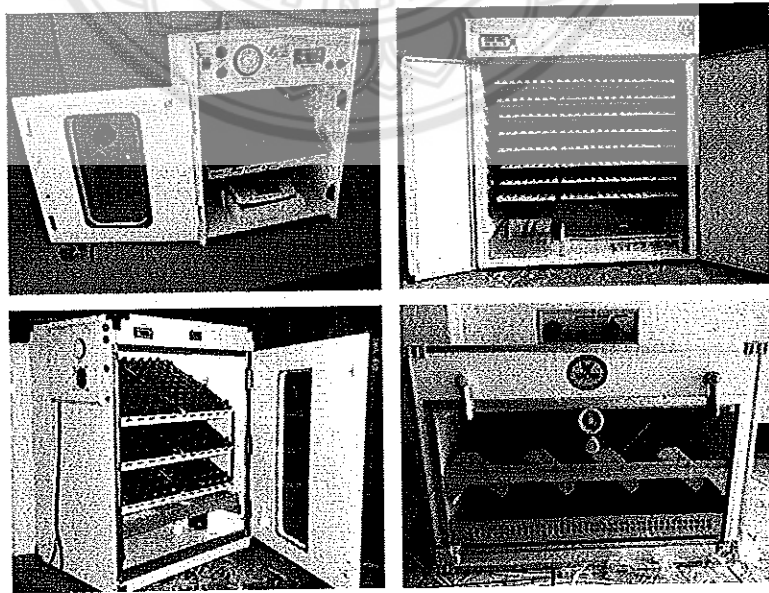


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องฟักไข่ (Egg incubator)

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมในหมู่บ้านชนบทเกษตรกรส่วนใหญ่ทำนา ทำไร่ และเลี้ยงสัตว์ควบคู่กันไป เช่น ไก่ เป็ด และสุกร เป็นต้น ทั้งนี้ไก่พื้นเมืองนั้นมีวิวัฒนาการมาจากไก่ป่าสีแดง (Red jungle fowl) ดังนั้นจึงมีผลให้ลักษณะนิสัยบางอย่างคล้ายกัน เช่น การฟักไข่ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เพื่อดำรงเผ่าพันธุ์ในไก่ป่า ได้ถ่ายทอดสู่ลูกไก่รุ่นต่อมาเรื่อยๆ การฟักไข่ที่เกิดขึ้นทำให้แม่ไก่ได้ผลผลิตไข่น้อย เนื่องจากต้องใช้เวลาในช่วง 20-21 วัน ในการฟักหนึ่งครั้ง และในชุดไข่นึงชุด แม่ไก่ให้ไข่ชุดละเพียง 10-15 ฟอง และในแต่ละปีแม่ไก่ให้ไข่ประมาณ 3-4 ชุด เนื่องจากไก่พื้นเมืองมีรสชาติดี เนื้อแน่น ทำให้ขายได้ราคาดี อย่างไรก็ตามการผลิตไก่พื้นเมืองก็มีความต้องการแม่ไก่ที่ให้ไข่สูงและสม่ำเสมอ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาพันธุ์ไก่พื้นเมืองที่มีความสามารถให้ไข่สูงขึ้น ในขณะเดียวกันก็สามารถฟักไข่เพื่อผลิตลูกไก่ได้ในสัดส่วนที่เหมาะสม สายพันธุ์ไก่ที่มีลักษณะดังกล่าวนี้เป็นประโยชน์อย่างมากต่อเกษตรกรรายย่อย เพราะการฟักไข่ด้วยแม่ไก่เป็นวิธีที่ประหยัด แต่มีอัตราการรอดต่ำ วิธีการฟักไข่โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การฟักไข่โดยใช้แม่ไก่ฟักเองตามธรรมชาติ (natural incubation) และการฟักไข่โดยใช้เครื่องฟักไข่ (artificial incubation) ได้เริ่มมีการพัฒนา มาตั้งแต่ประมาณ 230 ปีที่แล้ว โดยการทำเลียนแบบการฟักไข่ของแม่ไก่ตามธรรมชาติ ตู้ฟักโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นตู้ปิด ผนังตู้เป็นวัสดุที่เป็นฉนวน มีการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น การกลับไข่ และการระบายอากาศ [1-3,7] การฟักไข่โดยใช้ตู้ฟักไข่ในปัจจุบันนี้มีหลากหลายขนาดในการบรรจุที่จะฟักในแต่ละรอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

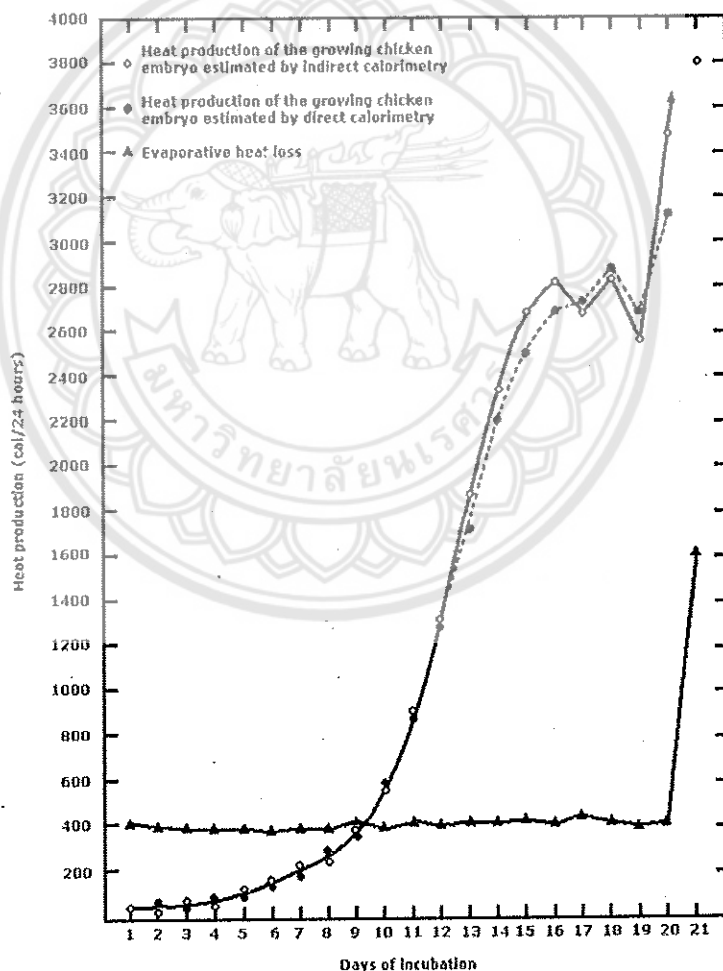


รูป 0.1 เครื่องฟักไข่ขนาดต่างๆ ที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการฟักไข่

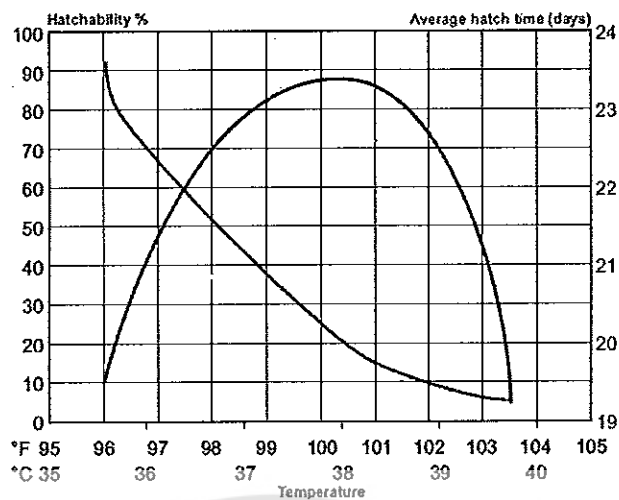
2.2.1 อุณหภูมิการฟักไข่ (Incubating temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญเป็นอันดับแรกของการฟักไข่ ในธรรมชาติความร้อนที่ใช้ในการฟักไข่นั้นได้จากความร้อนที่ผลิตได้จากร่างกายของแม่ไก่ ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการฟักไข่ในเครื่องฟักไข่นั้น ควรใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่แม่ไก่ฟักเองตามธรรมชาติ จึงจำเป็นต้องรักษาอุณหภูมิภายในเครื่องฟักไข่ให้เหมาะสมและคงที่เพื่อให้การฟักไข่ได้ผลดี อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการฟักไข่ไก่ในช่วงวันที่ 1-18 ของการฟักไข่อยู่ในช่วง $36-38^{\circ}\text{C}$ และในวันที่ 19-21 อยู่ในช่วง $36.1-37.2^{\circ}\text{C}$ ถ้าอุณหภูมิเกิดสูงหรือต่ำกว่านี้ส่งผลให้การฟักออกเป็นตัวของลูกไก่ไม่ดีเท่าที่ควรหรืออาจทำให้ลูกไก่ไม่สามารถฟักออกเป็นตัวได้ [1-3] รูปที่ 2.2 แสดงความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเติบโตของเอ็มบริโอของไข่ไก่ตลอดระยะเวลาการฟัก พบว่าอุณหภูมิการฟักไข่จะมีผลต่อการเติบโตของเอ็มบริโอเป็นอย่างมาก



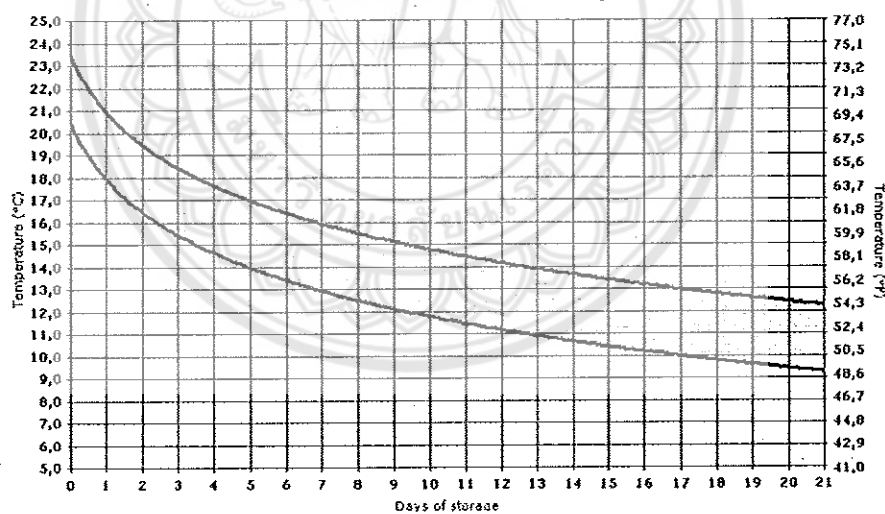
รูป 0.2 ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเติบโตของเอ็มบริโอของไข่ไก่ตลอดระยะเวลาการฟัก [2]

รูป 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยการฟักไข่ อัตราการฟักไข่เป็นตัว และอุณหภูมิการฟักไข่ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการฟักไข่อยู่ที่ 38°C และมีอัตราการฟักเป็นตัวสูงสุดประมาณ 90% ที่ 23.5 วัน



รูป 0.3 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยการฟักไข่ อัตราการฟักไข่เป็นตัว และ อุณหภูมิการฟักไข่ [12]

ในกรณีที่มีการเก็บไข่ไว้รอการฟักนั้น ถือว่ามีความจำเป็นมากเนื่องจากมีผลต่ออัตราการฟักไข่ ดังนั้นการเก็บรักษาไข่ไก่ควรอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimum egg storage conditions) ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการเก็บรักษาไข่ไก่ โดยพบว่าถ้าเวลาการเก็บรักษาไข่นานขึ้น จำเป็นต้องเก็บรักษาไข่ไก่ในสภาวะที่มีต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2.4

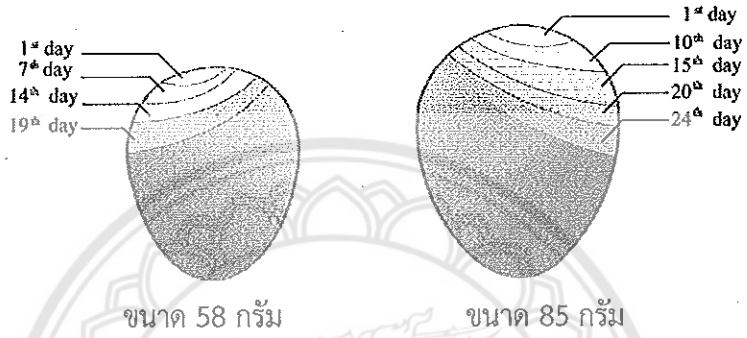


รูป 0.4 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเก็บรักษาไข่ไก่ [2]

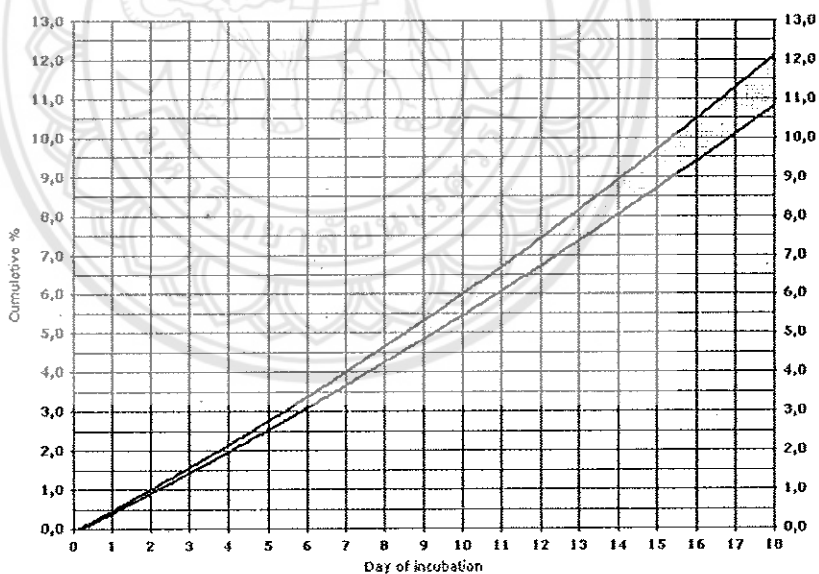
2.2.2 ความชื้น (Humidity)

ความชื้นในเครื่องฟักไข่เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากในการฟักไข่ ในขณะที่กำลังฟักไข่มีการสูญเสียความชื้นออกจากฟองไข่ตลอดเวลาสามารถสังเกตได้จากขนาดของช่องอากาศในฟองไข่ซึ่งมีขนาดขยายใหญ่ขึ้นเรื่อยๆและเมื่อฟักไข่ไก่ไปได้ 19 วันฟองอากาศก็มีปริมาณประมาณ 1/3 ของฟองไข่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการฟักไข่นั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงคือช่วง 18 วันแรกในเครื่องฟักไข่ควรมีความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) ประมาณ 60%RH และในช่วง 3 วันสุดท้ายของการฟักโดยไข่ฟักต้องการ ความชื้นสูงขึ้นเล็กน้อยประมาณ 70-

75%RH หรือช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่มีความเหมาะสมตลอดระยะเวลาการฟักไข่คือ 60-80 %RH [1-3] เพื่อให้มีการเจริญเติบโตและมีพัฒนาการที่ดีของตัวอ่อน จนกระทั่งฝักออกมาเป็นตัวไก่ ซึ่งถ้าหากความชื้นน้อยเกินไปก็ส่งผลให้เปลือกไข่แข็งและลูกไก่ไม่สามารถเจาะเปลือกไข่ออกมาได้ อาจทำให้ลูกไก่อตาย วิธีแก้ไขทำได้โดยการเผาระวังและสามารถช่วยเจาะเปลือกไข่ไก่เมื่อครบกำหนดการฟักไข่ ส่วนในกรณีความชื้นมากเกินไปและมีไข่ฟักออกมาตามกำหนดแล้วก็ส่งผลให้ปริมาณไข่ขาวที่หุ้มไข่แดงอยู่นั้นยังมีมากจนเกินไป จนลูกไก่ออกไข่ขาวหุ้มตัวอ่อนจนไม่สามารถออกจากไข่ไก่ได้ วิธีแก้ไขทำได้โดยสังเกตว่าถ้าลูกไก่ออกจากไข่ได้แล้วให้ทำความสะอาดตัวลูกไก่ที่มีของเหลวเกาะอยู่



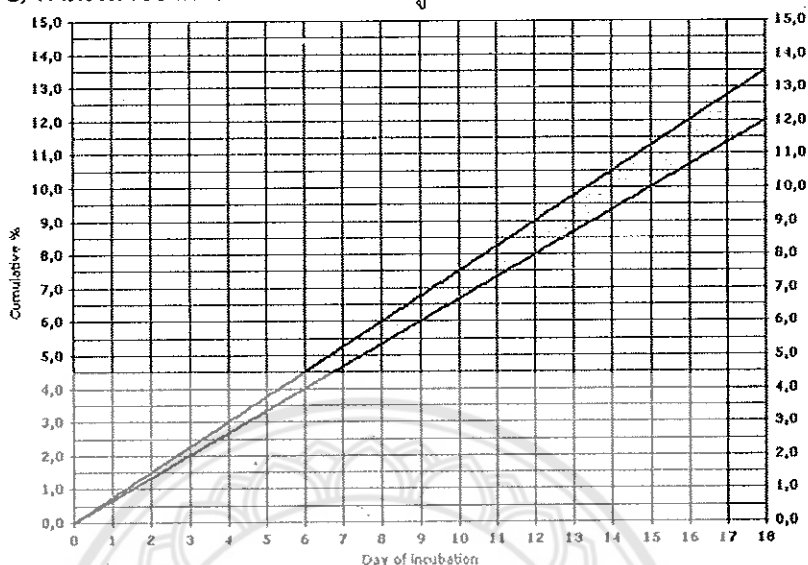
รูป 0.5 ขนาดของไข่และช่องอากาศ [9]



รูป 0.6 ประมาณการสูญเสียน้ำของไข่ไก่ตามเวลาการฟักไข่ในเครื่องฟักไข่แบบชั้นเดียว [2]

โดยปกติแล้วระหว่างการฟักไข่มีการสูญเสียน้ำภายในไข่ผ่านทางรูพรุนของเปลือกไข่ โดยอัตราการสูญเสียน้ำหรือความชื้นขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของรูพรุนที่เปลือกไข่และความชื้นของอากาศรอบไข่ สำหรับสถานะการสูญเสีย (Wright loss, %) ที่ทำให้ได้อัตราการฟักไข่เป็นตัวสูงที่สุดคือ 12 % ของน้ำหนักไข่ไก่ในวันที่ 18 ของการฟักไข่ รูปที่ 2.6 แสดงอัตราการสูญเสียของไข่ไก่ที่มีการฟักในเครื่องฟักไข่แบบชั้นเดียว (Single stage incubator) พบว่ามีการสูญเสียของไข่ไก่เพิ่มขึ้นแบบเลขชี้กำลัง (Exponential curve) ตามเวลาการฟักไข่ สำหรับเครื่องฟักไข่แบบหลายชั้น

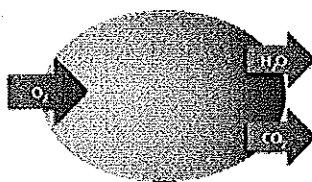
(Multi-stage incubator) นั้น พบว่ามีการปริมาณการสูญเสียน้ำของไข่ไก่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น (Linear curve) ตามเวลาของการฟักไข่ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูป 0.7 ประมาณการสูญเสียน้ำของไข่ไก่ตามเวลาการฟักไข่ในเครื่องฟักไข่แบบหลายชั้น [2]

2.2.3 อากาศในเครื่องฟักไข่ (Humidity)

การเจริญเติบโตของตัวอ่อนต้องอาศัยออกซิเจนเพื่อใช้ในการเผาผลาญและขับถ่าย เอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการระบายอากาศในเครื่องฟักไข่เพื่อให้มีออกซิเจนเพียงพอกับความต้องการและเพื่อลดระดับของคาร์บอนไดออกไซด์ให้ต่ำกว่าระดับที่ทำให้เกิดผลเสียต่อการเจริญเติบโตของตัวอ่อน รวมถึงควบคุมปริมาณการสูญเสียน้ำผ่านรูพรุนของเปลือกไข่ไก่ ดังแสดงในรูป 2.8 ตามปกติอากาศที่ระดับน้ำทะเลมีออกซิเจนประมาณ 21% และคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ระหว่าง 3-8% ดังนั้นถ้าในเครื่องฟักไข่มีการติดตั้งพัดลมและมีการระบายอากาศที่ดี ออกซิเจนในระดับนี้ก็สามารถทำให้ลูกไก่ฟักออกเป็นตัวได้อย่างปกติ



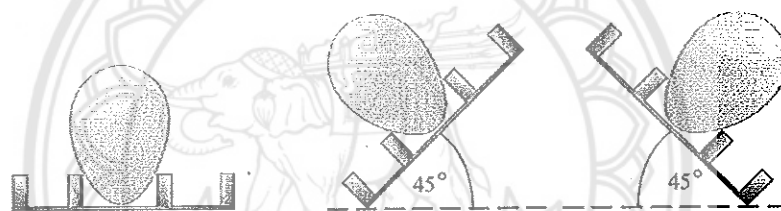
รูป 0.8 แก๊สที่เกี่ยวข้องกับการฟักไข่

2.2.3 การกลับไข่ฟัก (Turning)

การกลับไข่ถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่ออัตราการฟักไข่ และจำเป็นต้องมีการกลับไข่ระหว่างการฟักไข่เพื่อป้องกันเอ็มบริโอ (Embryo) ติดกับเยื่อเปลือกไข่ (Shell membrane) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงสัปดาห์แรกของการฟักไข่ อีกทั้งยังช่วยให้การเจริญเติบโตของเยื่อหุ้มเอ็มบริโอ (Embryonic membrane) จากการที่มีการเจริญเติบโตของเอ็มบริโอและการเพิ่มขึ้นของ

ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเติบโตของเอมบริโอทำให้การกลับไข่ช่วยให้มีการไหลเวียนของอากาศที่ดี และมีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม

ลูกไก่ที่อยู่ในฟองไข่นั้นปกติหัวของลูกไก่อยู่ทางด้านข้างของฟองไข่ เมื่อไข่ฟักมีอายุมากขึ้นส่วนหัวและปากของลูกไก่เข้าไปอยู่ใกล้ช่องอากาศเพื่อเตรียมเจาะเข้าสู่ช่องอากาศให้หายใจได้สะดวกขึ้นจากลักษณะทางธรรมชาติทั้งสองนี้การวางไข่ฟักในเครื่องฟักไข่จึงควรวางไข่ให้เหมาะสมคือวางไข่ฟักโดยเอาด้านข้างขึ้นข้างบนสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการกลับไข่คือมุมและจำนวนครั้งในการกลับไข่มุมที่ใช้ในการกลับไข่ซึ่งทำให้การฟักออกเป็นตัวของลูกไก่ที่ดีที่สุดควรจะให้แกนของฟองไข่ทำมุม 45° กับแนวตั้งทั้งนี้ด้วยเหตุผล 3 ประการคือเพื่อไม่ให้ตัวอ่อนติดเยื่อเปลือกไข่ตายไม่ให้น้ำเยื่อพิเศษของตัวอ่อนติดกันและเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอ่อนของลูกไก่เจริญอยู่ในท่าผิดปกติ จากการศึกษาพบว่าถ้าไม่มีการกลับไข่ในระยะ 18 วันแรกของการฟักซึ่งตัวอ่อนยังมีขนาดเล็กและอยู่ในท่าเดียวกันนานๆตัวอ่อนมีการลอยขึ้นไปติดกับน้ำเยื่อเปลือกไข่ทำให้ลูกไก่ตายแต่ในช่วงวันที่ 19-21 ของการฟักการกลับไข่ไม่มีผลต่อการฟักออกเป็นตัวจึงไม่จำเป็นต้องมีการกลับไข่ดังแสดงไว้ในรูป 2 ผลของมุมที่ใช้ในการกลับไข่กับการฟักออกเป็นตัวของลูกไก่แสดงไว้ในตาราง 2.1



รูป 0.9 มุมการกลับไข่ในตู้ฟัก 45°

ตาราง 0.1 มุมการกลับไข่ [9]

มุมการกลับไข่ในตู้ฟัก	อัตราการฟักออก (%)
30	78.9
45	84.6

จำนวนครั้งในการกลับไข่ในช่วงฟัก 1-18 วันแรก นั้นมีผลต่อการฟักออกเป็นตัว เช่นเดียวกันหากมีการกลับไข่น้อยครั้งเกินไปส่งผลทำให้การฟักออกเป็นตัวต่ำ แต่ถ้ากลับไข่น้อยครั้งเกินไปก็ไม่ทำให้การฟักสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในการฟักไข่ด้วยเครื่องฟักไข่จึงควรกลับไข่วันละไม่ต่ำกว่า 6-10 ครั้ง ผลของจำนวนครั้งในการกลับไข่ต่อการฟักออกเป็นตัวแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตาราง 0.2 ผลที่เกิดจากการกลับไข่ต่ออัตราการฟัก [9]

จำนวน (วัน)	อัตราการฟัก (%)
6	92.0
8	92.2
10	92.1

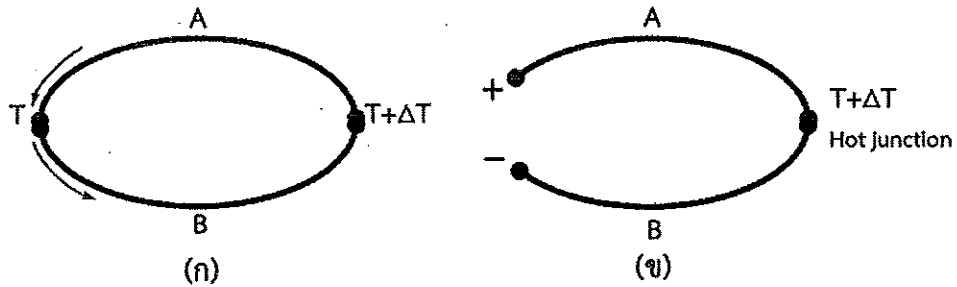
2.3 เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric)

2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric materials: TE) เป็นวัสดุที่สามารถผันความร้อนเป็นกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผ่านปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) หรือสามารถผันกระแสไฟฟ้าเป็นความร้อนหรือความเย็นได้ โดยขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module) ผ่านปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ (Peltier effect) ถือได้ว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นแหล่งพลังงานทดแทนหลักอีกอันหนึ่งที่สามารถผันพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยความร้อนที่ใช้สามารถใช้ความร้อนเหลือทิ้ง (waste heat) จากกระบวนการต่างๆ ได้ ซึ่งขบวนการผันไฟฟ้าจากความร้อนนี้เกิดขึ้นภายในวัสดุเท่านั้น ไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่คาดว่าจะใช้ในอนาคตอันใกล้นี้ มีการทำงานที่เงียบเนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ส่วนใดเคลื่อนที่ระหว่างการดำเนินงานยิ่งกว่านั้นยังเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่สะอาดอีกด้วย เนื่องจากสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยการใช้สิ่งประดิษฐ์ทางเทอร์โมอิเล็กทริกที่ปราศจากมลพิษ อีกด้านหนึ่งวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถทำความเย็น (Refrigeration) และปั๊มความร้อน (Heat pump) ได้โดยไม่ทำลายธรรมชาติ เพราะไม่มีการใช้สารทำความเย็น ดังนั้น สามารถนำมาผลิตตู้เย็นเทอร์โมอิเล็กทริกหรือตู้เย็นพกพา มาประกอบเข้ากับระบบระบายความร้อนสำหรับซีพียูคอมพิวเตอร์ และเครื่องปรับอากาศขนาดเล็กเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นต้น นอกจากการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกด้านความเย็นแล้วยังมีการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการผลิตความร้อนด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่นเครื่องฟักไข่ (Egg incubator) และเครื่องทำน้ำอุ่น เป็นต้น เห็นได้ว่าข้อดีของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคือ น้ำหนักเบา มีขนาดเล็ก และทำงานเงียบ เพราะไม่มีชิ้นส่วนใดเคลื่อนไหวตลอดการทำงาน

1) ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect)

ในปี ค.ศ. 1821 โทมัส โจแฮนน์ ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ได้ค้นพบว่า “เมื่อให้ความร้อนหรือมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อของวัสดุตัวนำสองชนิด แล้วทำให้เกิดไฟฟ้าไหลในวงจรปิด” ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า “ปรากฏการณ์ซีเบค” (Seebeck effect) [13] แสดงดังรูปที่ 2.10 วงจรเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ซีเบค ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานสำหรับการผันความร้อนเป็นกระแสไฟฟ้า ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรมันถูกทำให้เปลี่ยนแปลงตามผลต่างของอุณหภูมิที่รอยต่อของวัสดุตัวนำทั้งสอง (A และ B) โดยที่ปลายรอยต่อคือที่ วัสดุตัวนำ A และวัสดุตัวนำ B มีอุณหภูมิแตกต่างกันมาก ก็ส่งผลให้มีปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรมากขึ้นตามไปด้วย อันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่รอยต่อนั้นทำให้พาหะอิสระหรือประจุ (free carrier) บริเวณปลายด้านร้อน (hot junction) มีพลังงานจลน์สูงขึ้นและมากกว่ารอยต่อด้านเย็น (col junction) ทำให้เกิดการแพร่หรือเคลื่อนที่ไปทางรอยต่อด้านเย็น จนถึงจุดอิ่มตัวจุดหนึ่งของพาหะอิสระแล้วทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากลับ (Back electromotive force: e.m.f) ซึ่งมีทิศการไหลตรงข้ามกับการไหลของพาหะอิสระ ถ้าเปิดปลายจูดรอยต่อด้านหนึ่งออกดังรูปที่ 2.10 (ข) ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ปลายด้านเปิด เรียกความต่างศักย์วงจรเปิดหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ว่า “ความต่างศักย์ซีเบค” (Seebeck voltage)



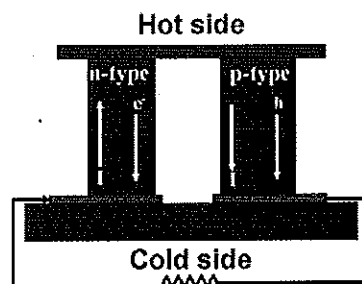
รูป 0.10 (ก) วงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของความสัมพันธ์ความต่างศักย์ซีเบค (ข) ความต่างศักย์วงจรเปิดของความต่างศักย์ซีเบค [13]

สมการปรากฏการณ์ซีเบคสามารถเขียนในรูปของความต่างศักย์และความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ ตามสมการที่ 2.1

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta T} \tag{0.1}$$

- เมื่อ S = สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient), V/K
 ΔV = ความต่างศักย์ไฟฟ้า, V
 ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิต่างด้านร้อนและด้านเย็น, K

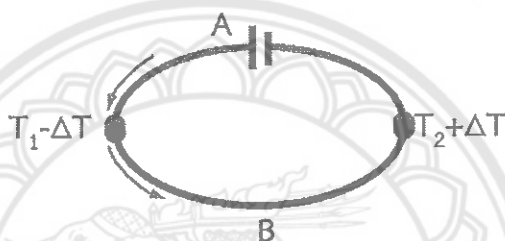
วัสดุตัวนำหรือโลหะตัวนำที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคไม่เท่ากับศูนย์ ($S \neq 0$) แสดงว่าวัสดุนั้นมีสมบัติเป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก โดยค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าได้ทั้งบวกและลบตามคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ เช่น วัสดุที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเป็นลบ แต่ถ้าวัสดุมีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าเป็นบวก รูปที่ 2.11 แสดงการใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์ซีเบคผ่านวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อน (thermoelectric power generation) จากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module)



รูป 0.11 ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า [14]

2) ปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ (Peltier effect)

หลังจากที่ โทมัส โจแฮนด์ ซีเบค ได้ค้นพบปรากฏการณ์ซีเบค ต่อมาในปี ค.ศ. 1834 นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ยีน เพลทีเยอร์ชาร์เลส อะธานเนส (Jean Charle Athanase Peltier) ได้ค้นพบว่า “เมื่อมีกระแสไหลผ่านวัสดุตัวนำสองชนิดที่ต่อกันแล้วทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของวัสดุตัวนำทั้งสองชนิด ความร้อนที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศทางกระแส” ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า “ปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ (Peltier effect)” [13] ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอกไหลผ่านเข้าไปในวงจรผ่านวัสดุตัวนำ A และ B ทำให้จุดต่อวงจร $T_2 + \Delta T$ มีอุณหภูมิสูงขึ้น และ $T_1 - \Delta T$ มีอุณหภูมิต่ำลง เนื่องจากการไหลของพาหะอิสระตามการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจร



รูป 0.12 วงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ [13]

ปรากฏการณ์เพลทีเยอร์เป็นปรากฏการณ์ที่ควบคู่ไปกับปรากฏการณ์ซีเบค ซึ่งสามารถอธิบายโดยอาศัยความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ซีเบค ดังสมการที่ 2.2

$$\Pi = ST \quad (0.2)$$

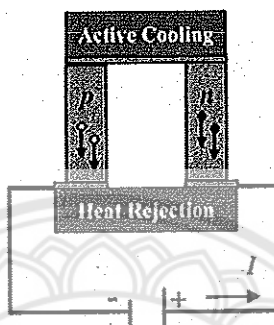
เมื่อ	Π	=	สัมประสิทธิ์เพลทีเยอร์ (Peltier coefficient), V
	S	=	สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient), V/K
	T	=	อุณหภูมิ, K

การใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์เพลทีเยอร์นั้น สามารถนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ทำเป็นตู้เย็นจากการผันความร้อนจากไฟฟ้ากระแสตรง (Thermoelectric refrigeration) หรือปั๊มความร้อน (Heat pump) โดยอาศัยการขับเคลื่อนจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับชุดเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ดังนั้นอัตราการคายความร้อนทิ้งที่รอยต่อของวัสดุตัวนำทั้งสองชนิด คำนวณได้จาก

$$Q_p = SIT \quad (0.3)$$

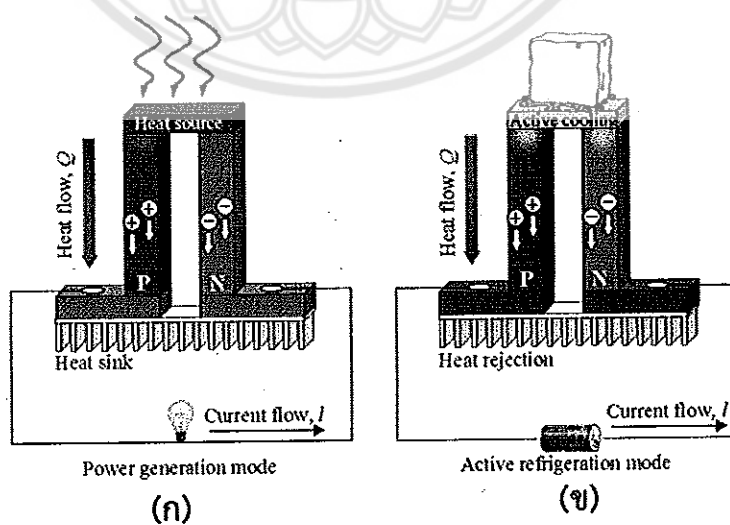
เมื่อ	Q_p	=	อัตราการคายความร้อนทิ้งที่รอยต่อ, W
	S	=	สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient), V/K
	I	=	กระแสไฟฟ้าที่ผ่านรอยต่อของวัสดุตัวนำ, A
	T	=	อุณหภูมิ, K

โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่เลือกมาใช้เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นมีอยู่สองชนิดคือวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้าชนิดพีและชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์เพลทีเยอร์ โดยลักษณะการต่อกันเหมือนกับเทอร์โมอิเล็กทริกแบบผลิตรกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เพื่อดูดกลืนความร้อนหรือสร้างความร้อนขึ้นในด้านหนึ่ง และนำความร้อนที่ได้ไปคายทิ้งอีกด้านหนึ่ง โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละด้านขึ้นอยู่กับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายกับชุดเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล



รูป 0.13 โดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ใช้สำหรับทำความเย็นหรือปั๊มความร้อน [15]

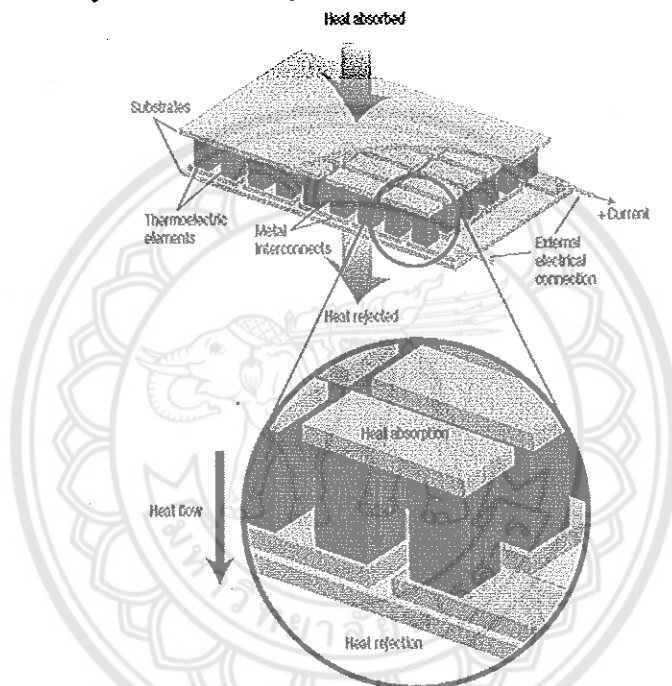
ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกประกอบด้วยปรากฏการณ์ซีเบคโดยผันความร้อนเป็นกระแสไฟฟ้า และปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ที่ผันกระแสไฟฟ้าเป็นความร้อนหรือความเย็นดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกประกอบไปด้วยวัสดุกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็นมาต่อกันแบบอนุกรม โดยรูป 2.14(ก) แสดงการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตไฟฟ้าจากความร้อน และรูป 2.14(ข) แสดงการทำงานแบบทำความเย็นหรือปั๊มความร้อน



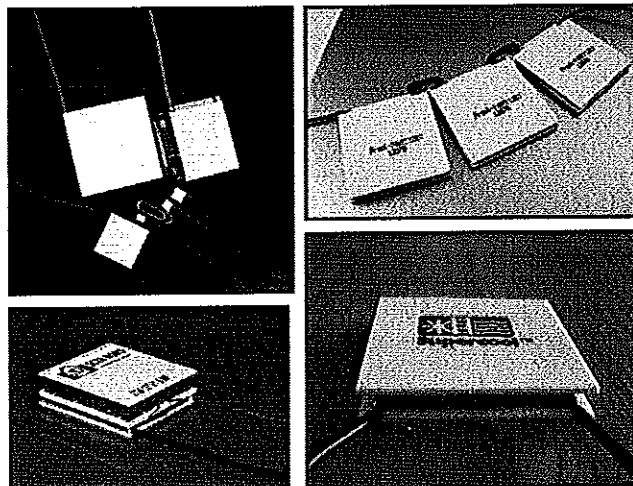
รูป 0.14 (ก) โดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบผลิตรกระแสไฟฟ้า และ (ข) แบบทำความเย็นหรือแบบปั๊มความร้อน

2.3.2 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module)

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประกอบด้วยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก 2 ชนิด คือชนิดเอ็นและชนิดพี โดยนำวัสดุทั้ง 2 ชนิด มาต่อกันแบบอนุกรมเป็นคู่ๆ สลับกัน และมีขั้วไฟฟ้าโลหะเชื่อมต่อทั้งคู่เข้าด้วยกัน แต่ละคู่ที่ต่อกันมีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมทางไฟฟ้าตั้งแต่ตัวแรกถึงตัวสุดท้าย ที่ด้านบนและด้านล่างของโลหะเชื่อมต่อถูกประกบด้วยแผ่นเซรามิก เมื่อนำมาต่อเข้ากับโหลด (Load) หากมีกระแสไฟฟ้าไหลก็ทำให้ครบวงจรพอดี ปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลผลิตได้จากความต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นด้านบน (ดูดกลืนความร้อน) และด้านล่าง (คายความร้อน) ขึ้นอยู่กับจำนวนคู่ของเอ็น-พี ในโมดูลนั้น ดังแสดงในรูป 2.12 และ 2.13



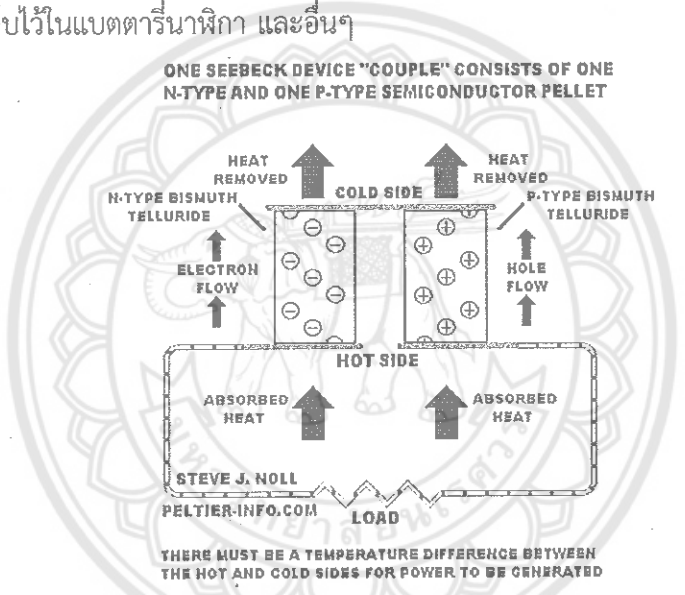
รูป 0.15 ไดอะแกรมของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่แสดงการไหลของประจุภายในตัววัสดุที่สามารถใช้งานได้ทั้งระบบความเย็นและผลิตกระแสไฟฟ้า [16]



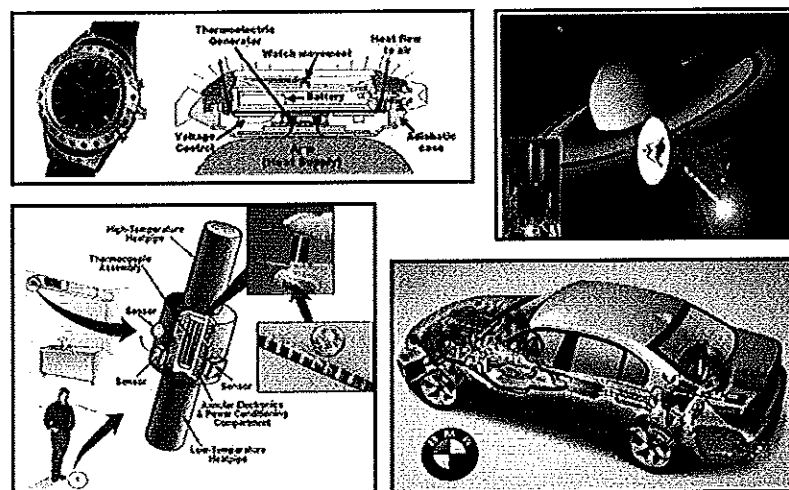
รูป 0.16 เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่สามารถใช้งานได้ทั้งระบบความเย็นและผลิตกระแสไฟฟ้า

การประยุกต์ใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้

1) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า การประยุกต์ใช้งานเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าใช้หลักการของปรากฏการณ์ซีเบคของการผันพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือการผันความร้อนที่ถ่ายโอนจากด้านร้อนสู่ด้านเย็นเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยนำเทอร์โมอิเล็กทริกมาเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งความร้อนหรือแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง เมื่อเทอร์โมอิเล็กทริกด้านร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนอิสระเกิดการเคลื่อนที่จากด้านร้อนมายังด้านเย็น และในส่วนของวัสดุกึ่งตัวนำชนิดพี โฮลอิสระเสมือนเคลื่อนที่จากด้านร้อนมายังด้านเย็นเช่นเดียวกัน จนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าจากการถ่ายโอนของประจุระหว่างขั้วทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.17 การใช้งานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในปัจจุบันเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้านั้นมีหลากหลายดังรูปที่ 2.18 เช่นการผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งจากท่อไอเสียรถยนต์ ความร้อนจากร่างกายมนุษย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเก็บไว้ในแบตเตอรี่นาฬิกา และอื่นๆ

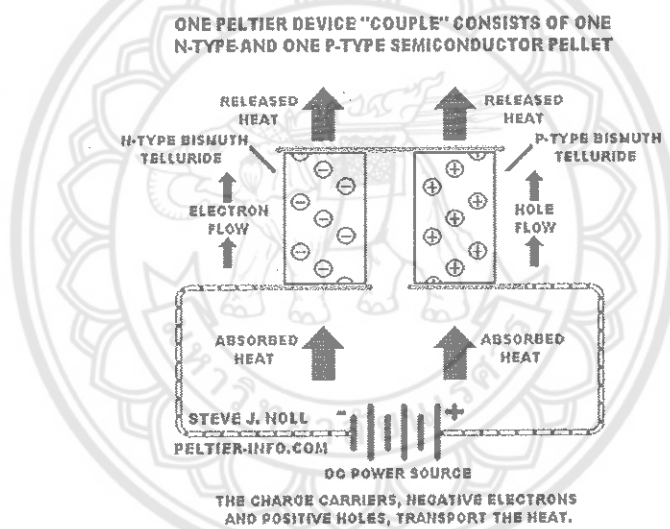


รูป 0.17 ไดอะแกรมการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการผลิตกระแสไฟฟ้า ที่มา: <http://www.peltier-info.com/photos.html>

