บทที่ 3
การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดกำลังไฟฟ้า 100 W โดยอาศัยกระบวนการทำงานย้อนกลับของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (TEC) เพื่อผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 100 ^{o}C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะกับการใช้เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์มาใช้เป็นเซลล์ความร้อน เป็นงานวิจัยต่อเนื่องในโครงการ "ศึกษาวิเคราะห์ศักยภาพทางเทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนเหลือทิ้ง" [4] เพื่อขยายกำลังผลิตไฟฟ้าจากเดิม 50 W เป็น 100 W เพิ่มประสิทธิภาพการกำลังผลิตด้วยการเพิ่มผลต่างอุณหภูมิของเซลล์ความร้อนให้มากขึ้น ลดจำนวนเซลล์ความร้อนให้น้อยลงอันเป็นผลในเรื่องของต้นทุนที่ถูกลง รวมถึงการออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดน้ำร้อนระบบปิดที่จะใช้ทดสอบ โดยในงานวิจัยมีขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ ดังนี้

ก. การออกแบบโครงสร้างของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน
ข. การออกแบบและสร้างแผงเซลล์ความร้อน
ค. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน
ง. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น
จ. การออกแบบและสร้างระบบกำเนิดความร้อนสำหรับการทดสอบ
ฉ. การประกอบและติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อน

3.1 การออกแบบโครงสร้างของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [4] พบว่าสามารถพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนขนาดกำลังไฟฟ้า 50 W ประกอบด้วยโมดูลความร้อน 4 โมดูล แต่ละโมดูลใช้เซลล์ความร้อนดัดแปลง 96 เซลล์ รวมใช้เซลล์ความร้อนทั้งสิ้น 384 เซลล์ โครงสร้างของโมดูลผลิตไฟฟ้าออกแบบเพื่อใช้ไอน้ำเป็นแหล่งความร้อนและระบายความร้อนด้วยพัดลม ใช้พื้นที่การติดตั้ง 3 x 2 = 6 ตารางเมตร ผลการพัฒนาระบบพบว่าต้องภารพื้นที่มาก ใช้ปริมาณความร้อนสูงในการผลิตไอน้ำที่มีแรงดันค่อนข้างสูงและมีประสิทธิภาพการระบายความร้อนต่ำ จึงได้นำปัญหาที่เป็นอุปสรรคดังกล่าวมาวิเคราะห์และพัฒนาโครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนแบบใหม่

3.1.1 โครงสร้างของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อน

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นและการทดลองในข้อ 4.1 เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อน ทำให้สามารถกำหนดโครงสร้างของระบบในประเด็นต่อไปนี้

- การลดการใช้ปริมาณความร้อนในระบบผลิตความร้อน โดยปรับเปลี่ยนมาใช้น้ำร้อนไหลเวียนในระบบปิดเป็นแหล่งความร้อน แทนการใช้ไอน้ำ
- การระบายความร้อนปรับเปลี่ยนมาใช้น้ำระบายความร้อนแทนพัดลม ทำให้มีประสิทธิภาพในการสร้างผลต่างอุณหภูมิสูงกว่า
- การผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนที่ให้ประสิทธิภาพในสูงกว่า ทำให้สามารถลดจำนวนเซลล์ความร้อนลง มีผลให้ใช้พื้นที่โมดูลเซลล์ความร้อนลดลง

ข้อมูลข้างต้นสามารถออกแบบโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 100 W ได้ดังแผนภาพของระบบในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยระบบหลัก 5 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่