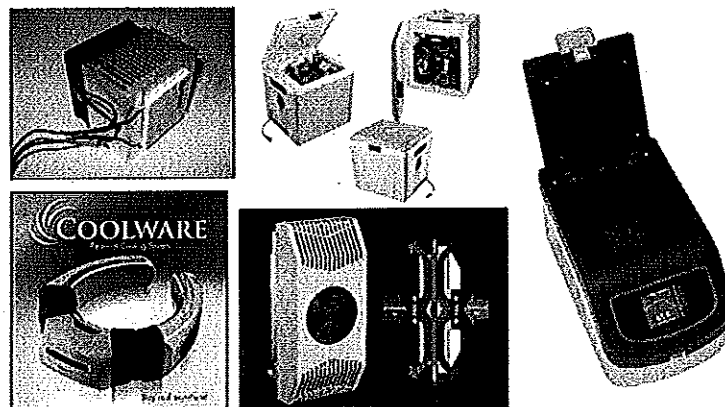


รูป 0.18 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการผลิตกระแสไฟฟ้า

2) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อทำความเย็นหรือปั๊มความร้อน การประยุกต์ใช้งานเพื่อทำความเย็นหรือปั๊มความร้อนนั้นใช้หลักการของปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปมีผลทำให้อิเล็กตรอนในวัสดุชนิดเอ็นเคลื่อนที่สวนทางกับทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้า และในทางกลับกันโฮลในวัสดุชนิดพีถูกเหนี่ยวนำให้เคลื่อนที่ตามกระแสไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลนั้นมีการนำความร้อนมาด้วยจนทำให้เกิดด้านหนึ่งร้อนและด้านหนึ่งเย็น ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.19 การใช้งานอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อทำความเย็นและปั๊มความร้อนนั้นมีหลายอย่างด้วยกันเช่น การประยุกต์ใช้กับตู้เย็นแบบพกพา อุปกรณ์ช่วยระบายความร้อนในคอมพิวเตอร์ เครื่องปรับอากาศแบบพกพาที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ หรือต่อเข้ากับสาย USB หรือใช้กับไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไป เครื่องทำความเย็นสำหรับเก็บยาวัคซีนหรือตัวอย่างต่างๆ ที่ต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีความสะดวกในการเคลื่อนย้ายหรือพกพา เนื่องจากมีขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 2.20 และในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ทำความร้อนและความเย็นเพื่อปรับอุณหภูมิภายในบ้านโดยมีการใช้งานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น



รูป 0.19 ไดอะแกรมการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการทำความเย็นและปั๊มความร้อน
ที่มา: <http://www.peltier-info.com/photos.html>



รูป 0.20 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลในการทำความเย็นและปั๊มความร้อน

2.3.3 ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric efficiency)

เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลประกอบไปด้วยวัสดุ 2 ชนิด ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น คือ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกชนิดเอ็นและพี การคำนวณหาค่า ZT โดยไม่คำนึงถึงค่าความต้านทานที่รอยต่อของวัสดุทั้งสองกับโลหะที่ใช้เชื่อมต่อ และผลจากการแผ่รังสีความร้อนที่เกิดขึ้นนั้น สามารถคำนวณบนพื้นฐานของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ดังสมการที่ 2.4

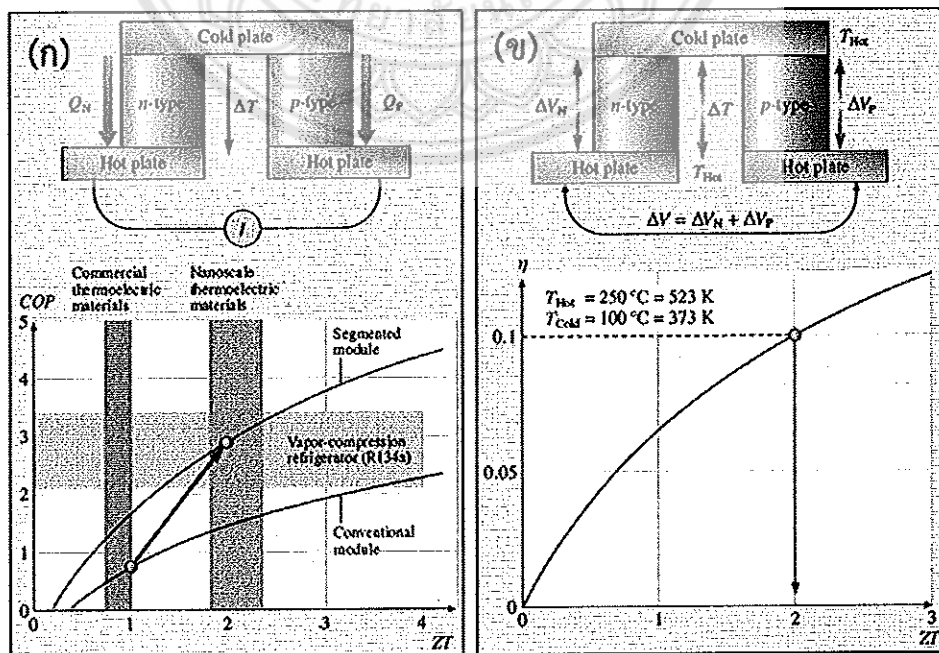
$$ZT = \frac{(S_p - S_n)^2 T}{(\rho_p \kappa_p)^{1/2} + ((\rho_n \kappa_n)^{1/2})} \tag{0.4}$$

- โดยที่ S_p และ S_n = ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของวัสดุชนิดพีและเอ็น ตามลำดับ, V/K
- ρ_p และ ρ_n = ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุชนิดพีและเอ็น ตามลำดับ, $\Omega \cdot m$
- κ_p และ κ_n = ค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุชนิดพีและเอ็น ตามลำดับ, W/(m·K)

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance, COP) ของระบบทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11 และค่าสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะทำความเย็นคำนวณได้จาก สมการที่ 2.5 และรูปที่ 2.21(ก) ดังนี้

$$COP_{max} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \frac{\sqrt{1+ZT} - (T_H/T_C)}{\sqrt{1+ZT} + 1} \tag{0.5}$$

โดยที่ T_C และ T_H คือ อุณหภูมิด้านเย็นและด้านร้อน ตามลำดับ, K



รูป 0.21 (ก) การหาค่า COP และค่า COP เปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (ข) การหาค่า η ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และ ความสัมพันธ์ของ η กับค่า ZT [17]

ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกในการผลิตกระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (W) ทหารด้วยอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิ (Q_H) ที่ผนังด้านร้อน โดยค่า Q_H มีค่าเป็นบวกเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อนไปที่ครีบถ่ายเทความร้อน (heat sink) แสดงในสมการที่ 2.6 และรูปที่ 2.21(ข) การหาค่า η ของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และความสัมพันธ์ของ η กับค่า ZT จากสมการที่ 2.6 พบว่าค่า η เป็นฟังก์ชันกับค่า $(1+ZT_m)^{1/2}$ และค่า η มีค่าเข้าใกล้กับค่าประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนท์ เมื่อค่า ZT มีค่าเป็นอนันต์ (infinity)

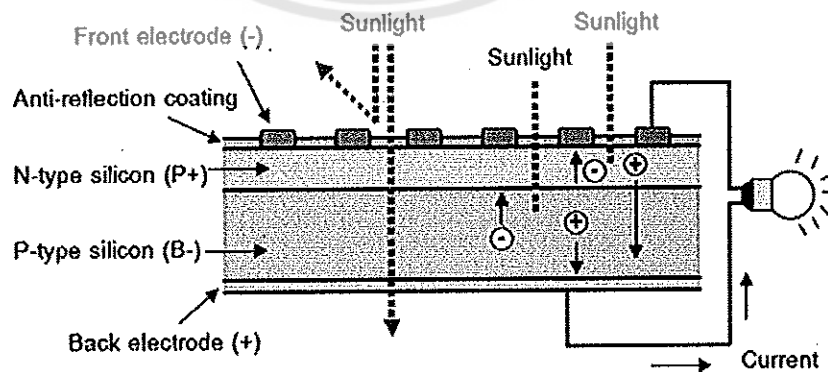
$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \left(\frac{\sqrt{1 + ZT_M} - 1}{\sqrt{1 + ZT_M} + (T_C/T_H)} \right) \quad (0.6)$$

โดยที่ T_C และ T_H = อุณหภูมิด้านเย็นและด้านร้อน ตามลำดับ, K
 T_M = อุณหภูมิเฉลี่ย, K

2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cells)

2.4.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

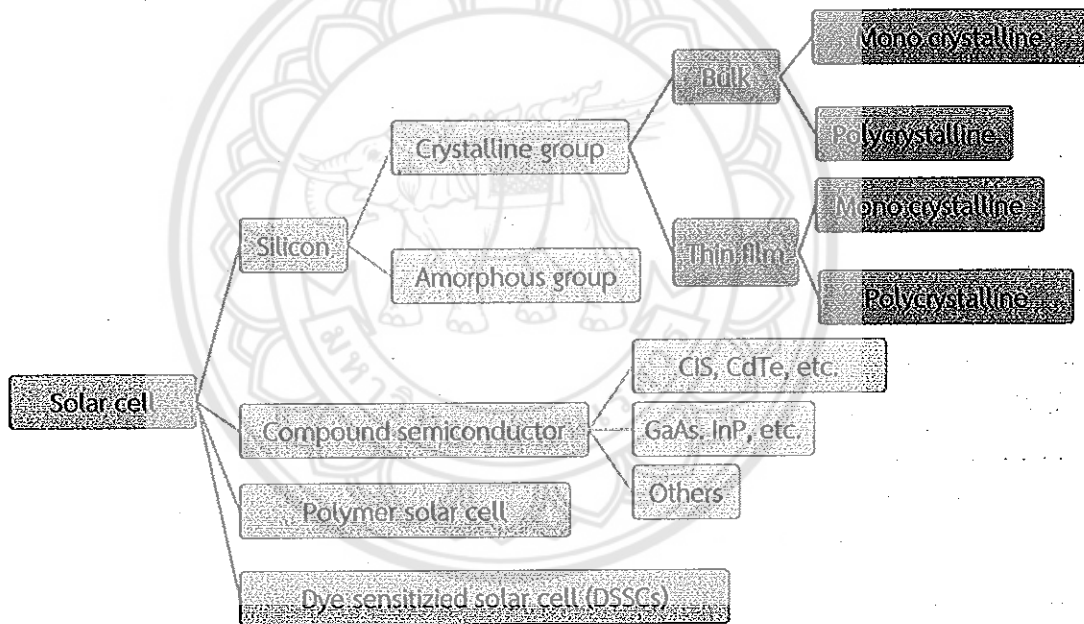
เซลล์แสงอาทิตย์เป็นเซลล์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ โดยโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับความนิยมสูงสุดได้แก่ รอยต่อพีเอ็น (p-n) ของสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีราคาถูกและมีมากที่สุดในธรรมชาติ หลักการทำงานพื้นฐานคือ เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงอาทิตย์ทำให้เกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าชนิดประจุลบคือ อิเล็กตรอน และประจุบวก คือ โฮล ขึ้นภายในโครงสร้างรอยต่อ p-n และบริเวณรอยต่อนี้เองทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อแยกอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วลบและแยกโฮลให้ไหลไปทางขั้วบวก ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์แบบกระแสตรงขึ้นที่ขั้วทั้งสอง และเมื่อมีการเชื่อมต่อระหว่างขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนในวงจร [18,19] ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูป 0.22 โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์
 ที่มา: <http://www3.egat.co.th/re/solarcell/solarcell.htm>

2.4.2 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน และสารประกอบชนิดอื่นๆ เช่น แกลเลียมเซไนด์ (GaAs) และ แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) เป็นต้น ส่วนอีกสองประเภทอยู่ในขั้นของการพัฒนาในห้องวิจัย เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่สูง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน โดยถูกคาดหวังว่าจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับ 2 ประเภทแรก คือ เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทพอลิเมอร์และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye sensitized solar cells) ดังแสดงในรูปที่ 2.23 กลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอนสามารถ แบ่งตามลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นเป็น 2 แบบได้แก่แบบที่อยู่ในรูปของผลึก (Crystal) และแบบที่ไม่เป็นรูปผลึก (Amorphous) แบบที่เป็นรูปผลึกยังสามารถแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ชนิด คือชนิดเป็นก้อนผลึก (Bulk) และชนิดฟิล์มบาง (Thin film) เซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดก้อนผลึก ยังแบ่งออกเป็นชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Mono Crystalline Silicon Solar Cell) และชนิดผลึกรวมซิลิคอน (Poly Crystalline Silicon Solar Cell) [18,19]



รูป 0.23 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Amorphous มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ แต่มีข้อดีคือเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไวแสงมากที่สุด สามารถรับแสงที่ความหนาแน่นต่ำๆ ได้ดีเช่นในพื้นที่ที่มีเมฆหมอก ฝุ่นละออง มีฝนตกชุก เป็นต้น รวมถึงแสงจากหลอดไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ดีอีกด้วย เซลล์ชนิดนี้นิยมใช้กันมากสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กต่างๆ เช่น เครื่องคิดเลขนาฬิกาหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็ก เป็นต้น สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ Crystalline เป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ในรูปของผลึกที่ทำให้เป็นแผ่นฟิล์ม ชั้นบางๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือแบบ Mono (Single) crystalline หรือแผงชนิดผลึกเดี่ยวและแบบ Poly crystalline (Multi crystalline) หรือผลึกผสม เซลล์

แสงอาทิตย์ทั้งสองชนิดนี้มีการใช้งานมากที่สุด โดยเซลล์แสงอาทิตย์ Mono crystalline มีประสิทธิภาพดีกว่าแต่ราคาแพงกว่าแบบ Poly crystalline เล็กน้อย อายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ชนิดนี้ มีการใช้งานยาวนานกว่า 20 ปี มีความทนทาน ใช้พื้นที่น้อย มีน้ำหนักเบา แต่มีข้อจำกัดคือประสิทธิภาพการทำงานลดลงอย่างมากเมื่อมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

ตาราง 0.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด

ชนิด	วัสดุเซลล์แสงอาทิตย์	ประสิทธิภาพ (%)
Thin Film	Amorphous silicon (a-Si)	4-9
	Cadmium telluride (CdTe)	6-9
	Copper indium gallium selenide (CIS or CIGS)	9-10.5
	Organic Cells	3-4
Mono-crystalline Si	Sc-Si	10-16
Multi-crystalline Si	Mc-Si	10-14.5

ที่มา: System integration for optimal production output of solar farms, Schneider Electric Thailand, 2553

2.4.3 การคำนวณหาขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์

การคำนวณหาขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ นั้น จำเป็นต้องทราบข้อมูลเบื้องต้นดังต่อไปนี้

- 1.) ทราบภาระทางพลังงานไฟฟ้าต้องการ (Energy Demand)
- 2.) ทราบข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่นั้นๆ (Solar Radiation)
- 3.) ทราบค่า Quality Factor of system ดังแสดงในตารางที่ 2.4

สมการที่ 2.7 เป็นการคำนวณหาขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทราบข้อมูลเบื้องต้นแล้ว โดยค่า Quality Factor of system แสดงในตารางที่ 2.4 แบ่งตามลักษณะการประยุกต์เซลล์แสงอาทิตย์

$$P_{peak} = \frac{E_{el} \cdot I_{STC}}{E_{glob} \cdot Q} \quad (0.7)$$

- เมื่อ P_{peak} คือ ขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
- E_{el} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ภาระทางไฟฟ้าต้องการ (kWh/day)
- E_{glob} คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบต่อพื้นที่ 1 m² (kWh/day)
- Q คือ Quality Factor of system
- I_{STC} คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m²)

ตาราง 0.4 ค่า Quality Factor of system

Component/System	Quality Factor of system
PV module (Crystalline)	0.85 - 0.95
PV array	0.80 - 0.90
PV system (Grid-connected)	0.60 - 0.75
PV system (Stand-alone)	0.10 - 0.40
Hybrid system (PV-Diesel)	0.40 - 0.60

ที่มา: นิพนธ์ เกตุจ้อย. (2554). เอกสารประกอบการสอนรายวิชาการระบบโฟโตโวลเทอิก. หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต. สาขาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร.

การคำนวณประสิทธิภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (System efficiency) สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.8

$$\eta_{PV} = \frac{E_{PV}}{H_i A_A} \quad (0.8)$$

- เมื่อ η_{PV} คือ ประสิทธิภาพของระบบแสงอาทิตย์
 E_{PV} คือ พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกใช้โดยภาระทางไฟฟ้า (kWh)
 H_i คือ พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m²)
 A_A คือ พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m²)

2.5 ระบบสะสมความร้อน (Thermal energy storage)

การเก็บสะสมพลังงาน ในรูปของพลังงานความร้อนแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ การเก็บรักษาพลังงานความร้อนแบบสัมผัส (sensible heat) โดยใช้ตัวกลางที่เป็นของแข็ง เช่น ก้อนหิน หรือของเหลว เช่น น้ำ การเก็บรักษาในรูปของความร้อนแฝง (latent heat) โดยความร้อนถูกสะสมในสารตัวกลางโดยมีการเปลี่ยนเฟส และเก็บรักษาในรูปของพลังงานเคมี (chemical energy) ซึ่งพลังงานความร้อนจะถูกนำมาใช้เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมี

การพิจารณาเลือกประเภทของสารตัวกลางในการเก็บสะสมพลังงาน ประกอบด้วย

- 1) ความจุความร้อน คือความสามารถของสารตัวกลางในการเก็บสะสมพลังงานความร้อน สารใดที่มีความจุความร้อนสูงหรือขนาดปริมาตรของสารตัวกลางมีปริมาตรน้อยทำให้ต้องมีขนาดกะทัดรัด
- 2) อุณหภูมิทำงาน ในบางครั้งเรียกว่าอุณหภูมิของการเก็บรักษาความร้อน การเลือกสารตัวกลางที่เหมาะสม อุณหภูมิในการประจุ (charge) พลังงานความร้อน และอุณหภูมิในการจ่ายพลังงานความร้อนไปใช้ (discharge) ควรต้องอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ

- 3) ความสามารถประจุพลังงานและจ่ายพลังงานออกมาได้เร็ว ความเสถียรโดยไม่เสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อมีการใช้งานเป็นประจำ และสมรรถนะในการประจุและจ่ายพลังงานออกมาใช้ค่อนข้างคงที่
- 4) มีพลังงานความร้อนสูญเสียสู่สิ่งแวดล้อมต่ำ
- 5) ไม่กักความร้อน ไม่เป็นพิษ หาง่าย และราคาถูก

2.5.1 การเก็บสะสมพลังงานความร้อนในรูปความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage)

- 1.) ตัวกลางที่ใช้ในการเก็บรักษาความร้อน ต้องเลือกตัวกลางให้เหมาะสม ให้มีขนาดกะทัดรัด โดยที่สามารถเก็บรักษาพลังงานความร้อนได้เป็นปริมาณมากและมีการสูญเสียความร้อนต่ำ
- 2.) อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน ซึ่งทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากแหล่งที่มาของความร้อนไปยังตัวกลางที่ใช้เก็บรักษาความร้อน และถ่ายเทออกจากตัวกลางเมื่อต้องการใช้ความร้อนนั้น
- 3.) ภาชนะสำหรับบรรจุและฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งจะคอยควบคุมอุณหภูมิของสารตัวกลางที่เก็บให้มีอุณหภูมิคงที่ เพื่อการใช้งาน

2.5.2 การสะสมพลังงานความร้อนในรูปความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage)

พลังงานความร้อนในรูปของความร้อนถูกสะสมในสารตัวกลางโดยอุณหภูมิของสารตัวกลางเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยสารตัวกลางเป็นของแข็งหรือของเหลว โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้น และเมื่อต้องการใช้พลังงาน พลังงานความร้อนที่สะสมไว้ถูกจ่ายออกและอุณหภูมิของสารตัวกลางที่ใช้ในการเก็บสะสมพลังงานมีค่าลดลง ในการเลือกสารตัวกลางในรูปความร้อนสัมผัสพิจารณาที่ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity) และช่วงอุณหภูมิใช้งาน ซึ่งมีผลต่อการเลือกขนาดของถังเก็บสะสมความร้อน สารตัวกลางที่นิยมใช้เมื่ออุณหภูมิใช้งานไม่สูงมากนัก ($<150^{\circ}\text{C}$) ได้แก่ น้ำและก้อนกรวด เนื่องจากมีราคาถูก หาง่าย แต่ที่อุณหภูมิปานกลางหรืออุณหภูมิสูงมักจะใช้น้ำมันที่ทนอุณหภูมิสูง (heat transfer oil)

2.5.3 การสะสมพลังงานในรูปความร้อนแฝง (Latent heat storage)

การเก็บสะสมพลังงานแบบนี้อยู่ในรูปความร้อนแฝง โดยนำพลังงานความร้อน มาให้สารตัวกลางเปลี่ยนสถานะ ส่วนใหญ่อยู่ในลักษณะเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลว และเมื่อต้องการนำพลังงานความร้อนมาใช้งาน มีของไหลดึงความร้อนจากสารตัวกลาง ซึ่งเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลับคืนเป็นของแข็ง สารทำงานที่นิยมใช้กับชุดเก็บสะสมความร้อนแบบนี้ ได้แก่ พาราฟิน และซีฟิ่งต่างๆ ข้อดีของการเก็บสะสมความร้อนในรูปแบบความร้อนแฝง คือมีขนาดกะทัดรัด เพราะความร้อนแฝงของสารทั่วไป มักมีค่าความร้อนสัมผัสสูงมาก

วิธีการเก็บสะสมพลังงานความร้อนมีหลายรูปแบบและวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การเปลี่ยนสถานะของสารทำงาน เช่น น้ำ เกลือ ซีฟิ่งพาราฟิน การสะสมพลังงานทำได้ด้วยการให้ความร้อนแก่สารทำงานที่มีสถานะเป็นของแข็ง จนถึงจุดที่หลอมเหลวของสารนั้น สารนั้นจะเปลี่ยนเป็น

ของเหลว และเก็บสะสมพลังงานความร้อนไว้ในรูปของความร้อนแฝง (Latent Heat) เมื่อเราต้องการความร้อน ก็ใช้วิธีการย้อนกลับ คือ การทำให้มีการถ่ายเทความร้อนออกจากสารสู่แหล่งที่เราต้องการ พลังงานความร้อนจนสารนั้นกลับมาเป็นสถานะของแข็ง อุณหภูมิของสารขณะเปลี่ยนสถานะคงที่ ทำให้การควบคุมการทำงานง่าย [20] ตัวอย่างของคุณสมบัติของสารสะสมความร้อนแสดงในตารางที่ 2.5

คุณสมบัติที่ดีของการเลือกสารที่นำมาใช้งาน ต้องมีคุณสมบัตินี้

- ราคาค่าใช้จ่ายในการสั่งนำมาใช้ไม่สูง
- ในการเปลี่ยนสถานะต้องมีค่าความร้อนแฝง (Latent Heat) สูง คือ มีการเก็บสะสมพลังงานความร้อนไว้ได้มาก
- หาง่ายและมีปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการ
- สามารถเกิดกระบวนการย้อนกลับได้หลายรอบ โดยที่จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพลดลง
- การเตรียมสารทำได้ง่าย
- เป็นสารที่ไม่เกิดอันตราย เช่น ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟง่าย ไม่เกิดปฏิกิริยากัดกร่อน
- สามารถเก็บไว้ในภาชนะที่ส่งผ่านความร้อนเข้าออกได้

ตาราง 0.5 คุณสมบัติของสารสะสมพลังงานความร้อน

สารเก็บสะสมพลังงาน	ช่วงอุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	ค่าความร้อนแฝง (kJ/kg)
น้ำ	0-100	0	335
ซีเมนต์พาราฟิน	0-100	20-60	140-160
เกลือไฮเดรต	0-100	30-50	170-270

ระบบสะสมพลังงานความร้อนที่ไม่ต้องการอุณหภูมิการทำงานของระบบสูงมากนัก อย่างเช่น เครื่องฟักไข่ ที่ต้องการอุณหภูมิที่ 36-38°C ดังนั้นซีเมนต์พาราฟินจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารตัวกลางในการสะสมพลังงานความร้อนเพราะ ข้อดีของซีเมนต์พาราฟิน คือ นอกจากจะมีราคาถูกแล้ว ยังมีคุณสมบัติทางเคมีค่อนข้างคงที่ เปลี่ยนสถานะกลับไปกลับมาได้หลายครั้งโดยที่ประสิทธิภาพการสะสมความร้อนยังเท่าเดิม เก็บสะสมพลังงานความร้อนไว้ในปริมาณสูงเนื่องจากค่าความร้อนแฝงในการหลอมละลายสูง และคุณสมบัติอื่นๆอีกมากมาย แต่ข้อเสียคือ มีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยากับทองแดง แต่สามารถแก้ไขได้โดยการ เพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน คือ การติดครีบบ (Fin) เพิ่มเข้าไปที่ถังเก็บสะสมความร้อน

การหาปริมาณความร้อนที่สารตัวกลางประจุได้คำนวณจากสมการที่ 2.9 โดยมีการเปลี่ยนสถานะของสารตัวกลางจากของแข็งกลายเป็นของเหลว ในกรณีของการพิจารณาหาปริมาณ

ความร้อนที่สารตัวกลางจ่ายได้ สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.10 โดยมีการจ่ายความร้อนเป็น 2 ขั้นตอนคือ ในรูปแบบของความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัส

$$Q_c = m_{\text{paraffin}} \left(\int_{T_1}^{T_f} C_{ps} dT + \Delta H_f + \int_{T_f}^{T_2} C_{pl} dT \right) \quad (0.9)$$

- เมื่อ Q_c = ความร้อนทั้งหมดที่ประจุได้
 m_{paraffin} = มวลของสารตัวกลางที่เก็บความร้อน
 C_{ps}, C_{pl} = ความร้อนจำเพาะของสารตัวกลาง เมื่อเป็นของแข็งและของเหลว ตามลำดับ
 ΔH_f = ความร้อนแฝงในการหลอมเหลวของสารตัวกลาง
 T_1, T_2 = อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดของการเปลี่ยนแปลง ตามลำดับ
 T_f = อุณหภูมิหลอมเหลวของสารตัวกลาง

$$Q_d = m_{\text{paraffin}} \left(\int_{T_f}^{T_2} C_{pl} dT + \Delta H_f + \int_{T_1}^{T_f} C_{ps} dT \right) \quad (0.10)$$

- เมื่อ Q_d = ความร้อนทั้งหมดที่จ่ายได้
 m_{paraffin} = มวลของสารตัวกลางที่ใช้เก็บความร้อน
 C_{pl}, C_{ps} = ความร้อนจำเพาะของสารตัวกลาง เมื่อเป็นของเหลวและของแข็ง
 ΔH_f = ความร้อนแฝงในการหลอมเหลวของสารตัวกลาง
 T_1, T_2 = อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$)
 T_f = อุณหภูมิหลอมเหลวของสารตัวกลาง ($^{\circ}\text{C}$)

สำหรับการพิจารณาประสิทธิภาพรวมของระบบสะสมความร้อน คำนวณได้จาก สมการที่ 2.11

$$\eta_{\text{storage}} = \frac{mC_p(T - T_o)}{mC_p(T_{\infty} - T_o)} \quad (0.11)$$

- เมื่อ mC_p = ความจุความร้อนรวมของสารตัวกลางในระบบสะสมพลังงาน
 T, T_o = อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของสารตัวกลางในขณะที่มีการจ่ายความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{∞} = อุณหภูมิสูงสุดเมื่อสารตัวกลางได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสุดท้าย ($^{\circ}\text{C}$)

2.6 การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Economic evaluation)

การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต เป็นการประเมินต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดช่วงอายุการใช้งานของระบบที่ศึกษา ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ ค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ใน ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ตลอดจนค่าใช้จ่ายทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปล่อยสารพิษหรือมลพิษของกระบวนการต่างๆ ในระบบตลอดช่วงชีวิตของระบบนั้น ในการประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตมีการรวมต้นทุนทางสิ่งแวดล้อมเข้าไปด้วย การกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์ระบบ (Cost profile development) และการประเมินต้นทุน (Evaluation) เป็นวิธีการที่ผสมผสานกันระหว่างความรู้เชิงเศรษฐศาสตร์และความรู้เชิงวิศวกรรม โดยพิจารณาค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นในช่วงอายุการใช้งานของระบบหนึ่งๆ อันได้แก่ เงินลงทุนในการติดตั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ (Capital Cost) ค่าแรงในการติดตั้งระบบ (Labor and Installation Costs) ค่าบำรุงรักษาระบบ (Maintenance Costs) ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ (Running Costs) และค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนอุปกรณ์ในระบบ (Replacement Costs) รวมถึงการประเมินมูลค่าซากของเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ โดยมีการปรับค่าของเงินในแต่ละปีให้เป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Present value, NPV) การประเมินค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสามารถเขียนอธิบายให้อยู่ในรูปของสมการดังนี้ [21]

$$LCC = C_c + \sum_{n=1}^N \frac{C_m}{(1+i)^n} - \frac{SV}{(1+i)^N} \quad (0.12)$$

- เมื่อ C_c = เงินลงทุนเริ่มต้น (Initial capital cost) (บาท)
 C_m = ต้นทุนในการดำเนินการ (Operating cost) ค่าซ่อมบำรุง เชื้อเพลิงและอื่นๆ ในแต่ละปี (บาท)
 SV = มูลค่าซาก (Salvage value) ปีสุดท้ายของโครงการ (บาท)
 i = อัตราดอกเบี้ย (Interest rate) หรือ อัตราคิดลด (Discount rate)
 n = อายุการใช้งานโครงการ (Project period)
 N = จำนวนปีที่สิ้นสุดโครงการ (Year at the end of project)

สำหรับการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน (Payback period: PB) เป็นการคำนวณหาจุดคุ้มทุนว่าเมื่อมีการลงทุนแล้วจะใช้ระยะเวลากี่ปีในการคืนทุน โดยมีหน่วยวัดเป็นเวลาเช่น งวด เดือน และ ปี เป็นต้น โดยมีการพิจารณาจากการคำนวณหาระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิสะสมจากการดำเนินการมีค่าเท่ากับมูลค่าในการลงทุนทั้งหมด หรือจนกระทั่งผลตอบแทนสุทธิสะสมมีค่าเป็นบวก สมการที่ 2.13 แสดงการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนไต่ดังนี้

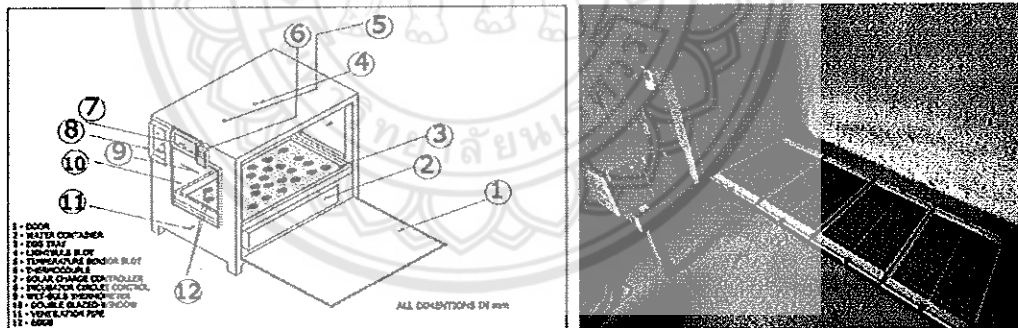
$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (PB)} = \frac{\text{มูลค่าในการลงทุนรวม}}{\text{ผลตอบแทนสะสมสุทธิรายปี}} \quad (0.13)$$



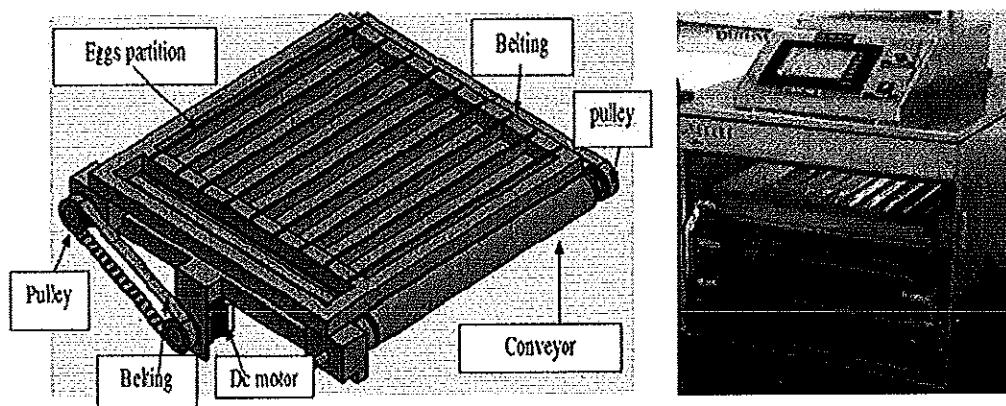
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature reviews)

Liu D. และคณะ (2558) ได้ทำการศึกษาภาระทางความร้อนและความเย็นของเครื่องฟักไข่ขนาดความจุ 38,400 ฟอง แบบเครื่องเดี่ยวและแบบรวม (Incubation module) ที่อุณหภูมิปกติสำหรับการฟักไข่ตลอดระยะเวลา 21 วัน ผลการทดลองพบว่าภาระทางความร้อนและความเย็นเป็นผลมาจากการเกิดความร้อนจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของไข่ โดยภาระความร้อนสูงสุดอยู่ที่วันแรกของการฟักไข่ เมื่อพิจารณาภาระที่ภาระความร้อนคงที่มีค่าภาระความร้อนเท่ากับ 1.5 kW สำหรับภาระความเย็นที่ต้องการของการฟักไข่มีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 18 ของการฟักไข่ โดยมีค่าเท่ากับ 9.7 kW โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องทั้งเครื่องแบบเดี่ยวและแบบรวม [22]

Mansaray K. G. และ Yansaneh O. (2558) รายงานผลการออกแบบและสร้างเครื่องฟักไข่ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และทำการทดสอบหาประสิทธิภาพการทำงาน สำหรับใช้ในพื้นที่ห่างไกลหรือชนบทของประเทศ Sierra Leone โดยส่วนประกอบหลักคือ ตู้ฟักไข่ ชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ และระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (รูปที่ 2.24) ผลการทดสอบพบว่าเครื่องฟักนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงของอุณหภูมิการฟักไข่คือ 36.8-37.9°C และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 67.3% อัตราการฟักไข่ออกมาเป็นตัวและความสมบูรณ์ของลูกไก่เท่ากับ 23.1 และ 43.3% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าอัตราการฟักไข่ออกเป็นตัวมีค่าต่ำเนื่องจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น สภาพอากาศที่มีเมฆมากในวันที่ 3 ของการฟักไข่ การเก็บรักษาไข่ การวางตำแหน่งไข่ในเครื่องฟักไข่และการเก็บรักษาไข่ เวลาและการสูญเสียพลังงานระหว่างการกลับไข่ เป็นต้น [23]



รูป 0.24 ไดอะแกรมส่วนประกอบและต้นแบบของเครื่องฟักไข่ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ [23]



รูป 0.25 ไดอะแกรมระบบ conveyer rotating ต้นแบบของเครื่องฟักไข่ [24]

Ramli M. B. และคณะ (2558) ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องฟักไข่ด้วยระบบการบังคับการไหลของอากาศ (Forced air system) และ conveyer rotating ที่สามารถใช้กับไข่ที่หลากหลายชนิดได้ (รูปที่ 2.25) มีการทดสอบเครื่องฟักไข่กับไข่นกกระทา ผลการทดสอบพบว่าเครื่องฟักไข่สามารถควบคุมอุณหภูมิการฟักไข่และความชื้นสัมพัทธ์ให้มีความเสถียรที่ 37.5°C และ $79.89\% \text{RH}$ การใช้ conveyer rotating ที่มุม 45° ให้มีสภาวะการฟักไข่ที่สอดคล้องกับการฟักไข่แบบธรรมชาติมากที่สุด โดยมีอัตราการฟักออกมากเป็นตัวเลขที่สูงเท่ากับ 94.17% การที่ระบบนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่แม่นยำเหมาะสมส่งผลให้ปริมาณการปนเปื้อนของแบคทีเรียน้อยลง [24]

เอกชัย สิงห์เดช และคณะ (2557) รายงานผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อนและแบบเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่า การควบคุมอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถทำอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการฟักไข่ คือ $36-38^{\circ}\text{C}$ และมีการแกว่งของอุณหภูมิในช่วงแคบๆ เมื่อเทียบกับตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่ามาตรฐานการฟักไข่และมีการแกว่งของอุณหภูมิในช่วงที่กว้างมากกว่า ตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมต่อการฟักไข่ในช่วง $75-80\%$ ได้ดีกว่าแบบขดลวดความร้อน การเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกใช้พลังงานไฟฟ้า 28.22 หน่วย ซึ่งน้อยกว่าตู้ฟักไข่ขดลวดความร้อนประมาณ 2.14 เท่า ลดค่าใช้จ่ายได้ 103.2 บาทต่อการฟักไข่หนึ่งรอบ หรือมีค่าใช้จ่ายลดลงคิดเป็น 53.4% นอกจากนี้ตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกให้อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานที่สูงกว่าตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อนประมาณ 1.4 เท่า ดังนั้นจากผลการทดลองด้านการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าและต้นทุนค่าใช้จ่ายในการฟักไข่หนึ่งรอบ รวมถึงการเปรียบเทียบอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานสามารถสรุปได้ว่าตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถนำมาใช้ทดแทนตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อนได้ [11]

ชัยณรงค์ ธรรมกุล (2551) ได้พัฒนาเครื่องฟักไข่โดยใช้ถังหมักก๊าซชีวภาพร่วมกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าอุณหภูมิของห้องฟักไข่เท่ากับ 38°C เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์รายชั่วโมงไม่น้อยกว่า 400 W/m^2 ต้องใช้เวลาในการสะสมความร้อน 2 ชั่วโมง ในถังเก็บ

น้ำที่มีอุณหภูมิ 41°C ซึ่งให้ความร้อนกับเครื่องฟักไข่ได้ประมาณ 13.5 ชั่วโมง ส่วนปริมาณก๊าซ 230 ลิตรต่อวัน สามารถทำงานได้ 6 ชั่วโมงต่อวัน เมื่อต้องการใช้เครื่องฟักไข่ 24 ชั่วโมง ต้องเพิ่มขนาดถังหมักก๊าซเป็น 400 ลิตร จึงสามารถทดแทนการใช้ไฟฟ้าในการฟักไข่ได้ 24 ชั่วโมง ที่ระยะเวลาการฟักไข่ 21 วัน [7]

อัศนัย ประทุมมิน (2550) ได้ทำการพัฒนาเครื่องฟักไข่โดยใช้ระบบน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์และประเมินประสิทธิภาพของระบบ ลักษณะทางกายภาพของระบบน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์มีหลักการทำงาน คือ ระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่ไหลผ่านท่อในแผงรับแสงอาทิตย์ เมื่อน้ำได้รับความร้อนเกิดการขยายตัวและไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำร้อน แล้วนำความร้อนในถังเก็บน้ำร้อนมาถ่ายเทให้กับเครื่องฟักไข่ ส่วนระบบไฟฟ้ามีการถ่ายเทความร้อนจากหลอดไฟซึ่งเป็นตัวให้ความร้อน หลังจากอุณหภูมิน้ำในถังเก็บประมาณ 40°C ชุดควบคุมทำการตัดต่อระบบไฟฟ้าภายในเครื่องฟักไข่ ให้เครื่องฟักไข่มีอุณหภูมิระหว่าง 36-38°C การพัฒนาเครื่องฟักไข่โดยใช้ระบบน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนจากแผงรับรังสีอาทิตย์มาจัดเก็บในถังเก็บน้ำร้อนแล้วยังนำมาผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้ในเครื่องฟักไข่ อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องฟักไข่เฉลี่ย 37.63°C อุณหภูมิภายในแผงรับแสงอาทิตย์เฉลี่ย 44.10°C อุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อนเฉลี่ย 46.72°C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 57.09% ซึ่งถือว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ผลของการฟักไข่ 100 ฟอง ไม่มีเชื้อ 9 ฟอง ฟักออกมาเป็นตัวได้ 71 ฟอง คิดเป็นร้อยละ 78% [5]

โชติวิทย์ ธัมโรดม (2549) ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยด้านการเก็บไข่ก่อนเข้าฟักและความชื้นสัมพัทธ์ในตู้ฟัก รวมทั้งรูปร่างและน้ำหนักของไข่ที่มีผลต่ออัตราการฟักออกเป็นตัว นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงสมรรถภาพการผลิตของลูกนกกระจอกเทศในระยะ 3 เดือนแรกเมื่อให้อาหารที่มีโปรตีนและเยื่อใยระดับต่างๆ โดยในส่วนของเครื่องฟักไข่ได้แบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ การทดลองที่ 1 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิห้องเก็บไข่ก่อนนำเข้าฟักกับระดับความชื้นสัมพัทธ์ของตู้ฟักที่มีผลต่ออัตราการฟักออกโดยแบ่งไข่จำนวน 482 ฟองออกเป็น 4 กลุ่ม ผลปรากฏว่าอุณหภูมิของห้องเก็บไข่ไม่มีผลต่ออัตราการฟักออกแต่การฟักไข่ในตู้ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำมีอัตราการฟักออกเป็นตัวสูงกว่าการฟักในตู้ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ส่วนการทดลองที่ 2 ไข่ไข่ 146 ฟอง ศึกษาหาระยะเวลาที่เหมาะสมของการเก็บไข่ก่อนนำเข้าฟักโดยเก็บไว้ในห้องปกติเป็นเวลา 4, 8, 12 และ 16 วัน จากนั้นนำไข่ทั้งหมดเข้าฟักในตู้ฟักที่มีอุณหภูมิ 36.4°C และความชื้นสัมพัทธ์ 25-35% ผลปรากฏว่าอัตราการฟักออกเป็นตัว (เฉลี่ย 76.6% ของไข่มีเชื้อ) ลดลง เมื่อเก็บไข่ไว้นานกว่า 11 วัน น้ำหนักลูกนกแรกเกิด (เฉลี่ย 841.4 ± 73.7 หรือเท่ากับ 61.3% ของน้ำหนักไข่) ให้ผลไม่ต่างกันไม่ว่าเก็บไข่ไว้นานกี่วันก็ตาม ผลการทดลองสรุปว่าถ้าจะเก็บไข่นกกระจอกเทศไว้ในห้องธรรมดาควรเก็บไว้ไม่เกิน 11 วัน การฟักควรใช้ตู้ฟักไข่ที่สามารถควบคุมความชื้นได้โดยให้อยู่ประมาณ 25% สำหรับรูปร่างของไข่ (ความกว้างและความยาวของฟองไข่) และน้ำหนักไข่ไม่มีผลต่อการฟักออกและน้ำหนักตัวของลูกนกแรกเกิดส่วนการเลี้ยงลูกนกกระจอกเทศในระยะ 3 เดือนแรกควรใช้อาหารที่มีโปรตีน 22% และมีเยื่อใยต่ำ (5%) [25]

แสงธิดา แสงดาวเรือง และคณะ (2548) ศึกษาผลของการใช้ตู้ฟักเทียบกับการใช้แม่ไก่ฟักไข่ และผลของการเลี้ยงโดยขังไว้ในคอก ให้ได้รับอาหารสำเร็จรูปจากการรวบรวมข้อมูล 1 ปี

พบว่าการใช้ตู้ฟักไข่มีอัตราการเกิดเฉลี่ยออกเป็นตัว 56.2% เปรียบเทียบกับแม่ไก่ฟักโดยการใช้ตู้ฟักใช้เวลาลดลง 20 วัน โดยแม่ไก่แต่ละตัวผลิตลูกไก่ได้เพิ่มจาก 8.4 เป็น 15 ชุด ลูกไก่เพิ่ม 31 ตัวต่อแม่ ดังนั้นควรส่งเสริมให้มีการใช้ตู้ฟักไข่อย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น [10]

พงศ์สวัสดิ์ สวัสดิภาพ (2546) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องฟักไข่ขนาดบรรจุ 36 ฟอง ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลและการระเหยน้ำผลการทดสอบอุณหภูมิภายในตู้ 36.5-38°C ความชื้นสัมพัทธ์ 60-75% เป็นอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่ในช่วงมาตรฐานของการฟักไข่เปอร์เซ็นต์การฟักเป็นตัว 72.22% และประหยัดไฟกว่าตู้ฟักไข่ชนิดขดลวดไฟฟ้าได้ 44 บาท ระยะเวลาคืนทุน 1.06 ปี ต่อการฟักไข่ 13 รุ่นต่อปี [9]

สันต์ สลัดยะนันท์ (2546) ศึกษาและทำการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับตู้ฟักไข่โดยใช้น้ำมันที่ใช้น้ำแล้วหลังจากการประกอบอาหารเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานให้กับตู้ฟักไข่ขนาด 144 ฟอง โครงสร้างทำจากตู้เย็น 5 ครัวฟุตที่เสียแล้ว ผลที่ได้คือค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่เหลือใช้จากการประกอบอาหารมีค่าระหว่าง 36,000-40,000 กิโลจูลต่อกิโลกรัม อุณหภูมิอากาศร้อนที่ส่งไปยังตู้ฟักไข่หลังจากเปิด Blower ชักฟักแล้วอยู่ที่ 35-45°C แต่การควบคุมอุณหภูมิทำได้ยากกว่าเครื่องฟักไข่ชนิดไฟฟ้าและอัตราของการฟักไข่อยู่ที่ประมาณ 63% น้อยกว่าเครื่องฟักไข่ไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ แต่การศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าค่าใช้จ่ายต่อปีของเครื่องฟักไข่ที่ออกแบบถูกกว่าเครื่องฟักไข่ชนิดไฟฟ้า อยู่ที่ 1,374 บาท/ปี ระยะเวลาคืนทุน 2.45 ปี IRR อยู่ที่ 87.71% [8]

ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล (2544) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องฟักไข่พลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 720 ฟอง สำหรับพื้นที่ห่างไกล โดยมีหลักการการทำงานของเครื่องคือ ใช้ความร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแล้วใช้พัดลมเป็นตัวดึงความร้อนเข้าสู่เครื่องฟักไข่ ให้ความชื้นด้วยวิธีระเหยตามธรรมชาติ การควบคุมอุณหภูมิและการกลับไข่เป็นแบบอัตโนมัติใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ ซึ่งได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 53 วัตต์ จำนวน 6 แผง โดยมีถังน้ำขนาด 130 ลิตรสำหรับเก็บสะสมความร้อน อุณหภูมิของน้ำร้อนใช้งานประมาณ 50-70°C ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน 33.3% ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนก่อนนำน้ำร้อนไปใช้งาน 35.5% ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนขณะนำน้ำร้อนไปใช้ในการฟักไข่ 23.9% ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า ความเข้มรังสีอาทิตย์ประมาณ 100 W/m² ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ 4% และที่ความเข้มรังสีอาทิตย์มากกว่า 400 W/m² ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ 6% อุณหภูมิแผง 45°C อุณหภูมิภายในเครื่องฟักไข่ 37-39°C ความชื้น 60-80% การฟัก 70% [6]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงประโยชน์หลายอย่างในตัวของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก ทั้งด้านที่สามารถใช้ในการผลิตความร้อน ความเย็นและยังสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ด้วย แต่ข้อเสียก็มีเช่นการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นยังได้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยมาก แต่ปัจจุบันก็เริ่มเป็นที่นิยมกันมากขึ้น ส่วนในด้านการผลิตความร้อนนั้นเทอร์โมอิเล็กทริกเหมาะสำหรับที่นำไปใช้กับงานที่ต้องการการควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำได้เพราะเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เราต้องการได้เป็นอย่างดี และไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่จึงไม่มีเสียงดังรบกวน เหมาะสำหรับการนำมาให้ความร้อนกับตู้ฟักไข่ นอกจากนี้แผงเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมีประสิทธิภาพการทำความร้อนที่ดีด้วย เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นปั๊มความร้อน (Heat pump) ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่นำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานความร้อนให้กับตู้ฟักไข่โดยตรงสำหรับการควบคุมอุณหภูมิในช่วงของการ

ฟักไข่ในตอนกลางวัน โดยร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้ขจัดความร้อนเป็นแหล่งจ่ายความเพื่อเก็บความร้อนไว้ใช้ในตอนกลางคืน พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผงเทอร์โมอิเล็กทริกและขจัดความร้อนนั้นได้มาจากการเชื่อมต่อฟักไข่เข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้สนับสนุนและผลักดันการใช้พลังงานทดแทนและช่วยเหลือเกษตรกรในเขตชนบทห่างไกลที่ระบบไฟฟ้าพื้นฐานยังเข้าถึงได้ยาก



บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบการทำงานของเครื่องฟักไข่ที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อน เพื่อดำเนินการเก็บข้อมูลระยะเวลา 21 วัน หรือ 1 รอบ การฟักไข่ และบันทึกผลภายใต้สภาวะที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และการสะสมอุณหภูมิของพาราฟินโดยตู้ฟักไข่ที่ใช้ในการศึกษา ได้ถูกออกแบบและสร้างให้มีขนาดเท่ากับตู้ฟักไข่ในท้องตลาด และปรับให้เหมาะสมกับสภาวะของระบบที่ต้องการศึกษา

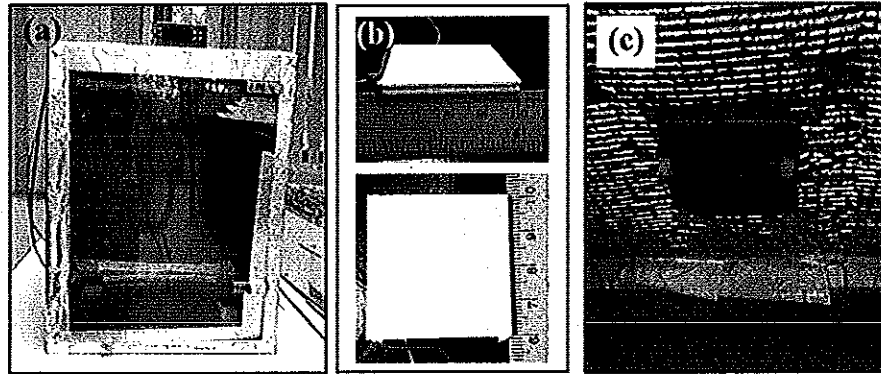
3.1 เครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric egg Incubator, TEI)

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้ออกแบบเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกให้มีขนาดความจุการฟักไข่เท่ากับ 24 ฟอง เทียบเท่าเครื่องฟักไข่แบบขดลวดความร้อนที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน การควบคุมอุณหภูมิ และความชื้น ตลอด 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 21 วัน ตารางที่ 3.1 แสดงข้อกำหนดการออกแบบและสร้างเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก

ตาราง 0.1 ข้อกำหนดการสร้างตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกเปรียบเทียบกับตู้ฟักไข่ขดลวดความร้อน

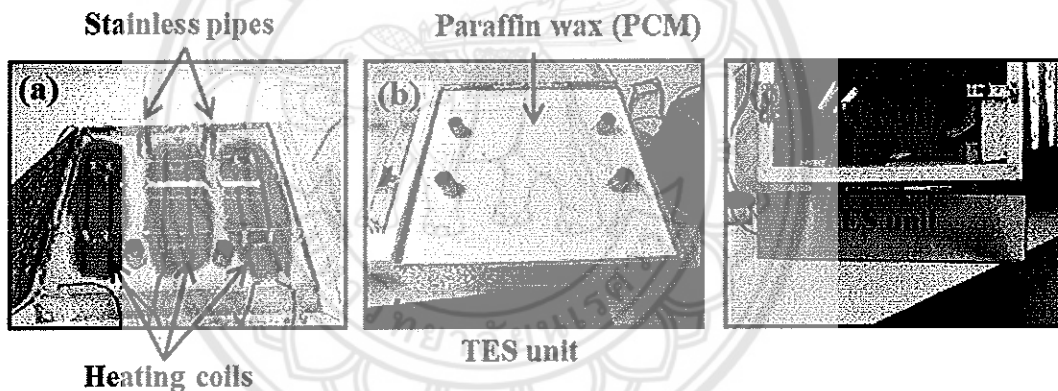
ข้อกำหนด	ตู้ฟักไข่ขดลวดความร้อน	ตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก
ขนาดตู้ฟักไข่ กว้าง×ยาว×สูง (เมตร)	0.35×0.35×0.44	0.35×0.35×0.44
แหล่งกำเนิดความร้อน	ฮีตเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 120 W	เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (TEC1-12710) และระบบสะสมพลังงานความร้อน (Paraffin wax)
พลังงานไฟฟ้า	ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V	ไฟฟ้ากระแสตรง จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างส่วนที่เป็นตู้ของเครื่องฟักไข่ทำจากไม้อัดที่มีความหนา 10 มม. มาประกอบให้มีขนาด 0.35 × 0.35 × 0.44 ม. โดยภายนอกของเครื่องฟักไข่มีการติดฉนวนชนิดโพลีสไตรีน (Polystyrene insulator) ที่มีความหนา 3 มม. เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่และลดการสูญเสียความร้อน ดังแสดงในรูป 3.1a เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้รุ่น TEC1-12710 จากบริษัท Thermanamic Electric Co., Ltd. ประเทศจีน ที่มีขนาด 40 × 40 × 3.4 มม. (รูป 3.1b) โดยมีข้อมูลของการใช้งานดังนี้ 1) สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุด = 79°C 2) แรงดันสูงสุด = 17.5 V 3) กระแสสูงสุด = 10.1 A 4) ความต้านทานกระแสสลับ = 1.27-1.49 Ω รูปที่ 3.1c แสดงการติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเข้ากับด้านบนของตู้ฟักไข่ และพัดลมขนาด 12 V และ 10 A สำหรับเป็นแหล่งความร้อนสำหรับการทำงานของเครื่องฟักไข่ในช่วงเวลากลางวัน



รูป 0.1 (a) ตู้ฟักไข่ขนาด $40 \times 40 \times 3.4$ มม. (b) แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (TEC1-12710) และ (c) การติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก

3.2 ระบบสะสมความร้อน (Thermal energy storage, TES)



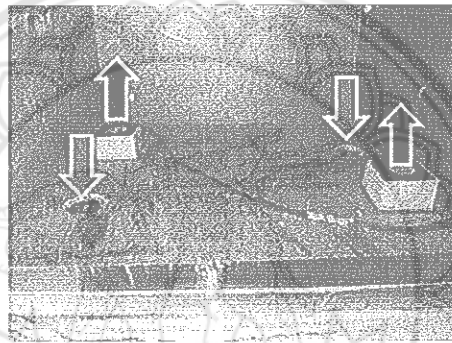
รูป 0.2 ระบบสะสมความร้อน (a) การประกอบขดลวดความร้อนและท่อนำความร้อน (b) การบรรจุพาราฟินในระบบสะสมพลังงานแบบเปลี่ยนสถานะ และ (c) การติดตั้งระบบสะสมความร้อนกับเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก

ระบบสะสมความร้อนมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการสะสมความร้อนไว้สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องฟักไข่ในตอนกลางคืน เนื่องจากมีต้นทุนถูกกว่าการใช้แบตเตอรี่มาประจุไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รวมถึงขนาด การบำรุงรักษาและอายุการใช้งาน

กล่องระบบสะสมความร้อนทำจากแผ่นสแตนเลสหนา 3 มม. มาพับเป็นกล่องขนาด $0.35 \times 0.35 \times 0.10$ ม. มีการติดตั้งขดลวดความร้อนจำนวน 3 เส้น ที่มีขนาด 1500 W โดยแต่ละเส้นนำมาต่อกันแบบขนานกัน ดังแสดงในรูป 3.2a มีการติดตั้งท่อนำความร้อนสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25.4 มม. จำนวน 2 ท่อ ดังรูป 3.2a และ 3.2b สำหรับสารทำงานแบบเปลี่ยนสถานะ (Phase change material) ในงานวิจัยนี้เลือกพาราฟิน ที่มีจุดหลอมเหลวที่ 70°C ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Latent heat of fusion) เท่ากับ 0.790 g/cm^3 ที่ 70°C โดยบรรจุพาราฟินปริมาณ 7 กิโลกรัม ลงในกล่องระบบสะสมความร้อน ซึ่งปริมาณนี้สอดคล้องกับภาระความร้อนของเครื่องฟักไข่

รวมถึงการใส่ในปริมาณที่มากเกินไปสำหรับการสำรองความร้อนในระบบสะสมความร้อนเพื่อใช้งานในเวลากลางคืน ดังรูป 3.2a และ 3.2b หลังจากนั้นนำชุดระบบสะสมความร้อนมาประกอบเข้ากับตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ดังรูป 3.2c สุดท้ายมีการหุ้มฉนวนใยหิน (Rockwool insulator) ที่ความหนา 40 มม. รอบระบบสะสมความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากระบบสู่สิ่งแวดล้อม

ภายในตู้ฟักไข่มีการติดตั้งพัดลมขนาด 12 V และ 10 A จำนวน 2 ตัว บริเวณปลายท่อนำความร้อนแสดนเลส โดยมีการติดตั้งแบบตรงข้ามกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อนและการกระจายความร้อนให้ทั่วบริเวณภายในเครื่องฟักไข่ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ช่องไหลเวียนอากาศภายในตู้ด้านล่าง 4 ช่อง เป็นช่องระบายอากาศออกจากตู้ จำนวน 2 ช่อง และติดตั้งพัดลมดูดอากาศขนาดเล็กแบบกระแสตรง จำนวน 2 ช่อง เพื่อใช้ไหลเวียนอากาศร้อนผ่านท่อสแตนเลสที่ติดตั้งในกล่องสะสมความร้อน



รูป 0.3 การติดตั้งพัดลมสำหรับส่งผ่านความร้อนจากระบบสะสมความร้อนไปยังเครื่องฟักไข่

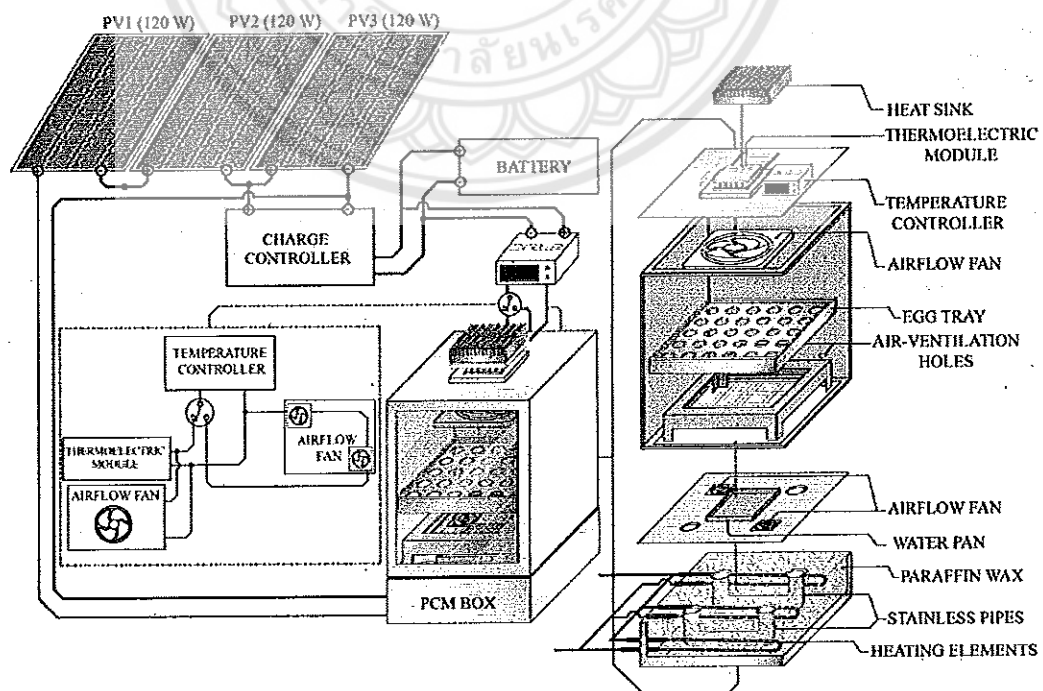
3.3 เครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์

เพื่อให้การทำงานของเครื่องฟักไข่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดตลอดเวลา 24 ชั่วโมง โดยไม่มีการใช้ไฟฟ้าพื้นฐาน ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และสนับสนุนพลังงานทดแทน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกผสมซิลิกอน ของ Ekarat Solar รุ่น ES20636120 มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังตาราง 3.2 จำนวน 3 แผง มาต่ออนุกรมกัน การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในรูปที่ 3.4 โดยมีอุปกรณ์หลักดังนี้ 1) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 2) ชุดควบคุมอุณหภูมิ 3) ชุดระบบสะสมความร้อน 4) แบตเตอรี่ 3K ขนาด 24 V 120 Ah 5) อุปกรณ์ประจุกระแสไฟฟ้า (Apollo S-120A, Leonic Co., Ltd.) 6) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 7) ชุดกล่องตู้ฟักไข่ และ 8) ถาดน้ำ ในระบบนี้มีการต่อเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 3 แผง เข้ากับขดลวดความร้อน (ขนาด 1,500 วัตต์) ภายในระบบสะสมความร้อน ในเวลากลางวันขดลวดทำหน้าที่สร้างและจ่ายความร้อนอย่างต่อเนื่องให้กับสารเปลี่ยนสถานะชนิดพาราฟิน (paraffin wax) ที่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 70°C สำหรับชุดจ่ายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลได้ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงจำนวน 1 แผง ผ่านอุปกรณ์ประจุกระแสไฟฟ้าและแบตเตอรี่ โดยกระแสไฟฟ้าบางส่วนสะสมไว้ในแบตเตอรี่เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับชุดควบคุมอุณหภูมิ โดยระบบให้ความร้อนทั้งสองถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิผ่านสวิตช์ 3 ทางในการสลับการทำงานเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 36-39°C และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 60-80%

[1-3] (รูปที่ 3.4) โดยในเวลากลางวันชุดควบคุมอุณหภูมิถูกตั้งค่าให้มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 38°C โดยสั่งงานให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกทำงานเพื่อจ่ายความร้อนให้กับตู้ฟักไข่และหยุดทำงานในเวลาตอนกลางคืน เพื่อสลับให้ชุดระบบสะสมพลังงานความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะทำหน้าที่จ่ายความร้อนให้กับตู้ฟักไข่สำหรับช่วงเวลากลางคืนแทนและหยุดการทำงานในเวลากลางวัน สำหรับการควบคุมปริมาณความชื้นสัมพัทธ์โดยการใส่ถาดน้ำในเครื่องฟักไข่ เพื่อควบคุมปริมาณการสูญเสียน้ำของไข่ไก่ผ่านรูพรุนของเปลือกไข่ ที่ผนังด้านหลังของตู้ฟักไข่มีรูขนาด 10 มม. จำนวน 2 รูไว้สำหรับการแลกเปลี่ยนและควบคุมความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายในตู้ฟักไข่กับสิ่งแวดล้อม

ตาราง 0.2 คุณสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกผสมซิลิกอน ของ Ekarat Solar รุ่น ES20636120

รายละเอียดเซลล์แสงอาทิตย์	IES 20636120
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{max})	120 W
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{max})	17.48 V
กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{max})	6.98 A
แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc})	22.37 V
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})	7.57 A
ขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (mm)	662x1482



รูป 0.4 ไดอะแกรมระบบเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์

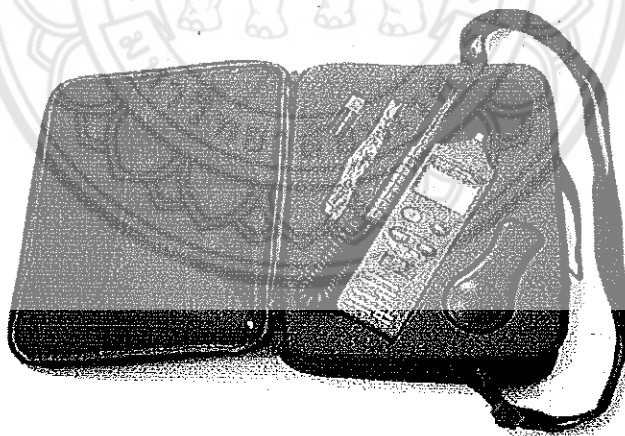
หลักการการทำงานของเครื่องฟอกโซลาร์โมอีเล็กตริกร่วมกับระบบสะสมความร้อน

1. มีการควบคุมอุณหภูมิในเครื่องฟอกโซลาร์โมอีเล็กตริกทำงานโดยชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ โดยตั้งอุณหภูมิภายในตู้ให้มีอุณหภูมิ 38°C โดยใช้แผ่นเทอร์โมอีเล็กตริกโมดูลร่วมกับระบบสะสมความร้อน โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 120 W จำนวน 3 แผง ต่อตรงเข้าขดลวดความร้อนที่ละลายสารทำงาน (พาราฟิน) และเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ต่อเข้าสะสมในแบตเตอรี่ (รูป 3.4) เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ตลอด 24 ชั่วโมง โดยไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน
2. แบ่งช่วงเวลาควบคุมระบบเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงกลางวัน 06.00 – 18.00น. เครื่องฟอกโซลาร์ถูกควบคุมอุณหภูมิผ่านแผ่นเทอร์โมอีเล็กตริกโมดูลเป็นแหล่งพลังงานความร้อน และช่วงกลางคืน 18.00 – 06.00 น. เครื่องฟอกโซลาร์ถูกควบคุมอุณหภูมิผ่านระบบสะสมความร้อนเป็นแหล่งพลังงานความร้อน

3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกโซลาร์โมอีเล็กตริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์

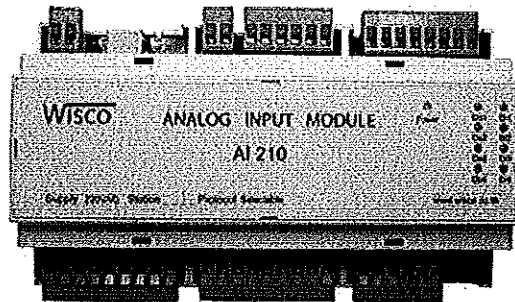
3.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องมือวัดความชื้น Multifunction environment meter รุ่น DT- 8820 ประเทศจีน ดังรูปที่ 3.5



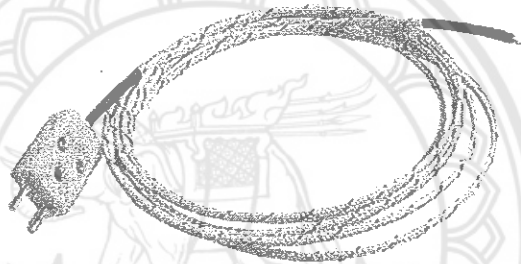
รูป 0.5 เครื่องมือวัดความชื้น Multifunction environment meter รุ่น DT-8820 ประเทศจีน

- 2) เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data recorder) รุ่น Wisco, AI 210 ประเทศไทย สำหรับบันทึกข้อมูลต่างๆ เช่น อุณหภูมิ แรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.6



รูป 0.6 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data recorder) รุ่น Wisco, AI 210 ประเทศไทย

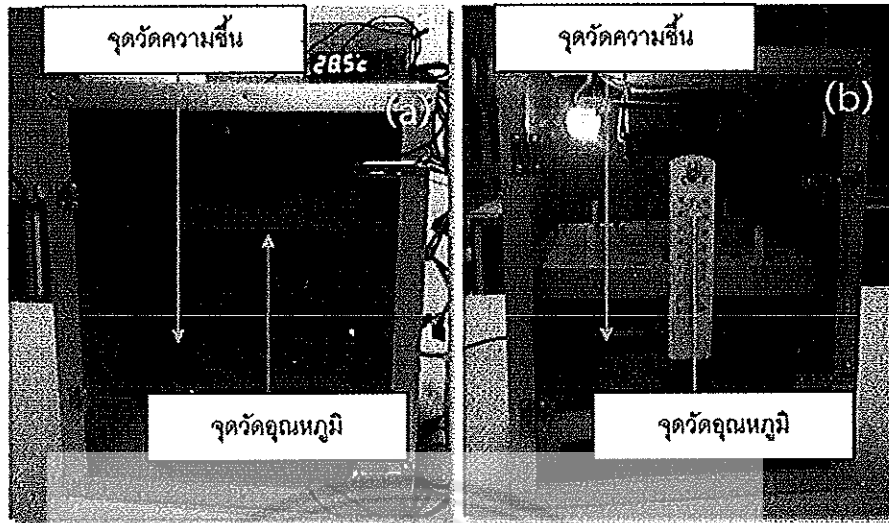
- 3) คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ (Personal computer)
- 4) เทอร์มอคัปเปิลชนิด K (Type K thermocouple)



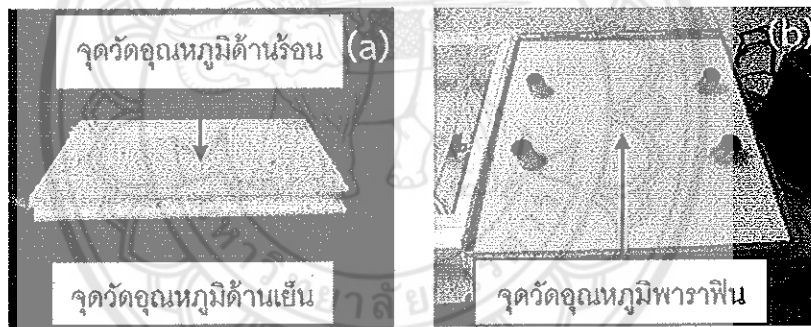
รูป 0.7 เทอร์มอคัปเปิลชนิด K (Type K thermocouple)

3.4.2 การเก็บข้อมูลประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไข่

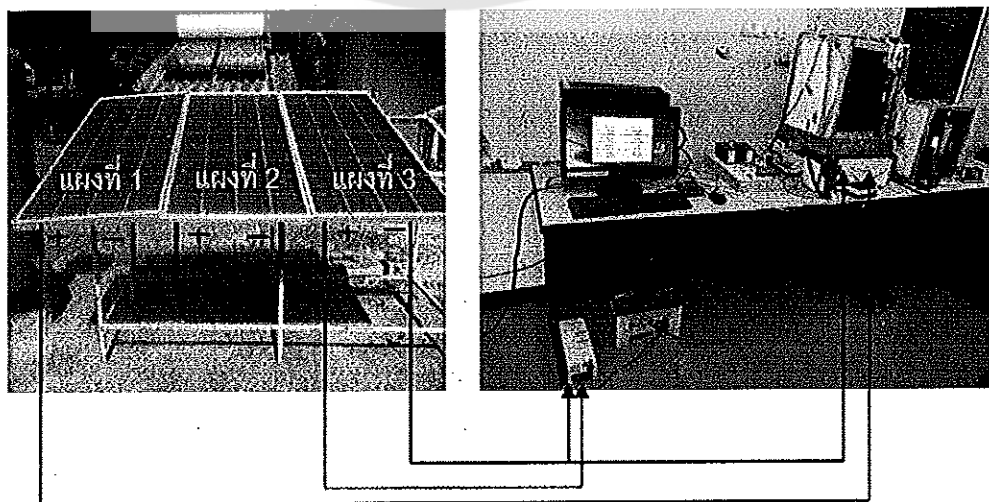
การเก็บข้อมูลประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้มีการเก็บข้อมูลอุณหภูมิการฟอกไข่และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อการฟอกไข่เพื่อเปรียบเทียบการทำงานกับเครื่องฟอกไข่แบบขดลวดที่จำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ในขนาดเดียวกัน โดยทำการเก็บข้อมูลตลอด 24 ชั่วโมงเป็นเวลา 21 วัน หรือ 1 รอบของการฟอกไข่ รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในเครื่องฟอกไข่ทั้งแบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์และเครื่องฟอกไข่แบบขดลวด นอกจากนี้มีการวัดอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเพื่อให้ทราบถึงช่วงเวลาการทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยถ้าแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมีการทำงานนั้นจะส่งผลให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิจนก่อให้เกิดด้านร้อนและด้านเย็น ดังแสดงในรูปที่ 3.9(a) เช่นเดียวกันเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการทำงานในระบบสะสมความร้อนในช่วงของการสะสมและปลดปล่อยความร้อน ตลอดระยะเวลาการทำงาน จึงทำการตรวจวัดอุณหภูมิและเก็บข้อมูลด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.9(b) สำหรับรูป 3.10 แสดงรายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับเครื่องฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์พร้อมทั้งระบบการเก็บข้อมูลประสิทธิภาพการทำงาน โดยทำการเก็บข้อมูลตู้ฟอกไข่แบบขดลวดควบคู่ไปด้วยตลอดเวลา



รูป 0.8 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้ฟักไข่ (a) แบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์ และ (b) เครื่องฟักไข่แบบขดลวด



รูป 0.9 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกและจุดอุณหภูมิภายในระบบสะสมความร้อน



รูป 0.10 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์

3.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

รายงานวิจัยนี้ มีการการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ในส่วนของ การประเมิน ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดความคุ้มค่าในการลงทุนสร้างระบบและใช้งานให้กับเกษตรกรหรือผู้ที่ประกอบอาชีพ เลี้ยงไก่และฟักไข่ที่สนใจในการสร้างและใช้งานตู้ฟักไข่นี้ โดยมีการเปรียบเทียบกับตู้ฟักไข่แบบขดลวด ที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์

3.5.1 การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC)

การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) ของเครื่องฟักไข่ เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการ ประเมินต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดช่วงชีวิตหรืออายุการใช้งานของเครื่องฟักไข่นี้ โดยมีการพิจารณา ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นทั้งหมดในช่วงอายุการใช้งาน ได้แก่ เงินลงทุนในการสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ (Initial capital cost) ค่าแรงในการออกแบบและสร้างเครื่องฟักไข่ (Labor and Installation cost) และ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา (Maintenance cost) นอกจากนี้มีการพิจารณามูลค่าซาก (Salvage value) ในปีที่สุดท้ายของต้นแบบตู้ฟักไข่ด้วย และนำค่าใช้จ่ายทั้งหมดนี้มาปรับคิดเป็นมูลค่าปัจจุบัน สุทธิ (Present value, NPV) ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$LCC = C_c + \sum_{n=1}^N \frac{C_m}{(1+i)^n} - \frac{SV}{(1+i)^N} \quad (0.1)$$

- เมื่อ C_c = เงินลงทุนเริ่มต้น (Initial capital cost) (บาท)
 C_m = ต้นทุนในการดำเนินการ (Operating cost) ค่าซ่อมบำรุง เชื้อเพลิงและอื่นๆ ในแต่ละปี (บาท)
 SV = มูลค่าซาก (Salvage value) ปีที่สุดท้ายของโครงการ (บาท)
 i = อัตราดอกเบี้ย (Interest rate) หรือ อัตราคิดลด (Discount rate)
 n = อายุการใช้งานโครงการ (Project period)
 N = จำนวนปีที่สิ้นสุดโครงการ (Year at the end of project)

3.5.2 ระยะเวลาคืนทุน (Payback period: PB)

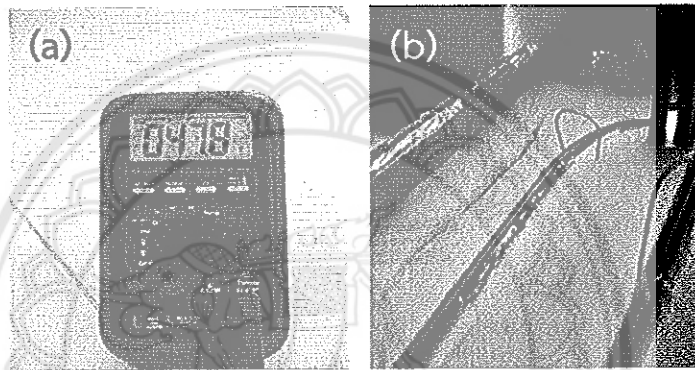
สำหรับการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน (Payback period: PB) ของตู้ฟักไข่ เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นการคำนวณหา จุดคุ้มทุนของตู้ฟักไข่ว่าเมื่อมีการลงทุนในตู้ฟักไข่แล้วจะใช้ระยะเวลากี่ปีในการคืนทุน โดยมีหน่วยวัด เป็นเวลาเช่น งวด เดือน และ ปี เป็นต้น โดยมีการพิจารณาจากการคำนวณหาระยะเวลาที่ ผลตอบแทนสุทธิสะสมจากการดำเนินการหรือใช้ตู้ฟักไข่นี้มีค่าเท่ากับมูลค่าในการลงทุนทั้งหมด หรือ จนกระทั่งผลตอบแทนสุทธิสะสมมีค่าเป็นบวก สมการที่ 2.13 แสดงการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน ของตู้ฟักไข่ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (PB)} = \frac{\text{มูลค่าในการลงทุนรวม}}{\text{ผลตอบแทนสะสมสุทธิรายปี}} \quad (0.2)$$

บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การควบคุมอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่

ในช่วงเวลากลางวัน เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงก็ทำการผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าประมาณ 47 V (รูปที่ 4.1a) สำหรับในวันที่มีปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์สูง โดยทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับระบบทำความร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกและระบบสะสมความร้อนผ่านขดลวดความร้อน โดยความร้อนที่ผลิตได้จากขดลวดความร้อนถูกสะสมในสารพาราฟินที่บรรจุอยู่ในระบบสะสมความร้อนสำหรับเป็นแหล่งความร้อนในช่วงเวลากลางคืน (รูปที่ 4.1b)

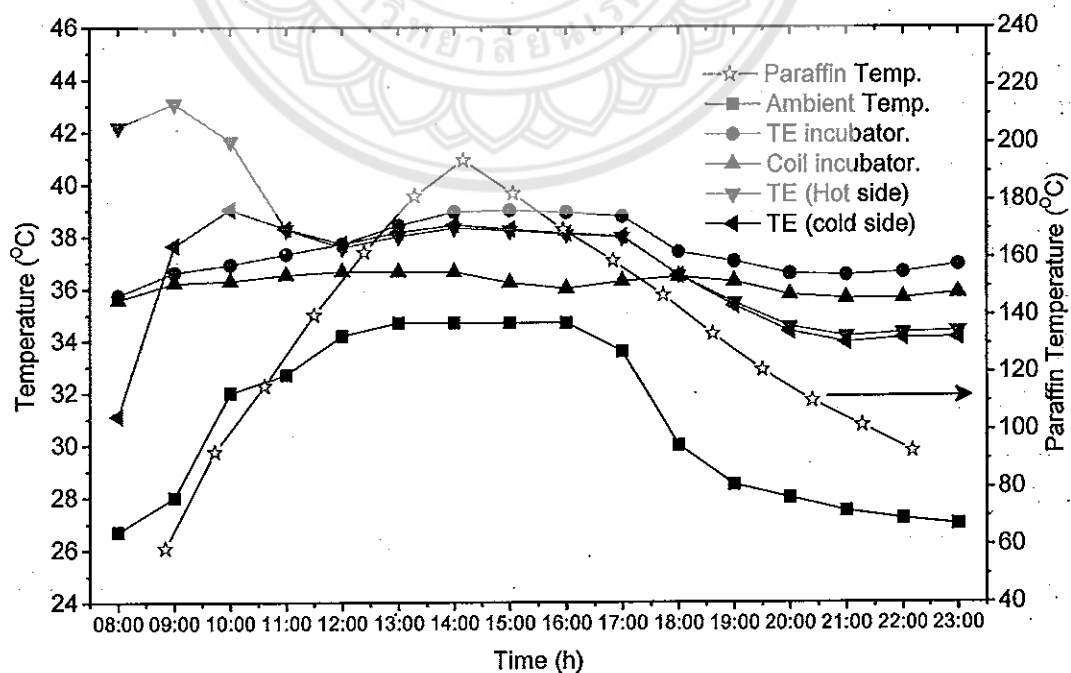


รูป 0.1 (a) ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตได้ และ (b) การสร้างความร้อนของขดลวดความร้อนภายในระบบสะสมความร้อน

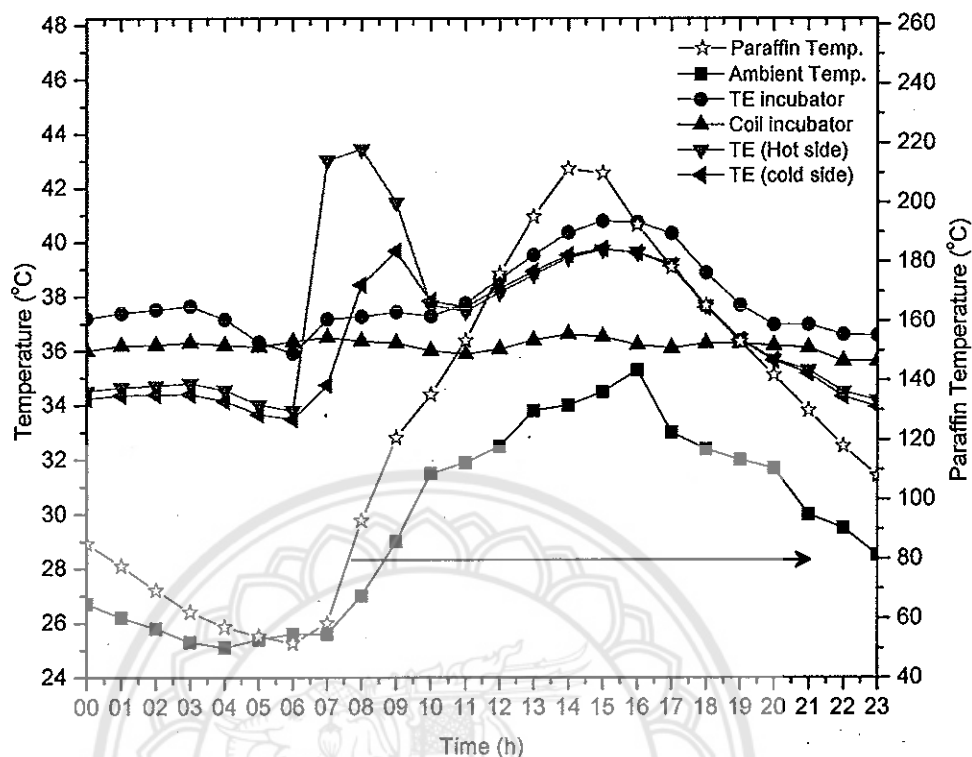
จากการเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ทำการบันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายในตู้ฟักไข่ตลอด 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 21 วัน เพื่อติดตามการทำงานของเครื่องฟักไข่นี้เปรียบเทียบกับ การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องฟักไข่แบบขดลวดที่จำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ โดยพิจารณาอุณหภูมิการฟักไข่ที่เหมาะสมในช่วง $36-39^{\circ}\text{C}$ [1-3] โดยมีรายละเอียดการควบคุมอุณหภูมิในแต่ละ ชั่วโมงของวันตลอดระยะเวลา 21 วัน

รูปที่ 4.2 แสดงการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อุณหภูมิของสารทำงาน หรือ อุณหภูมิภายในพาราฟิน (paraffin temperature) อุณหภูมิอากาศแวดล้อมภายนอก (ambient temperature) อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก (TE incubator) อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่ขดลวดไฟฟ้า (Coil incubator) อุณหภูมิเทอร์โมอิเล็กทริกด้านร้อน TE (hot side) อุณหภูมิเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็น TE (cold side) เพื่อติดตามการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิในวันแรกของตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์ เปรียบเทียบกับตู้ฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้าอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ในวันที่ 1 ที่เวลา 08.00 น. อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าประมาณ 27°C เมื่อพิจารณาอุณหภูมิอากาศแวดล้อม พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 26°C ที่เวลา 08.00 น. จนถึงอุณหภูมิประมาณ 34°C ซึ่งคงที่ในช่วงเวลา 12.00-16.00 น. โดยลักษณะภูมิอากาศ และความโปร่งของท้องฟ้าสังเกตได้จากกราฟอุณหภูมิอากาศแวดล้อมและ

แนวโน้มการเพิ่มสูงขึ้นเป็นแนวเดียวกันกับกราฟอุณหภูมิของสารพาราฟิน เนื่องจากขดลวดความร้อนในกล่องสะสมความร้อนรับแหล่งพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเซลล์แสงอาทิตย์มีการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงเมื่อมีความเข้มของแสงอาทิตย์สูง ซึ่งส่งผลให้ขดลวดความร้อนเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นความร้อนได้สูงจึงเปลี่ยนสถานะของพาราฟินจากของแข็งเป็นของเหลว เมื่อพิจารณาอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยประมาณ 36°C ขณะที่ตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับระบบสะสมความร้อนเริ่มการทำงานด้วยการทำความร้อนจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งสังเกตได้จากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนกับอุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์ เมื่ออุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่มีค่าเท่ากับ 38°C แผ่นเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์หยุดทำงานและทำงานอัตโนมัติอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึง 36°C เป็นการตัดต่อการทำงานอัตโนมัติตามที่ตั้งค่าการควบคุมผ่านชุดควบคุมอุณหภูมิ จนหยุดการทำงานอัตโนมัติ ที่เวลาประมาณ 11.00 น. เป็นต้นไป หลังจากเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์หยุดทำงานอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เพิ่มสูงเกินกว่า 38°C เล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากสารทำงานภายในระบบสะสมความร้อนที่มีอุณหภูมิภายในสูงประมาณ 180°C จนถึงเวลา 18.00 น. ได้เปลี่ยนระบบให้ความร้อนจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทรอนิกส์มาเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนผ่านพัดลมดูดความร้อนที่ติดตั้งไว้ที่ปลายท่อแอสแตนเลสทั้ง 2 ท่อภายในตู้ฟักไข่ เห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่ยังคงอยู่ในช่วงรักษาช่วงของอุณหภูมิที่ $36-38^{\circ}\text{C}$ โดยที่อุณหภูมิของสารพาราฟินมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความร้อนถูกถ่ายเทมาใช้งานในการควบคุมอุณหภูมิในช่วงเวลากลางคืน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความร้อนภายในระบบสะสมความร้อนมีค่าสูงและเพียงพอสำหรับการรักษาอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่จนถึงเวลา 06:00 น. ของวันถัดไป



รูป 0.2 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 1 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

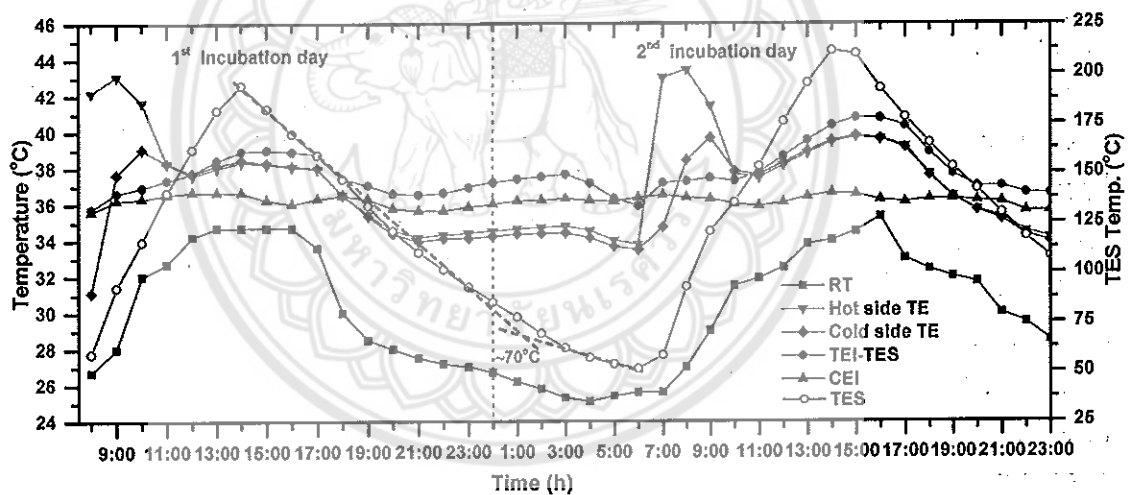


รูป 0.3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 2 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิในวันที่ 2 เป็นการทำงานต่อเนื่องจากวันที่ 1 อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เริ่มที่ประมาณ 37°C ช่วงเวลา 00:00 น. และค่อยๆ ลดลงต่ำกว่า 36°C ตั้งแต่เวลา 05:00-06:00 น. หลังจากนั้นสังเกตกราฟอุณหภูมิของตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกเริ่มสูงขึ้น เนื่องจากเข้าสู่การทำความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกตั้งแต่ 06:00 น. ทำให้อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เพิ่มขึ้น และกลับไปอยู่ในช่วงประมาณ 37°C ผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกหยุดทำงานเมื่อถึง 38°C ระบบตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกและมาจ่ายไฟให้อีกครั้งเมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 36°C และหยุดทำงานที่ 10:00 น. แต่หลังจากนั้นอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่ยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และสูงสุดประมาณ 40°C ทั้งนี้ การเกิดปรากฏการณ์ที่แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกหยุดทำงานแต่อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่มีอุณหภูมิสูงขึ้นเช่นนี้ เกิดจากการถ่ายเทความร้อนของระบบสะสมความร้อนผ่านท่อ นำความร้อนแสดนเลสถึงแม้พัดลมถ่ายเทความร้อนไม่มีการทำงาน กลไกการถ่ายเทความร้อนในลักษณะเช่นนี้เป็นแบบกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน เนื่องจากระบบสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูงถึง 220°C และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสารทำงานในระบบสะสมความร้อนลดลงจนอยู่ในช่วง $36-38^{\circ}\text{C}$ หลังจาก 15:00 น. เป็นผลจากสภาพอากาศที่มีความเข้มรังสีอาทิตย์เริ่มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกราฟอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่ทั้งสองชนิด พบว่า อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกนั้นมีการแกว่งของอุณหภูมิมากกว่าตู้ฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้า (coil incubator) เนื่องจากตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกได้รับ

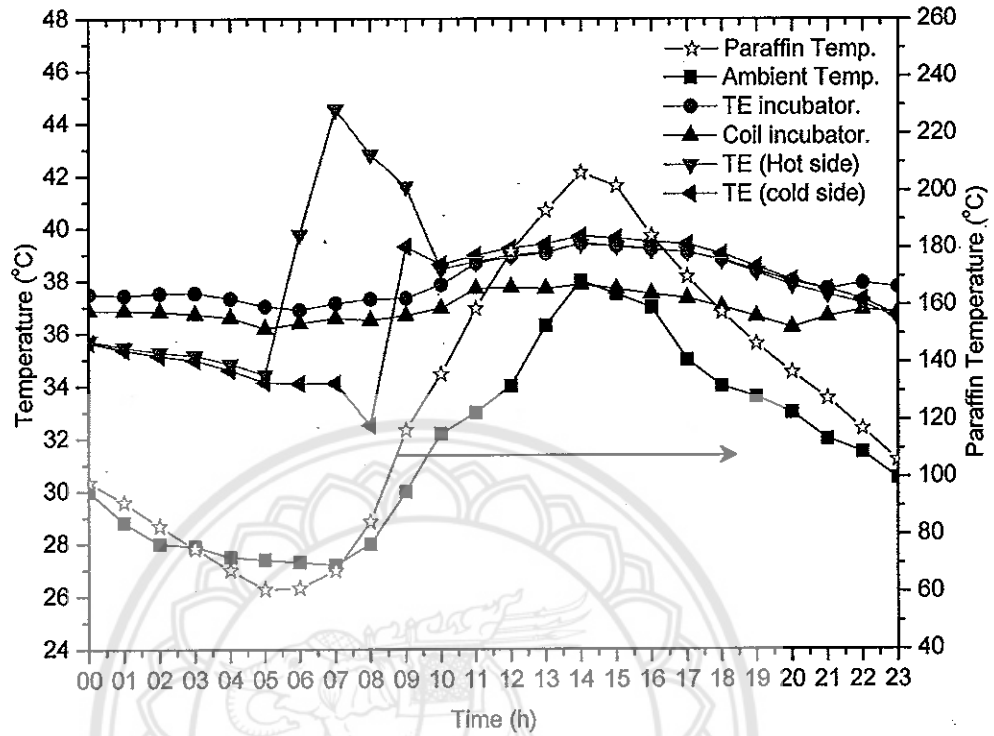
ผลกระทบจากความร้อนในระบบสะสมความร้อน แต่ตู้ฟักไข่ขดลวดไฟฟ้านั้นมีแหล่งจ่ายความร้อนเพียงแหล่งเดียวทำให้การแกว่งตัวของอุณหภูมินั้นเกิดขึ้นน้อยกว่า

ในการพิจารณาการกระจายความร้อน (Heat discharging) ของระบบสะสมความร้อนทำได้โดยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของระบบต่อเนื่อง 2 วันของการทดสอบ ผลการทดลองพบที่มีความแตกต่างกันของความชื้นสำหรับการลดลงของอุณหภูมิภายในระบบสะสมความร้อน โดยในช่วงเวลา 15.00 น. ถึง 23.00 น. มีความชื้นในการลดลงของอุณหภูมิมาก และในช่วงเวลา 3.00 น. ถึง 6.00 น. มีความชื้นในการลดลงของอุณหภูมิน้อยกว่า สามารถอธิบายได้ว่ากลไกการจ่ายความร้อนในระบบสะสมความร้อนนี้ประกอบด้วย 2 กลไก คือ 1) กลไกการจ่ายความร้อนผ่านความร้อนสัมผัส (Sensible heat discharge) สำหรับในกรณีที่มีความชื้นในการลดลงของอุณหภูมิมาก และ 2) กลไกการจ่ายความร้อนผ่านความแฝง (Latent heat discharge) สำหรับในกรณีที่มีความชื้นในการลดลงของอุณหภูมิน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาที่จุดตัดของเส้นตรงในแต่ละความชื้นพบว่ามีความเท่ากับ 70°C ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับจุดหลอมเหลวของสารพาราฟินที่ใช้เป็นสารทำงานแบบเปลี่ยนสถานะ (Phase change material, PCM)