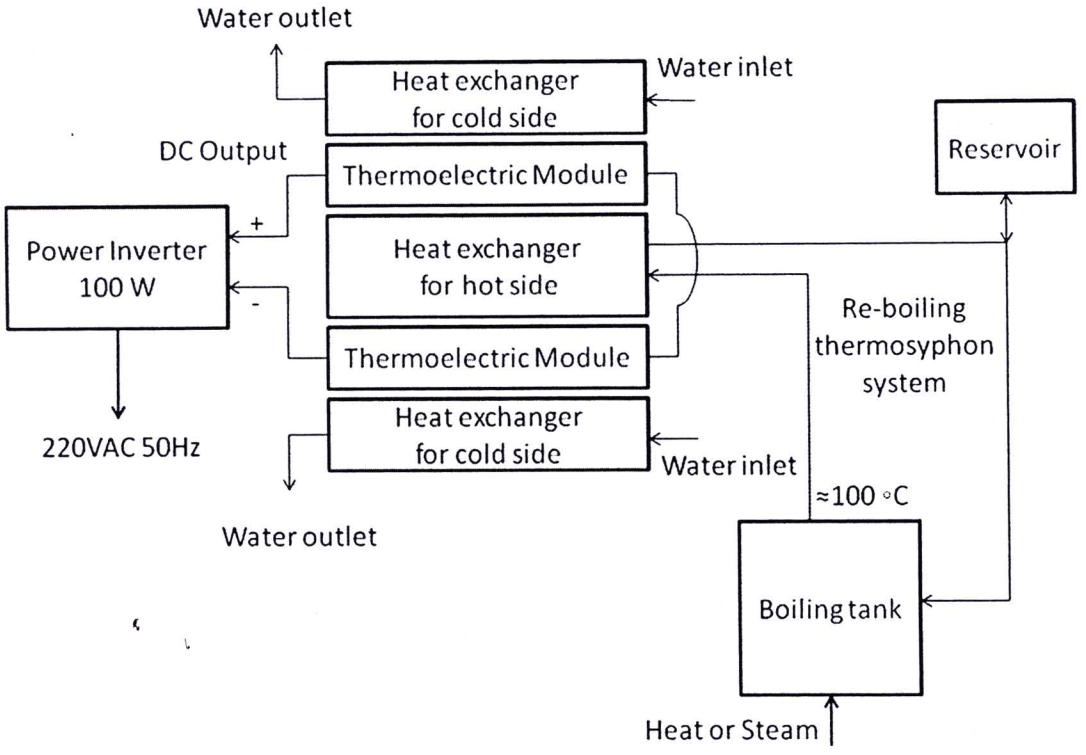
1) โมดูลผลิตไฟฟ้าจากความร้อน (Thermoelectric Module) ประกอบด้วย ชุดแผงเซลล์ความร้อน (Thermoelectric cell) จำนวน 192 เซลล์ ขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 100 W

2) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน (Heat exchanger for hot side) ประกอบด้วย โมดูลถ่ายเทความร้อนจากระบบน้ำร้อนหมุนเวียนให้แก่ชุดแผงเซลล์ความความร้อน

3) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น (Heat exchanger for cold side) ประกอบด้วย โมดูลถ่ายเทความร้อนจากชุดแผงเซลล์ความร้อน 2 ชุด เพื่อการระบายความร้อนจากผนังด้านเย็นด้วยน้ำในระบบเปิด

4) ระบบผลิตน้ำร้อนไหลเวียนตามธรรมชาติ (Re-boiling thermosyphon system) ระบบปิดประกอบด้วย ถังต้มน้ำ ท่อไหลเวียนของน้ำร้อนผ่านระบบแลกเปลี่ยนความร้อน และอ่างสำรองน้ำ (Reservoir)

5) ระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Power Inverter) ขนาดกำลังไฟฟ้า 100 W, 220 VAC, 50 Hz



รูปที่ 3.1 แผนภาพโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน

3.1.2 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อน

การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านระบบน้ำไหลเวียน ตามแผนภาพของระบบในรูปที่ 3.1 มีขั้นตอนดังนี้

1) เมื่อถังต้มน้ำร้อน (Boiling tank) ของระบบผลิตน้ำร้อนได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนเหลือทิ้งเกรดต่ำ (Low Grade Waste Heat) จะผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 100 ^{o}C ไหลเวียนด้วยหลักการเทอร์โมไซฟอนกลับเข้าต้มใหม่ อันเนื่องมาจากแรงลอยตัวของน้ำร้อนขาเข้าและแรงโน้มถ่วงของน้ำขาออกเป็นตัวผลักดัน ผ่านระบบแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน น้ำส่วนที่ขยายตัวจะถูกส่งไปที่อ่างสำรองน้ำ

2) ความร้อนจากน้ำร้อนไหลเวียนบริเวณอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีสภาวะกึ่งน้ำกึ่งไอน้ำ ถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองด้านให้กับแผงโมดูลผลิตไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก ความหนาของผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะช่วยสะสมความร้อนและยืดเวลาการลดลงของอุณหภูมิ ทำให้อุณหภูมิผนังด้านร้อนไม่เปลี่ยนแปลงมาก

3) น้ำที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น จะทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากผนังด้านเย็นของโมดูลเซลล์ความร้อน เพื่อรักษาผลต่างของอุณหภูมิ