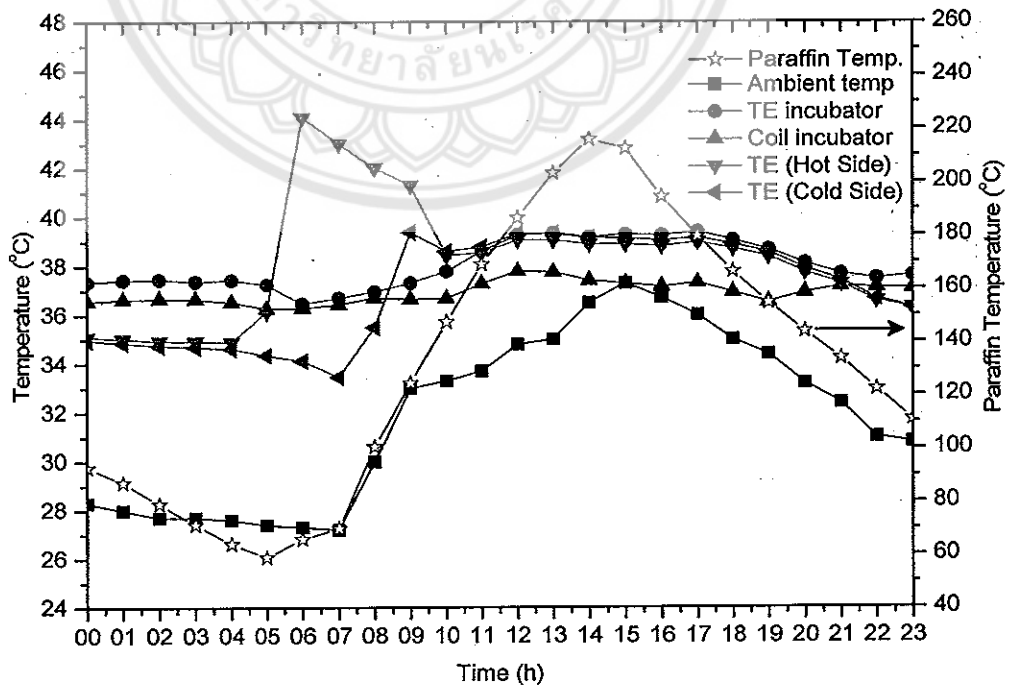


รูป 0.4 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา ช่วงวันที่ 1-2 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

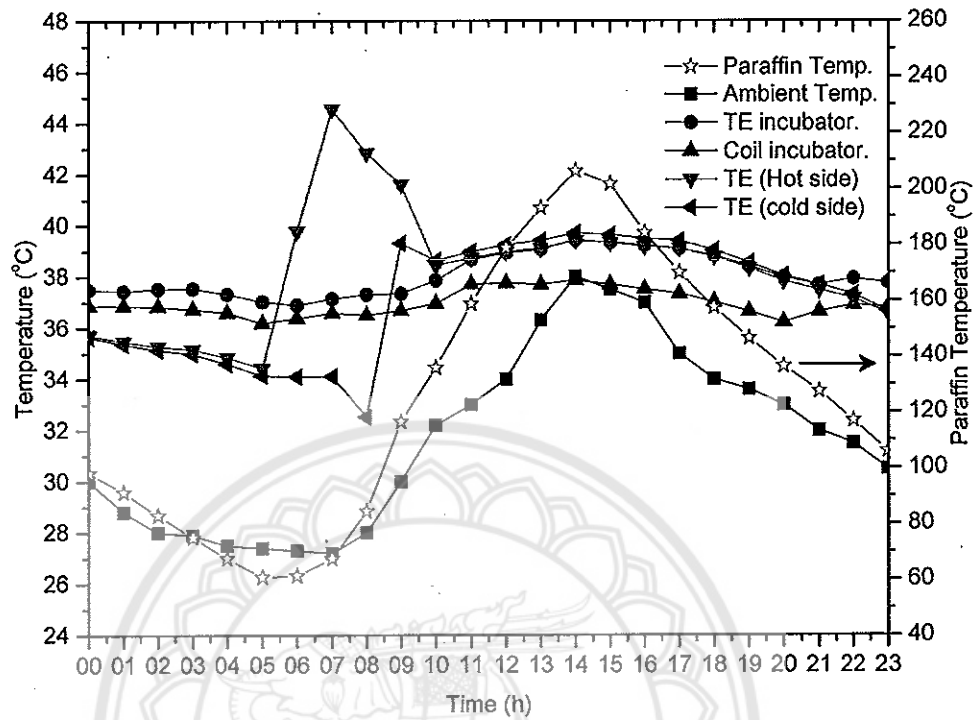
นอกจากนี้ ยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างๆ ในวันที่ 3 ถึงวันที่ 7 ในรอบการฟักไข่มีแนวโน้มเช่นเดียวและสอดคล้องกับข้อมูลในวันที่ 2 เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่สภาพบรรยากาศและความเข้มรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกัน จนไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องฟักไข่ทั้งสองชนิด ดังแสดงในรูป 4.5 ถึงภาพ 4.9



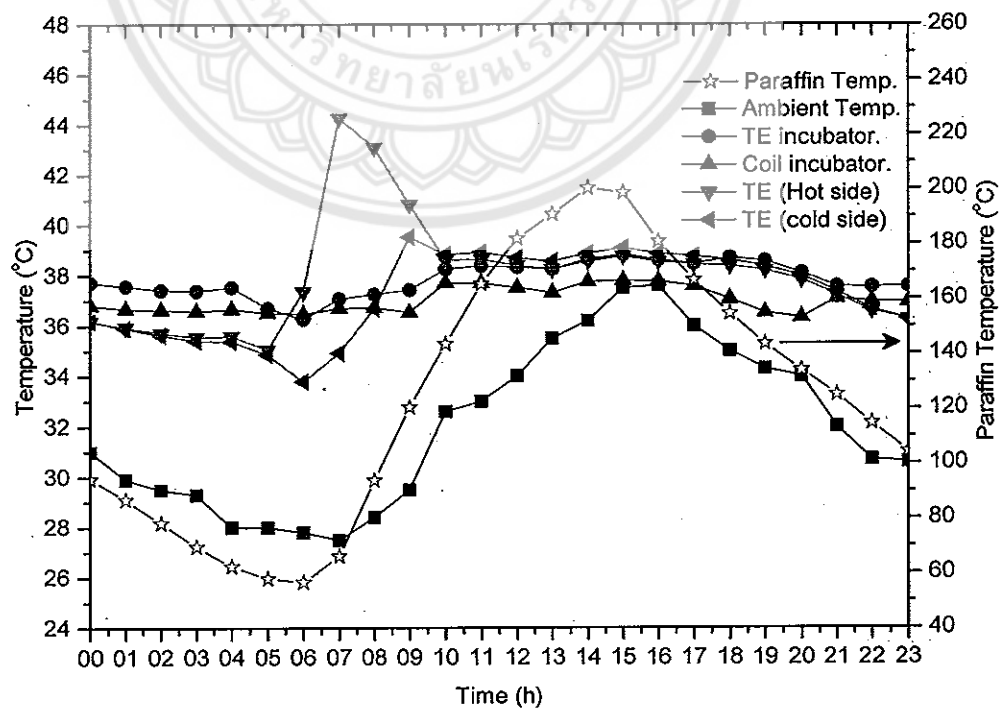
รูป 0.5 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 3 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน



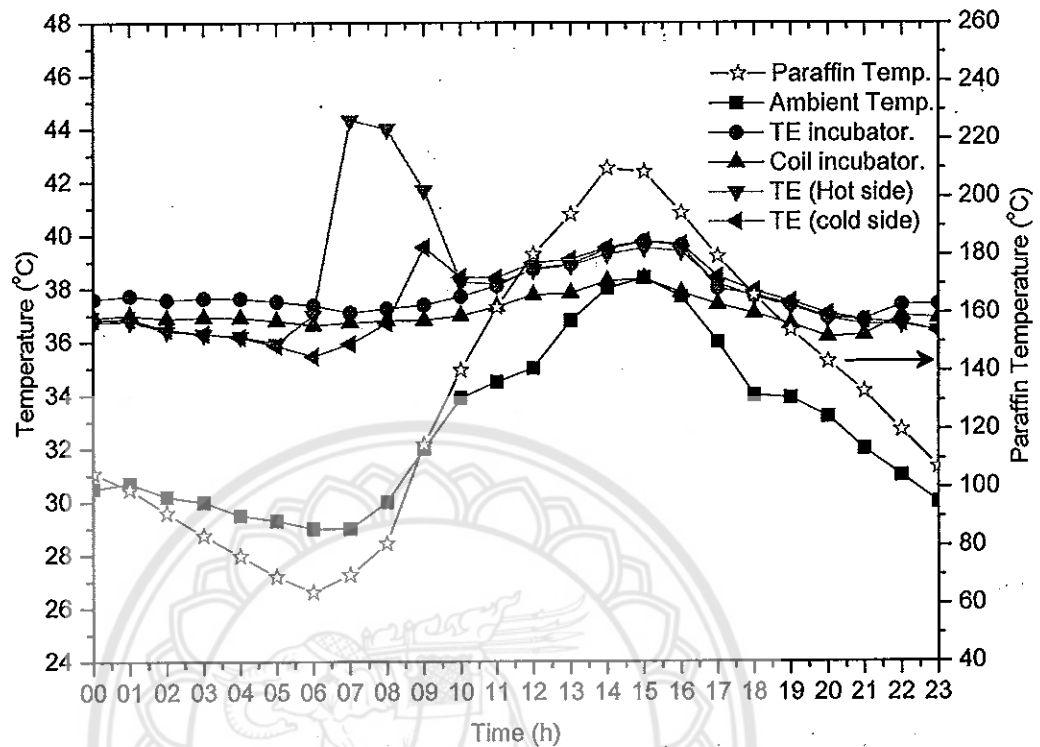
รูป 0.6 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 4 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน



รูป 0.7 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 5 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

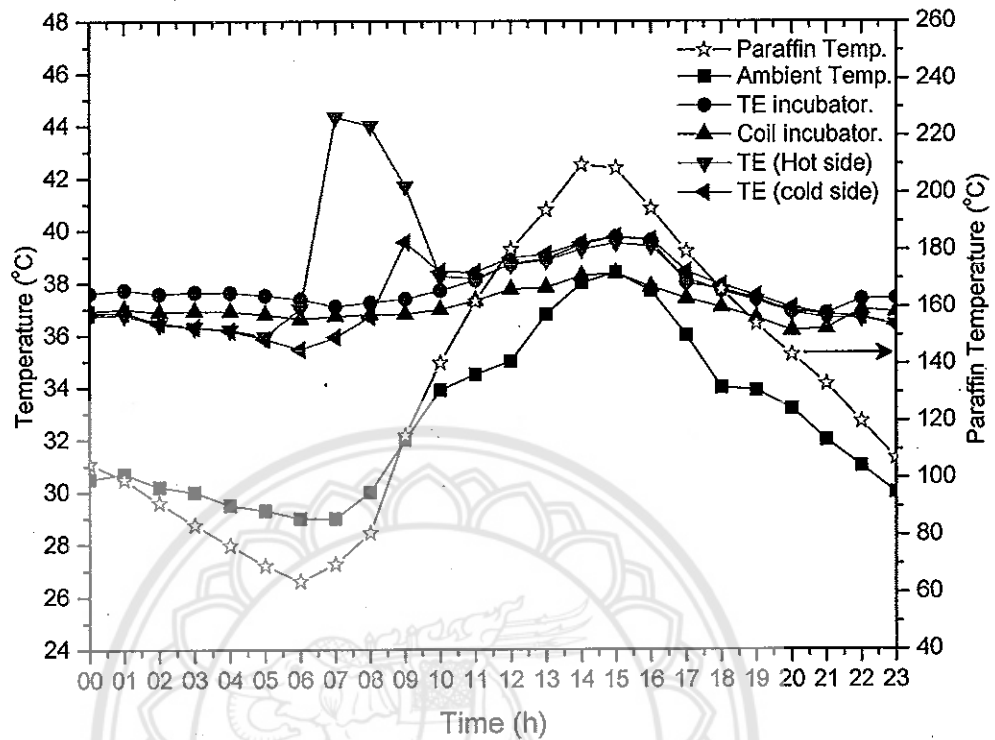


รูป 0.8 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 6 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

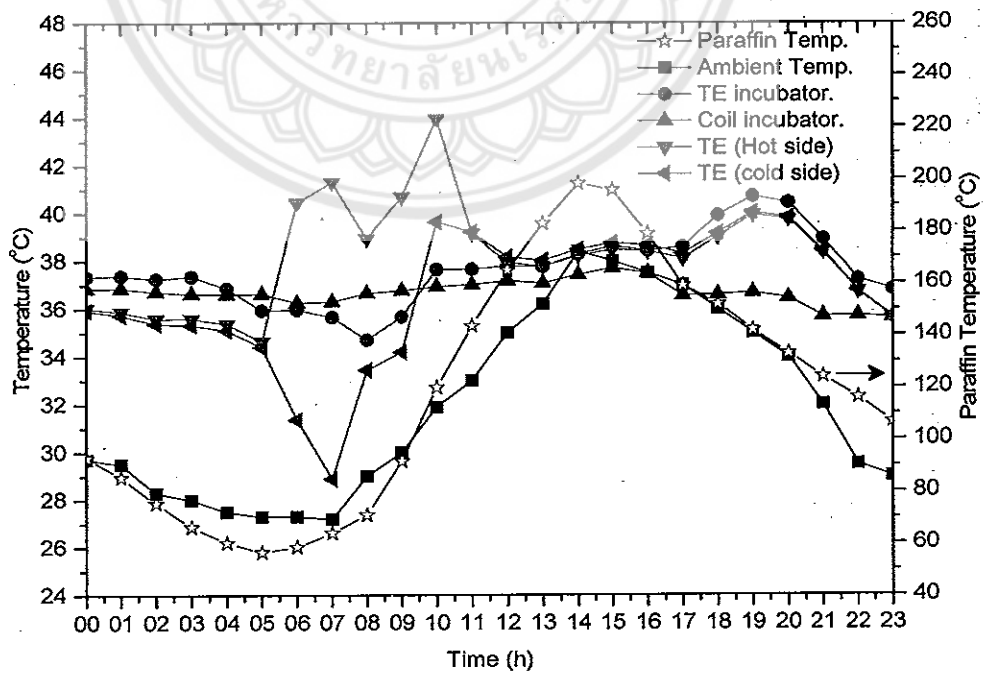


รูป 0.9 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 7 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

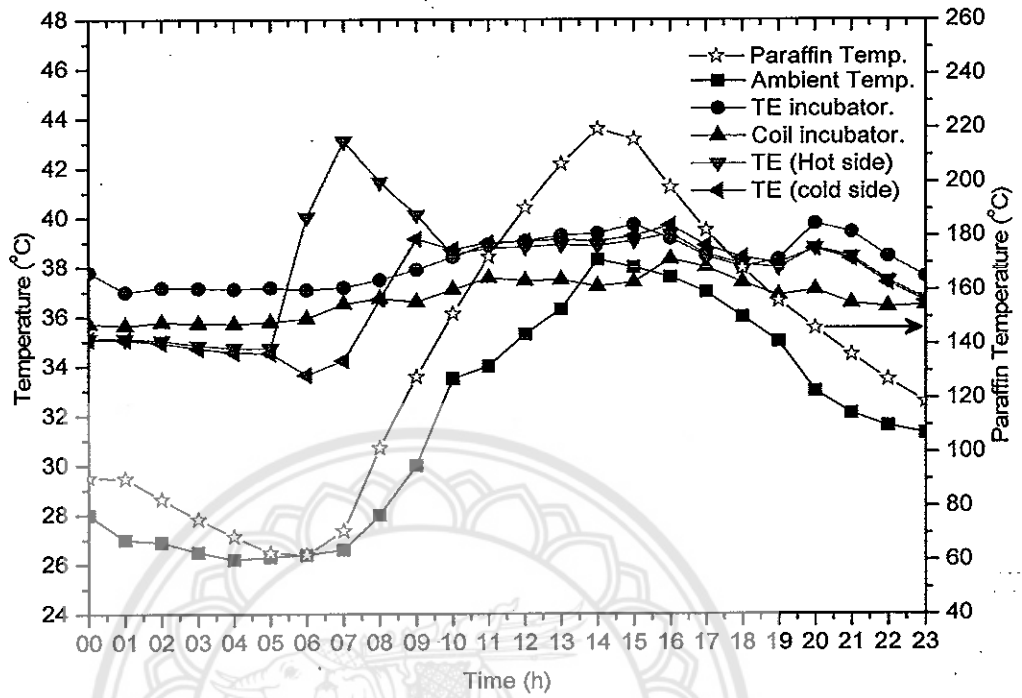
วันที่ 8 ถึงวันที่ 12 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน พบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างๆ ที่ทำการตรวจวัด มีลักษณะคล้ายคลึงกับแนวโน้มอุณหภูมิในช่วงวันที่ 2 ถึงวันที่ 7 คือ มีการทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเริ่มที่ 06:00 น. และหยุดการทำงานที่ 10:00 น. แต่อุณหภูมิยังคงเพิ่มสูงขึ้นกว่า 38°C จากอิทธิพลของความร้อนที่ถูกถ่ายเทจากระบบสะสมความร้อนฝั่งท้อแอสตันเลส ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นเกินกว่ามาตรฐาน $36-39^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลานานๆ อาจส่งผลเสียต่อการฟักออกเป็นตัวลูกไก่แต่อย่างไรก็ตามการที่อุณหภูมิสูงในช่วงเวลาสั้นๆ นั้นมีส่วนช่วยให้กระบวนการเมตาบอลิซึมของเอ็มบริโอมีการเจริญเติบโตที่ดี [1,4,27] เมื่อเปรียบเทียบกับตู้ฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้าที่มีการแกว่งตัวของอุณหภูมಿನ้อยกว่าเนื่องจากตู้ฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้าใช้ขดลวดไฟฟ้าเป็นแหล่งผลิตความร้อนเพียงแหล่งเดียว ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงในทิศทางเดียวกัน โดยเฉพาะเมื่ออุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่สูงขึ้นอุณหภูมิของตู้ฟักไข่ทั้งสองชนิดสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกันและลดลงสู่ช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ $15:00$ น. ตามการลดลงของอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ดังแสดงในรูป 4.10 ถึง 4.14



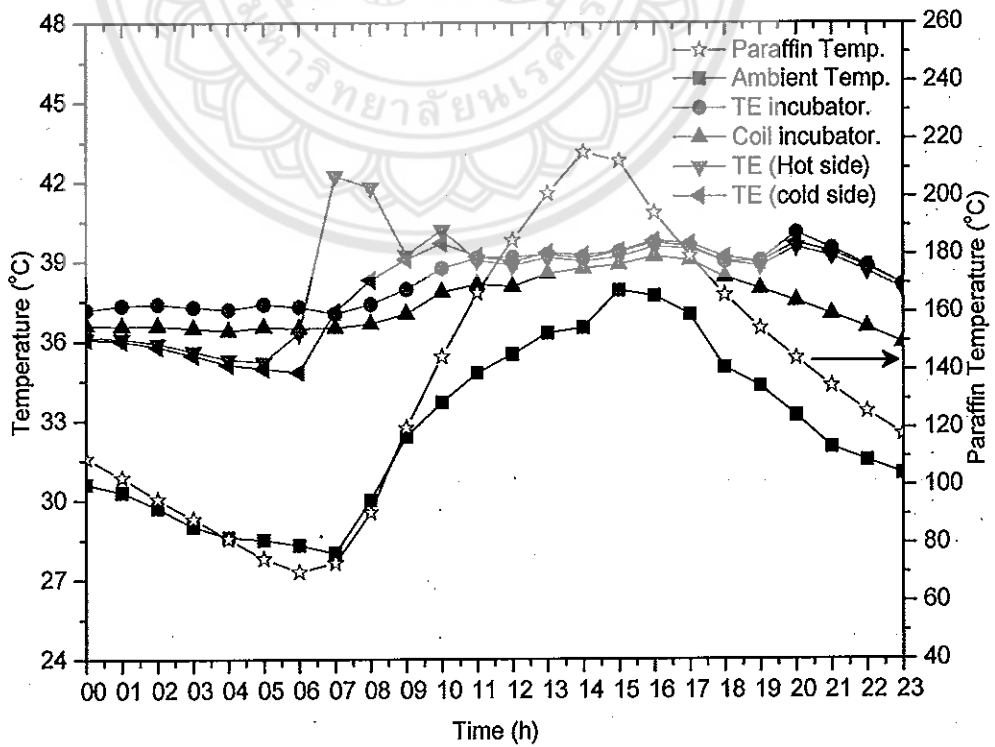
รูป 0.10 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 8 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน



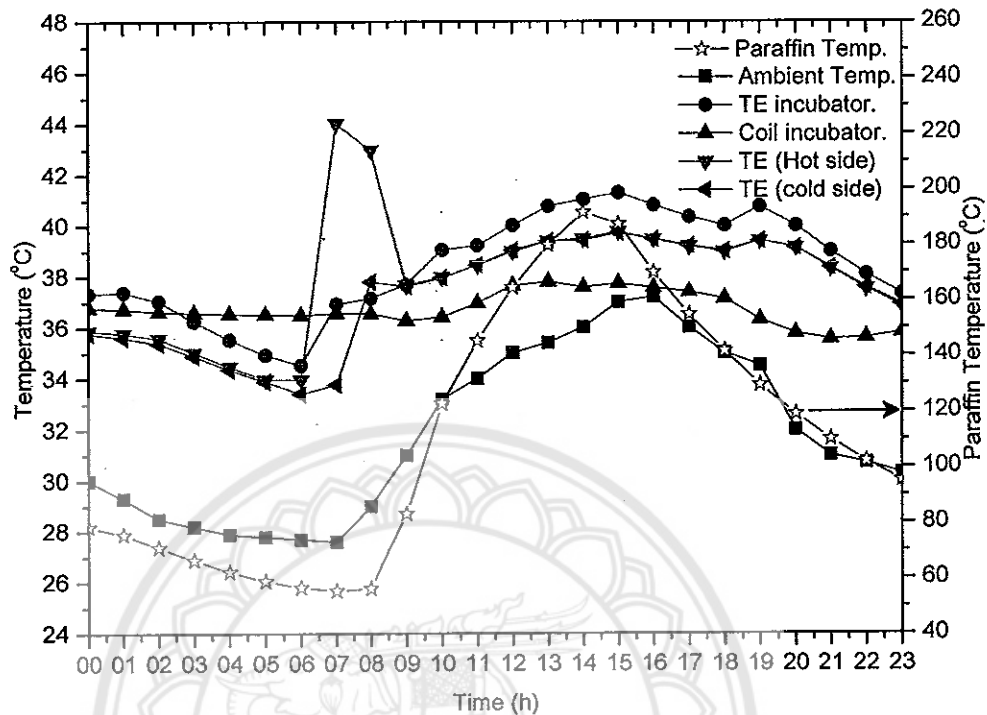
รูป 0.11 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 9 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน



รูป 0.12 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 10 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

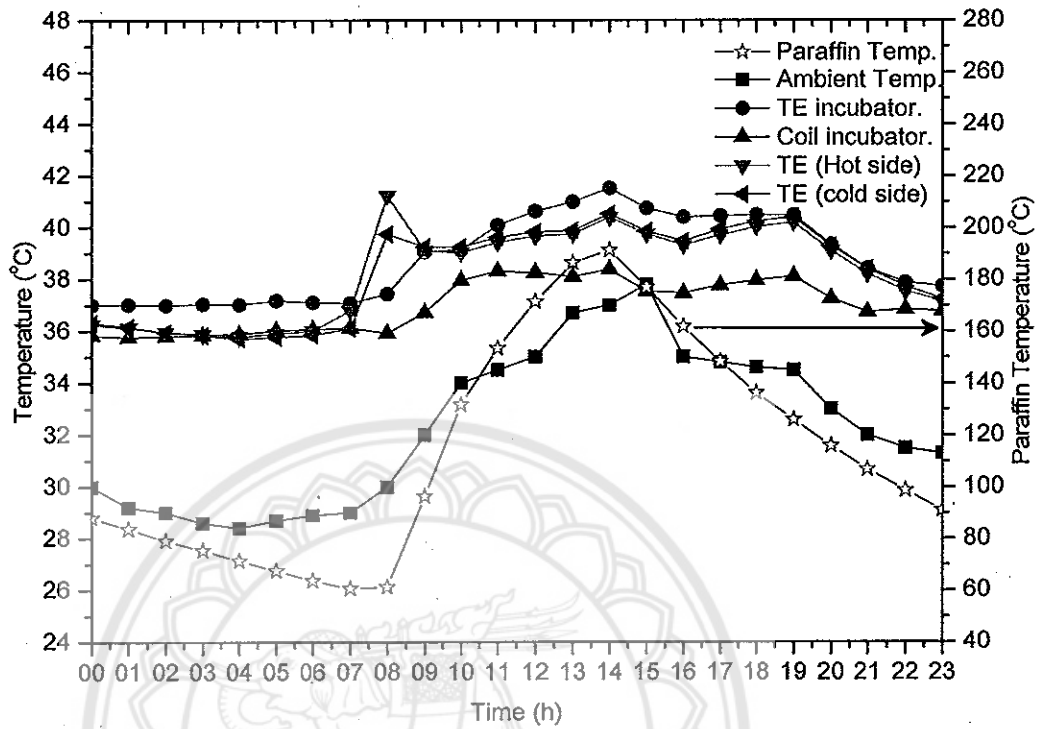


รูป 0.13 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 11 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

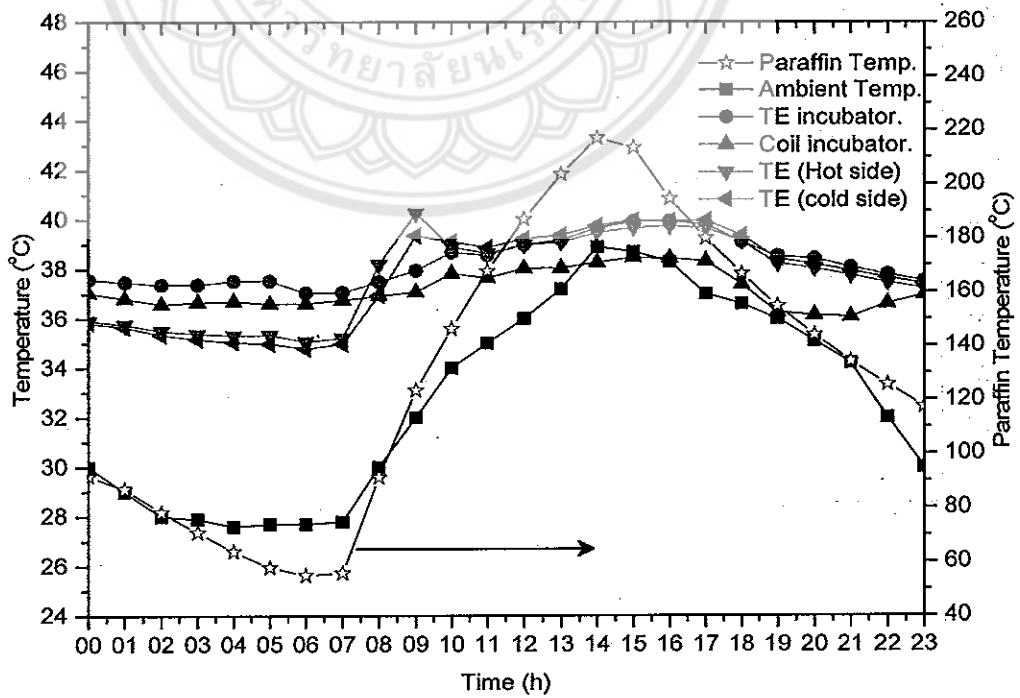


รูป 0.14 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 12 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

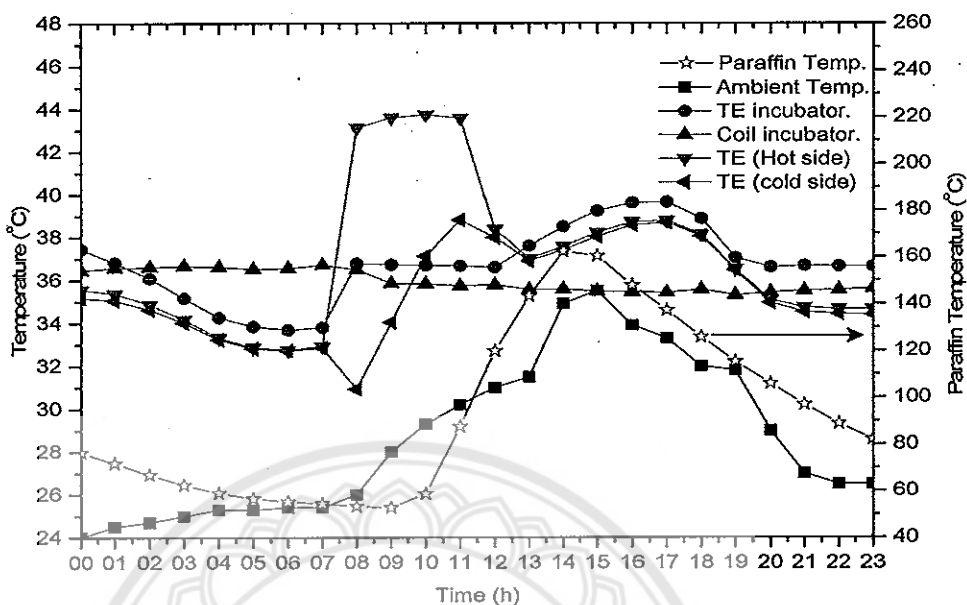
ผลการทดสอบในวันที่ 13 และ 14 พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นภายในตู้ฟักไข่ทั้งสองชนิดค่อนข้างคงที่ประมาณ 36-37°C เมื่อเข้าสู่ช่วงเวลา 09:00 น. อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่ทั้งสองชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากสภาพห้องฟักเปิดอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเพิ่มขึ้นและเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงเต็มที่ อีกทั้งความร้อนจากสารทำงานในระบบสะสมความร้อนที่เพิ่มขึ้นจนอุณหภูมิสารพาราฟินภายในระบบสะสมความร้อน สูงถึง 190°C ซึ่งแม้เข้าสู่ช่วงเปลี่ยนระบบให้ความร้อนเป็นสารทำงาน ตั้งแต่เวลา 18:00 น. อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกยังคงสูงกว่า 38°C ซึ่งมาตรฐานการฟักไข่อุณหภูมิมาตรฐานอยู่ที่ประมาณ 36-39°C ถ้าอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่ามาตรฐานเป็นระยะเวลานานๆ อาจส่งผลเสียต่อการฟักออกเป็นตัวของลูกไก่ นอกจากนี้อุณหภูมิของตู้ฟักไข่ทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงขึ้น รวมถึงลักษณะการแกว่งของอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกเหมือนกับตู้ฟักไข่ขดลวดไฟฟ้าที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมและลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศแวดล้อมลดลงจากข้อมูลในรูป 4.15 และ 4.16 ข้อสังเกตจากวันที่ 13 และ 14 คือ มีการทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกในช่วงวัน ในระยะเวลาประมาณ 3 ชั่วโมงและมีการทำงานเพียงเล็กน้อยเนื่องจากอุณหภูมิด้านร้อยและด้านเย็นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากความร้อนจากระบบสะสมความร้อนและอุณหภูมิอากาศแวดล้อมนั้นสูงจนถึงอุณหภูมิของการฟักไข่ที่ 36-39°C ส่งผลให้อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่อยู่ในช่วงมาตรฐาน ส่วนแนวโน้มของอุณหภูมิที่ตำแหน่งอื่นๆ มีลักษณะเช่นเดียวกับในรอบวันที่ผ่านมา



รูป 0.15 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 13 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน



รูป 0.16 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 14 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

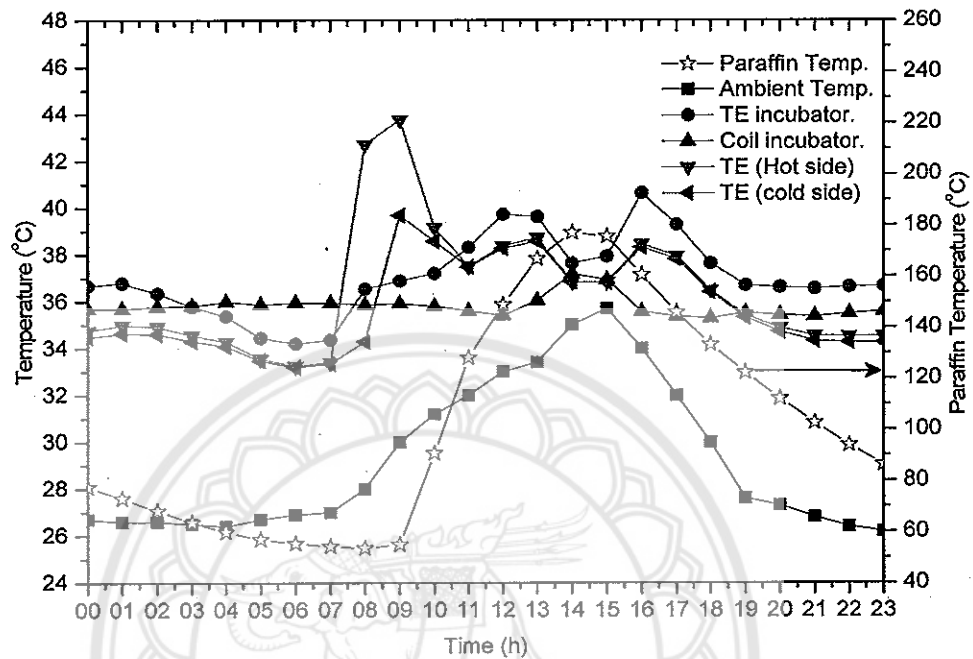


รูป 0.17 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 15 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

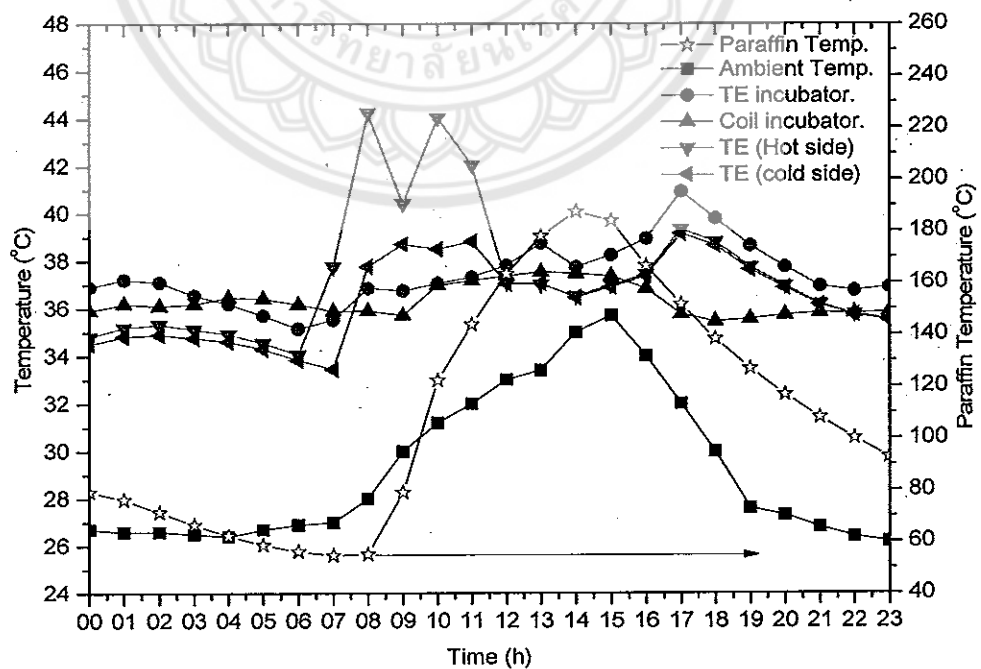
ในวันที่ 15 อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกและตู้ฟักไข่ขดลวดไฟฟ้ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยที่หลังจากเวลา 02:00 น. อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิมาตรฐานประมาณ 1°C ซึ่งเป็นช่วงที่ต่ำกว่าเล็กน้อยและระยะเวลาไม่นานขณะที่อุณหภูมิตู้ฟักไข่ขดลวดไฟฟ้า ค่อนข้างคงที่และรักษาระดับให้อยู่ในช่วงมาตรฐานการฟักไข่ได้ สาเหตุที่ทำให้ อุณหภูมิของตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกลดต่ำลงนั้นเนื่องจากอุณหภูมิกอากาศแวดล้อมต่ำทำให้ระบบถ่ายเทความร้อนจากสารทำงานมาใช้เป็นระยะเวลานาน สังเกตว่าอุณหภูมิของสารทำงาน พาราฟิน ช่วงเวลา 03:00–07:00 น. อุณหภูมิภายในระบบสะสมความร้อนลดต่ำกว่า 50°C สอดคล้องกับอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก เช่นเดียวกับในวันที่ 14 หลังจากเวลา 06:00 น. แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเริ่มทำงานเวลา 06:00 ทำให้อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เพิ่มขึ้นไปอยู่ในช่วงมาตรฐานอีกครั้งเวลา 07:30 น. และเมื่อเข้าสู่เวลา 15:00 น. อุณหภูมิเริ่มสูงกว่า 39°C ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในระบบสะสมความร้อน (พาราฟิน) เช่นเดียวกันแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกหยุดทำงานเวลาประมาณ 12:00 น. แต่อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่ยังคงเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนจากสาร พาราฟินในระบบสะสมความร้อนที่เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นอุณหภูมิลดลงสู่ช่วงอุณหภูมิที่ต้องการเมื่อเข้าสู่เวลา 19:00 น. ดังแสดงในรูป 4.17

ในวันที่ 16 อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่ทั้งสองแบบมีแนวโน้มใกล้เคียงกับวันที่ 15 คืออุณหภูมิของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกมีการแกว่งตัวของอุณหภูมิมากกว่าตู้ฟักไข่ขดลวดไฟฟ้า มีอุณหภูมิฟักไข่ต่ำลงหลังเวลา 02:00 น. และลดลงถึง 34°C ที่เวลา 06:00 น. หลังจากเวลานี้ระบบทำความร้อนด้วยแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเริ่มทำงาน และปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้นตามต้องการจนถึงเวลา 11:00 น. จึงหยุดการทำงานที่อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก 38°C แต่อุณหภูมียังเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 40°C ด้วยอิทธิพลจากความร้อนของระบบสะสมความร้อน และลดลงจนคงที่หลังจาก

เปลี่ยนระบบการทำงานจากเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นระบบสะสมความร้อนเมื่อเข้าสู่เวลา 17:00 น.
 ดังแสดงในรูป 4.18

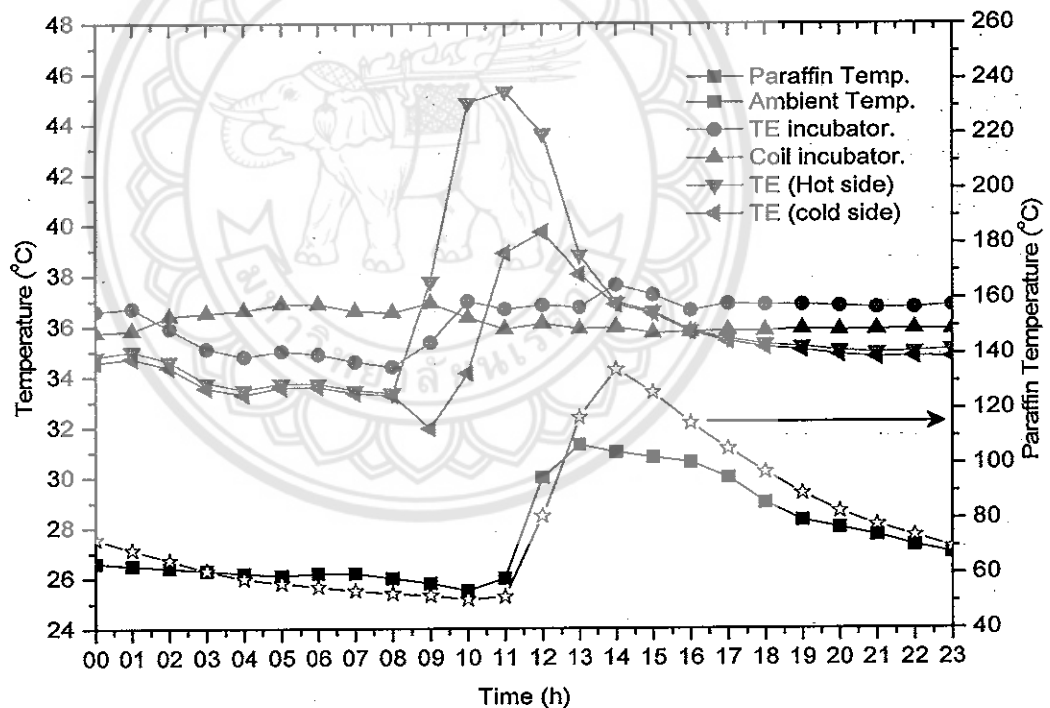


รูป 0.18 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 16 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

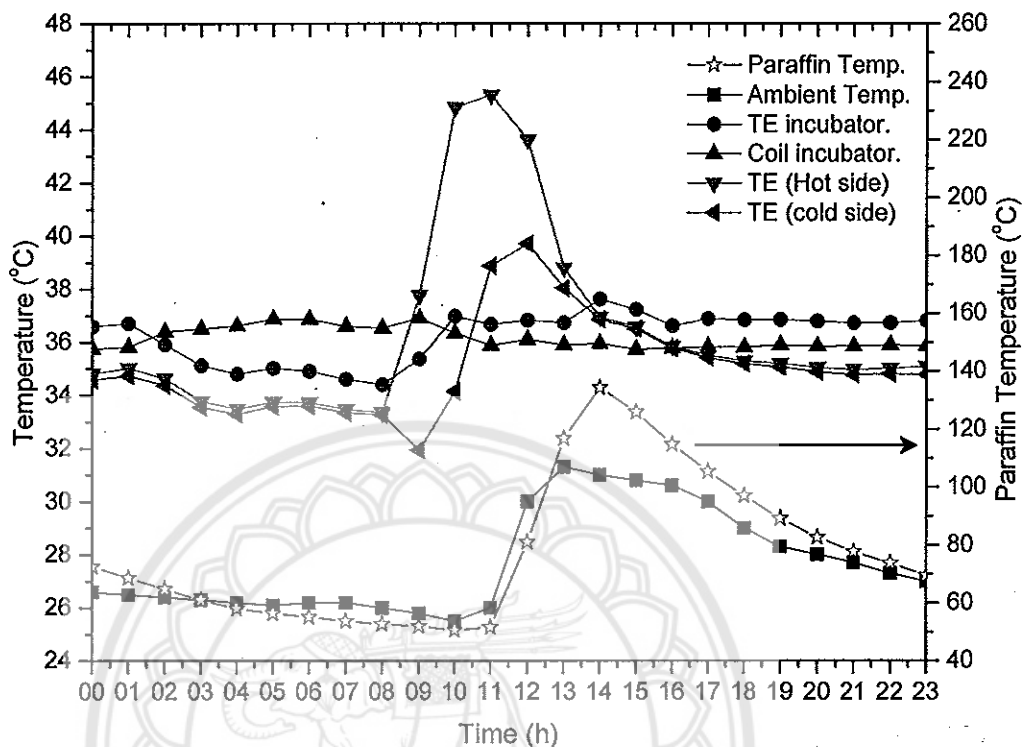


รูป 0.19 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 17 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

แนวโน้มของอุณหภูมิต่างๆ ในรอบวันที่ 17 โดยรวมมีลักษณะใกล้เคียงกับในรอบวันที่ผ่านมา โดยอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกทรูกลดลงต่ำกว่า 36°C เล็กน้อยช่วงเวลา 05:00–06:00 น. และปรับสูงขึ้น เมื่อแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลทำงานตั้งแต่วันที่ 06:00 น. จนมีอุณหภูมิภายในอยู่ในช่วงที่เหมาะสมของการฟักไข่ กระทั่งเวลา 12:00 น. แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลหยุดทำงาน แต่อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกยังคงเพิ่มขึ้นเกินกว่า 38°C เล็กน้อยซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเวลาสั้นๆ และกลับสู่อุณหภูมิมาตรฐานโดยการแกว่งตัวของอุณหภูมิเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากระบบสะสมความร้อนมายังตู้ฟักไข่ผ่านท่อแอสตันเลส เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของตู้ฟักไข่ขดลวดไฟฟ้าพบว่าอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่มีลักษณะการแกว่งของอุณหภูมิมากกว่าเครื่องฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้า ซึ่งการแกว่งของอุณหภูมินี้มีทิศทางการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอากาศแวดล้อมด้วยเช่นเดียวกัน เป็นที่สังเกตได้ว่าในช่วงเวลาประมาณ 8:00-15:00 น. ของแต่ละวันที่ทำการทดลองเป็นช่วงที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อมสูงทำให้อุณหภูมิในส่วนต่างๆ มีแนวโน้มสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูป 4.19

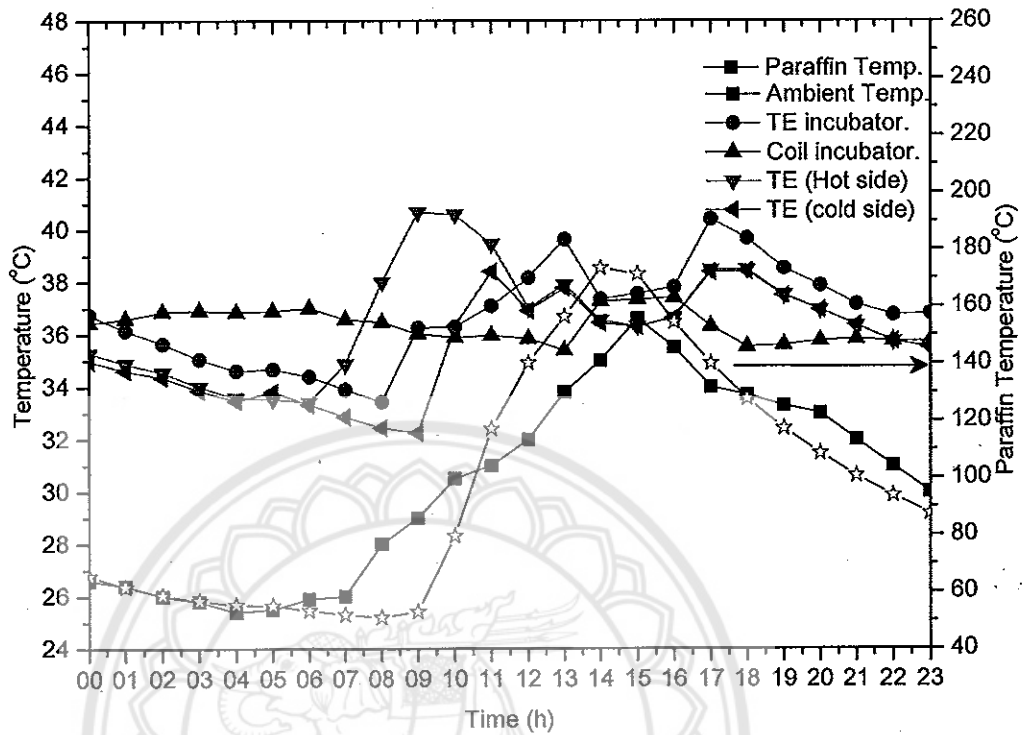


รูป 0.20 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 18 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

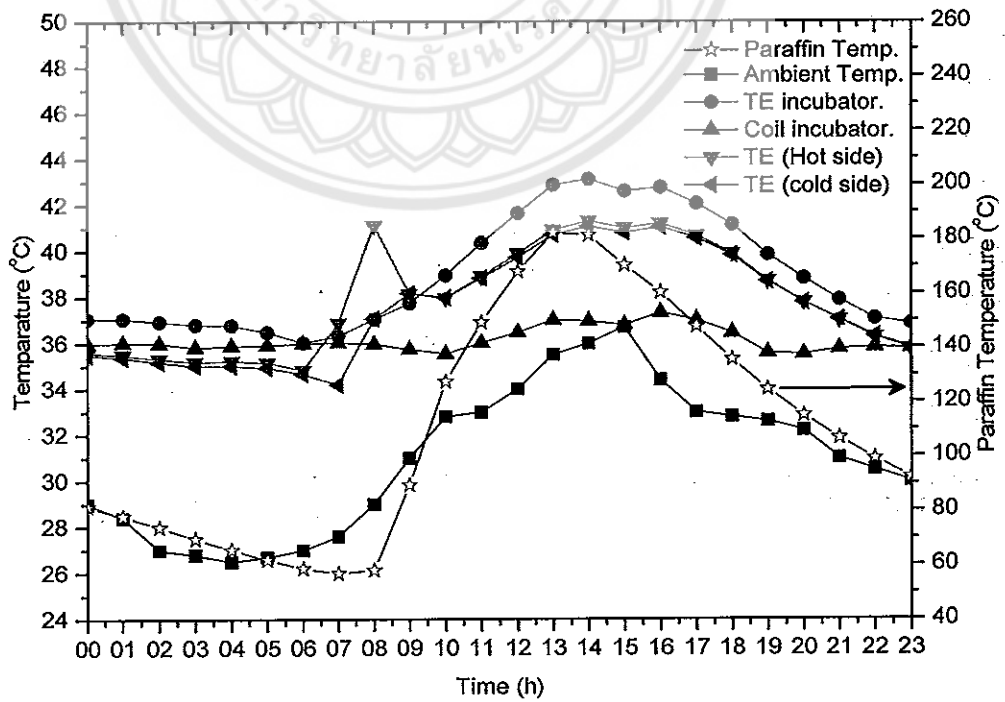


รูป 0.21 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 19 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

เมื่อพิจารณาวันที่ 17 ถึง 19 ในรอบการฟักไข่พบว่าอุณหภูมิสภาพแวดล้อมมีอุณหภูมิต่ำกว่าวันอื่นๆ ที่ผ่านมา รวมถึงอุณหภูมิภายในระบบสะสมความร้อนเช่นเดียวกันที่มีอุณหภูมิต่ำเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศของช่วงเวลานี้ที่มีเมฆมากและมีฝนตก ซึ่งส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ต่ำลงเนื่องจากประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มของรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่ในช่วงเวลา 02:00-08:00 น. มีค่าต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิฟักไข่ แต่ช่วงเวลา 09:00-01:00 น. สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีตามมาตรฐานอุณหภูมิการฟักไข่ เช่นเดียวกับวันที่ท้องฟ้าโปร่ง แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกยังคงทำงานเพียง 4 ชั่วโมงต่อวันเท่านั้นในช่วงเวลา 08:00-12:00 น. เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกกับเครื่องฟักไข่ขดลวดความร้อนพบว่า การควบคุมอุณหภูมิของเครื่องฟักไข่ขดลวดมีความคงที่ตลอดช่วงเวลา เนื่องจากมีแหล่งความร้อนเดียวที่สร้างจากกระแสไฟฟ้า ซึ่งแตกต่างจากเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกที่ทำงานร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นช่วงสั้นๆ ระหว่างการทำงาน



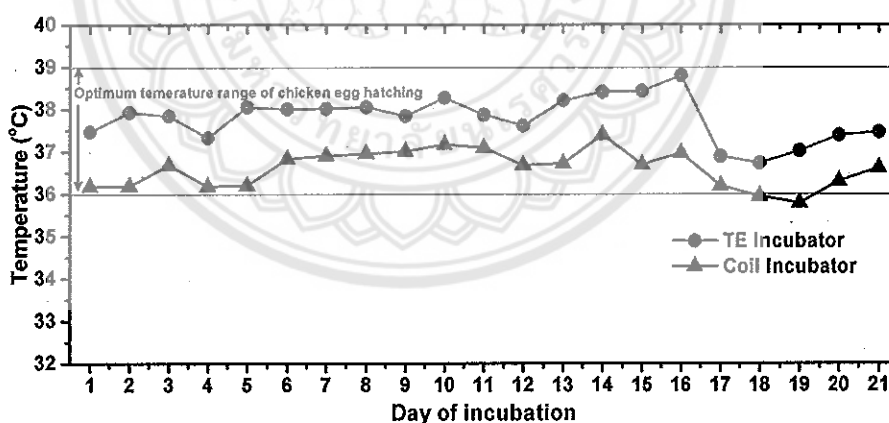
รูป 0.22 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 20 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน



รูป 0.23 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่างๆ ตามเวลา สำหรับวันที่ 21 ในรอบการฟักไข่ 21 วัน

ในวันที่ 20 อุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกพบว่าอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 36°C ตั้งแต่เวลา 02:00 น. จนถึงเวลา 08:00 น. เนื่องจากอุณหภูมิของระบบสะสมความร้อนค่อนข้างต่ำต่อเนื่องจากวันที่ 19 เมื่อเข้าสู่เวลา 08:00 น. แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเริ่มทำงาน และปรับอุณหภูมิภายในตู้ฟักไข่ให้มีค่าสูงขึ้นและอยู่ในช่วงที่เหมาะสมของการฟักไข่ หลังจากนั้นแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกหยุดการทำงานเมื่อเข้าสู่เวลา 12:00 น. ดังแสดงในภาพ 4.22 นอกจากนี้เมื่อเทียบกับอุณหภูมิของตู้ฟักไข่ชนิดหลอดไฟฟ้าพบว่าอุณหภูมิของตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกมีการแกว่งมากกว่าเครื่องฟักไข่ชนิดหลอดไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับวันอื่นๆ ที่ผ่านมามาก อย่างไรก็ตามเครื่องฟักไข่ชนิดหลอดไฟฟ้ามีการแกว่งตัวเล็กน้อยในช่วงเวลา 13:00 - 18:00 น.

สำหรับวันที่ 21 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องฟักไข่ทั้งสองเครื่อง ผลการทดสอบพบว่า อุณหภูมิตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าเพิ่มสูงกว่าอุณหภูมิมาตรฐานที่ 38°C ตั้งแต่ช่วงเวลา 09:00 น. เนื่องจากความร้อนจากระบบสะสมความร้อนมีการถ่ายเทมายังตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกผ่านท่อนำความร้อนเสตนเลสด้วยกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน เนื่องจากพัดลมในการพาความร้อนมาจากระบบสะสมความร้อนยังปิดระบบการทำงานอยู่ในช่วงเวลาดังกล่าว โดยอุณหภูมิฟักไข่สูงขึ้นประมาณ 43°C ในเวลา 14:00 น. ก่อนปรับลดลงสู่ช่วงอุณหภูมิที่ต้องการเมื่อเวลา 20:00 น. ดังแสดงในภาพ 4.23 เช่นเดียวกับวันอื่นๆ ที่ผ่านมาในรอบของการฟักไข่ คือเครื่องฟักไข่ชนิดหลอดไฟฟ้าสามารถควบคุมอุณหภูมิฟักไข่ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการฟักไข่ ($36-39^{\circ}\text{C}$) ได้ดีและคงที่มากกว่าเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก เนื่องจากเครื่องฟักไข่ชนิดหลอดไฟฟ้ามีแหล่งจ่ายความร้อนเพียงแหล่งเดียวและใช้พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากไฟฟ้าพื้นฐานที่มีความเสถียรและมีคุณภาพพลังงานสูง



รูป 0.24 อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดวันของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก (TE Incubator) และเครื่องฟักไข่ชนิดหลอดความร้อน (Coil Incubator)

รูปที่ 4.24 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งวันตลอด 21 วันหรือ 1 รอบการฟักไข่ ของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกและเครื่องฟักไข่ชนิดหลอดความร้อน ผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิภายในเครื่องฟักไข่ทั้งสองชนิดอยู่ในช่วงที่เหมาะสมของการฟักไข่ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งวันของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกมีอุณหภูมิสูงกว่าเครื่องฟักไข่แบบชนิดหลอดไฟฟ้า ซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ยของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกและชนิดหลอดความร้อนไฟฟ้าอยู่ในช่วง $36.7-38.8^{\circ}\text{C}$ และ $35.8-37.4^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับจากอุณหภูมิเฉลี่ยของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกมีอุณหภูมิสูงกว่านั้นส่งผลให้สามารถกระตุ้นการ

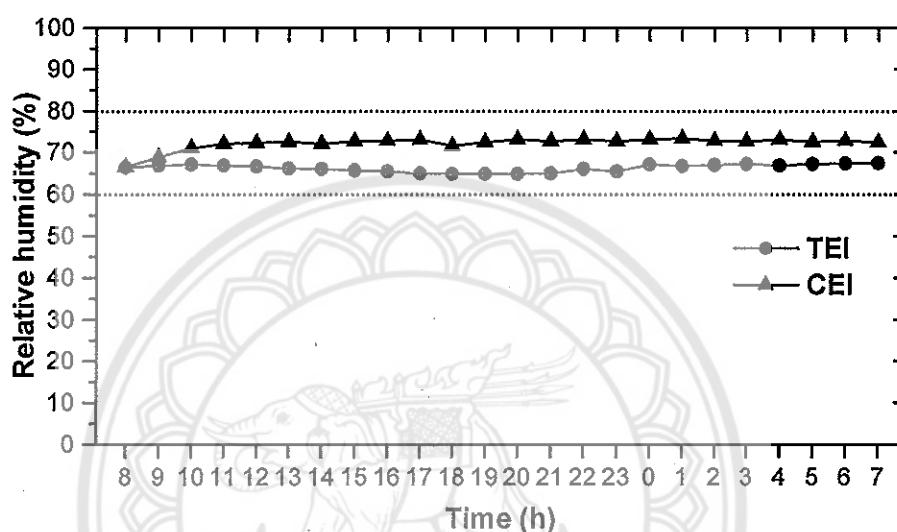
เติบโตหรือการพัฒนาของเอ็มบริโอหรือตัวอ่อนของไข่ไก่ได้ดีกว่า อีกทั้งช่วยส่งเสริมการใช้อาหารและพลังงานจากไข่แดง (Yolk) และ ไข่ขาว (albumen) ที่สำรองอาหารและพลังงานไว้สำหรับตัวอ่อน โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดสอบเครื่องฟักไข่ที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์โดยมีการควบคุมอุณหภูมิฟักไข่ให้คงที่ตลอดเวลาที่อุณหภูมิ 37.8°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเหมาะสมที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตและพัฒนาตัวอ่อน อีกทั้งเพิ่มอัตราการฟักไข่ออกมาเป็นตัวด้วย [1,4,27] ดังนั้น เครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถควบคุมอุณหภูมิฟักไข่ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของการฟักไข่ตลอดช่วงรอบของการฟักไข่ เช่นเดียวกับเครื่องฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้าที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์

4.2 การควบคุมความชื้นภายในตู้ฟักไข่

ระดับความชื้นภายในตู้ฟักไข่ถือว่ามีความสำคัญมากเนื่องจากโดยปกติแล้วระหว่างการฟักไข่ มีการสูญเสียน้ำภายในไข่ผ่านทางรูพรุนของเปลือกไข่ โดยอัตราการสูญเสียน้ำหรือความชื้นขึ้นอยู่กับปริมาณและขนาดของรูพรุนที่เปลือกไข่และความชื้นของอากาศรอบไข่ สำหรับสภาวะการสูญเสียน้ำ (Wright loss, %) ที่ทำให้ได้อัตราการฟักไข่เป็นตัวสูงที่สุดคือ 12 % ของน้ำหนักไข่ไก่ในวันที่ 18 ของการฟักไข่ รูปที่ 2.6 ดังนั้นเครื่องฟักไข่จำเป็นต้องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่มีความเหมาะสมตลอดระยะเวลาการฟักไข่คือ 60-80 %RH [1-3] เพื่อให้มีการเจริญเติบโตและมีพัฒนาการที่ดีของตัวอ่อน จนกระทั่งฝักออกมาเป็นตัวไก่ ซึ่งถ้าหากความชื้นน้อยเกินไปก็ส่งผลให้เปลือกไข่แข็งและลูกไก่ไม่สามารถเจาะเปลือกไข่ออกมาได้ อาจทำให้ลูกไก่ตาย วิธีแก้ไขทำได้โดยการเผาระวังและสามารถช่วยเจาะเปลือกไข่ไก่เมื่อครบกำหนดการฟักไข่ ส่วนในกรณีความชื้นมากเกินไปและมีไข่ฝักออกมาตามกำหนดแล้วก็ส่งผลให้ปริมาณไข่ขาวที่หุ้มไข่แดงอยู่นั้นยังมีมากจนเกินไป จนลูกไก่ถูกไข่ขาวหุ้มตัวอ่อน จนไม่สามารถออกจากไข่ไก่ได้ วิธีแก้ไขทำได้โดยสังเกตว่าถ้าลูกไก่ออกจากไข่ได้แล้วให้ทำความสะอาดตัวลูกไก่ที่มีของเหลวเกาะอยู่ ตามหลักการของการควบคุมความชื้นนั้น ความชื้นของอากาศนั้นขึ้นอยู่กับความชื้นของสิ่งแวดล้อม โดยความชื้นสัมพัทธ์มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าเพิ่มขึ้นจากกระบวนการให้ความร้อน (Heating process) ดังนั้นจึงมีการวางถาดน้ำไว้ในตู้ฟักไข่เพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมของการฟักไข่จากกระบวนการให้ความร้อนทั้งเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์ และเครื่องฟักไข่ขดลวดความร้อนไฟฟ้า

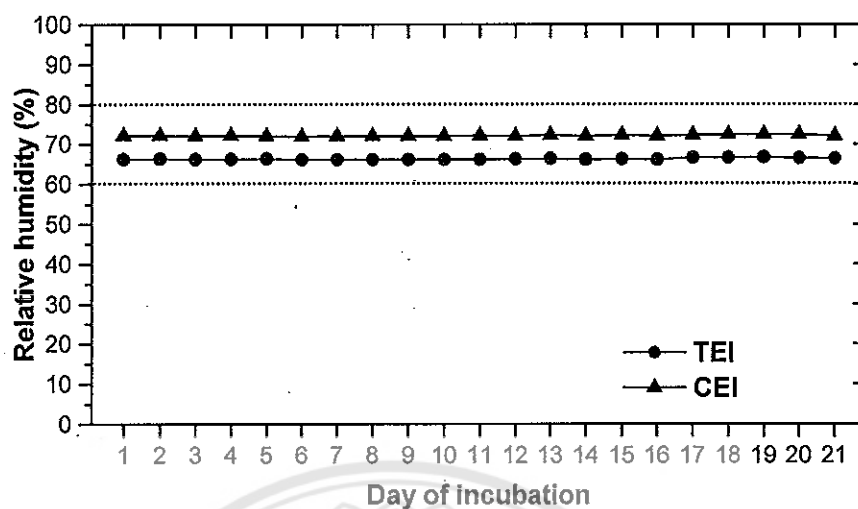
รูปที่ 4.25 ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, %RH) รายชั่วโมงของวันที่ 1 ของการฟักไข่ของเครื่องฟักไข่ทั้งสองแบบ โดยเครื่องฟักไข่ทั้งเริ่มดำเนินการตรวจวัดความชื้นสัมพัทธ์ในเวลา 08:00 น. เช่นเดียวกับการตรวจวัดอุณหภูมิฟักไข่ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.1 ผลการทดสอบพบว่าเครื่องฟักไข่ทั้งสองแบบมีความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นที่เท่ากัน เมื่อพิจารณาเครื่องฟักไข่ขดลวดไฟฟ้าพบว่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นจากเวลา 08:00 น. ถึง 13:00 น. และหลังจากนั้นความชื้นสัมพัทธ์มีค่าคงที่ตลอดการฟักไข่ของวันที่ 1 โดยมีค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 72 ± 1.5 %RH สำหรับเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยกับเวลาและหลังจากนั้นมีค่าคงที่ตลอดการฟักไข่ของวันที่ 1 โดยมีค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 66 ± 0.9 %RH การควบคุมปริมาณความชื้นเกิดจากความร้อนที่

เพิ่มขึ้นของอากาศแล้วส่งผลให้น้ำมีการระเหยจากถาดน้ำแล้วไปผสมกับอากาศภายในตู้ฟักไข่ แสดงให้เห็นว่าเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้คงที่ให้อยู่ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมต่อการฟักไข่เช่นเดียวกับเครื่องฟักไข่ขดลวดไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าน้อยกว่าเครื่องฟักไข่ขดลวดความร้อนเนื่องจากอุณหภูมิฟักไข่ของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกมีค่าสูงกว่าเครื่องฟักไข่ขดลวดความร้อน



รูป 0.25 ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, %RH) รายชั่วโมงของวันที่ 1 ของการฟักไข่

รูป 4.26 แสดงค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ต่อวันตลอดหนึ่งรอบการฟักไข่ (21 วัน) ของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์ และเครื่องฟักไข่ขดลวดไฟฟ้า ผลการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ต่อวันตลอดหนึ่งรอบการฟักไข่ (21 วัน) ของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 66 ± 0.2 %RH ขณะที่เครื่องฟักไข่ขดลวดไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 72 ± 0.1 เห็นได้ว่าเครื่องฟักไข่ทั้งสองสามารถควบคุมความชื้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการฟักไข่ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเครื่องฟักไข่ต่างๆที่มีการวิจัยและพัฒนาที่ผ่านมา พบว่าเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์มีการควบคุมความชื้นได้เช่นเดียวกันกับเครื่องฟักไข่พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar powered chicken egg incubators) [23] เครื่องฟักไข่แบบ conveyor rotation system [24] และเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก [11] ดังนั้นสรุปได้ว่าเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์สามารถควบคุมความชื้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการฟักไข่ (60-80 %RH) ตลอดระยะเวลาการฟักไข่

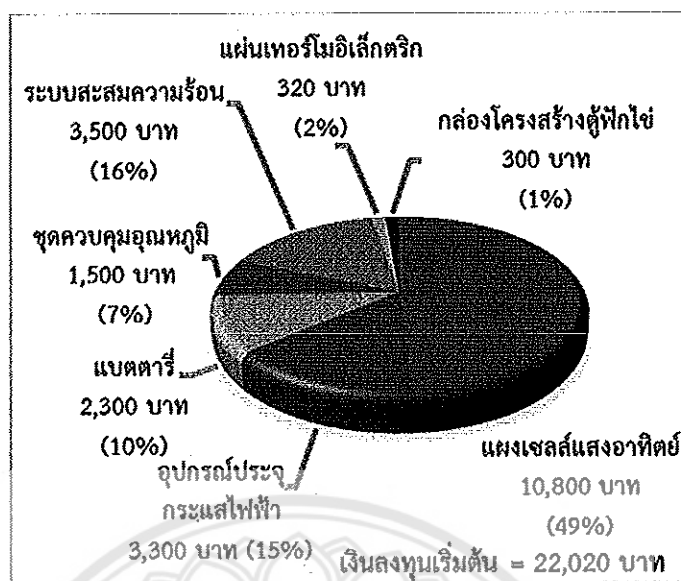


รูป 0.26 ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ต่อวันตลอดหนึ่งรอบการฟักไข่ (21 วัน)

4.3 การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากหัวข้อ 4.1 และ 4.2 เป็นการทดสอบและตรวจวัดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนและเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งพบว่าเครื่องฟักไข่นี้สามารถควบคุมอุณหภูมิฟักไข่และความชื้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการฟักไข่ตลอดเวลา 24 ชั่วโมง โดยไม่มีการใช้ไฟฟ้าพื้นฐาน ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และสนับสนุนพลังงานทดแทน เห็นได้ว่าเป็นการศึกษาทางด้านเทคนิค เพื่อให้เกิดคลอบคลุมในส่วนของการนำไปใช้งานจริง จำเป็นต้องศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ โดยทำการศึกษาในส่วนของ การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดความคุ้มค่าในการลงทุนสร้างระบบและใช้งานให้กับเกษตรกรหรือผู้ที่ประกอบอาชีพเลี้ยงไก่และฟักไข่ที่สนใจในการสร้างและใช้งานตู้ฟักไข่

การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาคืนทุนของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องพิจารณาถึงเงินลงทุนเริ่มต้นของเครื่องฟักไข่นี้ รายละเอียดเงินลงทุนเริ่มต้นแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าเงินลงทุนเริ่มต้นสูงสุดของต้นแบบเครื่องฟักไข่นี้มาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (49%) รองลงมาคือระบบสะสมความร้อน อุปกรณ์ประจุกระแสไฟฟ้า แบตเตอรี่ ชุดควบคุมอุณหภูมิ แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก และกล่องโครงสร้างตู้ฟักไข่ ตามลำดับ ดังนั้น เงินลงทุนเริ่มต้นของเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 22,020 บาท เห็นได้ว่าเป็นเงินลงทุนเริ่มต้นที่สูงเมื่อเทียบกับตู้ฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้าที่มีขนาดเดียวกันและจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ (3,500-5,000 บาท) เนื่องจากเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกมีการทำงานร่วมกับระบบสะสมความร้อนและใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีข้อเด่นกว่าสำหรับโรงเรือนในพื้นที่ห่างไกลจากระบบสายส่งและไม่มีไฟฟ้าพื้นฐาน รวมถึงเป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนให้เกิดประโยชน์สูงสุด



รูป 0.27 เงินลงทุนเริ่มต้นของเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

อายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ในต้นแบบตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานสูงสุดคือ 25 ปี สำหรับกล่องโครงสร้างตู้ฟักไข่และอุปกรณ์ประจุไฟฟ้าชนิดแบบเติมน้ำกลั่นมีอายุการใช้งานสั้นน้อยสุดที่ 2 ปี ส่งผลให้การประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิตของตู้ฟักไข่นี้ ได้พิจารณาอายุการใช้งานเท่ากับ 2 ปี

ตาราง 4.1 อายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ในเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

อุปกรณ์	อายุการใช้งาน (ปี)
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (120 W)	25
อุปกรณ์ประจุกระแสไฟฟ้า (Solar Charger Controller)	10
แบตเตอรี่ ขนาด 120 Ah (Battery)	2
ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)	10
ชุดระบบสะสมความร้อน (Thermal storage box)	10
แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (TE Module)	10
กล่องโครงสร้างตู้ฟักไข่	2

ต้นทุนในการดำเนินการ (Operating cost, C_m) ในสมการ 2.12 คือ ค่าซ่อมบำรุงรักษา อุปกรณ์ เชื้อเพลิงและอื่นๆ ในแต่ละปี (บาท) โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาว่าทุกอุปกรณ์มีค่าบำรุงรักษาที่คงที่และเท่ากันทุกปี โดยแต่ละอุปกรณ์มีค่าต้นทุนในการดำเนินการเท่ากับ 2% ต่อปี โดยไม่มีการพิจารณาต้นทุนดำเนินการของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกและกล่องโครงสร้างตู้ฟักไข่ เนื่องจากอุปกรณ์ทั้งสองนี้ไม่มีอุปกรณ์ใดเคลื่อนไหวและสามารถดำเนินการตลอดการประเมินวัฏจักรชีวิต (2 ปี) จากการประเมินต้นทุนในการดำเนินการพบว่าตู้ฟักไข่นี้มีค่าต้นทุนการดำเนินการต่อปีเท่ากับ 428 บาท (ตารางที่ 4.2)

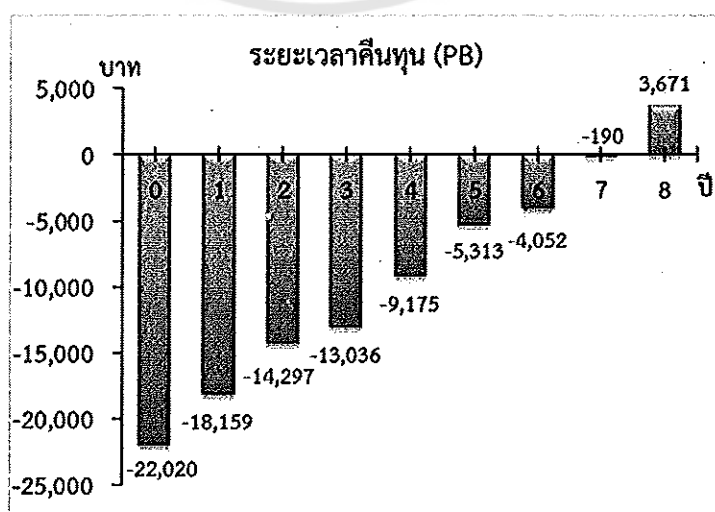
ตาราง 4.2 ผลประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตของเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
เงินลงทุนเริ่มต้น (C_0)	22,020 (บาท)
ต้นทุนในการดำเนินการ (C_m)	428 (บาท)
มูลค่าซากปีที่สุดท้ายของโครงการ (SV)	15,414 (บาท)
อัตราดอกเบี้ย หรือ อัตราคิดลด (i)	7.875 (%)*
อายุการใช้งานโครงการ (n)	2 (ปี)
จำนวนปีที่สิ้นสุดโครงการ (N)	3 (ปี)
ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (LCC)	9,142 (บาท)

*ธนาคารกรุงไทย จำกัด (มหาชน), 22 พฤษภาคม 2558

การพิจารณามูลค่าซาก (SV) ปีสุดท้ายของเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (สมการที่ 2.12) จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 พบว่ามูลค่าซากที่มีค่าลดลงมากและไม่สามารถใช้งานต่อได้คือไม้อัดที่ใช้ทำกล่องโครงสร้างตู้ฟักไข่และแบตเตอรี่ แต่อุปกรณ์อื่นๆ ยังสามารถใช้งานต่อไปได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถใช้งานได้ต่อเนื่องอีก 23 ปี ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้พิจารณามูลค่าซากของตู้ฟักไข่ในปีที่ 2 ของการใช้งานที่มีมูลค่าซากเท่ากับ 70% ของเงินลงทุนเริ่มต้น ส่งผลให้ตู้ฟักไข่นี้มีมูลค่าซากเท่ากับ 15,414 บาท ดังนั้นต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตของตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ตามสมการที่ 2.12 มีค่าเท่ากับ 9,142 บาท (ตารางที่ 4.2) ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าตู้ฟักไข่แบบขดลวดที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์เมื่อมีขนาดของตู้ฟักไข่ที่เท่ากัน (3,500-5,000 บาท)

ระยะเวลาคืนทุน (PB) ของเครื่องฟอกไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ถูกคำนวณตามสมการที่ 2.13 โดยใช้ข้อมูลเงินลงทุนเริ่มต้นตามรายละเอียดในรูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.2 โดยมีการพิจารณาผลตอบแทนสะสมสุทธิรายปีจากค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อรอบการฟอกไข่ (21 วัน) ของเครื่องฟอกไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เทียบกับเครื่องฟอกไข่แบบขดลวดไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่าเครื่องฟอกไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้ไม่มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการฟอกไข่เนื่องจากสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เองผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่เครื่องฟอกไข่แบบขดลวดไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าพื้นฐานจากสายส่ง ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 2.88 หน่วยต่อวัน และเมื่อพิจารณาต่อรอบการฟอกไข่ พบว่าใช้พลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 60.48 หน่วย [11] ปัจจุบันอัตราค่าไฟฟ้าฐานเท่ากับ 3.7556 บาทต่อหน่วย (ที่มา: <http://www.erc.or.th>, เข้าดูเมื่อวันที่ 11/03/2559) เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าต่อรอบการฟอกไข่เท่ากับ 227.14 บาท ถ้าในระยะเวลา 1 ปี สามารถฟอกไข่ไก่ได้ 17 รอบ ดังนั้นเครื่องฟอกไข่แบบขดลวดไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 3,861.36 บาทต่อปี ดังนั้นระยะเวลาคืนทุนของของเครื่องฟอกไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้โดยนำเงินลงทุนเริ่มต้นในแต่ละปีลบออกด้วยผลตอบแทนสุทธิสะสมรายปีที่ไม่ต้องจ่ายค่าพลังงานไฟฟ้าในแต่ละปี (3,861.36 บาท) นอกจากนี้ทุกๆ 2 ปี จะมีการเปลี่ยนกล่องโครงสร้างตู้ฟอกไข่และแบตเตอรี่เนื่องจากหมดอายุการใช้งานทำให้มีการลงทุนเพิ่มสำหรับอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้เท่ากับ 2,600 บาท ผลการคำนวณระยะเวลาคืนทุนของเครื่องฟอกไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าระยะเวลาคืนทุนที่ได้ผลตอบแทนเท่ากับเงินลงทุนรวมคือ 7.05 ปี นอกจากนี้ พบว่าในปีที่ 3 และ 6 ของการใช้งานตู้ฟอกไข่เริ่มมีผลตอบแทนสะสมสุทธิรายปีน้อยกว่าปีอื่นๆ เนื่องจากในปีที่ 3 และ 6 มีการลงทุนเพิ่มเติมในส่วนของกล่องโครงสร้างตู้ฟอกไข่และแบตเตอรี่ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูป 0.28 ระยะเวลาคืนทุนของเครื่องฟอกไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาต้นทุนของเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกที่มีแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นแหล่งความร้อนเพียงอย่างเดียว (1.06 ปี) [9] พบว่าตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะคืนทุนของนานกว่าถึง 6 ปี และเมื่อเปรียบเทียบกับตู้ฟักไข่ที่มีขนาดใหญ่กว่าเช่นตู้ฟักไข่แบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้น้ำมันที่ใช้แล้วหลังจากการประกอบอาหารเป็นแหล่งพลังงานความร้อน [8] พบว่าตู้ฟักไข่ที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้มีระยะเวลาคืนทุนมากกว่าถึง 2.88 เท่า หรือ 4.6 ปี เห็นได้ว่าระยะเวลาคืนทุนที่แตกต่างนี้เนื่องจากอุปกรณ์ส่วนที่เพิ่มเติมจากเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ และ ชุดระบบสะสมความร้อน อย่างไรก็ตามต้นทุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องและข้อได้เปรียบของเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นี้คือ สามารถทำงานได้ทั้งกลางวันและกลางคืนโดยไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน เพราะใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านระบบทำความร้อนชุดแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมระบบสะสมความร้อนแบบสารเปลี่ยนสถานะ ทำให้ไม่ต้องมีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ และเป็นการสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนที่มีอยู่ไม่จำกัด

ดังนั้นจากผลการทดสอบทางด้านเทคนิคและการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สรุปได้ว่าเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาทดแทนตู้ฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้าได้ และเป็นแนวทางส่งเสริมและพัฒนากการใช้พลังงานทดแทน เพื่อลดปัญหาการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้อีกทางหนึ่ง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาและสร้างเครื่องฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริกขนาด 24 ฟอง ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้เครื่องฟอกไข่สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ห่างไกลจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน โดยใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเป็นแหล่งจ่ายพลังงานความร้อนในเวลากลางวัน และใช้สารเปลี่ยนสถานะชนิดพาราฟินเป็นสารสะสมความร้อนภายในระบบสะสมความร้อนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานความร้อนในช่วงเวลากลางคืน โดยแหล่งความจ่ายความร้อนทั้งสองชนิดได้รับพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน ผลการทดลองพบว่าต้นแบบเครื่องฟอกไข่สามารถควบคุมอุณหภูมิการฟอกไข่เฉลี่ยในช่วง $36.7 - 38.8^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $66 \pm 0.2\% \text{RH}$ ตลอดระยะเวลา 1 รอบของการฟอกไข่ (21 วัน) โดยช่วงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของการฟอกไข่ดังกล่าวสอดคล้องกับสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการฟอกไข่ให้มีอัตราการฟอกไข่สูงสุด (อุณหภูมิฟอกไข่ $36-39^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ 60-80 %RH) รวมถึงมีประสิทธิภาพการทำงานในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้เช่นเดียวกับเครื่องฟอกไข่ที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ที่ใช้ขดลวดความร้อนเป็นแหล่งความร้อน อย่างไรก็ตาม บางวันในช่วงบ่ายพบว่าอุณหภูมิการฟอกไข่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมเนื่องจากภายในชุดระบบสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากชุดระบบสะสมพลังงานมายังเครื่องฟอกไข่ผ่านชุดท่อนำความร้อนแสดนเลส โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวันที่ท้องฟ้าโปร่งและมีความเข้มรังสีอาทิตย์สูง

ผลการประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาคืนทุนของเครื่องฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าใช้เงินลงทุนเริ่มต้นของระบบ รวม 22,020 บาท ซึ่งเป็นเงินลงทุนเริ่มต้นที่สูงเมื่อเทียบกับตู้ฟอกไข่แบบขดลวดที่มีขนาดเดียวกันและมีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ เนื่องมาจากตู้ฟอกไข่ฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริกมีการทำงานร่วมกับระบบสะสมความร้อนและใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แทนพลังงานไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าพื้นฐาน และเมื่อคำนวณต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (LCC) โดยปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่าเท่ากับ 9,142 บาท สำหรับการประเมินระยะเวลาคืนทุน (PB) โดยพิจารณาระยะเวลาคืนทุนจากผลตอบแทนสุทธิ ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาผลตอบแทนสุทธิจากตู้ฟอกไข่แบบขดลวดไฟฟ้าที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าประมาณ 3,861.36 บาทต่อปี ผลการประเมินระยะเวลาคืนทุนพบว่าตู้ฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะเวลาคืนทุนที่ได้ผลตอบแทนเท่ากับเงินลงทุนรวมคือ 7.05 ปี ดังนั้น

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าเครื่องฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาทดแทนเครื่องฟอกไข่แบบขดลวดไฟฟ้าได้ และเป็นแนวทางส่งเสริมและพัฒนาการใช้พลังงานทดแทน เพื่อลดปัญหาการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้อีกทางหนึ่ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. มีการติดตั้งชุดป้องกันความร้อนจากชุดสะสมความร้อนหรือแยกส่วนระบบสะสมความร้อนออกจากโครงสร้างเครื่องฟอกไข่เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมความร้อน และการจัดการความร้อนอย่างมีคุณภาพ
2. ควรพัฒนาระบบสะสมความร้อนโดยใช้ฉนวนกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนในช่วงเวลากลางวัน
3. ควรทดสอบการฟอกไข่ไก่ที่มีเชื้อจริงเพื่อให้ทราบถึงอัตราการฟอกไข่เป็นตัวไก่ และนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องฟอกไข่ที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์
4. ต้นทุนของเครื่องฟอกไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง เนื่องจากราคาของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้สามารถเกิดการใช้งานได้จริงในพื้นที่ห่างไกลจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน ควรมีการวิจัยและพัฒนา ระบบและต่อยอดองค์ความรู้เพื่อลดต้นทุนของระบบ



บรรณานุกรม

- [1] King`Ori A. M., Review of the Factors That Influence Egg Fertility and Hatchability in Poultry, *Int. J. Poult. Sci.* 10 (2011) 483-492.
- [2] Hubbard Co., *Incubation guide*, U.S.A., 2011, www.hubbardbreeders.com (Accessed: July 2016).
- [3] Nakage E., Cardozo J., Pereira G., S. and Boleli I., Effect of temperature on incubation period, embryonic mortality, hatch rate, egg water loss and partridge chick weight (*Rhynchotus rufescens*), *Rev. Bras. Cienc. Avic.* 5 (2003) 131-135.
- [4] Lourens A., Van Den Brand H., Meijerhof R. and Kemp B., Effect of eggshell temperature during incubation on embryo development, hatchability, and posthatch development, *Poultry Sci.* 84 (2005) 914-920.
- [5] อศนัย ประทุมมิน. การพัฒนาเครื่องฟักไข่โดยใช้ระบบน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ปริญญา นิพนธ์ กศ.ม. (อุตสาหกรรมศึกษา) thesis, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, (2550).
- [6] ชาวนวิทย์ อุดมศักดิ์กุล. การพัฒนาเครื่องฟักไข่พลังงานแสงอาทิตย์ ป.บัณฑิต (เทคโนโลยี พลังงาน) thesis, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, (2544).
- [7] ชัยณรงค์ ธรรมกุล. การพัฒนาเครื่องฟักไข่โดยใช้ถังหมักก๊าซชีวภาพร่วมกับเครื่องทำน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ วิทยานิพนธ์ วศ.ม. thesis, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, (2551).
- [8] สันต์ สลัดยะนันท์. การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับตู้ฟักไข่ใช้เชื้อเพลิงที่เป็น วัสดุเหลือใช้จากการผลิตอาหาร วิทยานิพนธ์ วศ.บ. thesis, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, (2546).
- [9] พงศ์สวัสดิ์ สวัสดิภาพ. การพัฒนาเครื่องฟักไข่โดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกในการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้น วิทยานิพนธ์ วศ.ม thesis, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, (2546).
- [10] แสงธิดา แสงดาวเรือง, สุชน ตั้งทวีวัฒน์, บุญล้อม ชีวะอิสระกุล, เบญจวรรณ ศิริศรีสวัสดิ์, สมควร ปัญญาวีร์ และ ผ่านฟ้า ณ เชียงใหม่. การประชุมทางวิชาการของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 43. 314-322.
- [11] Singhadet E., Suriwong T., Jijajitsawat S. and Tanarak P., Performance comparison of heating coil and thermoelectric egg incubators, *Burapha Sci. J. Special volume* 2014 (2014) 263-270.
- [12] Cobb Vantress I. (2013). "Hatchery management guide". [ออนไลน์]. สามารถเข้าถึง ได้ จาก : http://dev.cobb.marln.com/docs/default-source/management-guides/hatchery_management_guide_englishAB158662CC0DBEA86B974859.pdf (13/06/2016).
- [13] Rowe D. W. "Thermoelectrics Handbook Macro to Nano". in *Thermoelectrics Handbook Macro to Nano*. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL (2006).

- [14] Minnich A. J., Dresselhaus M. S., Ren Z. F. and Chen G., Bulk nanostructured thermoelectric materials: current research and future prospects *Energy Environ. Sci.* 2 (2009) 466-479.
- [15] Tritt T. M. and Subramanian M. A., Thermoelectric Materials, Phenomena, and Application: A Bird's Eye View, *MATER RES BULL* 31 (2006) 188-198.
- [16] Snyder G. J. and Toberer E. S., Complex thermoelectric materials, *Nature Materials* 7 (2008) 105-114.
- [17] Heremans J. "Nanometer-Scale Thermoelectric Materials ". in *Springer Handbook of Nanotechnology* (ed. B. Bhushan). 2nd Ed. Springer. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany (2007) 345-374.
- [18] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.). "เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์". [ออนไลน์]. สามารถเข้าถึงได้จาก: 14/07/2556).
- [19] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2557). "คู่มือการพัฒนาและการลงทุนการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์". [ออนไลน์]. สามารถเข้าถึงได้จาก: http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/h_solar.pdf (22 กรกฎาคม 2557).
- [20] สิทธิพร พึ่งใหญ่. การเก็บสะสมพลังงานความร้อนโดยการเปลี่ยนสถานะของซีมีนพาราฟิน วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต thesis, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, (2537).
- [21] Raman V. and Tiwari G. N., Life cycle cost analysis of HPVT air collector under different Indian climatic conditions, *Energy Policy* 36 (2008) 603-611.
- [22] Liu D., Liu Z., Li Z. and Liu K., Research on the Energy Load During Incubation and the Energy-saving Potential of the Traditional Incubator, *Procedia Engineering* 121 (2015) 1757-1763.
- [23] Mansaray K. G. and Yansaneh O., Fabrication and Performance Evaluation of a Solar Powered Chicken Egg Incubator, *Inter. J. Emer. Tech. & Adv. Eng.* 5 (2015) 31-36.
- [24] Ramli M. B., Lim H. P., Wahab M. S. and Zin M. F. M., Egg Hatching Incubator Using Conveyor Rotation System, *Procedia Manufacturing* 2 (2015) 527-531.
- [25] อัมโรฒ ไชติวิทย์. ระยะเวลาในการเก็บรักษาและระดับความชื้นของตู้ฟักที่เหมาะสมต่ออัตราการฟักออกรวมทั้งสมรรถภาพการผลิตของลูกนกกระจอกเทศ. วิทยานิพนธ์ วท.ม. thesis, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, (2549).
- [26] Lourens A., Van Den Brand H., Heetkamp M. J. W., Meijerhof R. and Kemp B., Effects of Eggshell Temperature and Oxygen Concentration on Embryo Growth and Metabolism During Incubation, *Poultry Sci.* 86 (2007) 2194-2199.



ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการตรวจวัดอุณหภูมิต่างๆ ตลอดระยะเวลา 1 รอบการฟักไข่

ตาราง ก ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยต่อชั่วโมงต่าง ๆ สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องฟักไข่

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp- TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp- Parafin (°C)	Temp - Coll (°C)	Ambeint (°C)
1	8:00 น.	31.11	42.20	35.75	40.47	3.05	123.62	58.89	35.58	26.70
	9:00 น.	37.65	43.09	36.62	41.46	3.13	129.70	92.27	36.22	28.00
	10:00 น.	39.04	41.66	36.92	43.57	3.29	143.30	115.17	36.30	32.00
	11:00 น.	38.30	38.28	37.33	44.15	3.33	147.13	139.98	36.54	32.70
	12:00 น.	37.72	37.59	37.72	43.98	3.32	145.99	161.81	36.66	34.20
	13:00 น.	38.16	38.01	38.43	43.36	3.27	141.89	181.34	36.65	34.70
	14:00 น.	38.45	38.33	38.94	30.43	2.30	69.88	193.85	36.66	34.70
	15:00 น.	38.27	38.23	39.00	12.07	0.91	11.00	182.21	36.24	34.70
	16:00 น.	38.11	38.09	38.92				169.64	36.01	34.70
	17:00 น.	38.01	37.97	38.77				158.89	36.29	33.60
	18:00 น.	36.52	36.53	37.41				146.86	36.47	30.00
	19:00 น.	35.36	35.47	37.05				133.36	36.28	28.50
	20:00 น.	34.37	34.56	36.59				120.75	35.77	28.00
	21:00 น.	33.94	34.18	36.53				110.04	35.64	27.50
	22:00 น.	34.12	34.33	36.64				101.50	35.65	27.20
	23:00 น.	34.14	34.40	36.93				92.55	35.85	27.00

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp- TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp- Parafin (°C)	Temp - Coil (°C)	Ambeint (°C)
2	0:00 น.	34.24	34.52	37.20				84.94	36.01	26.70
	1:00 น.	34.36	34.65	37.39				77.42	36.19	26.20
	2:00 น.	34.39	34.72	37.52				69.25	36.22	25.80
	3:00 น.	34.40	34.80	37.64				61.94	36.30	25.30
	4:00 น.	34.15	34.56	37.16				56.95	36.21	25.10
	5:00 น.	33.66	34.01	36.33				53.82	36.15	25.40
	6:00 น.	33.48	33.79	35.91	2.71			51.52	36.35	25.60
	7:00 น.	34.74	43.02	37.18	22.39			58.26	36.50	25.60
	8:00 น.	38.43	43.44	37.27	39.57			92.73	36.36	27.00
	9:00 น.	39.67	41.47	37.44	42.00	3.17	133.14	120.55	36.30	29.00
	10:00 น.	37.83	37.68	37.28	34.81	2.63	91.45	134.97	36.01	31.50
	11:00 น.	37.62	37.46	37.75	43.95	3.32	145.79	153.26	35.88	31.90
	12:00 น.	38.30	38.15	38.65	43.64	3.29	143.70	175.72	36.07	32.50
	13:00 น.	38.93	38.81	39.53	43.23	3.26	141.05	195.00	36.40	33.80
	14:00 น.	39.52	39.43	40.36	41.71	3.15	131.28	211.15	36.62	34.00
	15:00 น.	39.77	39.73	40.79	12.64	0.95	12.06	209.73	36.53	34.50
	16:00 น.	39.61	39.62	40.75	7.06			192.28	36.23	35.30
	17:00 น.	39.14	39.21	40.33	3.98			177.99	36.11	33.00
	18:00 น.	37.61	37.69	38.88				164.91	36.29	32.40
	19:00 น.	36.41	36.46	37.69				152.96	36.29	32.00
	20:00 น.	35.66	35.70	36.98				141.73	36.21	31.70
	21:00 น.	35.18	35.29	36.99				129.73	36.13	30.00
	22:00 น.	34.33	34.51	36.62				117.83	35.63	29.50
	23:00 น.	33.95	34.19	36.59				107.88	35.65	28.50

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp- TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp- Parafin (°C)	Temp - Coil (°C)	Ambeint (°C)
3	0:00 u.	33.78	34.06	36.85				95.75	35.74	28.20
	1:00 u.	33.80	34.12	37.01				90.33	35.97	28.10
	2:00 u.	33.76	34.13	37.26				82.07	36.10	27.30
	3:00 u.	33.82	34.25	37.43				74.42	36.37	26.90
	4:00 u.	33.98	34.47	37.75				66.89	36.63	26.70
	5:00 u.	34.02	34.58	37.86				60.61	36.64	26.70
	6:00 u.	34.46	40.04	37.41	3.71	0.28		61.18	36.63	26.70
	7:00 u.	35.65	43.62	37.11	18.40	1.39		67.81	36.59	26.80
	8:00 u.	36.62	42.72	36.86	39.38	2.97		93.96	36.33	27.00
	9:00 u.	38.61	42.16	37.16	42.74	3.23	137.87	122.56	36.62	30.00
	10:00 u.	38.44	39.58	37.29	42.44	3.20	135.92	146.03	36.60	31.70
	11:00 u.	37.53	37.46	37.69	43.19	3.26	140.75	166.58	36.62	32.00
	12:00 u.	38.08	37.97	38.56	43.28	3.27	141.37	186.44	36.51	34.00
	13:00 u.	39.12	38.89	39.12	41.81	3.16	131.91	203.53	37.36	35.50
	14:00 u.	38.99	38.71	38.97	40.60	3.06	124.39	215.86	37.15	36.00
	15:00 u.	38.84	38.57	38.97	10.65	0.80	8.56	213.84	37.23	36.40
	16:00 u.	38.97	38.74	39.14	4.27	0.32		195.62	37.21	37.00
	17:00 u.	38.80	38.65	39.19	3.72	0.28		180.45	37.02	35.00
	18:00 u.	38.48	38.30	38.70	1.93	0.15		167.12	36.66	34.50
	19:00 u.	37.62	37.46	37.87				154.70	36.89	32.30
	20:00 u.	36.86	36.74	37.51				141.78	37.07	31.10
	21:00 u.	36.29	36.26	37.61				128.12	36.94	30.80
	22:00 u.	35.72	35.77	37.48				115.93	36.84	29.00
	23:00 u.	35.32	35.41	37.45				105.25	36.73	28.40

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp-TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp-Parafin (°C)	Temp-Coil (°C)	Ambeint (°C)
4	0:00 u.	34.98	35.11	37.35				92.79	36.57	28.30
	1:00 u.	34.87	35.03	37.43				87.14	36.63	28.00
	2:00 u.	34.75	34.95	37.46				79.06	36.66	27.70
	3:00 u.	34.69	34.93	37.37				71.20	36.64	27.70
	4:00 u.	34.63	34.90	37.43				63.98	36.53	27.60
	5:00 u.	34.35	36.14	37.25				58.95	36.27	27.40
	6:00 u.	34.13	44.10	36.46	3.75	0.28		65.77	36.28	27.30
	7:00 u.	33.46	43.02	36.70	21.54	1.63		69.81	36.43	27.20
	8:00 u.	35.49	42.02	36.96	39.16	2.96		100.57	36.69	30.00
	9:00 u.	39.38	41.31	37.30	42.77	3.23	138.04	124.46	36.64	33.00
	10:00 u.	38.60	38.44	37.79	43.34	3.27	141.76	147.34	36.68	33.30
	11:00 u.	38.78	38.54	38.60	42.96	3.24	139.32	168.95	37.27	33.70
	12:00 u.	39.32	39.06	39.27	41.64	3.14	130.87	186.38	37.79	34.80
	13:00 u.	39.33	39.06	39.35	43.13	3.25	140.36	203.22	37.75	35.00
	14:00 u.	39.16	38.88	39.18	39.23	2.96	116.13	215.86	37.40	36.50
	15:00 u.	39.13	38.89	39.29	10.83	0.82	8.86	212.51	37.28	37.30
	16:00 u.	39.04	38.81	39.26	5.40	0.41		194.24	37.15	36.70
	17:00 u.	39.15	38.96	39.40	4.13	0.31		179.48	37.31	36.00
	18:00 u.	38.89	38.71	39.06				166.22	36.93	35.00
	19:00 u.	38.56	38.39	38.67				154.55	36.52	34.40
	20:00 u.	37.90	37.74	38.11				143.77	36.91	33.20
	21:00 u.	37.42	37.27	37.67				133.65	37.15	32.40
	22:00 u.	36.65	36.58	37.48				122.05	37.11	31.00
	23:00 u.	36.30	36.29	37.62				110.68	37.08	30.80

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE- Hot (°C)	Temp- TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp- Parafin (°C)	Temp - Coil (°C)	Arbeitsint (°C)
5	0:00 u.	35.65	35.71	37.49				98.02	36.87	29.00
	1:00 u.	35.37	35.47	37.44				91.10	36.86	28.80
	2:00 u.	35.14	35.28	37.52				82.85	36.83	28.40
	3:00 u.	34.98	35.16	37.54				75.01	36.73	28.10
	4:00 u.	34.60	34.84	37.33				67.47	36.60	27.50
	5:00 u.	34.14	34.43	37.03				60.83	36.19	27.10
	6:00 u.	34.10	39.77	36.90	4.24	0.32		61.27	36.39	27.10
	7:00 u.	34.11	44.54	37.14	12.15	0.92		67.43	36.58	27.20
	8:00 u.	32.52	42.82	37.31	33.87	2.56		84.40	36.51	28.00
	9:00 u.	39.30	41.60	37.34	42.28	3.19	134.93	116.41	36.68	30.00
	10:00 u.	38.63	38.45	37.86	40.88	3.08	126.10	135.75	36.96	32.20
	11:00 u.	38.98	38.73	38.67	43.35	3.27	141.83	158.66	37.71	34.40
	12:00 u.	39.25	38.97	38.93	42.20	3.18	134.39	178.58	37.75	35.90
	13:00 u.	39.40	39.11	39.07	39.52	2.98	117.89	192.86	37.70	36.30
	14:00 u.	39.71	39.40	39.43	38.68	2.92	112.90	206.20	37.86	36.80
	15:00 u.	39.63	39.32	39.33	10.75	0.81	8.72	201.52	37.69	37.50
	16:00 u.	39.49	39.18	39.22	4.82	0.36		184.01	37.51	37.00
	17:00 u.	39.41	39.09	39.09	3.55	0.27		169.81	37.34	36.10
	18:00 u.	39.03	38.78	38.81				157.36	37.02	34.00
	19:00 u.	38.55	38.33	38.40				146.40	36.64	33.60
	20:00 u.	38.04	37.83	37.98				136.37	36.23	33.00
	21:00 u.	37.69	37.48	37.70				127.30	36.64	32.20
	22:00 u.	37.31	37.15	37.92				116.82	36.90	31.50
	23:00 u.	36.67	36.58	37.77				105.93	36.82	31.00

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp-TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp-Parafin (°C)	Temp - Coll (°C)	Ambeint (°C)
7	0:00 u.	35.82	35.90	37.58				91.57	37.03	30.00
	1:00 u.	35.65	35.76	37.47				86.77	36.80	29.00
	2:00 u.	35.34	35.49	37.37				78.25	36.58	28.00
	3:00 u.	35.16	35.37	37.37				70.81	36.66	27.90
	4:00 u.	35.04	35.33	37.52				63.81	36.70	27.60
	5:00 u.	34.98	35.33	37.52				57.93	36.60	27.70
	6:00 u.	34.77	35.07	37.04	3.49	0.26		54.98	36.60	27.70
	7:00 u.	34.97	35.21	37.06	23.84	1.80		55.80	36.75	27.80
	8:00 u.	36.94	38.18	37.48	40.24	3.04		91.18	36.92	30.00
	9:00 u.	39.35	40.25	37.94	42.66	3.22	137.35	123.36	37.07	32.00
	10:00 u.	39.12	38.90	38.68	43.05	3.25	139.84	146.20	37.83	34.00
	11:00 u.	38.87	38.63	38.56	43.28	3.27	141.40	167.59	37.65	35.00
	12:00 u.	39.24	38.98	38.98	43.09	3.25	140.15	186.87	38.03	36.00
	13:00 u.	39.37	39.10	39.18	42.76	3.23	138.00	203.50	38.05	37.20
	14:00 u.	39.76	39.48	39.66	41.42	3.13	129.50	216.96	38.27	38.90
	15:00 u.	39.97	39.68	39.92	9.97	0.75	7.50	213.31	38.47	38.70
	16:00 u.	40.04	39.74	39.94	5.34	0.40		194.45	38.43	38.30
	17:00 u.	39.96	39.66	39.81	7.95	0.60		179.78	38.32	37.00
	18:00 u.	39.37	39.11	39.10				166.69	37.39	36.60
	19:00 u.	38.42	38.23	38.52				154.64	36.25	36.00
	20:00 u.	38.19	38.03	38.42				143.93	36.14	35.10
	21:00 u.	37.94	37.75	38.08				134.15	36.07	34.20
	22:00 u.	37.65	37.47	37.78				125.51	36.61	32.00
	23:00 u.	37.41	37.23	37.52				117.37	36.97	30.00

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp- TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp- Parafin (°C)	Temp - Coil (°C)	Ambeint (°C)
8	0:00 u.	36.83	36.74	37.60				104.90	36.92	30.50
	1:00 u.	36.87	36.78	37.74				99.39	37.00	30.70
	2:00 u.	36.46	36.42	37.58				91.23	36.88	30.20
	3:00 u.	36.31	36.31	37.65				83.46	36.93	30.00
	4:00 u.	36.18	36.21	37.64				76.38	36.91	29.50
	5:00 u.	35.86	35.94	37.52				69.34	36.79	29.30
	6:00 u.	35.46	37.01	37.38	4.80	0.36		63.92	36.63	29.00
	7:00 u.	35.93	44.32	37.10	13.27	1.00		69.89	36.73	29.00
	8:00 u.	36.70	44.00	37.25	28.75	2.17		80.72	36.79	30.00
	9:00 u.	39.55	41.70	37.39	42.97	3.24	139.35	114.78	36.82	32.00
	10:00 u.	38.43	38.25	37.71	43.24	3.26	141.12	140.26	36.99	33.90
	11:00 u.	38.41	38.17	38.11	43.34	3.27	141.74	161.88	37.32	34.50
	12:00 u.	38.95	38.71	38.73	41.73	3.15	131.42	179.99	37.76	35.00
	13:00 u.	39.09	38.87	38.91	40.90	3.09	126.25	193.76	37.83	36.80
	14:00 u.	39.53	39.29	39.47	41.66	3.14	130.98	209.64	38.28	38.00
	15:00 u.	39.77	39.52	39.76	20.65	1.56	32.18	208.47	38.37	38.40
	16:00 u.	39.65	39.40	39.61	12.29	0.93		194.35	37.85	37.70
	17:00 u.	38.45	38.18	38.01	5.24	0.40		179.38	37.41	36.00
	18:00 u.	37.92	37.70	37.77				165.99	37.07	34.00
	19:00 u.	37.52	37.34	37.40				154.04	36.67	33.90
	20:00 u.	37.06	36.89	36.92				143.15	36.18	33.20
	21:00 u.	36.81	36.66	36.84				132.89	36.27	32.00
	22:00 u.	36.70	36.65	37.39				119.67	36.98	31.00
	23:00 u.	36.40	36.40	37.43				106.95	36.90	30.00

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp- TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp- Paraffin (°C)	Temp - Coll (°C)	Ambelnt (°C)
9	0:00 u.	35.92	36.02	37.34				92.93	36.84	29.70
	1:00 u.	35.73	35.87	37.38				85.38	36.86	29.50
	2:00 u.	35.38	35.59	37.25				75.45	36.71	28.30
	3:00 u.	35.32	35.59	37.35				66.21	36.63	28.00
	4:00 u.	35.10	35.37	36.86				60.15	36.61	27.50
	5:00 u.	34.40	34.63	35.94				56.48	36.63	27.30
	6:00 u.	31.36	40.45	35.96	3.81	0.29		58.49	36.26	27.30
	7:00 u.	28.89	41.31	35.65	16.24	1.23		63.93	36.30	27.20
	8:00 u.	33.44	38.94	34.70	18.68	1.41		70.93	36.66	29.00
	9:00 u.	34.19	40.70	35.67	35.61	2.69	95.69	91.58	36.76	30.00
	10:00 u.	39.64	43.95	37.65	43.09	3.25	140.10	119.83	36.93	31.90
	11:00 u.	39.21	39.16	37.65	43.33	3.27	141.67	143.40	37.01	33.00
	12:00 u.	38.17	37.92	37.79	43.06	3.25	139.95	164.66	37.17	35.00
	13:00 u.	38.02	37.77	37.76	42.61	3.22	137.03	182.74	37.07	36.20
	14:00 u.	38.48	38.21	38.27	41.26	3.11	128.50	198.13	37.42	38.40
	15:00 u.	38.75	38.47	38.63	10.57	0.80	8.43	195.58	37.70	38.00
	16:00 u.	38.66	38.40	38.43	4.95	0.37		178.76	37.49	37.50
	17:00 u.	38.31	38.09	38.58	2.88	0.22		158.92	36.55	37.00
	18:00 u.	39.17	39.02	39.91				151.77	36.59	36.00
	19:00 u.	40.03	39.94	40.70				141.79	36.68	35.00
	20:00 u.	39.81	39.75	40.44				132.81	36.44	34.00
	21:00 u.	38.42	38.39	38.92				123.88	35.68	32.00
	22:00 u.	36.75	36.72	37.24				115.88	35.71	29.50
	23:00 u.	35.68	35.66	36.81				106.63	35.63	29.00

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp- TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp- Parafin (°C)	Temp - Coil (°C)	Ambeint (°C)
10	0:00 u.	35.08	35.12	37.80				90.48	35.72	28.00
	1:00 u.	35.07	35.13	37.00				90.14	35.64	27.00
	2:00 u.	34.95	35.04	37.17				82.45	35.78	26.90
	3:00 u.	34.72	34.85	37.15				75.09	35.73	26.50
	4:00 u.	34.56	34.74	37.12				68.71	35.71	26.20
	5:00 u.	34.53	34.73	37.18				62.68	35.78	26.30
	6:00 u.	33.65	40.03	37.08	3.40	0.26		61.97	35.93	26.40
	7:00 u.	34.23	43.09	37.18	23.40	1.77		70.80	36.52	26.60
	8:00 u.	36.69	41.45	37.49	39.06	2.95		101.43	36.73	28.00
	9:00 u.	39.14	40.11	37.69	42.63	3.22	137.13	127.77	36.60	30.00
	10:00 u.	38.71	38.51	38.41	43.16	3.26	140.58	151.07	37.10	33.50
	11:00 u.	38.98	38.76	38.93	43.29	3.27	141.44	172.16	37.56	34.00
	12:00 u.	39.04	38.82	39.06	43.11	3.25	140.27	190.33	37.45	35.30
	13:00 u.	39.11	38.90	39.28	42.71	3.22	137.69	206.46	37.48	36.30
	14:00 u.	39.05	38.86	39.36	41.42	3.13	129.46	219.45	37.23	38.30
	15:00 u.	39.25	39.07	39.72	11.51	0.87	10.00	215.63	37.39	38.00
	16:00 u.	39.69	39.34	39.17	7.82	0.59		197.84	38.33	37.60
	17:00 u.	38.87	38.53	38.45	4.88	0.37		182.07	38.00	37.00
	18:00 u.	38.39	38.11	38.01				168.00	37.38	36.00
	19:00 u.	38.16	37.98	38.31				155.87	36.86	35.00
	20:00 u.	38.74	38.79	39.76				145.81	37.08	33.00
	21:00 u.	38.33	38.43	39.42				135.90	36.54	32.10
	22:00 u.	37.37	37.47	38.44				126.70	36.40	31.60
	23:00 u.	36.63	36.72	37.64				118.57	36.48	31.30

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp- TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp- Paraffin (°C)	Temp - Coil (°C)	Ambeint (°C)
11	0:00 u.	36.08	36.15	37.18				109.60	36.60	30.60
	1:00 u.	36.01	36.10	37.33				102.81	36.56	30.30
	2:00 u.	35.79	35.92	37.39				95.35	36.57	29.70
	3:00 u.	35.47	35.62	37.27				88.44	36.48	29.00
	4:00 u.	35.11	35.31	37.18				81.62	36.39	28.60
	5:00 u.	34.97	35.22	37.38				74.79	36.52	28.50
	6:00 u.	34.83	36.30	37.29	3.82	0.29		70.16	36.48	28.30
	7:00 u.	37.10	42.23	37.03	11.82	0.89		73.30	36.51	28.00
	8:00 u.	38.29	41.80	37.39	34.47	2.60		90.70	36.65	30.00
	9:00 u.	39.07	39.24	37.95	41.53	3.13	130.15	119.97	37.02	32.40
	10:00 u.	39.68	40.17	38.73	43.16	3.26	140.56	144.60	37.84	33.70
	11:00 u.	39.19	39.04	39.12	43.07	3.25	139.97	166.53	38.13	34.80
	12:00 u.	38.98	38.84	39.15	42.72	3.22	137.74	184.79	38.05	35.50
	13:00 u.	39.32	39.14	39.26	42.36	3.20	135.43	200.98	38.53	36.30
	14:00 u.	39.23	39.00	39.11	41.49	3.13	129.89	215.28	38.73	36.50
	15:00 u.	39.38	39.16	39.36	8.68	0.65	5.68	212.22	38.87	37.90
	16:00 u.	39.77	39.55	39.70	5.44	0.41		194.26	39.19	37.70
	17:00 u.	39.67	39.49	39.57	3.57	0.27		179.29	39.04	37.00
	18:00 u.	39.16	39.00	38.99				165.79	38.39	35.00
	19:00 u.	38.98	38.82	39.03				154.30	37.96	34.30
	20:00 u.	39.70	39.53	40.08				144.07	37.50	33.20
	21:00 u.	39.36	39.19	39.48				134.44	37.01	32.00
	22:00 u.	38.80	38.63	38.85				125.63	36.51	31.50
	23:00 u.	38.13	37.96	38.12				117.70	35.93	31.00

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp-TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp-Parafin (°C)	Temp - Coil (°C)	Ambeint (°C)
12	0:00 u.	35.76	35.88	37.33				78.42	36.77	30.00
	1:00 u.	35.60	35.77	37.38				75.61	36.73	29.30
	2:00 u.	35.38	35.56	37.04				71.00	36.62	28.50
	3:00 u.	34.88	35.02	36.25				66.41	36.57	28.20
	4:00 u.	34.34	34.45	35.53				62.18	36.53	27.90
	5:00 u.	33.88	33.97	34.92				58.83	36.51	27.80
	6:00 u.	33.40	33.95	34.52	3.48	0.26		56.53	36.48	27.70
	7:00 u.	33.76	44.02	36.93	23.52	1.78		55.43	36.56	27.60
	8:00 u.	37.79	42.98	37.15	38.06	2.87		56.17	36.54	29.00
	9:00 u.	37.62	37.67	37.68	41.47	3.13	129.80	83.11	36.27	31.00
	10:00 u.	37.95	37.97	39.05	42.33	3.19	135.21	122.62	36.42	33.20
	11:00 u.	38.45	38.45	39.22	42.42	3.20	135.83	145.23	36.96	34.00
	12:00 u.	39.03	38.97	40.01	42.10	3.18	133.79	164.35	37.64	35.00
	13:00 u.	39.39	39.39	40.76	41.57	3.14	130.42	179.65	37.79	35.40
	14:00 u.	39.42	39.47	41.04	39.74	3.00	119.18	191.45	37.58	36.00
	15:00 u.	39.70	39.75	41.29	11.05	0.83	9.22	187.21	37.72	37.00
	16:00 u.	39.46	39.46	40.80	6.87	0.52		169.77	37.56	37.20
	17:00 u.	39.20	39.18	40.34	5.91	0.45		154.57	37.38	36.00
	18:00 u.	39.00	38.97	40.00	1.51	0.11		141.44	37.12	35.00
	19:00 u.	39.40	39.41	40.75				129.19	36.31	34.50
	20:00 u.	39.14	39.14	39.99				118.85	35.76	32.00
	21:00 u.	38.35	38.33	38.99				109.90	35.53	31.00
	22:00 u.	37.57	37.51	38.08				101.94	35.59	30.70
	23:00 u.	36.90	36.83	37.32				95.08	35.80	30.30

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp- TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp- Parafin (°C)	Temp - Coil (°C)	Ambeint (°C)
13	0:00 u.	36.31	36.25	37.01				87.94	35.82	30.00
	1:00 u.	36.15	36.12	37.02				83.64	35.75	29.20
	2:00 u.	35.94	35.95	36.99				79.01	35.79	29.00
	3:00 u.	35.83	35.87	37.04				75.38	35.83	28.60
	4:00 u.	35.69	35.77	37.01				71.39	35.87	28.40
	5:00 u.	35.76	35.90	37.18				67.54	36.01	28.70
	6:00 u.	35.84	35.99	37.11	3.37	0.25		63.71	36.06	28.90
	7:00 u.	36.08	36.79	37.08	21.54	1.63		60.67	36.11	29.00
	8:00 u.	39.73	41.22	37.43	38.77	2.93		61.27	35.92	30.00
	9:00 u.	39.24	39.09	39.06	42.41	3.20	135.74	96.29	36.72	32.00
	10:00 u.	39.24	39.02	39.12	42.65	3.22	137.30	131.65	37.95	34.00
	11:00 u.	39.60	39.41	40.08	42.79	3.23	138.17	153.33	38.30	34.50
	12:00 u.	39.83	39.66	40.62	42.69	3.22	137.52	171.37	38.25	35.00
	13:00 u.	39.88	39.74	40.98	42.58	3.21	136.86	186.33	38.10	36.70
	14:00 u.	40.51	40.39	41.51	23.93	1.81	43.23	191.16	38.37	37.00
	15:00 u.	39.84	39.74	40.74	10.60	0.80	8.47	176.83	37.54	37.80
	16:00 u.	39.46	39.31	40.40	7.94	0.60		161.71	37.47	35.00
	17:00 u.	39.92	39.70	40.44	6.85	0.52		148.21	37.76	34.80
	18:00 u.	40.24	40.02	40.48	1.68	0.13		136.21	37.96	34.60
	19:00 u.	40.40	40.20	40.48				125.89	38.11	34.50
	20:00 u.	39.29	39.09	39.34				115.77	37.26	33.00
	21:00 u.	38.42	38.21	38.42				106.81	36.73	32.00
	22:00 u.	37.73	37.55	37.88				98.63	36.85	31.50
	23:00 u.	37.25	37.16	37.75				91.01	36.78	31.30

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp-TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp-Parafin (°C)	Temp - Coil (°C)	Ambeint (°C)
14	0:00 u.	36.84	36.82	37.57				83.16	36.75	30.70
	1:00 u.	36.66	36.69	37.56				79.18	36.76	30.00
	2:00 u.	36.27	36.41	37.50				74.99	36.65	27.00
	3:00 u.	35.40	35.60	36.62				69.98	36.46	26.00
	4:00 u.	33.60	33.77	34.58				64.89	36.17	25.00
	5:00 u.	33.02	33.17	33.99				61.18	36.60	24.80
	6:00 u.	32.65	32.77	33.57	1.68	0.13		58.01	36.67	25.00
	7:00 u.	32.05	36.03	34.30	12.26	0.93		55.96	36.54	25.30
	8:00 u.	35.69	45.56	37.09	20.45	1.54		54.56	36.27	27.00
	9:00 u.	40.04	44.44	37.01	42.90	3.24	138.89	55.46	35.98	28.00
	10:00 u.	37.78	37.79	36.79	43.13	3.25	140.37	94.68	35.45	29.40
	11:00 u.	36.91	36.92	37.72	43.09	3.25	140.12	132.47	35.41	30.00
	12:00 u.	37.77	37.85	38.65	28.24	2.13	60.18	149.85	35.58	31.70
	13:00 u.	38.16	39.82	37.79	20.67	1.56	32.25	142.48	36.65	33.00
	14:00 u.	37.56	38.35	37.91	20.99	1.58	33.24	141.73	36.82	35.00
	15:00 u.	38.09	39.01	37.83	16.40	1.24	20.29	135.41	36.86	34.00
	16:00 u.	37.99	38.83	38.14	7.12	0.54		125.30	36.27	33.50
	17:00 u.	37.68	37.67	38.38	4.04	0.31		115.02	35.89	32.00
	18:00 u.	37.11	37.08	37.57				106.19	35.71	31.50
	19:00 u.	36.44	36.40	36.93				98.49	35.84	31.00
	20:00 u.	35.97	35.95	36.95				91.50	35.83	30.40
	21:00 u.	35.76	35.78	36.92				85.34	35.80	30.00
	22:00 u.	35.69	35.72	36.93				80.05	35.77	29.20
	23:00 u.	35.61	35.67	36.95				76.07	35.85	29.00

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp- TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp- Parafin (°C)	Temp - Coil (°C)	Ambeint (°C)
15	0:00 น.	35.17	35.56	37.44				76.52	36.45	24.00
	1:00 น.	35.06	35.38	36.82				71.83	36.57	24.50
	2:00 น.	34.63	34.87	36.08				66.86	36.60	24.70
	3:00 น.	34.02	34.16	35.16				62.50	36.66	25.00
	4:00 น.	33.24	33.31	34.26				58.98	36.62	25.30
	5:00 น.	32.81	32.87	33.84				56.68	36.52	25.30
	6:00 น.	32.71	32.75	33.68	3.31	0.25		55.36	36.55	25.40
	7:00 น.	32.86	32.92	33.80	9.73	0.73		54.43	36.71	25.40
	8:00 น.	30.93	43.12	36.78	26.45	2.00		53.30	36.50	26.00
	9:00 น.	34.04	43.60	36.72	30.86	2.33	71.89	52.72	35.85	28.00
	10:00 น.	37.12	43.73	36.68	33.05	2.49	82.44	58.67	35.82	29.30
	11:00 น.	38.81	43.58	36.66	38.73	2.92	113.19	87.58	35.73	30.20
	12:00 น.	37.99	38.38	36.60	39.85	3.01	119.82	119.84	35.78	31.00
	13:00 น.	36.89	36.99	37.60	42.90	3.24	138.90	143.14	35.56	31.50
	14:00 น.	37.40	37.57	38.49	38.73	2.92	113.21	162.24	35.58	34.90
	15:00 น.	38.02	38.22	39.23	13.00	0.98	12.75	160.37	35.48	35.50
	16:00 น.	38.57	38.71	39.61	12.27	0.93		147.70	35.45	33.90
	17:00 น.	38.68	38.78	39.65	7.03	0.53		137.14	35.41	33.30
	18:00 น.	38.05	38.12	38.88				125.74	35.55	32.00
	19:00 น.	36.47	36.50	37.03				115.20	35.29	31.80
	20:00 น.	34.93	35.07	36.60				105.84	35.43	29.00
	21:00 น.	34.52	34.73	36.67				96.89	35.51	27.00
	22:00 น.	34.43	34.65	36.65				88.84	35.55	26.50
	23:00 น.	34.39	34.65	36.64				82.15	35.61	26.50

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp-TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp-Parafin (°C)	Temp - Coil (°C)	Ambeint (°C)
16	0:00 น.	34.47	34.76	36.67				79.51	35.40	26.70
	1:00 น.	34.64	34.99	36.79				77.33	35.68	26.60
	2:00 น.	34.61	34.92	36.35				72.96	35.68	26.60
	3:00 น.	34.31	34.56	35.78				68.14	35.78	26.50
	4:00 น.	34.08	34.28	35.37				63.56	35.81	26.40
	5:00 น.	33.47	33.55	34.44				59.80	35.99	26.70
	6:00 น.	33.19	33.25	34.20	4.88	0.37		56.90	35.87	26.90
	7:00 น.	33.35	33.40	34.37	15.69	1.18		55.35	35.94	27.00
	8:00 น.	34.29	42.70	36.54	26.49	2.00		54.22	35.94	28.00
	9:00 น.	39.68	43.76	36.88	38.30	2.89	110.72	53.51	35.87	30.00
	10:00 น.	38.57	39.15	37.20	42.89	3.24	138.82	54.93	35.91	31.20
	11:00 น.	37.47	37.50	38.31	41.28	3.12	128.64	90.65	35.80	32.00
	12:00 น.	38.27	38.37	39.72	42.61	3.22	137.05	128.01	35.60	33.00
	13:00 น.	38.57	38.72	39.62	41.43	3.13	129.57	148.77	35.40	33.40
	14:00 น.	36.82	36.83	37.63	35.83	2.70	96.87	166.73	36.05	35.00
	15:00 น.	36.81	36.83	37.93	19.86	1.50	29.78	176.93	37.18	35.70
	16:00 น.	38.32	38.46	40.64	7.11	0.54		175.53	36.92	34.00
	17:00 น.	37.81	37.93	39.28	2.81	0.21		160.41	35.58	32.00
	18:00 น.	36.42	36.48	37.63				145.73	35.37	30.00
	19:00 น.	35.32	35.41	36.70				133.08	35.29	27.60
	20:00 น.	34.72	34.88	36.62				122.18	35.52	27.30
	21:00 น.	34.32	34.54	36.55				111.96	35.43	26.80
	22:00 น.	34.26	34.52	36.63				102.53	35.37	26.40
23:00 น.	34.26	34.54	36.67				93.83	35.49	26.20	

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp-TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp-Parafin (°C)	Temp-Coil (°C)	Ambient (°C)
18	0:00 u.	35.33	35.41	36.86				84.86	35.89	29.30
	1:00 u.	35.30	35.40	36.90				80.45	35.96	29.10
	2:00 u.	35.24	35.37	36.90				76.54	35.95	28.60
	3:00 u.	35.19	35.35	36.89				72.72	35.95	28.40
	4:00 u.	35.18	35.36	36.89				68.69	35.99	28.00
	5:00 u.	35.27	35.49	36.94				64.84	35.98	28.00
	6:00 u.	35.40	35.65	37.01	3.45	0.26		61.31	36.02	28.00
	7:00 u.	33.99	38.82	37.00	24.28	1.83		58.74	36.46	28.00
	8:00 u.	34.32	42.49	37.00	34.78	2.63		59.82	37.37	29.00
	9:00 u.	38.04	41.28	37.19	39.49	2.98	117.72	88.48	37.33	31.00
	10:00 u.	37.65	38.26	37.45	37.51	2.83	106.19	119.86	37.38	32.30
	11:00 u.	37.15	37.06	37.95	41.04	3.10	127.12	138.13	37.53	33.00
	12:00 u.	37.94	37.85	39.15	41.37	3.12	129.15	158.37	37.32	34.00
	13:00 u.	38.75	38.67	40.04	26.50	2.00	52.99	162.27	37.51	34.90
	14:00 u.	38.44	38.36	39.57	14.38	1.09	15.60	156.72	37.67	35.00
	15:00 u.	37.42	37.32	38.40	8.71	0.66	5.72	143.27	37.71	33.00
	16:00 u.	36.95	36.84	37.90	10.85	0.82		132.26	37.64	31.50
	17:00 u.	36.79	36.66	37.60	6.80	0.51		122.22	37.74	31.40
	18:00 u.	37.60	39.00	37.57	1.62	0.12		111.90	36.73	31.40
	19:00 u.	36.52	36.50	37.02				102.59	35.62	31.30
	20:00 u.	35.35	35.42	36.75				94.46	35.74	29.00
	21:00 u.	34.93	35.06	36.70				87.28	35.74	27.00
	22:00 u.	34.58	34.76	36.62				81.37	35.65	26.80
	23:00 u.	34.49	34.70	36.58				77.04	35.69	26.70

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp- TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp- Parafin (°C)	Temp - Coil (°C)	Ambeint (°C)
19	0:00 u.	34.58	34.82	36.60				72.62	35.75	26.60
	1:00 u.	34.73	35.02	36.71				68.70	35.82	26.50
	2:00 u.	34.37	34.63	35.92				64.90	36.40	26.40
	3:00 u.	33.55	33.77	35.12				61.07	36.51	26.30
	4:00 u.	33.30	33.49	34.80				58.10	36.63	26.20
	5:00 u.	33.58	33.75	35.02				56.51	36.88	26.10
	6:00 u.	33.60	33.73	34.90	2.32	0.18		55.20	36.87	26.20
	7:00 u.	33.35	33.46	34.60	4.19	0.32		53.80	36.60	26.20
	8:00 u.	33.27	33.36	34.40	1.44	0.11		52.76	36.54	26.00
	9:00 u.	31.94	37.77	35.36	5.28	0.40	2.11	52.04	36.91	25.80
	10:00 u.	34.14	44.85	36.98	32.89	2.48	81.67	50.59	36.35	25.50
	11:00 u.	38.88	45.31	36.67	41.40	3.12	129.34	51.62	35.88	26.00
	12:00 u.	39.72	43.63	36.83	34.37	2.59	89.14	80.94	36.10	30.00
	13:00 u.	38.04	38.80	36.74	38.66	2.92	112.81	116.78	35.89	31.30
	14:00 u.	36.85	36.94	37.62	29.60	2.23	66.11	134.22	35.94	31.00
	15:00 u.	36.50	36.57	37.23	3.37	0.25	0.86	125.88	35.72	30.80
	16:00 u.	35.77	35.83	36.62	2.57	0.19		114.73	35.77	30.60
	17:00 u.	35.41	35.50	36.88	4.69	0.35		105.38	35.83	30.00
	18:00 u.	35.18	35.29	36.84				96.93	35.81	29.00
	19:00 u.	35.06	35.19	36.85				89.12	35.89	28.30
	20:00 u.	34.87	35.03	36.79				82.61	35.84	28.00
	21:00 u.	34.77	34.96	36.72				77.68	35.85	27.70
	22:00 u.	34.80	35.00	36.73				73.76	35.89	27.30
	23:00 u.	34.77	35.09	36.82				69.51	35.86	27.00

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp-TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp-Parafin (°C)	Temp-Coil (°C)	Ambeint (°C)
20	0:00 u.	34.98	35.30	36.75				65.43	36.43	26.60
	1:00 u.	34.62	34.88	36.15				61.60	36.58	26.40
	2:00 u.	34.36	34.55	35.65				58.65	36.85	26.00
	3:00 u.	33.86	34.00	35.05				56.73	36.90	25.80
	4:00 u.	33.47	33.58	34.61				55.33	36.84	25.40
	5:00 u.	547.81	549.54	565.68	2.88	0.22		895.12	37.89	25.50
	6:00 u.	33.32	33.42	34.40	5.81	0.44		53.36	37.00	25.90
	7:00 u.	32.86	34.87	33.90	12.63	0.95		51.90	36.57	26.00
	8:00 u.	32.44	38.00	33.43	29.84	2.25		50.97	36.46	28.00
	9:00 u.	32.25	40.67	36.25	38.52	2.91	111.98	52.95	36.02	29.00
	10:00 u.	36.31	40.58	36.28	34.58	2.61	90.26	79.53	35.88	30.50
	11:00 u.	38.40	39.46	37.09	42.81	3.23	138.32	116.97	35.96	31.00
	12:00 u.	36.91	36.99	38.16	40.91	3.09	126.32	140.09	35.84	32.00
	13:00 u.	37.76	37.89	39.63	40.19	3.03	121.88	156.17	35.39	33.80
	14:00 u.	36.43	36.54	37.34	41.29	3.12	128.64	173.24	37.26	35.00
	15:00 u.	36.29	36.30	37.55	7.98	0.60	4.81	171.04	37.33	36.60
	16:00 u.	36.64	36.65	37.81	3.99	0.30		154.31	37.41	35.50
	17:00 u.	38.39	38.47	40.41	2.68	0.20		139.88	36.31	34.00
	18:00 u.	38.42	38.48	39.68				127.54	35.54	33.70
	19:00 u.	37.49	37.52	38.52				117.16	35.60	33.30
	20:00 u.	36.95	36.95	37.87				108.43	35.77	33.00
	21:00 u.	36.37	36.34	37.15				100.61	35.83	32.00
	22:00 u.	35.75	35.74	36.76				93.62	35.75	31.00
	23:00 u.	35.49	35.52	36.81				87.47	35.75	30.00

Date	Time	TE-Cold (°C)	TE-Hot (°C)	Temp- TE (°C)	Volt (PV)	Amp (PV)	Watt (PV)	Temp- Parafin (°C)	Temp - Coil (°C)	Ambeint (°C)
21	0:00 u.	35.48	35.57	37.07				81.43	35.98	29.00
	1:00 u.	35.38	35.48	37.06				77.85	36.01	28.40
	2:00 u.	35.18	35.32	36.94				73.78	35.99	27.00
	3:00 u.	35.02	35.20	36.81				69.53	35.82	26.80
	4:00 u.	35.01	35.23	36.78				65.53	35.87	26.50
	5:00 u.	34.94	35.16	36.49				61.83	35.91	26.70
	6:00 u.	34.65	34.83	36.02	2.77	0.21		58.65	35.98	27.00
	7:00 u.	34.19	36.89	36.32	24.33	1.84		56.86	36.03	27.60
	8:00 u.	37.07	41.11	37.05	38.50	2.91		58.03	35.96	29.00
	9:00 u.	38.16	38.14	37.74	42.05	3.17	133.48	89.29	35.73	31.00
	10:00 u.	37.98	37.97	38.94	42.56	3.21	136.69	127.36	35.54	32.80
	11:00 u.	38.82	38.90	40.36	42.54	3.21	136.56	149.22	36.02	33.00
	12:00 u.	39.73	39.89	41.64	42.54	3.21	136.55	167.89	36.47	34.00
	13:00 u.	40.71	40.92	42.87	36.59	2.76	101.03	182.06	37.01	35.50
	14:00 u.	41.07	41.30	43.13	23.02	1.74	39.99	181.29	36.96	36.00
	15:00 u.	40.80	41.00	42.61	17.45	1.32	22.97	170.15	36.79	36.70
	16:00 u.	41.05	41.20	42.76	14.05	1.06		160.17	37.32	34.40
	17:00 u.	40.56	40.68	42.06	5.74	0.43		147.68	37.01	33.00
	18:00 u.	39.81	39.89	41.15				135.51	36.44	32.80
	19:00 u.	38.68	38.71	39.83				124.44	35.56	32.60
	20:00 u.	37.77	37.78	38.80				114.83	35.50	32.20
	21:00 u.	37.04	37.01	37.88				106.43	35.74	31.00
	22:00 u.	36.31	36.27	37.06				98.91	35.82	30.50
	23:00 u.	35.80	35.77	36.84				92.17	35.77	30.00

ภาคผนวก ข
ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ของเครื่องฟอกไข่

ตารางภาคผนวก ข ตัวอย่างความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, %RH) ของเครื่องฟอกไข่ทั้งสอง

Date	Time	RH TE (%)	RH Coil (%)
6/5/1957	8:30	66.4	66.5
	9:30	66.9	68.9
	10:30	67.1	71
	15:30	66.9	72
	16:30	66.7	72.2
	17:30	66.3	72.5
	20:30	66	72
	21:30	65.7	72.5
	22:30	65.4	72.9
	7/5/1957	8:30	65
9:30		64.7	71.6
10:30		64.7	72.3
15:30		65	73.1
16:30		64.9	72.6
17:30		66	73
20:30		65.4	72.6
21:30		67	73.1
22:30		66.8	73.4

ภาคผนวก ค
คำนวณหาขนาดแบตเตอรี่

สูตรสำหรับการคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่

$$C_B = \frac{L \cdot E_{el}}{DOD \cdot D_T \cdot \eta_C \cdot \eta_W \cdot \eta_B}$$

โดยที่

- C_B คือ ความจุของแบตเตอรี่ (kWh)
 L คือ จำนวนวันที่ต้องเผื่อในวันที่ไม่มีแสงแดด (day)
 E_{el} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อวัน (kWh/day)
 DOD คือ อัตราการคายประจุของแบตเตอรี่ (0.60)
 D_T คือ ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลทำให้แบตเตอรี่ต่ำลง (0.85)
 η_C คือ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แปลงไฟฟ้า (0.80)
 η_W คือ ประสิทธิภาพของสายไฟ (0.95)
 η_B คือ ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ (0.85)

ดังนั้นขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่ากับ

$$C_B = \frac{3 \times 1.44}{0.60 \times 0.85 \times 0.80 \times 0.95 \times 0.85}$$

$$C_B = 13.11 \text{ kWh}$$

ภาคผนวก ง
คำนวณขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การคำนวณหาขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

$$P_{peak} = \frac{E_{el} \cdot I_{STC}}{E_{glob} \cdot Q}$$

$$P_{peak} = \frac{4.5 \times 300}{4.5 \times 0.85} = 352.94 \text{ W}$$

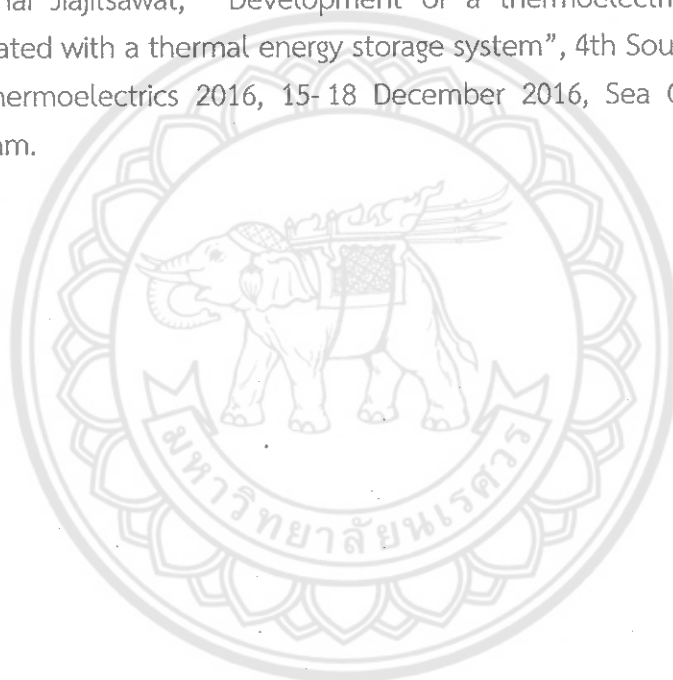
โดยที่

P_{peak}	คือ	ขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W)
E_{el}	คือ	พลังงานไฟฟ้าที่ภาระทางไฟฟ้าต้องการ (kWh/day)
E_{glob}	คือ	พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร (kWh/day)
Q	คือ	Quality factor of system
I_{STC}	คือ	ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2)

ภาคผนวก จ

การเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการในระดับชาติ/นานาชาติ

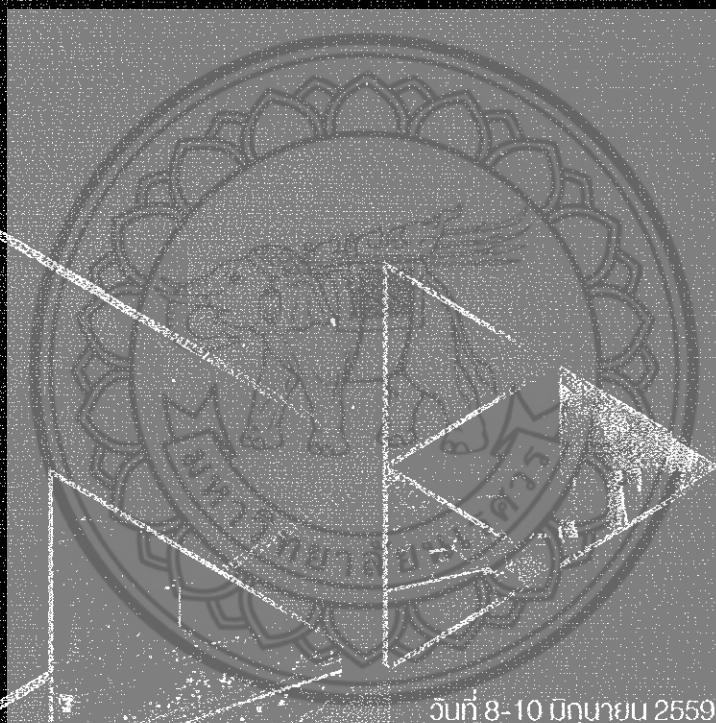
- 1) ชานนท์ บุญมีพิพิธ, เอกชัย สิงหเดช, สาทิต บันทึก, ประพิธาร์ ธนารักษ์ และ ธวัช สุริวงษ์, “ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาคืนทุนของตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 (12th Conference on Energy Network of Thailand, E-NETT) ณ โรงแรมวังจันทร์ริเวอร์วิว จังหวัดพิษณุโลก ระหว่างวันที่ 8-10 มิถุนายน 2559
- 2) Tawat Suriwong, Sathit Banthuek, Chanon Bunmephiphit, Ekachai Singhadet and Somchai Jiajitsawat, “ Development of a thermoelectric egg incubator (TEI) integrated with a thermal energy storage system”, 4th Southeast Asia Conference on Thermoelectrics 2016, 15-18 December 2016, Sea Garden Hotel, Danang, Vietnam.



การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย

ครั้งที่
12

Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT)



วันที่ 8-10 มิถุนายน 2559

ณ โรงแรมจินตน์ริเวอร์วิว จังหวัดพิษณุโลก



ดำเนินการจัดประชุมโดย
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ร่วมกับ มหาวิทยาลัยแม่โจ้



www.enett.or.th

ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาคืนทุนของผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้า
จากเซลล์แสงอาทิตย์
Life Cycle Cost (LCC) and Payback Period (PB) of Thermolectric Egg Incubator Integrated with Thermal
Storage System and Using Electricity from Solar Cells

ชานนท์ บุญมีพิพิธ¹ เอกชัย สิงห์เดช¹ ศาธิต บรรรทัภ¹ ประกิจาริ อนุภักษ์¹ และรัช สุวิงษ์¹

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ 99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิจิตร 65000
*E-mail: tawats@un.ac.th, โทรศัพท์ 055-963192

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในส่วนของต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) ของผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการวิจัยพบว่าผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใช้เงินลงทุนเริ่มต้นรวมเท่ากับ 22,020 บาท โดยประมาณ 49% ของเงินลงทุนเริ่มต้นมาจากต้นทุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อคำนวณต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่าเท่ากับ 9,142 บาท เห็นได้ว่าเงินลงทุนเริ่มต้นและต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับผู้ใช้แบบตลาดเดียวกันที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกนี้มีการทำงานร่วมกับระบบสะสมความร้อนและใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การประเมินระยะเวลาคืนทุนโดยพิจารณาจากผลตอบแทนสุทธิพบว่าผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะเวลาคืนทุนที่ได้ผลตอบแทนเท่ากับเงินลงทุนรวมคือ 7.05 ปี จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาแทนผู้ใช้แบบตลาดไฟฟ้าได้โดยเดาอย่างยั่งยืนในพื้นที่ห่างไกลจากระบบสายส่งไฟฟ้าพื้นฐาน และเป็นแนวทางส่งเสริมและพัฒนาการใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดปัญหาการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้

คำสำคัญ: ผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เซลล์แสงอาทิตย์ ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต ระยะเวลาคืนทุน

Abstract

The objective of this present research is focused on an economic evaluation of thermolectric egg incubator integrated with a thermal storage system and using electricity from solar cells (TE incubator). The economic evaluation based on Life cycle cost (LCC) and Payback period (PB) was determined. As the results, an investment cost of the TE incubator was 22,020 Baht and 49% of investment cost was solar cell panels. LCC of the TE incubator was 9,142 Baht which is according to the present value (PV). It is indicated that the investment cost and LCC of TE incubator were relatively higher than commercial egg incubator such as heating coil egg incubator due to this TE incubator integrated with thermal storage system and using electricity from solar cells. PB of this TE incubator considered on the net present value (NPV) was evaluated. It is found that PB of the TE incubator was 7.05 years. Therefore, thermolectric egg incubator integrated with a thermal storage system using electricity from solar cells can be competitive with commercial egg incubator, and it is especially high potential in remote areas where located far from the electrical infrastructure. In addition, it can be guidelines for widely promoting utilization of renewable energy.