ระหว่างผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็นของโมดูลผลิตไฟฟ้าให้แตกต่างกันมากที่สุด เมื่อระบบถูกระบายความร้อนจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิจากผนังด้านร้อนภายในเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริกถ่ายเทสู่อุณหภูมิด้านต่ำ

4) ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผนังแผงโมดูลผลิตไฟฟ้า $\Delta T = T_h - T_c$ ทั้ง 2 แผงจะกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงตามการออกแบบที่แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดประมาณ 400 V และกระแสลัดวงจร 1 แอมแปร์ เพื่อผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 100 W

5) ไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงโมดูลผลิตไฟฟ้าจะส่งให้กับระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Power inverter) เพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220V, 50Hz พร้อมที่จะจ่ายไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน

3.2 การออกแบบและสร้างแผงเซลล์ความร้อน

ในงานวิจัยนี้ต้องการกำลังการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ความร้อนดัดแปลงจากเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ (Thermoelectric cooler) เบอร์ TEC 1-12710 ให้ได้ขนาดกำลังไฟฟ้า 100 W ผลศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการระบายความร้อนด้วยน้ำสูงกว่าการระบายด้วยอากาศมากและช่วยให้ชุดเซลล์ความร้อนผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นมากกว่าประมาณ 4 เท่า ดังนั้นจึงต้องทดสอบข้อมูลเฉพาะทางเทคนิค (Specification) ของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์ที่ความแตกต่างอุณหภูมิในสภาพการระบายความร้อนด้วยน้ำ

3.2.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของเซลล์เทอร์โมอิเล็กทริก

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์รุ่น TEC1-12710 ผลิตไฟฟ้าเมื่อระบายความร้อนด้วยน้ำในข้อ 4.1 พบว่าอุณหภูมิที่ผนังด้านร้อนของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (T_h) ที่ประมาณ 96 ^{o}C (369.2 K) และอุณหภูมิผนังด้านเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (T_c) ที่ประมาณ 30 ^{o}C (313.2 K) เป็นการระบายความร้อนที่อุณหภูมิอยู่ในสภาวะแวดล้อม เกิดผลต่างอุณหภูมิประมาณ 66 ^{o}C เป็นช่วงอุณหภูมิที่นำมาใช้ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้ผลิตไฟฟ้าได้ขนาดกำลังไฟฟ้า 100 W

จากการศึกษาข้อมูลเฉพาะทางเทคนิค (Specification) ของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอร์เรเตอร์ พบว่า [11] ข้อมูลหลักที่จำเป็นในการออกแบบชุดเซลล์ความร้อนมี 5 ชนิด ได้แก่

R_C = ความต้านทานภายในของเซลล์ (Internal resistance) (Ω)

ΔT = ความแตกต่างอุณหภูมิของเซลล์ (Temperature difference) (^{o}C)

V = แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage) (V)

I_{sc} = กระแสลัดวงจร (Short circuit current) (A)

α = สัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (Seebeck coefficient) (V/K)

σ = ความนำความร้อนของเซลล์ (Thermal conductance) (W/K)

ข้อมูลเหล่านี้ใช้สำหรับการคำนวณหาจำนวนเซลล์ความร้อนที่จะใช้ในการผลิตไฟฟ้าให้ได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อจ่ายแก่โหลดตามกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ

ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิค (Specification) ของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์รุ่น TEC1-12710 สำหรับการผลิตไฟฟ้าที่ความแตกต่างอุณหภูมิผนังเซลล์ด้านร้อนและด้านเย็นประมาณ 66 ^{o}C แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่3.1 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์รุ่น TEC1-12710 สำหรับการผลิตไฟฟ้าที่ ΔT = 66 ^{o}C

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงวงจรเปิด (V)	2.6
กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)	1.36
ความต้านทานภายใน (Ω)	2
สัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (V/K)	0.039
ความต้านทานความร้อน (K/W)	1.48
ความนำความร้อน (W/K)	0.67568

3.2.2 การหาจำนวนเซลล์ความร้อนในการกำเนิดไฟฟ้า

จากข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคสามารถประเมินอุณหภูมิของน้ำร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนให้ผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเกิดการกระจายความร้อนไปทั่วผนังเซลล์ความร้อน โดยผนังด้านร้อน (T_h) มีอุณหภูมิในภาวะสมดุลย์ความร้อนประมาณ 96 ^{o}C หรือประมาณ 369.2 K ส่วนผนังด้านเย็น (T_c) ต้องการระบายความร้อนให้ลดอุณหภูมิลงใกล้อุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 30 ^{o}C หรือประมาณ 313.2 K ซึ่งคิดเป็นความแตกต่างอุณหภูมิ 369.2 - 303.2 = 66 K

สามารถหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยได้จากสมการที่ 2.14

$$T_{avg} = \frac{(T_h + T_c)}{2}$$

$$= \frac{(369.2 + 313.2)}{2}$$

$$= 341.2 \text{ K}$$

จากสมการที่ 2.10 สามารถหากำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์ความร้อนดัดแปลง 1 เซลล์ ขณะผลต่างอุณหภูมิที่ 66 K ได้จาก

$$P_{\max} = \frac{(S_M \times \Delta T)^2}{4 \times R_M}$$

$$= \frac{(0.039 \times 66)^2}{4 \times 2}$$

$$= 0.82 \text{ W}$$

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องการกำลังผลิตไฟฟ้าที่ 100 W ดังนั้นจำนวนเซลล์ความร้อนที่ต้องนำมาใช้ในการประกอบเป็นโมดูลเซลล์ความร้อน จะสามารถคำนวณได้จาก

$$N_T = \frac{P_0}{P_{\max}}$$

$$= \frac{100}{0.82}$$

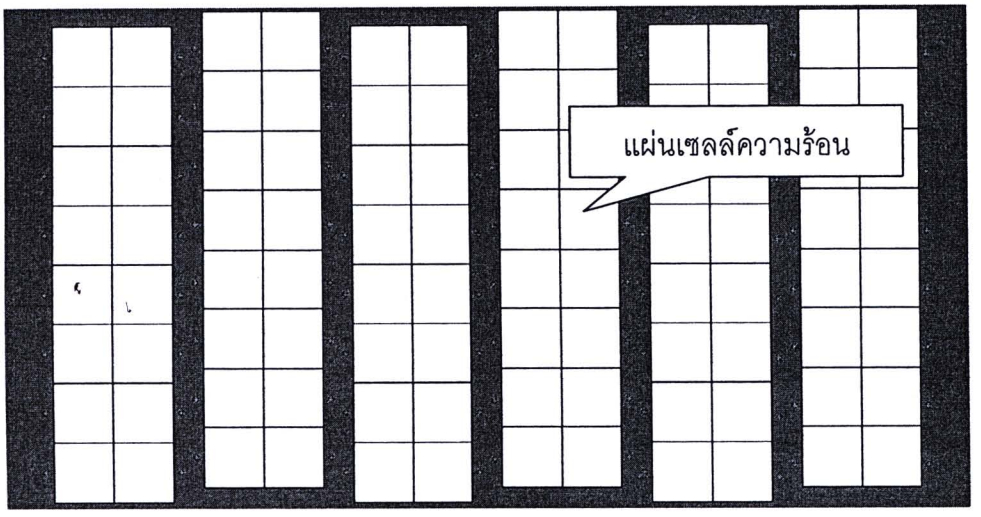
$$= 121.95 \text{ ประมาณ } 122 \text{ เซลล์}$$

ในทางปฏิบัติจะเผื่อจำนวนเซลล์ความร้อนมากกว่าที่คำนวณไว้ เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าของเซลล์ความร้อนแต่ละเซลล์ซึ่งขณะใช้งานจริงจะมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าต่างกัน เนื่องจากการติดตั้งเซลล์ความร้อนบนแผงหลายเซลล์ต่อร่วมกันบนพื้นที่กว้าง ไม่อาจทำให้เซลล์ความร้อนได้รับการถ่ายเทความร้อนที่ผลต่างอุณหภูมิเท่ากัน จึงทำให้ประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์ความร้อนต่อเซลล์ไม่เท่ากันหรือต่ำกว่าที่คำนวณได้ ฉะนั้นจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนเซลล์ความร้อนมากขึ้นเพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เต็มกำลังและในการประเมินจำนวนเซลล์ความร้อน ที่เพิ่มขึ้นยังจำเป็นต้องคำนึงถึงการจัดแบ่งและจัดเรียงให้เซลล์ความร้อนติดตั้งได้ลงตัวเหมาะสมกับพื้นที่ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