Keywords: Egg incubator, Thermal storage system, Thermolectric module, Solar cell, Life cycle cost, Payback period.



ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาคืนทุนของผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

Life Cycle Cost (LCC) and Payback Period (PB) of Thermoelectric Egg Incubator Integrated with Thermal Storage System and Using Electricity from Solar Cells

ชานนท์ บุญมีภักดิ์¹, เอกชัย สิงหนเดช¹, สาทิต บรรรทัต¹, ประทีปอารี ธนาธิภักษ์¹ และ ธวัช สุวิวงษ์^{1*}

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ 99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

*อีเมล์: suwong@tawatsru.ac.th, 055-963192

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในส่วนของต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) ของผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการวิจัยพบว่าผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใช้เงินลงทุนเริ่มต้นรวมเท่ากับ 22,020 บาท โดยประมาณ 49% ของเงินลงทุนเริ่มต้นมาจากต้นทุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อคำนวณต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่าเท่ากับ 9,142 บาท เห็นได้ว่าเงินลงทุนเริ่มต้นและต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับผู้ใช้แบบเซลล์ขนาดเดียวกันที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกมีการทำงานร่วมกับระบบสะสมความร้อนและใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การประเมินระยะเวลาคืนทุนโดยพิจารณาระยะเวลาคืนทุนจากผลตอบแทนสุทธิพบว่าผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะเวลาคืนทุนที่ได้ผลตอบแทนเท่ากับเงินลงทุนรวมคือ 7.05 ปี จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าผู้ใช้แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาทดแทนผู้ใช้แบบเซลล์ไฟฟ้าได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ห่างไกลจากระบบสายส่งไฟฟ้าที่พื้นฐาน และเป็นแนวทางส่งเสริมและพัฒนากาใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดปัญหาการใช้ไฟฟ้าที่ต้นทุนสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้

คำหลัก: ผู้ใช้ไฟฟ้า, ระบบสะสมความร้อน, เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล, เซลล์แสงอาทิตย์, ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต, ระยะเวลาคืนทุน

Abstract

The objective of this present research is focused on an economic evaluation of thermoelectric egg incubator integrated with a thermal storage system and using electricity from solar cells (TE incubator). The economic evaluation based on Life cycle cost (LCC) and Payback period (PB) was determined. As the results, an investment cost of the TE incubator was 22,020 Baht and 49% of investment cost was solar cell panels. LCC of the TE incubator was 9,142 Baht which is according to the present value (PV). It is indicated that the investment cost and LCC of TE incubator were relatively higher than commercial egg incubator such as heating coil egg incubator due to this TE incubator integrated with thermal storage system and using electricity from solar cells. PB of this TE incubator considered on the net present value (NPV) was evaluated. It is found that PB of the TE incubator was 7.05 years. Therefore, thermoelectric egg incubator integrated with a thermal storage system using electricity from solar cells can be competitive with commercial egg incubator, and it is especially high potential in remote areas where located far from the electrical infrastructure. In addition, it can be guidelines for widely promoting utilization of renewable energy.

Keywords: Egg incubator, Thermal storage system, Thermoelectric module, Solar cell, Life cycle cost, Payback period.

1. บทนำ

เกษตรกรในประเทศไทยที่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมส่วนใหญ่มีการเลี้ยงไก่เนื้อและไก่ไข่วางไข่ไปขาย และเป็นอาชีพเสริมที่สร้างรายได้ในครัวเรือน โดยปกติแล้วการเลี้ยงดูไก่และการฟักไข่ส่วนใหญ่ปล่อยเป็นไปตามธรรมชาติ ทำให้มีผลผลิตต่ำเนื่องจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ภูมิอากาศ และความชื้น [1, 2] การฟักไข่ถือเป็นหัวใจสำคัญของการเลี้ยงไก่เพราะถ้าสามารถฟักไข่ออกมาเป็นตัวไก่ได้เพิ่มขึ้นแสดงถึงการเพิ่มผลผลิตต่อรอบการฟักไข่ (21 วัน) อย่างไรก็ตามการฟักไข่ตามธรรมชาตินั้นผลผลิตค่อนข้างต่ำเนื่องจากแม่ไก่ไม่สามารถฟักไข่แล้วออกมาเป็นตัวไก่ได้พร้อมกันและทำให้แม่ไก่ละทิ้งการฟักไข่ก่อนกำหนดเมื่อมาเลี้ยงดูลูกไก่ รวมถึงการฟักไข่ตามธรรมชาติไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องเพราะบางช่วงเวลามันได้ตั้งลงออกจากรังเพื่อหาอาหาร ส่งผลให้ปัจจุบันมีผู้คิดค้นการฟักไข่โดยไม่ต้องการอาศัยแม่ไก่และสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการฟักไข่ให้มีความแม่นยำ และเที่ยงตรงมากขึ้น เช่น ควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 35-40.2°C และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 60-75 % [3, 4] ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องฟักไข่เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลถึงต้นทุนในการผลิตของไก่ในแต่ละรุ่น เพื่อให้การฟักไข่มีอัตราการฟักเพิ่มขึ้น การพัฒนาเครื่องฟักไข่ในปัจจุบันมุ่งเน้นไปที่การใช้ขดลวดความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิซึ่งต้องใช้กระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูง ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานในพื้นที่ห่างไกลที่ไม่มีระบบไฟฟ้าพื้นฐานทำให้ไม่สามารถใช้เครื่องฟักไข่ชนิดนี้ได้ งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเครื่องฟักไข่ร่วมกับพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ เพื่อความยั่งยืนในด้านพลังงานของประเทศ และการพัฒนาด้านนวัตกรรมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน [5-10] รวมถึงผลงานวิจัยที่คณะผู้วิจัยได้ศึกษามาแล้วในด้านการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อนและแบบเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่าตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในช่วงที่เหมาะสมกับการฟักไข่มากกว่าตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อน นอกจากนี้ตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยน้อยกว่าตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อนประมาณ 2.14 เท่า และเมื่อคิดค่าใช้จ่ายสำหรับค่าไฟฟ้าแล้วพบว่าตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถลดค่าใช้จ่ายคิดเป็น 53.4% ต่อการฟักไข่หนึ่งรอบ เมื่อพิจารณาทางด้านประสิทธิภาพการทำความร้อนพบว่า ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) ของตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าแบบขดลวดความร้อนประมาณ 1.4 เท่า [11] ปัจจุบันคณะผู้วิจัยได้ต่อยอดองค์ความรู้และประสบการณ์ความสำเร็จในการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้การทำงานของเครื่องฟักไข่เกิด

ประสิทธิภาพสูงสุดตลอดเวลา 24 ชั่วโมง โดยไม่มีการใช้ไฟฟ้าที่พื้นฐาน ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และสนับสนุนพลังงานทดแทน อย่างไรก็ตามยังไม่ได้มีการรายงานผลการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ในส่วนของ การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดความคุ้มค่าในการลงทุนสร้างระบบและใช้งานให้กับเกษตรกรหรือผู้ที่ประกอบอาชีพเลี้ยงไก่และฟักไข่ที่สนใจในการสร้างและใช้งานตู้ฟักไข่

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในส่วนของ การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาคืนทุนของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีการเปรียบเทียบกับตู้ฟักไข่แบบขดลวดที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ได้พิจารณาเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อนที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ขนาด 24 ฟอง โดยมีชื่อกำหนดการสร้างตู้ฟักไข่ดังกล่าวที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดการสร้างตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกเปรียบเทียบกับตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อน

ข้อกำหนด	ตู้ฟักไข่แบบขดลวดความร้อน	ตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริก
ขนาดตู้ฟักไข่		
กว้าง×ยาว×สูง (เมตร)	0.35×0.35×0.44	0.35×0.35×0.44
แหล่งกำเนิดความร้อน	ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 120 W	เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (TEC1-12710) และระบบสะสมพลังงานความร้อน (Paraffin wax)
พลังงานไฟฟ้า	ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V	ไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การคิดต้นทุนอุปกรณ์สำหรับตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในรูปที่ 1 โดยมีอุปกรณ์หลักดังนี้ 1) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 2) ชุดควบคุมอุณหภูมิ 3) ชุดระบบสะสมความร้อน 4) แบตเตอรี่ขนาด 120 Ah 5) อุปกรณ์ประจุกระแสไฟฟ้า 6) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 7) ชุดยกตู้ฟักไข่ที่ทำจากไม้ัดหนา

3 มิลลิเมตร และ 8) ถาดน้ำ ในระบบนี้มีการต่อเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 3 แผง เข้ากับขดลวดความร้อน (ขนาด 1,300 วัตต์) ภายในระบบสะสมความร้อน ในเวลากลางวัน ขดลวดทำหน้าที่สร้างและจ่ายความร้อนอย่างต่อเนื่องให้กับสารเปลี่ยนสถานะชนิดทวารพิน (paraffin wax) ที่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 70°C สำหรับชุดจ่ายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลได้ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงจำนวน 1 แผง ผ่านอุปกรณ์ประจุกระแสไฟฟ้าและแบตเตอรี่ โดยกระแสไฟฟ้าบางส่วนสะสมไว้ในแบตเตอรี่เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับชุดควบคุมอุณหภูมิ โดยระบบให้ความร้อนทั้งสองถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิผ่านสวิช 3 ทางในการสลับการทำงานเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 35-40.2°C และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 60-75% (รูปที่ 1) โดยในเวลากลางวัน ชุดควบคุมอุณหภูมิจะสั่งงานให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกทำงานเพื่อจ่ายความร้อนให้กับตู้หีอกไข่และหยุดการทำงานในเวลาตอนกลางคืน เพื่อสลับให้ชุดระบบสะสมพลังงานความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะทำหน้าที่จ่ายความร้อนให้กับตู้หีอกไข่สำหรับช่วงเวลากลางคืนแทนและหยุดการทำงานในเวลากลางวัน

การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) ของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการประเมินต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดช่วงชีวิตหรืออายุการใช้งานของเครื่องฟักไข่นี้ โดยมีการพิจารณาค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นทั้งหมดในช่วงอายุการใช้งาน ได้แก่ เงินลงทุนในการสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ (Initial capital cost) ค่าแรงในการออกแบบและสร้างเครื่องฟักไข่ (Labor and Installation cost) และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา (Maintenance cost) นอกจากนี้มีการพิจารณามูลค่าซาก (Salvage value) ในปีที่สุดท้ายของต้นแบบตู้ฟักไข่ด้วย และนำค่าใช้จ่ายทั้งหมดนี้มาปรับคิดเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Present value, NPV) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$LCC = C_c + \sum_{n=1}^N \frac{C_m}{(1+i)^n} - \frac{SV}{(1+i)^N} \quad (1)$$

- เมื่อ
- C_c = เงินลงทุนเริ่มต้น (Initial capital cost) (บาท)
- C_m = ต้นทุนในการดำเนินการ (Operating cost) ค่าซ่อมบำรุง เชื้อเพลิงและอื่นๆ ในแต่ละปี (บาท)
- SV = มูลค่าซาก (Salvage value) ปีที่สุดท้ายของโครงการ (บาท)
- i = อัตราดอกเบี้ย (Interest rate) หรือ อัตราคิดลด (Discount rate)
- n = อายุการใช้งานโครงการ (Project period)
- N = จำนวนปีที่สิ้นสุดโครงการ (Year at the end of project)

สำหรับการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน (Payback period: PB) ของตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นการคำนวณหาจุดคุ้มทุนของผู้ฟักไข่ว่าเมื่อมีการลงทุนในตู้ฟักไข่แล้วจะใช้ระยะเวลากี่ปีในการคืนทุน โดยมีหน่วยวัดเป็นเวลา เช่น นาที เดือน และ ปี เป็นต้น โดยมีการพิจารณาจากการคำนวณหาระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิสะสมจากการดำเนินการหรือใช้ตู้ฟักไข่นี้มีค่าเท่ากับมูลค่าการลงทุนทั้งหมด หรือจนกระทั่งผลตอบแทนสุทธิสะสมมีค่าเป็นบวก สมการที่ 2 แสดงการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของผู้ฟักไข่ ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (PB)} = \frac{\text{มูลค่าในการลงทุนรวม}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิรายปี}} \quad (2)$$

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาคืนทุนของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องพิจารณาถึงเงินลงทุนเริ่มต้นของเครื่องฟักไข่นี้ รายละเอียดเงินลงทุนเริ่มต้นแสดงในรูปที่ 2 ทบว่าเงินลงทุนเริ่มต้นสูงสุดของต้นแบบตู้ฟักไข่มีมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (49%) รองลงมาคือระบบสะสมความร้อน อุปกรณ์ประจุกระแสไฟฟ้า แบตเตอรี่ ชุดควบคุมอุณหภูมิ แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก และกล่องโครงสร้างตู้ฟักไข่ ตามลำดับ ดังนั้น เงินลงทุนเริ่มต้นของผู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 22,020 บาท เห็นได้ว่าเป็นเงินลงทุนเริ่มต้นที่สูงเมื่อเทียบกับตู้ฟักไข่แบบขดลวดที่มีขนาดเดียวกันและจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ (3,500-5,000 บาท) เนื่องจากตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกมีการทำงานร่วมกับระบบสะสมความร้อนและใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีข้อเด่นกว่าสำหรับโรงเรียนในพื้นที่ห่างไกลจากระบบสายส่งและไม่มีไฟฟ้าพื้นฐาน รวมถึงเป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนให้เกิดประโยชน์สูงสุด

อายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆในต้นแบบตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในตารางที่ 2 ทบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานสูงสุดคือ 25 ปี สำหรับกล่องโครงสร้างตู้ฟักไข่และอุปกรณ์ประจุไฟฟ้าชนิดแบบเติมน้ำกลั่นมีอายุการใช้งานสั้นน้อยสุดที่ 2 ปี ส่งผลให้การประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิตของผู้ฟักไข่นี้ได้พิจารณาอายุการใช้งานเท่ากับ 2 ปี



ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาคืนทุนของตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้า
จากเซลล์แสงอาทิตย์

Life Cycle Cost (LCC) and Payback Period (PB) of Thermoelectric Egg Incubator Integrated with Thermal
Storage System and Using Electricity from Solar Cells

ชานนท์ บุญมีทิพย์¹ เอกชัย สิงห์เทศ¹ ศาธิต บรรรที¹ ประดิษฐ์ อนุรักษ์¹ และธวัช สุวิวัฒน์¹

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ 99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

¹E-mail: tawats@nu.ac.th, โทรศัพท์ 055-963192

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในส่วนของต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) ของตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการวิจัยพบว่าตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใช้เงินลงทุนเริ่มต้นรวมเท่ากับ 22,020 บาท โดยประมาณ 49% ของเงินลงทุนเริ่มต้นมาจากต้นทุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อคำนวณต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่าเท่ากับ 9,142 บาท เห็นได้ว่าเงินลงทุนเริ่มต้นและต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับตู้ฟักไข่แบบตลาดขนาดเดียวกันที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกนี้มีการทำงานร่วมกับระบบสะสมความร้อนและใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การประเมินระยะเวลาคืนทุนโดยพิจารณาระยะเวลาคืนทุนจากผลตอบแทนสุทธิพบว่าตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะเวลาคืนทุนที่ได้ผลตอบแทนเท่ากับเงินลงทุนรวมคือ 7.05 ปี จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาทดแทนตู้ฟักไข่แบบตลาดไฟฟ้าได้โดยเอื้ออย่างยิ่งในพื้นที่ห่างไกลจากระบบสายส่งไฟฟ้าพื้นฐาน และเป็นแนวทางส่งเสริมและพัฒนากาใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดปัญหาการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้

คำสำคัญ: ตู้ฟักไข่ ระบบสะสมความร้อน เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เซลล์แสงอาทิตย์ ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต ระยะเวลาคืนทุน

Abstract

The objective of this present research is focused on an economic evaluation of thermoelectric egg incubator integrated with a thermal storage system and using electricity from solar cells (TE incubator). The economic evaluation based on Life cycle cost (LCC) and Payback period (PB) was determined. As the results, an investment cost of the TE incubator was 22,020 Baht and 49% of investment cost was solar cell panels. LCC of the TE incubator was 9,142 Baht which is according to the present value (PV). It is indicated that the investment cost and LCC of TE incubator were relatively higher than commercial egg incubator such as heating coil egg incubator due to this TE incubator integrated with thermal storage system and using electricity from solar cells. PB of this TE incubator considered on the net present value (NPV) was evaluated. It is found that PB of the TE incubator was 7.05 years. Therefore, thermoelectric egg incubator integrated with a thermal storage system using electricity from solar cells can be competitive with commercial egg incubator, and it is especially high potential in remote areas where located far from the electrical infrastructure. In addition, it can be guidelines for widely promoting utilization of renewable energy.

Keywords: Egg incubator, Thermal storage system, Thermoelectric module, Solar cell, Life cycle cost, Payback period.



ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาคืนทุนของผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

Life Cycle Cost (LCC) and Payback Period (PB) of Thermoelectric Egg Incubator Integrated with Thermal Storage System and Using Electricity from Solar Cells

ชานนท์ บุญมีภักดิ์¹, เอกชัย สิงหนเดช¹, สาธิต บรรพทิศ¹, ประทีพร อมารักษ์¹ และ ธวัช สุวีรังษ์^{1*}

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 99 หมู่ 9 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

*ธวัช สุวีรังษ์: tawats@nu.ac.th, 055-963192

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในส่วน of ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) ของผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการวิจัยพบว่าผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใช้เงินลงทุนเริ่มต้นรวมเท่ากับ 22,020 บาท โดยประมาณ 49% ของเงินลงทุนเริ่มต้นมาจากต้นทุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเมื่อคำนวณต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่าเท่ากับ 9,142 บาท เห็นได้ว่าเงินลงทุนเริ่มต้นและต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับผู้ใช้แบบขดลวดขนาดเดียวกันที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกนี้มีการทำงานร่วมกับระบบสะสมความร้อนและใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การประเมินระยะเวลาคืนทุนโดยพิจารณาระยะเวลาคืนทุนจากผลตอบแทนสุทธิพบว่าผู้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะเวลาคืนทุนที่ได้ผลตอบแทนเท่ากับเงินลงทุนรวมคือ 7.05 ปี จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าผู้ใช้แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาทดแทนผู้ใช้แบบขดลวดไฟฟ้าได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ห่างไกลจากระบบสายส่งไฟฟ้าพื้นฐาน และเป็นแนวทางส่งเสริมและทัศนคติการใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดปัญหาการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้

คำหลัก: ผู้ใช้, ระบบสะสมความร้อน, เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล, เซลล์แสงอาทิตย์, ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต, ระยะเวลาคืนทุน

Abstract

The objective of this present research is focused on an economic evaluation of thermoelectric egg incubator integrated with a thermal storage system and using electricity from solar cells (TE incubator). The economic evaluation based on Life cycle cost (LCC) and Payback period (PB) was determined. As the results, an investment cost of the TE incubator was 22,020 Baht and 49% of investment cost was solar cell panels. LCC of the TE incubator was 9,142 Baht which is according to the present value (PV). It is indicated that the investment cost and LCC of TE incubator were relatively higher than commercial egg incubator such as heating coil egg incubator due to this TE incubator integrated with thermal storage system and using electricity from solar cells. PB of this TE incubator considered on the net present value (NPV) was evaluated. It is found that PB of the TE incubator was 7.05 years. Therefore, thermoelectric egg incubator integrated with a thermal storage system using electricity from solar cells can be competitive with commercial egg incubator, and it is especially high potential in remote areas where located far from the electrical infrastructure. In addition, it can be guidelines for widely promoting utilization of renewable energy.

Keywords: Egg incubator, Thermal storage system, Thermoelectric module, Solar cell, Life cycle cost, Payback period.

1. บทนำ

เกษตรกรในประเทศไทยที่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมส่วนใหญ่มีการเลี้ยงไก่เนื้อและไก่ไข่ควบคู่ไปด้วย และเป็นอาชีพเสริมที่สร้างรายได้ในครัวเรือน โดยปกติแล้วการเลี้ยงดูไก่และการฟักไข่ส่วนใหญ่ปล่อยเป็นไปตามธรรมชาติ ทำให้มีผลผลิตต่ำเนื่องจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ภูมิอากาศ และความชื้น [1, 2] การฟักไข่ถือเป็นหัวใจสำคัญของการเลี้ยงไก่เพราะถ้าสามารถฟักไข่ออกมาเป็นตัวไก่ได้เพิ่มขึ้นแสดงถึงการเพิ่มผลผลิตต่อรอบการฟักไข่ (21 วัน) อย่างไรก็ตามการฟักไข่ตามธรรมชาตินั้นมีผลผลิตค่อนข้างต่ำเนื่องจากแม่ไก่ไม่สามารถฟักไข่แล้วออกมาเป็นตัวไก่ได้พร้อมกับและทำให้แม่ไก่ละทิ้งการฟักไข่ก่อนกำหนดเมื่อมาเลี้ยงดูลูกไก่ รวมถึงการฟักไข่ตามธรรมชาติไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องเพราะบางช่วงเวลามันไม่คงที่ลงออกจากรังเพื่อหาอาหาร ส่งผลให้ปัจจุบันมีผู้คิดค้นการฟักไข่โดยไม่ต้องการอาศัยแม่ไก่และสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการฟักไข่ให้มีความแม่นยำ และเที่ยงตรงมากขึ้น เช่น ควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 35-40.2°C และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 60-75 % [3, 4] ซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องฟักไข่เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่บ่งบอกถึงต้นทุนในการผลิตของไก่ในแต่ละรุ่น เพื่อให้การฟักไข่มีอัตราการฟักเพิ่มขึ้น การพัฒนาเครื่องฟักไข่ในปัจจุบันมุ่งเน้นไปที่การใช้ขดลวดความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิซึ่งต้องใช้กระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูง ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานในพื้นที่ห่างไกลที่ไม่มีระบบไฟฟ้าพื้นฐานทำให้ไม่สามารถใช้เครื่องฟักไข่ชนิดนี้ได้ งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเครื่องฟักไข่ร่วมกับพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ เพื่อความยั่งยืนในด้านพลังงานของประเทศ และการพัฒนาด้านนวัตกรรมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน [5-10] รวมถึงผลงานวิจัยที่คณะผู้วิจัยได้ศึกษามาแล้วในด้านการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฟักไข่แบบขดลวดความร้อนและแบบเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่าเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในช่วงที่เหมาะสมกับการฟักไข่มากกว่าเครื่องฟักไข่แบบขดลวดความร้อน นอกจากนี้เครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยน้อยกว่าเครื่องฟักไข่แบบขดลวดความร้อนประมาณ 2.14 เท่า และเมื่อคิดค่าใช้จ่ายสำหรับค่าไฟฟ้าแล้วพบว่าเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถลดค่าใช้จ่ายคิดเป็น 53.4% ต่อการฟักไข่หนึ่งรอบ เมื่อพิจารณาทางด้านประสิทธิภาพการทำความร้อนพบว่า ค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) ของเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกมีค่ามากกว่าแบบขดลวดความร้อนประมาณ 1.4 เท่า [11] ปัจจุบันคณะผู้วิจัยได้ต่อยอดองค์ความรู้และประสบการณ์ความสำเร็จในการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้การดำเนินงานของเครื่องฟักไข่เกิด

ประสิทธิภาพสูงสุดตลอดเวลา 24 ชั่วโมง โดยไม่มีการใช้ไฟฟ้าพื้นฐาน ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และสนับสนุนพลังงานทดแทน อย่างไรก็ตามยังไม่ได้มีการรายงานผลการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ในส่วนของประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) และระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดความคุ้มค่าในการลงทุนสร้างระบบและใช้งานให้กับเกษตรกรหรือผู้ที่ประกอบอาชีพเลี้ยงไก่และฟักไข่ที่สนใจในการสร้างและใช้งานเครื่องฟักไข่

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในส่วนของประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาคืนทุนของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีการเปรียบเทียบกับเครื่องฟักไข่แบบขดลวดที่มีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษารายละเอียดได้พิจารณาเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับเครื่องฟักไข่แบบขดลวดความร้อนที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ขนาด 24 ฟอง โดยมีข้อกำหนดการสร้างเครื่องฟักไข่ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดการสร้างเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกเปรียบเทียบกับเครื่องฟักไข่แบบขดลวดความร้อน

ข้อกำหนด	เครื่องฟักไข่แบบขดลวดความร้อน	เครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริก
ขนาดเครื่องฟักไข่	0.35x0.35x0.44	0.35x0.35x0.44
กว้างxยาวxสูง (เมตร)		
แหล่งกำเนิดความร้อน	ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 120 W	เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (TEC1-12710) และระบบสะสมพลังงานความร้อน (Paraffin wax)
พลังงานไฟฟ้า	ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V	ไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การคิดต้นทุนการผลิตสำหรับเครื่องฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในรูปแบบที่ 1 โดยมีอุปกรณ์หลักดังนี้ 1) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 2) ชุดควบคุมอุณหภูมิ 3) ชุดระบบสะสมความร้อน 4) แบตเตอรี่ขนาด 120 Ah 5) อุปกรณ์ประจุกระแสไฟฟ้า 6) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 7) ชุดกล่องเครื่องฟักไข่ที่หาจำหน่ายอีกตาม

3 มิลลิเมตร และ 8) ถาดน้ำ ในระบบนี้มีการต่อเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 3 แผง เข้ากับขดลวดความร้อน (ขนาด 1,300 วัตต์) ภายในระบบสะสมความร้อน ในเวลากลางวัน ขดลวดทำหน้าที่สร้างและจ่ายความร้อนอย่างต่อเนื่องให้กับสารเปลี่ยนสถานะขมิ้นทหาราหิน (paraffin wax) ที่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 70°C สำหรับจ่ายความร้อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลได้ต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงจำนวน 1 แผง ผ่านอุปกรณ์ประจุกระแสไฟฟ้าและแบตเตอรี่ โดยกระแสไฟฟ้าบางส่วนสะสมไว้ในแบตเตอรี่เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับชุดควบคุมอุณหภูมิ โดยระบบให้ความร้อนทั้งสองถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิผ่านสวิชต์ 3 ทางในการสลับการทำงานเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 35-40.2°C และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 60-75% (รูปที่ 1) โดยในเวลากลางวัน ชุดควบคุมอุณหภูมิจะสั่งงานให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกทำงานเพื่อจ่ายความร้อนให้กับตู้ฟักไข่และหยุดทำงานในเวลาตอนกลางคืน เพื่อสลับให้ชุดระบบสะสมพลังงานความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะทำหน้าที่จ่ายความร้อนให้กับตู้ฟักไข่สำหรับช่วงเวลากลางคืนแทนและจะหยุดการทำงานในเวลากลางวัน

การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (Life cycle cost, LCC) ของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการประเมินต้นทุนที่เกิดขึ้นตลอดช่วงชีวิตหรืออายุการใช้งานของเครื่องฟักไข่นี้ โดยมีการพิจารณาค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นทั้งหมดในช่วงอายุการใช้งาน ได้แก่ เงินลงทุนในการสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ (Initial capital cost) ค่าแรงในการออกแบบและสร้างเครื่องฟักไข่ (Labor and Installation cost) และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา (Maintenance cost) นอกจากนี้มีการพิจารณามูลค่าซาก (Salvage value) ในปีที่สุดท้ายของต้นแบบตู้ฟักไข่ด้วย และนำค่าใช้จ่ายทั้งหมดนี้มาปรับคิดเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Present value, NPV) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$LCC = C_c + \sum_{n=1}^N \frac{C_m}{(1+i)^n} - \frac{SV}{(1+i)^N} \quad (1)$$

- เมื่อ
- C_c = เงินลงทุนเริ่มต้น (Initial capital cost) (บาท)
- C_m = ต้นทุนในการดำเนินการ (Operating cost) ค่าซ่อมบำรุง เชื้อเพลิงและอื่นๆ ในแต่ละปี (บาท)
- SV = มูลค่าซาก (Salvage value) ปีที่สุดท้ายของโครงการ (บาท)
- i = อัตราดอกเบี้ย (Interest rate) หรือ อัตราคิดลด (Discount rate)
- n = อายุการใช้งานโครงการ (Project period)
- N = จำนวนปีที่สิ้นสุดโครงการ (Year at the end of project)

สำหรับการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน (Payback period: PB) ของตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นการคำนวณหาจุดคุ้มทุนของตู้ฟักไข่ว่าเมื่อมีการลงทุนในตู้ฟักไข่แล้วจะใช้ระยะเวลากี่ปีในการคืนทุน โดยมีหน่วยวัดเป็นเวลา เช่น งวด เดือน และ ปี เป็นต้น โดยมีการพิจารณาจากการดำเนินการหรือใช้ตู้ฟักไข่นี้มีค่าเท่ากับมูลค่าในการลงทุนทั้งหมด หรือจนกระทั่งผลตอบแทนสุทธิสะสมมีค่าเป็นบวก สมการที่ 2 แสดงการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของตู้ฟักไข่ดังนี้

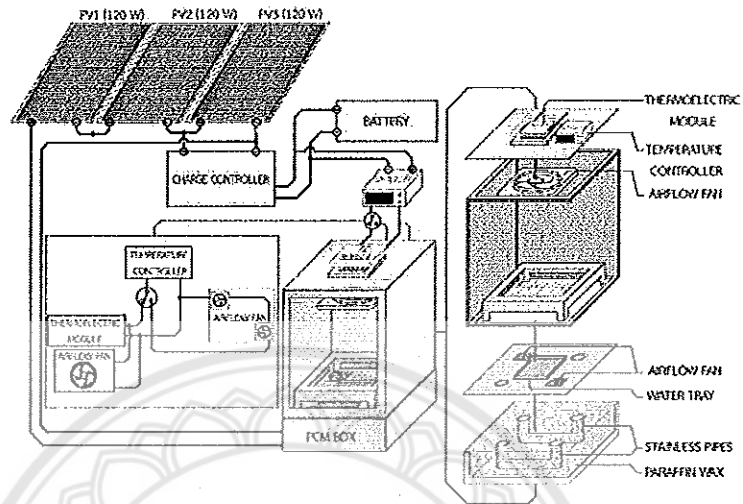
$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (PB)} = \frac{\text{มูลค่าในการลงทุนรวม}}{\text{ผลตอบแทนสะสมสุทธิรายปี}} \quad (2)$$

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

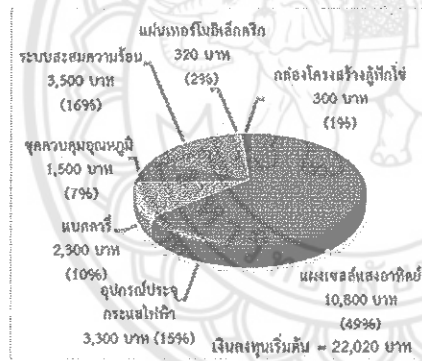
การประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาคืนทุนของเครื่องฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องพิจารณาถึงเงินลงทุนเริ่มต้นของเครื่องฟักไข่นี้ รายละเอียดเงินลงทุนเริ่มต้นแสดงในรูปที่ 2 พบว่าเงินลงทุนเริ่มต้นสูงสุดของต้นแบบตู้ฟักไข่นี้มาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (49%) รองลงมาคือระบบสะสมความร้อน อุปกรณ์ประจุกระแสไฟฟ้า แบตเตอรี่ ชุดควบคุมอุณหภูมิ แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก และกล่องโครงสร้างตู้ฟักไข่ ตามลำดับ ดังนั้น เงินลงทุนเริ่มต้นของตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 22,020 บาท เห็นได้ว่าเป็นเงินลงทุนเริ่มต้นที่สูงเมื่อเทียบกับตู้ฟักไข่แบบขดลวดที่มีขนาดเดียวกันและจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ (3,500-5,000 บาท) เนื่องจากตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกมีการทำงานร่วมกับระบบสะสมความร้อนและใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีข้อเด่นกว่าสำหรับโรงเรือนในพื้นที่ห่างไกลจากระบบสายส่งและไม่มีไฟฟ้าพื้นฐาน รวมถึงเป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนให้เกิดประโยชน์สูงสุด

อายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆในต้นแบบตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในตารางที่ 2 พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานสูงสุดคือ 25 ปี สำหรับกล่องโครงสร้างตู้ฟักไข่และอุปกรณ์ประจุไฟฟ้าชนิดแบบเดิมน้ำกลั่นมีอายุการใช้งานสั้นน้อยสุดที่ 2 ปี ส่งผลให้การประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิตของตู้ฟักไข่นี้ ได้พิจารณาอายุการใช้งานเท่ากับ 2 ปี

การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12
วันที่ 8 - 10 มิถุนายน พ.ศ. 2559 ณ โรงแรมวังจันทร์ จ.ฉะเชิงเทรา



รูปที่ 1 โดอะแกรมระบบการทำงานและอุปกรณ์ต่างๆ ของตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2 เงินลงทุนเริ่มต้นของตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ต้นทุนในการดำเนินการ (Operating cost, C_m) ในสมการ 1 คือ ค่าซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์ เชื้อเพลิงและอื่นๆ ในแต่ละปี (บาท) โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาว่าทุกอุปกรณ์ที่มีค่าบำรุงรักษาที่คงที่และเท่ากันทุกปี โดยแต่ละอุปกรณ์มีค่าต้นทุนในการดำเนินการเท่ากับ 2% ต่อปี โดยไม่มีการพิจารณาต้นทุนดำเนินการของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกและกล่องโครงสร้างตู้ฟักไข่ เนื่องจากอุปกรณ์ทั้งสองนี้ไม่มีอุปกรณ์ใดเคลื่อนไหวและ

สามารถดำเนินการลดการประเมินวัฏจักรชีวิต (2 ปี) จากการประเมินต้นทุนในการดำเนินการพบว่าตู้ฟักไข่มีค่าต้นทุนการดำเนินการต่อปี เท่ากับ 428 บาท (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 2 อายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ ในตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

อุปกรณ์	อายุการใช้งาน (ปี)
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (120 W)	25
อุปกรณ์ประจุกระแสไฟฟ้า (Solar Charger Controller)	10
แบตเตอรี่ ขนาด 120 Ah (Battery)	2
ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)	10
ตู้ระบบสะสมความร้อน (Thermal storage box)	10
แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (TE Module)	10
กล่องโครงสร้างตู้ฟักไข่	2

การพิจารณามูลค่าจาก (SV) ปีสุดท้ายของตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงาน

ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (สมการที่ 1) จากข้อมูลในตารางที่ 2 พบว่ามูลค่าซากที่มีค่าลดลงมากและไม่สามารถใช้งานต่อได้คือโม้อัดที่ใช้หักสองโครงสร้างผู้ฟักไข่และแบตเตอรี่ แต่อุปกรณ์อื่นๆ ยังสามารถใช้งานต่อไปได้โดยเดาอย่างอิงแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถใช้งานได้คือเนื่องอีก 23 ปี ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้พิจารณามูลค่าซากของผู้ฟักไข่ในปีที่ 2 ของการใช้งานที่มีมูลค่าซากเท่ากับ 70% ของเงินลงทุนเริ่มต้น ส่งผลให้ผู้ฟักไข่ไม่มีมูลค่าซากเท่ากับ 15,414 บาท ดังนั้นต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตของผู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ตามสมการที่ 1 มีค่าเท่ากับ 9,142 บาท (ตารางที่ 3) ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าผู้ฟักไข่แบบขดลวดที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์เมื่อมีขนาดของผู้ฟักไข่ที่เท่ากัน (3,500-5,000 บาท)

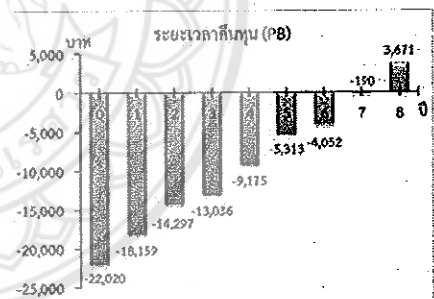
ตารางที่ 3 ผลประเมินต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิตของผู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
เงินลงทุนเริ่มต้น (C ₀)	22,020 (บาท)
ต้นทุนในการดำเนินการ (C ₁)	428 (บาท)
มูลค่าซากปีที่สุดท้ายของโครงการ (S _V)	15,414 (บาท)
อัตราดอกเบี้ย หรือ อัตราคิดลด (i)	7.875 (%)*
อายุการใช้งานโครงการ (n)	2 (ปี)
จำนวนปีที่สิ้นสุดโครงการ (N)	3 (ปี)
ต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (LCC)	9,142 (บาท)

*ธนาคารกรุงไทย จำกัด (มหาชน), 22 พฤษภาคม 2558

ระยะเวลาคืนทุน (PB) ของผู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ถูกคำนวณตามสมการที่ 2 โดยใช้ข้อมูลเงินลงทุนเริ่มต้นตามรายละเอียดในรูปที่ 2 และตารางที่ 3 โดยมีการพิจารณาผลตอบแทนสะสมสุทธิรายปีจากค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อรอบการฟักไข่ (21 วัน) ของผู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เทียบกับฟักไข่แบบขดลวด พบว่าผู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการฟักไข่เนื่องจากสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เองผ่านแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่ผู้ฟักไข่แบบขดลวดจำเป็นต้องใช้

พลังงานไฟฟ้าพื้นฐานจากสายส่ง ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 2.88 หน่วยต่อวัน และเมื่อพิจารณาต่อรอบการฟักไข่พบว่าใช้พลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 60.48 หน่วย [11] ปัจจุบันอัตราค่าไฟฟ้าฐานเท่ากับ 3.7556 บาทต่อหน่วย [12] เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าต่อรอบการฟักไข่เท่ากับ 227.14 บาท ถ้าในระยะเวลา 1 ปี สามารถฟักไข่ได้ 17 รอบ ดังนั้นผู้ฟักไข่แบบขดลวดมีค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 3,861.36 บาทต่อปี ดังนั้นระยะเวลาคืนทุนของผู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้โดยนำเงินลงทุนเริ่มต้นในแต่ละปีลบออกด้วยผลตอบแทนสุทธิสะสมรายปีที่ไม่ต้องจ่ายค่าพลังงานไฟฟ้าในแต่ละปี (3,861.36 บาท) นอกจากนี้ทุกๆ 2 ปี จะมีการเปลี่ยนถ่วงโครงสร้างผู้ฟักไข่และแบตเตอรี่เนื่องจากหมดอายุการใช้งานทำให้มีการลงทุนเพิ่มสำหรับอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้เท่ากับ 2,600 บาท ผลการคำนวณระยะเวลาคืนทุนของผู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในรูปที่ 3 พบว่าระยะเวลาคืนทุนที่ได้ผลตอบแทนเท่ากับเงินลงทุนรวมคือ 7.05 ปี นอกจากนี้ พบว่าในปีที่ 3 และ 6 ของการใช้ผู้ฟักไข่จะมีผลตอบแทนสะสมสุทธิรายปีน้อยกว่าปีอื่นๆ เนื่องจากในปีที่ 3 และ 6 มีการลงทุนเพิ่มเติมในส่วนของการก่อสร้างผู้ฟักไข่และแบตเตอรี่ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 3 ระยะเวลาคืนทุนของผู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาคืนทุนกับผู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นแหล่งความร้อนเพียงอย่างเดียว (1.06 ปี) [2] พบว่าผู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะคืนทุนของนานกว่าถึง 6 ปี และเมื่อเปรียบเทียบกับผู้ฟักไข่ที่มีขนาดใหญ่กว่าเช่นผู้ฟักไข่แบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้น้ำมันที่

ใช้แล้วหลังจากการประกอบอาหารเป็นแหล่งพลังงานความร้อน [8] พบว่าตู้ฟักไข่ที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้มีระยะเวลาคืนทุนมากกว่าถึง 2.88 เท่า หรือ 4.6 ปี เห็นได้ว่าระยะเวลาคืนทุนที่แตกต่างนี้ เนื่องจากอุปกรณ์ส่วนที่เพิ่มเติมจากตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ และ ชุดระบบสะสมความร้อน อย่างไรก็ตาม ต้นทุนแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องและข้อได้เปรียบของตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นี้คือ สามารถทำงานได้ทั้งกลางวันและกลางคืนโดยไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าพื้นฐาน เพราะใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านชุดแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนแบบสารเปลี่ยนสถานะทำให้ไม่ต้องมีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ และเป็น การสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนที่มีอยู่ไม่จำกัด ดังนั้น ตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาทดแทนตู้ฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้าได้ และเป็นแนวทางส่งเสริมและ พัฒนาการใช้พลังงานทดแทน เพื่อลดปัญหาการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้อีกทางหนึ่ง

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินต้นทุนวัฏจักรชีวิตและระยะเวลาคืนทุนของตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าใช้เงินลงทุนเริ่มต้นของระบบ รวม 22,020 บาท ซึ่งเป็นเงินลงทุนเริ่มต้นที่สูงเมื่อเทียบกับตู้ฟักไข่แบบขดลวดที่มีขนาดเดียวกันและมีจำหน่ายทั่วไปในเชิงพาณิชย์ เนื่องมาจากตู้ฟักไข่ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริกมีการทำงานร่วมกับระบบสะสมความร้อนและใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แทนพลังงานไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าพื้นฐาน และเมื่อคำนวณต้นทุนตลอดวัฏจักรชีวิต (LCC) โดยปรับเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่าเท่ากับ 9,142 บาท สำหรับการประเมินระยะเวลาคืนทุน (PB) โดยพิจารณาระยะเวลาคืนทุนจากผลตอบแทนสุทธิ ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาผลตอบแทนสุทธิจากตู้ฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้าที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าประมาณ 3,861.36 บาทต่อปี ผลการประเมินระยะเวลาคืนทุนพบว่าตู้ฟักไข่เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะเวลาคืนทุนที่ได้ผลตอบแทนเท่ากับเงินลงทุนรวมคือ 7.05 ปี ดังนั้น จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าตู้ฟักไข่แบบเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบสะสมความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาทดแทนตู้ฟักไข่แบบขดลวดไฟฟ้าได้ และเป็นแนวทางส่งเสริมและ พัฒนาการใช้พลังงานทดแทน เพื่อลดปัญหาการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้อีกทางหนึ่ง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผ่านทุนงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ประจำปี 2559 (R2559B116) ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดทั้งโครงการ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยหลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ สำหรับความอนุเคราะห์สถานที่ทำงานวิจัย เครื่องมือ และอุปกรณ์ทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สงคราม บุตรดา และสุนทร บุญคามาตัน (2541). เครื่องอำนวยความสะดวกในการเลี้ยงไก่, กรุงเทพฯ: สถาบันราชภัฏพระนคร
- [2] หงส์สวัสดิ์ สวัสดิภาพ (2546). การพัฒนาเครื่องฟักไข่โดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น, วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ
- [3] Nakage, E.S. Cardozo, J.P. Pereira, G.T. Queiroz, S.A. Boleli, I.C. (2003). Effect of temperature on incubation period, Embryonic mortality, hatch rate, egg water loss and partridge chick weight (*Rhynchotus rufescens*), *Revista Brasileira de Ciencia Avicola*, Vol 5, pp. 1-7.
- [4] Hubbard LLC, (2011). Incubation guide, Hubbardbreeders, USA, pp. 1-62.
- [5] ชัยคณีย์ ประทุมสิน (2550). การพัฒนาเครื่องฟักไข่โดยใช้ระบบน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์, วิทยานิพนธ์ กศ.ม. (อุตสาหกรรมศึกษา), มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ
- [6] ชญาวิทย์ อุดมศักดิ์กุล (2544). การพัฒนาเครื่องฟักไข่พลังงานแสงอาทิตย์, วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (เทคโนโลยีพลังงาน), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ
- [7] ชัยณรงค์ ธรรมกุล (2551). การพัฒนาเครื่องฟักไข่โดยใช้พลังงานจากชีวภาพร่วมกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์, วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ
- [8] สันต์ สลัดขะนันท์ (2546). การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับตู้ฟักไข่เชื้อเพลิงที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากการผลิตอาหาร, วิทยานิพนธ์ วศ.บ. (วิศวกรรมพลังงาน), มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่
- [9] หงส์สวัสดิ์ สวัสดิภาพ (2546). การพัฒนาเครื่องฟักไข่โดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ
- [10] แสงธิดา แสงดาวเรือง, สุจน ตั้งวิวิทพันธ์, บุญล้อม ชิวะอิสระกุล, เบญจวรรณ ศิริศรีสวัสดิ์, สดศวร ปัญญาวีร์ และผ่าน

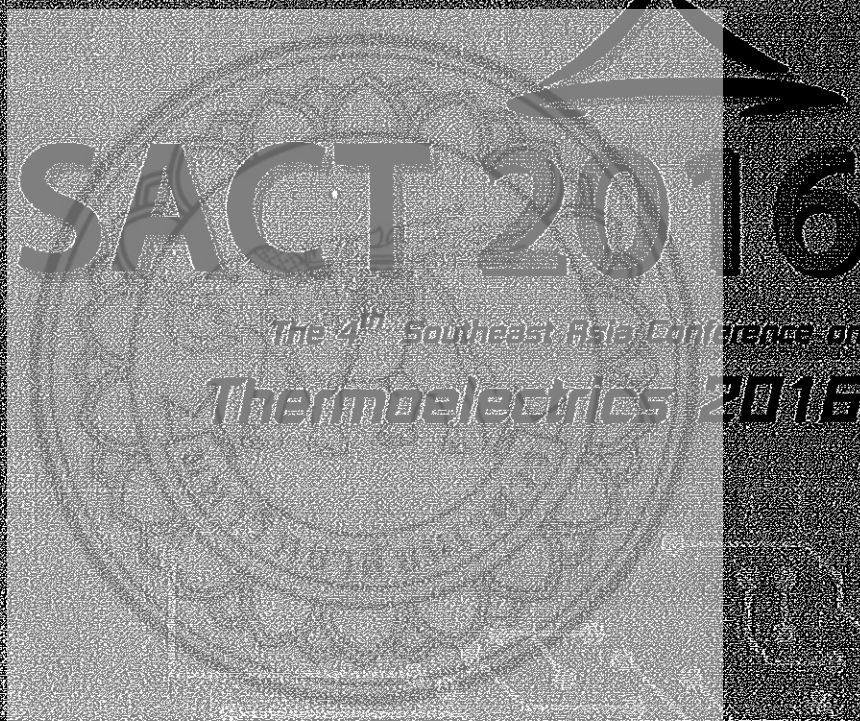
ฟ้า ณ เชียงใหม่ (2548). การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไก่
พื้นเมือง 2: การใช้ตู้ฟักไข่ รวมทั้งการให้และไม่ให้อาหารไก่ไข่,
การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่
43. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. หน้า 314-
322.

[11] เอกชัย สิงห์คง, วัช สุริวงษ์, สมชาย เขียวจิตต์สวัสดิ์ และ
ประทีปธาร์ อนุรักษ์ (2557). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการ
ทำงานของผู้ที่ใส่แบบชลดความร้อนและแบบเทอร์โมอิเล็ก
ทริก. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, ฉบับพิเศษ การประชุม
วิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์วิจัยครั้งที่ 6. หน้า 271-276.

[12] คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (Energy
Regulatory Commission) (2558). สำรสำคัญของการ
ปรับปรุงโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าของประเทศไทยปี 2558,
[ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.erc.or.th>, เข้าดูเมื่อ
วันที่ 11/03/2559.



Book of Abstracts



15-18 December 2016, Sea Garden Hotel, Danang, Vietnam

Program Committee

International Committee

Prof. Dr. Choahat Zhang, Harbin Institute of Technology, China
 Prof. Dr. Hong Joo Kim, Kyungpook National University, Korea
 Prof. Dr. Mitra Djamal, Institute of Technology Bandung, Indonesia
 Prof. Dr. Sunghee Cho, Ulsan University, Korea
 Prof. Dr. Kuei-Hsien Chen, National Taiwan University, Taiwan
 Prof. Dr. Li-Chyong Chen, National Taiwan University, Taiwan
 Prof. Dr. Chia-Chun Chen, National Taiwan Normal University, Taiwan
 Prof. Dr. Chih-Wei Chang, National Taiwan University, Taiwan
 Prof. Dr. Jee-Laj Kuo, Institute of Atomic and Molecular Sciences, Academia Sinica, Taiwan
 Prof. Dr. Nguyen Van Hung, Hanoi University of Science, Vietnam
 Assoc. Prof. Dr. Phan Bach Thang, Vietnam National University, Vietnam
 Dr. Melania Suweni Murnini, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia
 Dr. Ing. Setyawan P. Sakli, Universitas Brawijaya, Indonesia
 Dr. Ryoji Funahashi, National Institute of Advanced Industrial Science & Technology, Japan

Local Committee

Prof. Dr. Santi Marnsiri, Suranaree University of Technology
 Assoc. Prof. Dr. Chanin Vaseenonta, Sakon Nakhon Rajabhat University
 Assoc. Prof. Dr. Rattikorn Yimnirun, Suranaree University of Technology
 Assoc. Prof. Dr. Wisanu Pecharapo, College of Nanotechnology, KMUTT
 Assoc. Prof. Dr. Wittaya Amomkittaburung, Khon Kaen University
 Assoc. Prof. Dr. Jakkrapong Kaewkhao, Nakhon Pathom Rajabhat University
 Assoc. Prof. Dr. Weerasak Somkhunthot, Roi Rajabhat University
 Assoc. Prof. Dr. Tosawat Seetawan, Sakon Nakhon Rajabhat University
 Asst. Prof. Dr. Theerachai Bongkarn, Naresuan University
 Asst. Prof. Dr. Udom Tipperach, Ubon Ratchathani University
 Asst. Prof. Dr. Sert Klennork, Ubon Ratchathani University
 Asst. Prof. Dr. Kanjana Vongsawat, Sakon Nakhon Rajabhat University
 Asst. Prof. Dr. Chesla Ruttanapun, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Asst. Prof. Dr. Supree Pinitsoontorn, Khon Kaen University
 Dr. Anek Charoenphakdee, Rajabhat University of Technology Isan
 Dr. Narong Sangwarangtee, Suan Sunandha Rajabhat University
 Dr. Chanchana Thanachayanont, National Metal and Materials Technology Center
 Dr. Maiti Horpyathum, National Electronics and Computer Technology Center
 Dr. Malee Sriprorn, Sakon Nakhon Rajabhat University
 Dr. Haisakorn Wattanasarn, Sakon Nakhon Rajabhat University
 Dr. Athorn Vora-Ud, Sakon Nakhon Rajabhat University
 Mr. Theerawut Sumpitao, Sakon Nakhon Rajabhat University
 Mr. Kunchit Singsoog, Sakon Nakhon Rajabhat University
 Mr. Jukkrit Kongphimai, Sakon Nakhon Rajabhat University
 Mr. Sunfi Pevphong, Sakon Nakhon Rajabhat University

Table of Content

Oral Presentation	
Invited001 Prof. Dr. Chohad Zhang <i>Development and Application of Lightning Protection Technologies in Power Grids of China</i>	2
Invited002 Prof. Dr. Hyeog-Joo Kim <i>Development of Bulk Single Crystals for Biology Materials and Radiation Detection</i>	3
Invited003 Prof. Dr. Milica Djamal <i>Simulation of Surface Plasmon Resonance on Tapered Fiber Structure for E. coli Detection</i>	4
Invited004 Prof. Dr. Saull Masunzi <i>Nanostructured Materials and Composites for Energy Storage Applications</i>	5
Invited005 Prof. Dr. Saegul Cho <i>The Achievement of High ZT in n-type SiGe Single Crystal</i>	6
Invited006 Prof. Dr. Kofi-Atsina Chua <i>Thermoelectric Performance of Metastable Rock-salt GeTe-rich Ge-Sb-Te Thin Films</i>	7
Invited007 Prof. Dr. H-Chyong Chen <i>Redesigning GeTe-rich Ge-Sb-Te Thin Films: From Crystals to Thermoelectrics</i>	8
Invited008 Prof. Dr. Chia-Chou J. Chen <i>Earth Abundant and Non-toxic FeS₂ Nanocrystals for Photovoltaic and Catalytic Applications</i>	9
Invited009 Prof. Dr. Chia-Wel Chang <i>Ballistic Thermal Conduction and Thermoelectrics</i>	10
Invited010 Prof. Dr. Jey-Jai Kuo <i>Computational Material Design of Two Dimensional Materials and Their Energy Applications</i>	11
Invited011 Prof. Dr. Nguyen Van Hsiang <i>Thermodynamic Properties of Ice Crystals Studied Based On High-Order Expanded Debye-Waller Factors: Application to Perfluorocarbon</i>	12
Invited012 Assoc. Prof. Dr. Phan Bach Thang <i>Influences of Defects on Thermoelectric Properties of Indium and Gallium Dually-Doped ZnO Thin Film</i>	13
Invited013 Dr.-Ing. Sthyan P. Sankar <i>Surface Hydrophilicity and Roughness Modification of Low-Cost QCM Sensors</i>	14
Invited014 Dr. Hyeon Fungshuhl <i>High Temperature Thermoelectric Systems Using Oxide Minerals</i>	15
Invited015 Assoc. Prof. Dr. Whann Pecharapa <i>Synthesis and Optical Applications of Conducting Metal Oxides Nanostuctures</i>	16
Invited016 Asst. Prof. Dr. Jitrapong Kuantharo <i>Development of Solid State Lithium Materials from Glass</i>	17
Poster Presentation	
A00023: T. T. Ly <i>STM study on the origin of p-type characteristics of SnSe</i>	19
A00037: K. Sirigusa <i>Effect of Annealing Temperature on the Structural, Mechanical and Electrical Properties of Flexible Bi₂Te₃ Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering</i>	20
A00043: P. Nithongkuan <i>[Bi]/[Te] Control and Thermoelectric Properties of Flexible Bi₂Te₃ Thin Film Prepared by RF Magnetron Sputtering</i>	21
A00049: S. Barshad <i>Spectral Selectivity and Collector Thermal Performance of Ni-Al Solar Absorber Prepared Plasma Spray Technique</i>	22
A00051: T. Khunteepong <i>RSM Base Study of The Influence of Substrate Temperature and Gas Flow Rate on The [Sb]/[Te] Ratio and Thermoelectric Properties of Flexible Sb₂Te₃ Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering</i>	23
A00054: S. Chantreeoap <i>Al-doped ZnO Thermoelectric Module</i>	24
A00070: A. Vora-ud <i>A Study of Thermoelectric GeSb₂Te₃ Thin Films Prepared by High Power Impulse Magnetron Sputtering</i>	25
A00091: U. Tiefenbach <i>Synthesis and Optimal Properties of Various Zn_{1-x}Al_xN₂ Nanowires for Thermoelectric Applications</i>	26
B00017: T. Saitowong <i>Application of Thermoelectric (TE) Module and Thermal Energy Storage System as Heat Source in Egg Incubator</i>	27

Application of Thermoelectric (TE) Module and Thermal Energy Storage System as Heat Source in Egg Incubator

T. Suriwong^{a,*1}, S. Banthuek^{a,*2}, E. Singhadet^{a,*3} and S. Jiajitsawat^{b,*4}

^a School of Renewable Energy Technology, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand
^b Energy Research & Promotion Center, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand
 *1suriw@nu.ac.th, *2santh@nu.ac.th, *3taks@0404845@icloud.com, *4scojchaj@nu.ac.th

Abstract

Fundamentally, TE module can provide a method for heating and cooling applications by electricity based on heat-pump technology, together with no mechanical moving parts, small size, provide maintenance-free operations, emit no pollutants and feasible to use in a wide temperature range. In order to develop an egg incubator that is able to operate without on-grid electricity in remote areas, a thermoelectric (TE) module and thermal energy storage (TES) was applied as heat sources in egg incubator, "TEI-TES", and using PV Cells to be a primary energy source. TEI-TES was designed and fabricated with the same size of a commercial egg incubator (CEI) for providing fertile chicken eggs (24 eggs/hatching). The TEI-TES integrated PV cells was composed of several main parts: TE module, TEI unit, TES unit, PV cells, battery, 3-way switch, charger-controller, temperature controller, thermocouple type K, air vent, and water tray, as shown in Fig. In TEI-TES system, a TE module mode was applied as a heat source during daytime, while TES system was designed as a heat source during the nighttime. The incubating temperature and relative humidity (RH) inside the TEI-TES were controlled under optimum environmental conditions for hatching (36-39°C and 60-80 %RH) and recorded for 24 hours per day for the whole chicken-egg hatching period of 21 days, comparing with a CEI. According to the results, TEI-TES was able to maintain the emulate natural conditions for fertile chicken egg hatching over hatching periods. The performance of TEI-TES was comparable to that of CEI under the climatic conditions of Thailand. Therefore, TEI-TES with PV Cells has the potential performance and capabilities for promoting chicken hatchings in remote areas far from available electricity infrastructure.

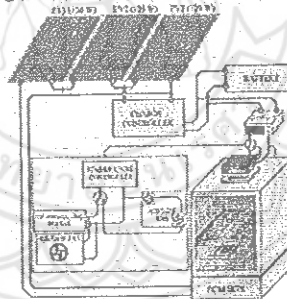



Fig. Diagram of the constructed TEI-TES integrated PV cells.

Keywords: Egg incubator, Thermoelectrics, Heating, Thermal energy storage



Thai Thermoelectric Society
Sakon Nakhon Rajabhat University, 680 Nittayo Road,
Mueang District, Sakon Nakhon, 47000, Thailand.
Tel & Fax (+66) 42744319
Website : <http://sact.snru.ac.th>

TTS
สมาคมเทอร์โมอิเล็กทริกไทย
Thai Thermoelectric Society

ภาคผนวก ง
การตีพิมพ์ผลงานวิจัยในระดับนานาชาติ

- 1) Tawat Suriwong, Sathit Banthuek, Ekachai Singhadet and Somchai Jiajitsawat, "A new prototype of thermoelectric egg incubator integrated with thermal energy storage and photovoltaic panels", *Maejo International Journal of Science and Technology*, 11 (2017), 148-157. (Impact Factor : 0.312)



*Full Paper***A new prototype of thermoelectric egg incubator integrated with thermal energy storage and photovoltaic panels**Tawat Suriwong^{1, 2, *}, Sathit Banthuek¹, Ekachai Singhadet¹ and Somchai Jajitsawat³¹ School of Renewable Energy Technology, Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand² Research Centre for Academic Excellence in Applied Physics, Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand³ Energy Research and Promotion Centre, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, 65000, Thailand* Corresponding author, e-mail: tawats@nu.ac.th*Received: 16 August 2016 / Accepted: 20 July 2017 / Published: 25 July 2017*

Abstract: The purpose of this study is to develop a thermoelectric egg incubator (TEI) integrated with a thermal energy storage (TES) system, using electricity from photovoltaic (PV) cells in order to operate without on-grid electricity. The TEI was constructed with the same dimensions as a commercial egg incubator (CEI), which was made to the required dimensions for hatching 24 eggs per period of 21 days. The TEI was designed with 2 operating modes of heat sources: a thermoelectric (TE) module used for daytime operation and a TES containing phase-change materials (PCM) which supplied heat to the TEI for nighttime operation. The PV panels were designed to be the primary energy source for generating 360 W of electricity, which was supplied to heat sources of TEI according to the energy load for providing fertile chicken eggs (24 eggs/hatching). The incubating temperature and relative humidity (RH) inside the TEI-TES were controlled under optimum environmental conditions for hatching (36-39°C and 60-80% RH) to stimulate embryonic growth. As a result, the TEI-TES achieved and maintained an optimum incubating temperature in the range of 36.7-38.8°C and the correct RH of 66±0.2 % in the warm weather of Thailand over the incubating period of 21 days. The TEI-TES was able to maintain optimum environmental conditions for chicken-egg hatching, and its performance was comparable to that of the CEI. The working mechanisms of the TE module and TES are also discussed. The results show that the TEI-TES with PV panels as the primary energy source is suitable for use in remote areas which have no on-grid electricity supply.

Keywords: egg incubator, thermoelectrics, hatching, thermal energy storage

INTRODUCTION

New technologies play an important role in modern agricultural practice. In the commercial production of poultry products such as meat and eggs, a guaranteed sufficient supply of brood chicks is essential. This cannot be achieved by natural incubation by means of broody hens sitting on clutches of eggs. The development of a new technology for a more efficient hatching of fertile eggs is important. The artificial incubator is an important technology for use as an alternative approach to the hatching of fertile chicken eggs without the involvement of broody hens. Egg incubators, which are widely used in the industry, must be well controlled to provide a hatching process under optimum environmental conditions (temperature, egg turning and humidity) to stimulate embryonic growth until hatching [1]. The temperature and relative humidity (RH) inside the incubator must be controlled to optimum environmental conditions in the temperature range of 36-39°C and RH of 60-80% [1-3]. The incubating temperature is the most crucial factor in incubating efficiency [1, 4]. In the case of the commercial egg incubator (CEI), a heating element is used as a heat source by directly converting electricity to thermal energy. The CEI has been designed in several forms and versions for manual operation and also for fully-automatic and semi-automatic operations [2]. The forced-air egg incubator is one of those approved due to its action of hot-air circulation through the use of an exhaust fan, which provides the necessary stable heat level, suitable moisture level, and the maintenance of appropriate amounts of oxygen inside the incubator [1, 2, 4, 5]. An egg-hatching incubator integrated with a conveyor rotation system has been designed and developed using an automatic controller for the maintenance of temperature and humidity [6]. However, it cannot be used in remote areas not serviced by electricity supply infrastructure. Recently, a photovoltaic (PV)-powered chicken-egg incubator was constructed for use in the rural areas of Serra Leone; nevertheless, a large-capacity battery was required for operating the system for 24 hours [7].

The thermoelectric (TE) technology, which involves the conversion of waste heat into useful electricity, can provide a method of heating and cooling by electricity. TE modules can be used for both power generation and solid-state refrigeration or heat pumps. A TE module has no mechanical moving parts or environmentally harmful fluids like chlorofluorocarbons [8, 9]. The TE systems are gaining an increasing level of attention because of their reliability and environmentally friendly energy conversion technology (heat-pump technology). They are of small size, provide maintenance-free operations, emit no pollutants and are feasible for use in a wide temperature range [8, 10]. TE technology is currently expected to contribute to solving global warming and climate change issues because of its improved total energy efficiency and reduced consumption of fossil fuels. In previous studies, TE modules were successfully initiated as a new heating device to replace the heating element in the CEI, and it was found that egg incubators with TE modules as heat sources exhibit high efficiency, resulting in low electrical fees per hatching period [11, 12].

Thermal energy storage (TES) is very important in many engineering applications. Among the practical problems involved in solar energy systems is the need to increase the reliability of the system by storing any power produced in excess of the energy load. The stored energy can be used whenever needed, such as during the night or on overcast days [13]. Similarly, practical engineering problems arise from the waste-heat recovery system where waste heat availability and utilisation periods are different [14]. A phase-change material (PCM) is a latent-heat storage material used for TES. The PCM can store or release a large amount of heat during the phase change process. TES systems containing PCM in the solid-to-liquid phase have been considered as a potential candidate for solar energy systems. These types of TES systems have a small volume and work in the known

Maejo Int. J. Sci. Technol. 2017, 11(02), 148-157

melting and solidifying temperature ranges of the PCM [13, 15, 16], which is used in latent heat storage for several applications such as solar energy systems, heat pumps and spacecraft thermal control, as well as for cooling applications in buildings [16].

In previous TE models, the TE module was successfully tested as a new heating device in egg incubators, but it still used electricity from the national grid [11, 12]. Furthermore, a large-capacity battery was required for the PV-powered chicken egg incubator [7]. In order to develop a thermoelectric egg incubator (TEI) that can be operated in rural areas where grid-supplied electricity is not necessarily available or reliable, we have integrated a TE module in a TES and used it as a heat source in the TEI. PV panels are used as the primary power source for the TE module and TES. The TEI is integrated with the TES and PV panels. As far as we know, this is the first time that this design has been used.

In the present study the design of this TEI integrated with the TES (TEI-TES) and PV panels has been developed based on the optimum chicken egg hatching period of 21 days (the usual hatching period of a chicken egg), with optimum temperature and humidity control 24 hours a day. The optimum incubating temperature and % RH of the TEI-TES were investigated, identified and compared with conditions used in a CEI.

MATERIALS AND METHODS

A TEI was constructed with the same dimensions as a CEI, which was 0.35 m wide, 0.35 m long and 0.44 m high, the required dimensions for accommodating the hatching of 24 eggs per period (Figure 1a). The incubating box was made of plywood 10 mm thick. Three-mm-thick polystyrene insulation covered the outer surfaces of the incubating box in order to reduce heat loss. Figure 1b illustrates a TE module (TEC1-12710 model, Thermonamic Electronic Co., P.R. China) with 127 couples. The module was 40 mm long, 40 mm wide and 3.4 mm high. The performance specifications of the module were: 79°C for maximum temperature difference between hot and cold sides of the module (ΔT_{max}), 17.2 V and 10.1 A at maximum voltage; DC current at ΔT_{max} , and 1.27-1.49 Ω for AC resistance. The module was mounted on top of a TEI box as the heat source in place of a heating element, as in the CEI (Figure 1c).

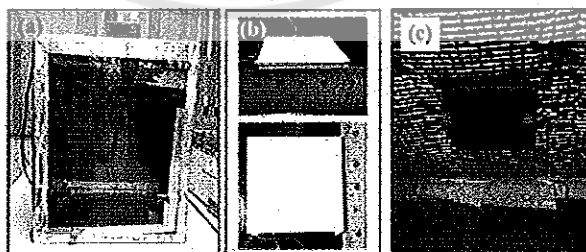


Figure 1. (a) TEI unit; (b) TE module (TEC1-12710); (c) installation of TE module at the top of TEI unit

The TES was designed to provide sufficient heating load for maintaining correct temperature conditions for the chicken eggs during the night [4]. The TES unit was made from stainless steel sheet 1 mm thick with dimensions of 0.35 m (width), 0.35 m (length) and 0.1 m (height). A 1500-W heating element with three parallel circuit lines (each 0.55 m long) was installed inside the TES unit for converting electricity from the PV panels to thermal energy. Two 1 mm-thick stainless steel

pipes with an outer diameter of 25.4 mm were also mounted inside the TES unit, as illustrated in Figures 2a and 2b. In the present study paraffin wax was used as PCM, which has a melting point of 70°C, a latent heat of fusion of 173.6 kJ/kg, and a density of 0.790 g/cm³ at 70°C. Seven-kilograms of the paraffin wax were contained in the TES unit to ensure sufficient thermal energy during the night. Rockwool, 40 mm thick, covered the outer surfaces of the TES unit to prevent heat loss. Then the TES unit was installed at the bottom of the TEI box, as shown in Figure 2c.

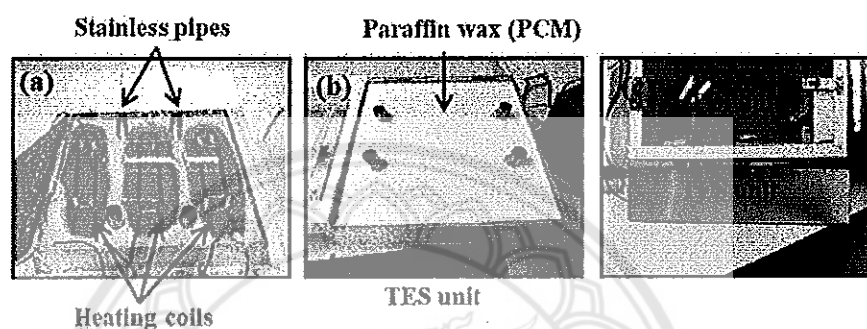


Figure 2. (a) 3 parallel heating elements and 2 stainless pipes inside TES unit; (b) paraffin wax contained in TES unit; (c) mounting TES unit at the bottom of TEI unit

In order to make the TEI operable in rural areas where grid-supplied electricity is not available, three PV panels (polycrystalline Si, 120 Wp, ES20636120, GIN Group, Italy) were used as the primary energy source. The PV panels generated ~360 W of electrical power for the TE module and the heating elements in the TES. Figure 3 presents the TEI apparatus, with the TES and PV panels included, which can operate without on-grid electricity. The overall TEI system (TEI-TES) is composed of several main parts: TE module, TEI unit, TES unit, PV panels and a battery (24 V, 120 Ah). The system is also fitted with a temperature controller, a charger-inverter (Apollo S-120A, Leonic Co., Thailand) and a type-K thermocouple. Air circulation inside the TEI during hatching is assisted by airflow fans. A water tray is placed in the bottom of the TEI to control the humidity in the incubator.

The TEI-TES has two heating modes as shown in Figure 3. When operating in TE mode, the TE module is the heat source during daytime, while during the night it operates in TES mode and heat is derived from the PCM. The two stainless steel pipes mounted inside the TES unit transfer heat from the TES to the TEI via a fan installed at the end of each pipe. The optimum incubation temperature of 38°C inside the TEI-TES is controlled by the temperature controller.

The type-K thermocouple is mounted inside the TES at the centre of the incubating chamber and on both the hot and cold sides of the TE module. A manual 3-way switch turns on the temperature controller at 6 a.m. to operate the TE module and turns it off at 6 p.m. The TES is switched on at 6 p.m. and switched off at 6 a.m. During the day, the PV panels generate DC electricity which is supplied to the TE module at 12 V and 5 A through the charger-inverter and battery. Three 3 PV panels simultaneously supply DC electricity to the heating element circuit for generating thermal energy and melting the paraffin wax when the temperature is higher than its melting point at 70°C inside the TES unit. This means that heat is absorbed inside the TES unit during the day and is discharged to the TEI chamber during the night. Two air vents 10 mm in diameter are installed at the back of the incubator at a height of 50 mm from the bottom of the TEI

Maejo Int. J. Sci. Technol. 2017, 11(02), 148-157

unit. The oxygen consumption and carbon dioxide concentration inside the incubator are optimised through the air vent during the metabolism period of embryo change.

The performance of the TEI-TES and PV panels were monitored 24 hours a day over 21 days (one chicken-egg hatching period). The temperature and humidity inside the TEI chamber were recorded with a data recorder (AI 210, Wisco, Thailand) connected to a personal computer and a multifunction environment meter (DT-8820, CEM-meter, China).

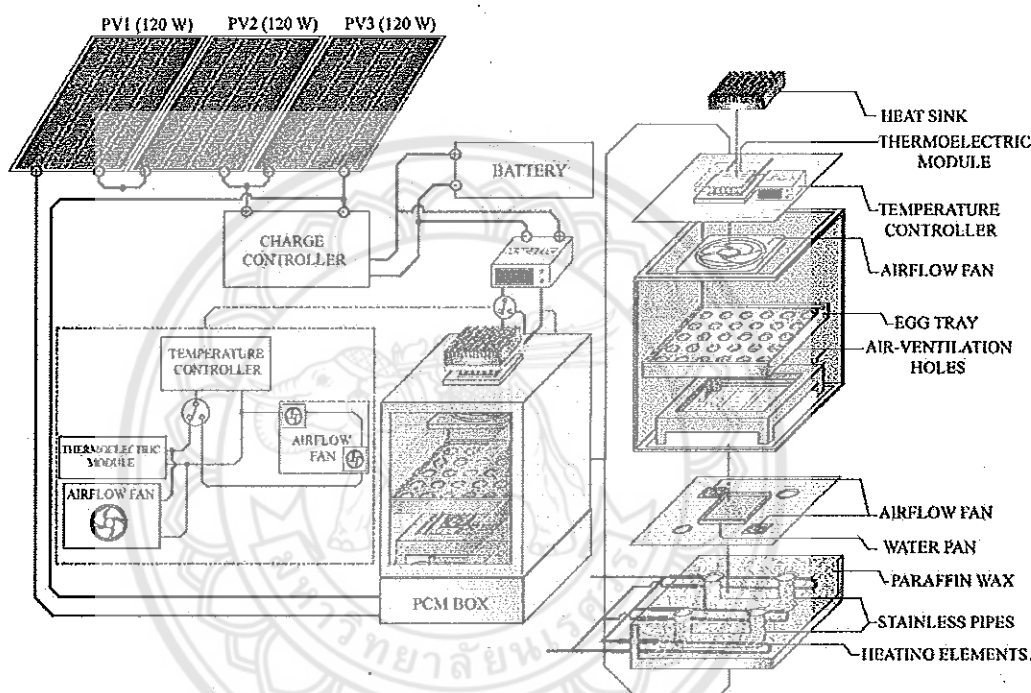


Figure 3. Schematic of the constructed TEI-TES and PV panels

RESULTS AND DISCUSSION

The incubating temperature is an important factor influencing the embryo development and metabolic rate during incubation. In the present study the incubating temperature inside the TEI-TES and CEI was continuously recorded 24 hours per day over 21 days (1 chicken-egg hatching period) in order to maintain the optimum incubating temperature of 36-39°C [1-3]. The incubating temperature inside both the commercial and experimental incubators was controlled by a temperature controller set at 38°C for the whole hatching period. The temperature controller was automatically turned off when the temperature inside of chamber rose above 38°C and was restarted when the inside temperature cooled to 36°C.

Figure 4 presents the incubating temperature profile of the TEI-TES compared with the CEI on the 1st and 2nd days of the incubation period, together with room temperature (RT), TES temperature, and temperatures on both the hot and cold sides of the TE module. On the 1st day of incubation, the TEI-TES and CEI were started at 8 a.m. The RT profile exhibited a dome-like shape, increasing from 26°C at 8 a.m., reaching the highest temperature of 34.7°C between 1-4 p.m., and

decreasing during the night. Atmospheric conditions (clear skies or overcast, dry weather or raining, cool temperature or hot, etc.) were observed and recorded for their effects on the RT profile. The PV panels produced the DC current which was supplied to the TE module and heating elements inside the TES unit during daytime. The initial temperatures for the TEI-TES and CEI were set at room temperature of 26.7°C. The hot side of the TE module was 42.2°C and the cold side was 31.1°C. The incubating temperature of the TEI-TES and CEI was raised to 35.7°C and 35.6°C respectively. The temperature inside the TES unit sharply increased and reached a maximum temperature of 193°C at 2 p.m. The high temperature inside the TES unit changed the PCM phase from solid state to liquid state.

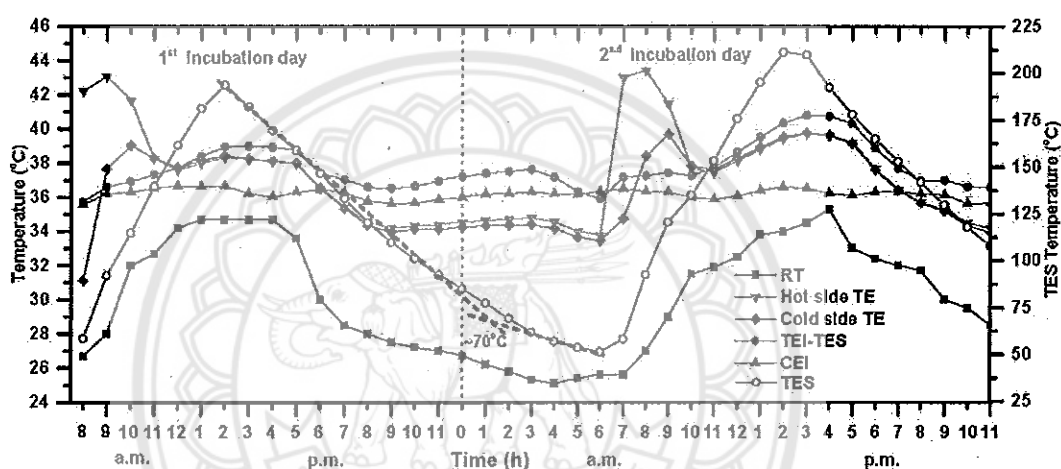


Figure 4. Temperature profiles over the 1st and 2nd days of incubation period of the following: TEI-TES, CEI, RT, hot and cold sides of TE module, and TES

There was a difference in temperature between the hot and cold sides of the TE module during 8 a.m. and 12 noon each day, indicating that the TE module transferred heat from the cold side to the hot side through the TE material (heat pump mode), thereby keeping the TEI-TES temperature within the required incubating temperature of 35.7-37.7°C. The operation of the TE module was stopped when the temperature was the same on each side; however, the TEI-TES continued to maintain the temperature within the incubating range even when the air-flow fans were turned off between 12 noon and 6 p.m. This resulted in sufficient heat being transferred from the TES unit to the TEI chamber through the stainless steel pipes by conductive heat transfer. The temperature inside the TEI-TES, which was switched on at 6 p.m., could be controlled within the optimum incubating range after 6 p.m., which indicates that the TES has enough thermal energy capacity to maintain the incubating temperature inside the TEI-TES until 6 a.m. the next day. On the 2nd day of incubation, the TE module provided heat for the 4 hours between 6-10 a.m. by deriving heat from the surroundings to the TEI chamber.

The TEI-TES reached a critical temperature of about 40°C, a slightly higher temperature than the optimum incubating temperature between 4-5 p.m. When the temperature reached this level, the temperature inside the TES increased up to 220°C, resulting in a continuous excess heat transfer from the TES unit to the TEI chamber (heat loss) through the two stainless pipes. Heat loss, especially in the afternoon, needed to be reduced in order to maintain a correct heat flow from the

Maejo Int. J. Sci. Technol. 2017, 11(02), 148-157

TES to the TEI at a correct temperature. This was achieved by having a thick layer of rockwool insulation in the space between the TES and TEI units.

Over the 2-day period, the TE module worked for about 4 hours and then stopped when the inside temperature of the TES reached 150°C. This means that the temperature of the TEI-TES varies within the range of the optimum incubating temperature during daytime operation by having sufficient heat transferred from the TES unit to the TEI chamber through the two stainless steel pipes. The temperature inside the TEI-TES thus is maintained in the desirable incubating temperature range. Compared with the CEI, the temperature of the TEI-TES fluctuates a little more than that of the CEI, and is slightly higher than the temperature maintained in the CEI (36-37°C). This is due to the heat transfer from the TES unit. An outcome of this is that the metabolic process of the chick embryos in the TEI-TES is higher than that inside the CEI [1].

As can be seen in the temperature profile of the TES during the discharge process between 3 -10 p.m. (Figure 4), the temperature sharply decreases, followed by a moderate decrease till 3 a.m. and a further slowing of the rate of decrease until 8 a.m., at which time the TE module starts to generate heat, powered by the PV panels. During 3 p.m. - 8 a.m., which is the period of heat discharge, the TES discharges thermal energy via two mechanisms: sensible heat discharge (a larger drop in thermal energy) and latent heat discharge (a smaller drop in thermal energy). These thermal energy-releasing processes correspond to the fundamentals of latent heat storage materials, which work in a nearly isothermal way based on the phase change mechanism. The intersection of both mechanisms occurs at about 70°C, which is congruent with the melting point of paraffin wax (PCM).

Fundamentally, the power generated by PV panels is proportional to the intensity of the solar irradiance. In Thailand, as anywhere, the weather varies from day to day – sometimes overcast and raining, sometimes clear skies and warm or hot. These variable conditions obviously impact on the workings of any solar-powered device. Figure 5 presents the temperature profile of the TEI-TES on the 18th and 19th days of the incubation period, compared with that of the CEI. On these two days the weather was heavily overcast. The temperature inside the TES increased sharply and steadily over the period from 9 a.m. to 2 p.m., reaching the highest temperatures of 162.2°C on the 18th day and 176.9°C on the 19th day. However, these temperatures were lower than the 210-215°C level reached on other cloudless days, thereby reducing the electrical power supplied by the PV panels to the heating element circuit of the TES unit. The RT was relatively lower (26-27°C) between 9 p.m. and 6 a.m. the following morning, causing a larger temperature difference between the TEI-TES and RT, which was the effect of the overcast weather. Thus, the thermal energy capacity inside the TES was reduced, causing a drop in the temperature inside the TEI-TES to less than 36°C between 3-7 a.m. on both days. The temperature inside the TEI-TES was achieved and maintained within the range of optimum incubating temperature from 8 a.m. to 3 a.m. of the next day. The TE module also worked for about 4 hours per day, transferring heat from the surrounding air into the TEI chamber. This transfer of heat stopped when the temperature inside the TES exceeded 150°C. In this situation the CEI maintained the incubating temperature better than the TEI. The TEI-TES thus seems to be able to work under cloudy conditions without electricity from the national grid, even with a full energy load for incubating chicken eggs.

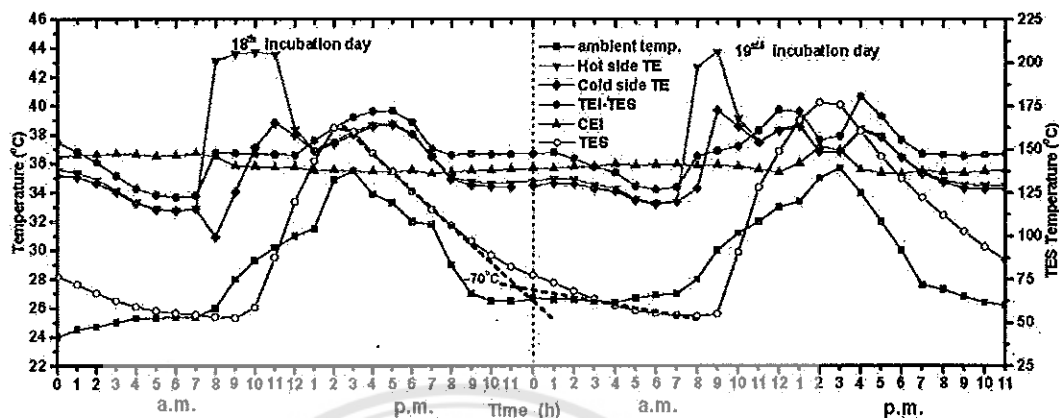


Figure 5. Time dependence of the temperature profiles (for TEI-TES, CEI, RT, hot and cold sides of TE module and TES) over the 18th and 19th days of incubation period

To discuss the performance of temperature control in more detail, the average daily temperatures of the TEI-TES and CEI during the incubation period are presented in Figure 6. It was observed that the incubating temperatures of the TEI-TES and CEI were mostly maintained within the optimum incubation temperature range for chicken egg hatching (36-39°C) [1-3]. On the 18th-19th days of incubation the incubating temperatures of both incubators were gradually lowered due to the effect of cloudy days on the performance of the PV panels (Figure 5). The daily average incubating temperatures of the TEI-TES at 36.7-38.8°C were achieved and maintained over the incubation period, which is comparable to those of the CEI (35.8-37.4°C). Thus, the PV-powered TEI-TES seems to be able to maintain the appropriate incubation temperature necessary for chicken eggs to hatch.

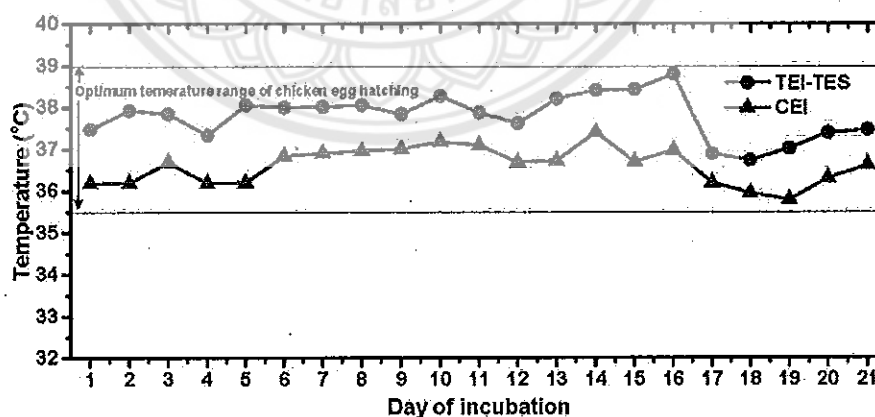


Figure 6. Average incubating temperatures of TEI-TES, compared with CEI, during the incubation period

Another important factor necessary for enabling fertile chicken eggs to stimulate the embryonic development until hatching is the moisture level, which must be controlled and maintained between 60-80% RH [1, 2]. Humidity is a crucial factor in preventing excess moisture loss from chicken eggs through the pores of the eggshell and membranes. It is well known that the

Maejo Int. J. Sci. Technol. 2017, 11(02), 148-157

moisture content in the air is also dependent on the ambient temperature. Generally, the RH decreases with increasing room temperature during the heating process. Therefore, a water pan is placed inside the incubator in order to prevent a low RH resulting from the heating process (Figure 3). Figure 7a shows % RH of the TEI-TES, compared with the CEI, over 24 hours on the 1st incubation day. At the beginning, the % RH of both incubators were the same. The RH of the CEI gradually increased and then became constant at about $72 \pm 1.5\%$ throughout the day. In the case of TEI-TES, the RH was kept constant at about $66 \pm 0.9\%$, also the correct humidity level for chicken egg hatching over the incubation period. However, the RH of the TEI-TES was lower than that of the CEI because the incubating temperature of the TEI-TES was higher than that of the CEI. Figure 7b shows the average daily % RH of the TEI-TES, together with that of the CEI, over the incubation period. The average daily RH of the TEI-TES during the incubation period was $66 \pm 0.2\%$, while that of the CEI was $72 \pm 0.1\%$. The % RH of the TEI-TES is in agreement with values from previous studies and developments of chicken egg incubators, e.g. solar-powered chicken egg incubators [7], the conveyor egg-hatching rotation system [6] and TEI [11].

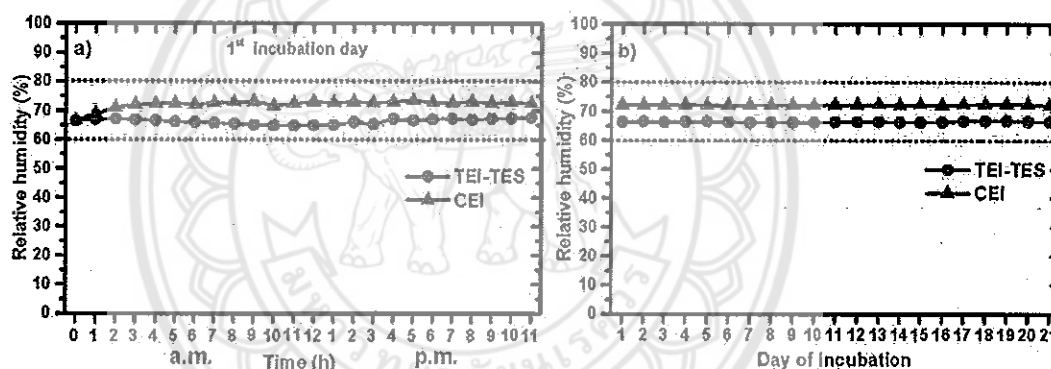


Figure 7. (a) % RH on 1st incubation day; (b) average % RH over an incubation period

CONCLUSIONS

The TEI-TES can achieve and maintain an optimum incubating temperature range of 36.7-38.8°C and a correct RH of $66 \pm 0.2\%$ under the climatic conditions of Thailand throughout the whole chicken-egg hatching period of 21 days. Therefore, the PV-powered TEI-TES has the potential for chicken hatching in remote areas without available electricity infrastructure.

ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful to the National Research Council of Thailand (NRCT), through Naresuan University, for providing financial support (Grant no. R2559B116). The School of Renewable Energy Technology and the Research Centre for Academic Excellence in Applied Physics, Naresuan University are also thanked for their general support.

REFERENCES

1. A. M. Kingori, "Review of the factors that influence egg fertility and hatchability in poultry", *Int. J. Poult. Sci.*, 2011, 10, 483-492.

Maejo Int. J. Sci. Technol. **2017**, *11*(02), 148-157

2. E. S. Nakage, J. P. Cardozo, G. T. Pereira, S. A. Queiroz and I. C. Boleli, "Effect of temperature on incubation period, embryonic mortality, hatch rate, egg water loss and partridge chick weight (*Rhynchotus rufescens*)", *Rev. Bras. Cienc. Avic.*, **2003**, *5*, 131-135.
3. Hubbard Co., "Incubation guide", **2011**, www.hubbardbreeders.com (Accessed: July 2016).
4. A. Lourens, H. van den Brand, R. Meijerhof and B. Kemp, "Effect of eggshell temperature during incubation on embryo development, hatchability, and posthatch development", *Poult. Sci.*, **2005**, *84*, 914-920.
5. A. Lourens, H. van den Brand, M. J. W. Heetkamp, R. Meijerhof and B. Kemp, "Effects of eggshell temperature and oxygen concentration on embryo growth and metabolism during incubation", *Poult. Sci.*, **2007**, *86*, 2194-2199.
6. M. B. Ramli, H. P. Lim, M. S. Wahab and M. F. M. Zin, "Egg hatching incubator using conveyor rotation system", *Procedia Manufact.*, **2015**, *2*, 527-531.
7. K. G. Mansaray and O. Yansaneh, "Fabrication and performance evaluation of a solar-powered chicken egg incubator", *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, **2015**, *5*, 31-36.
8. H. Alam and S. Ramakrishna, "A review on the enhancement of figure of merit from bulk to nano-thermoelectric materials", *Nano Energy*, **2013**, *2*, 190-212.
9. A. J. Minnich, M. S. Dresselhaus, Z. F. Ren and G. Chen, "Bulk nanostructured thermoelectric materials: Current research and future prospects", *Energy Environ. Sci.*, **2009**, *2*, 466-479.
10. X. Zhang and L.-D. Zhao, "Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity", *J. Materiomics*, **2015**, *1*, 92-105.
11. E. Singhadet, T. Suriwong, S. Jiajitsawat and P. Tanarak, "Performance comparison of heating coil and thermoelectric egg incubators", *Burapha Sci. J.*, **2014**, *Special Vol.2014*, 271-276 (in Thai).
12. P. Savatdipap, "Development of a thermoelectric egg incubator," *Master Thesis*, **2003**, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand.
13. A. Sharma, C. R. Chen, V. V. S. Murty and A. Shukla, "Solar cooker with latent heat storage systems: A review", *Renew. Sust. Energy Rev.*, **2009**, *13*, 1599-1605.
14. S. M. Hasnain, "Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: Heat storage materials and techniques", *Energy Convers. Manage.*, **1998**, *39*, 1127-1138.
15. Y. Tian and C. Y. Zhao, "A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications", *Appl. Energy*, **2013**, *104*, 538-553.
16. A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", *Renew. Sust. Energy Rev.*, **2009**, *13*, 318-345.

ผลสำเร็จของโครงการ

ภาคผนวก ง ตัวชี้วัดเพื่อการประเมินผลสำเร็จของโครงการวิจัย

ประเภท	ประเภทของผลงาน	ที่กำหนด	บรรลุ
การตีพิมพ์	1. ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติที่มีค่า Impact Factor	0 เรื่อง	1 เรื่อง
	2. ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ (ไม่มีค่า Impact Factor)	1 เรื่อง	0 เรื่อง
	3. ตีพิมพ์ในวารสารระดับประเทศ	0 เรื่อง	0 เรื่อง
	4. นำเสนอในการประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ ที่มีการตีพิมพ์บน Proceedings	0 เรื่อง	0 เรื่อง
	5. นำเสนอในการประชุมวิชาการในระดับชาติ ที่มีการตีพิมพ์บน Proceedings	0 เรื่อง	1 เรื่อง
	6. บทความวิชาการ ตำรา หนังสือที่มีการรับรองคุณภาพ	0 เรื่อง	0 เรื่อง
การใช้ประโยชน์	7. ถ่ายทอดผลงาน / เทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมายและได้รับการรับรองการใช้ประโยชน์จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง	0 ฉบับ	0 ฉบับ
	8. ได้สิ่งประดิษฐ์ อุปกรณ์ เครื่องมือ หรืออื่นๆ เช่น ฐานข้อมูล Software ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์หรือนำไปใช้เชิงพาณิชย์และได้รับการรับรองการใช้ประโยชน์จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง	0 ฉบับ	0 ฉบับ
การจดทะเบียน	9. สิทธิบัตร	0 ผลงาน	0 ผลงาน
ทรัพย์สินทางปัญญา	10. อนุสิทธิบัตร	0 ผลงาน	0 ผลงาน