จากประเมินการจัดเรียงเซลล์ความร้อนบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนพบว่าจะต้องใช้เซลล์ความร้อนทั้งหมดจำนวน 192 เซลล์ แบ่งเป็น 2 ชุด แต่ละชุดนำเซลล์ความร้อนต่ออนุกรมกันบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้านละ 96 เซลล์ แบ่งเป็นคอลัมน์ได้ด้านละ 6 คอลัมน์ ในแต่ละคอลัมน์ จะมีแผ่นอลูมิเนียมขนาด 10 x 8 และ 9 x 8 ตารางเซนติเมตร เป็นอุปกรณ์ในการยึดประกบเซลล์ความร้อนชุดละ 4 ตัว จำนวน 4 ชุด ไว้ให้แนบชิดพื้นผิวผนังถ่ายเทความร้อน โดยใช้ซิลิโคนถ่ายเทความร้อน (Heat sink compound) ประสานกับผนังถ่ายเทความร้อนเพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนดียิ่งขึ้น ดังในแผนภาพรูปที่ 3. 2 ผลการประเมินโมดูลผลิตไฟฟ้าจากความร้อน (Thermoelectric Module) สามารถสรุปชิ้นส่วนที่ใช้ได้ดังนี้

ชิ้นส่วนที่ใช้	ชุดแผงเซลล์ความร้อนขนาด 96 เซลล์	2	แผง
	เซลล์ความร้อนทั้งหมด	192	เซลล์

แผ่นอลูมิเนียมขนาด 0.4 x 10 x 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร	36	แผ่น
แผ่นอลูมิเนียมขนาด 0.4 x 10 x 9 ลูกบาศก์เซนติเมตร	12	แผ่น
สกรูสเตนเลสขนาด M3 ยาว 0.8 เซนติเมตร	192	ตัว
แผ่นอลูมิเนียมสำหรับติดตั้งเซลล์ความร้อนอาศัย	1	ชุด
ผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้านเย็น		
ท่อน้ำทนความร้อน	4	เมตร



รูปที่ 3.2 ลักษณะการจัดเรียงของเซลล์ความร้อน

3.2.3 การประเมินกำลังไฟฟ้าของโมดูลผลิตไฟฟ้า

จากเงื่อนไขการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer) ความต้านทานภายในเซลล์ความร้อนและความต้านทานโหลดจะต้องมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกัน ซึ่งแรงดันไฟฟ้าจะลดลงครึ่งหนึ่ง คือ $R_{TEC} = R_L$ และ $V_O = V_0/2$ ดังนั้นจะต้องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรอย่างน้อยประมาณ 400 VDC และกระแสลัดวงจร 1 A เพื่อนำมาแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 VAC, 50 Hz, 100 W

เมื่อนำเซลล์ความร้อนต่ออันดับกันทั้งหมด 192 เซลล์ จะได้ความต้านทานภายใน R_{TEC} = (192 x 2) = 384 Ω และที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าความต้านทานโหลดจะมีค่าดังนี้

$$\text{ค่าความต้านทานโหลด } R_L = \frac{V_0^2}{P_0}$$

$$= \frac{200^2}{100}$$

$$= 400\ \Omega$$

R_{TEC} = 384 Ω ใกล้เคียงกับ R_L = 400 Ω เป็นไปตามเงื่อนไขของการจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ส่วนกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะมีการต่อภาระทางไฟฟ้าหรือโหลดที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดประเมินได้จาก

$$I = \frac{S \times \Delta T}{R_C + R_L}$$
$$= \frac{0.039 \times 66}{384 + 400}$$
$$= 0.328 \text{ A}$$

แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะมีการต่อโหลดทางไฟฟ้า

$$V_O = I \times (R_M + R_L)$$
$$= 0.328 \times (384 + 400)$$
$$= 257.15 \text{ Vdc}$$

จากผลการคำนวณข้างต้นนำมาประเมินค่ากำลังไฟฟ้า

$$P_o = \frac{V_0^{\,2}}{R_L}$$
$$= \frac{257.15^2}{400}$$
$$= 165.31 \ W_e$$

ความต้องการปริมาณความร้อนที่ต้องจ่ายให้กับชุดเซลล์ความร้อน

$$Q_h = N_T[(S \times T_h \times I) - (0.5 \times I^2 \times R_C) + (K_C \times \Delta T)]$$
$$= 192 \ [(0.039 \times 369.2 \times 0.328) - (0.5 \times 0.328^2 \times 384) + (0.6758 \times 66)]$$
$$= 5{,}504.53 \ W_{th}$$

ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของชุดเซลล์ความร้อน

$$E_g = \frac{V \times I}{Q_h} \times 100\%$$
$$= \frac{257.15 \times 0.328}{5{,}504.53} \times 100$$
$$= 1.53 \ \%$$

3.3 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน จะทำหน้าที่เป็นหน่วยรับความร้อนจากน้ำไหลเวียนของหม้อต้มน้ำร้อนด้วยการพาความร้อนผ่านผนังถ่ายเทความร้อน จากนั้นนำความร้อนที่ได้ถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนผ่านผนังโมดูลไปสู่ผนังด้านร้อนของโมดูลเซลล์ความร้อน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะต้องเก็บรักษาความร้อนที่ได้มาให้มีอุณหภูมิคงที่มากที่สุดและในขณะเดียวกันก็ต้องถ่ายเทความร้อนให้รวดเร็วเพียงพอต่อความต้องการในการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์ความร้อน

3.3.1 การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

สิ่งที่นำมาพิจารณาในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับถ่ายเทความร้อนได้แก่ พื้นที่ถ่ายเทความร้อนให้เซลล์ความร้อน ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุ รูปร่างและขนาดของโมดูล ความแข็งแรง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) วัสดุที่ใช้สร้างโมดูล ต้องเป็นวัสดุที่ถ่ายเทความร้อนได้ดี มีค่าสภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity; K) สูง และทนต่อการกัดกร่อนเมื่อผิวสัมผัสน้ำร้อน

2) พื้นผิวผนังหน้าสัมผัสระหว่างโมดูลกับเซลล์ความร้อนต้องแนบสนิทเพื่อให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูง

3) พื้นผิวผนังของโมดูลต้องมีพื้นที่เพียงพอต่อการวางจำนวนเซลล์ความร้อน 96 เซลล์สองด้าน เพื่อให้จ่ายกำลังไฟฟ้าได้ 100 วัตต์

4) ขนาดของโมดูลที่ออกแบบไม่ใหญ่เทอะทะและมีน้ำหนักไม่มากเกินไป อันเป็นผลทำให้การติดตั้งและเคลื่อนย้ายลำบาก

5) สามารถทนการอัดแรงดันที่เกิดจากระบบไหลเวียนของน้ำร้อนกึ่งไอน้ำตามธรรมชาติในลูปปิดแบบเทอร์โมไซฟอนได้

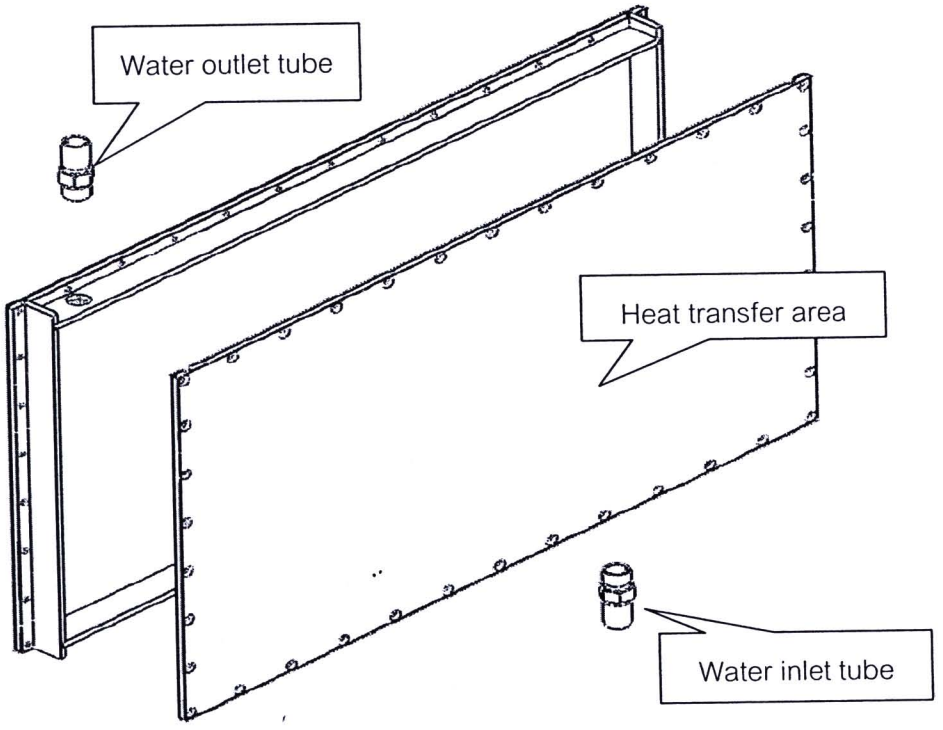
จากข้อพิจารณาดังกล่าวจะเลือกใช้อลูมิเนียมแมกนีเซียมอัลลอยด์ เบอร์ AA5083 ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม 0.6 เซนติเมตร โครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนที่ออกแบบไว้แสดงในรูปที่ 1 ของภาคผนวก ก มีลักษณะดังนี้

มีขนาดปริมาตรทั้งหมด	3.6 x 37.5 x 65	ลูกบาศก์เซนติเมตร
พื้นที่กักน้ำในโมดูลถ่ายเทความร้อน	3 x 34 x 60	ลูกบาศก์เซนติเมตร
ปริมาตรกักน้ำได้ประมาณ	6	ลิตร
ท่อน้ำร้อนขาเข้า เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3/4 นิ้ว	1	ท่อ
ท่อน้ำร้อนขาออก เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3/4 นิ้ว	1	ท่อ

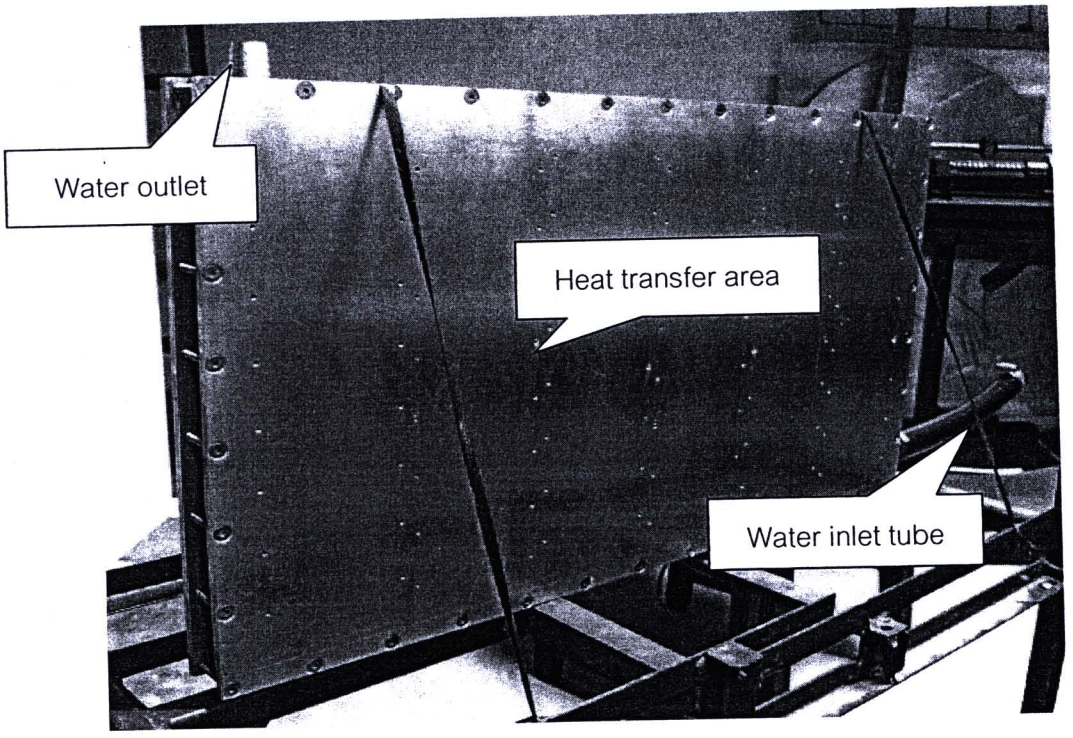
ชิ้นส่วนที่ใช้	แผ่นอลูมิเนียมผนังอุปกรณ์ขนาด	2	แผ่น
	แผ่นอลูมิเนียมกรอบแนวตั้งขนาด	2	แผ่น
	แผ่นอลูมิเนียมกรอบแนวนอนขนาด	2	แผ่น
	สกรูสเตนเลสขนาด M5 ยาว 5 เซนติเมตร	38	ตัว

3.3.2 การประกอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

ชิ้นส่วนอุปกรณ์ตามแบบที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคการเซาะร่องได้นำมาประกอบโดยใช้กาวซิลิโคนปะเก็นทนความร้อนทารอบร่องที่เซาะทำลิ่มเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำร้อน ก่อนที่จะยึดด้วยสกรูสเตนเลส และทดสอบการทนแรงดันน้ำที่ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แบบประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนและโครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนแสดงในแบบรูปที่ 3.3 และภาพถ่ายรูปที่ 3.4 ตามลำดับ หลังการประกอบจะนำไปทดสอบการตอบสนองต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนและความสม่ำเสมอการกระจายอุณหภูมิที่ผนังถ่ายความร้อนสองด้าน



รูปที่ 3.3 แบบประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน



รูปที่ 3.4 โครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

3.4 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น จะทำหน้าที่ระบายความร้อนด้วยน้ำที่ไหลผ่านโดยการพาความร้อนจากผนังโมดูลซึ่งแลกเปลี่ยนความร้อนจากผนังแผ่นเซลล์ความร้อนด้านเย็นโดยการนำความร้อน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะต้องมีพื้นที่ต่อปริมาตร (Surface to volume ratio) ภายในโมดูลสูง เพื่อประสิทธิภาพการระบายความร้อนและสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผนังด้านร้อนและผนังด้านเย็นของเซลล์ความร้อนให้มาก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็นนี้เป็นส่วนที่ติดตั้งแผงเซลล์ความร้อน 2 ชุดประกบกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

3.4.1 การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น

สิ่งที่นำมาพิจารณาในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับระบายความร้อน ได้แก่ พื้นที่ติดตั้งเซลล์ความร้อน ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุ รูปร่างและขนาดของโมดูล ความแข็งแรง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) วัสดุที่ใช้ต้องมีการถ่ายเทความร้อนได้ดี ทนการกัดกร่อน มีเนื้อแข็งพอที่จะทำเกลียวยึดชุดแผ่นเซลล์ความร้อน

2) วัสดุที่ใช้ต้องมีความแข็งพอที่จะสามารถเซาะทำร่องครีบระบายความร้อนเพื่อเพิ่มพื้นที่ต่อปริมาตร ภายในโมดูลได้

3) พื้นผิวของผนังอุปกรณ์ระบายความร้อนต้องเรียบ เพื่อให้สามารถสัมผัสกับผนังด้านเย็นของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่ติดตั้งได้แนบสนิท เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อน

4) ขนาดของโมดูลระบายความร้อนไม่หนักเกินไปและสามารถจัดวางประกบกับโมดูลเซลล์ความร้อนได้พอดี

จากข้อพิจารณาดังกล่าวจะเลือกใช้อลูมิเนียมแมกนีเซียมอัลลอยด์ เบอร์ AA5083 มาสร้างระบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับวัสดุที่นำมาสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน โดยการออกแบบชิ้นส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนด้านผนังติดตั้งเซลล์ความร้อนจะใช้แผ่นอลูมิเนียมแมกนีเซียมอัลลอยด์เซาะขึ้นรูปทำร่องครีบระบายความร้อน (Ventilating fin) เพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนให้แก่น้ำระบายความร้อน ในชิ้นส่วนฝาครอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะทำจากอลูมิเนียมเบอร์ AA1100 หนา 0.4 เซนติเมตร เนื่องจากไม่ต้องการความแข็งและมีราคาถูกกว่า

โครงสร้างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็นที่ออกแบบไว้ แสดงในรูปที่ 2 ของภาคผนวก ก โดยใน 1 โมดูล มีลักษณะดังนี้

มีขนาดปริมาตรทั้งหมด	2.5 x 65 x 34	ลูกบาศก์เซนติเมตร
จำนวนครีบระบายความร้อน	34	ครีบ
ขนาดความสูงของครีบ	1.5	เซนติเมตร
ความหนาของร่องครีบ	0.3	เซนติเมตร
ระยะห่างของร่องครีบ	0.6	เซนติเมตร

ปริมาตรที่สามารถบรรจุน้ำได้ของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนหาได้จาก

= (กว้างภายในx ยาวภายในxสูงภายใน) - (ปริมาตรของครีบระบายความร้อนทั้งหมด)

= (2x32x63)-34(0.2x57x1.5) = 3,450.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรหรือปริมาตรน้ำ 3.4 ลิตร

อัตราพื้นที่ระบายความร้อนทั้งหมดต่อปริมาตรน้ำ หาได้จากพื้นที่ของครีบระบายความร้อนและพื้นที่สัมผัสน้ำทั้งหมดต่อปริมาตรน้ำระบายความร้อน

= 3,307 ตารางเซนติเมตรต่อ 3,450.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร

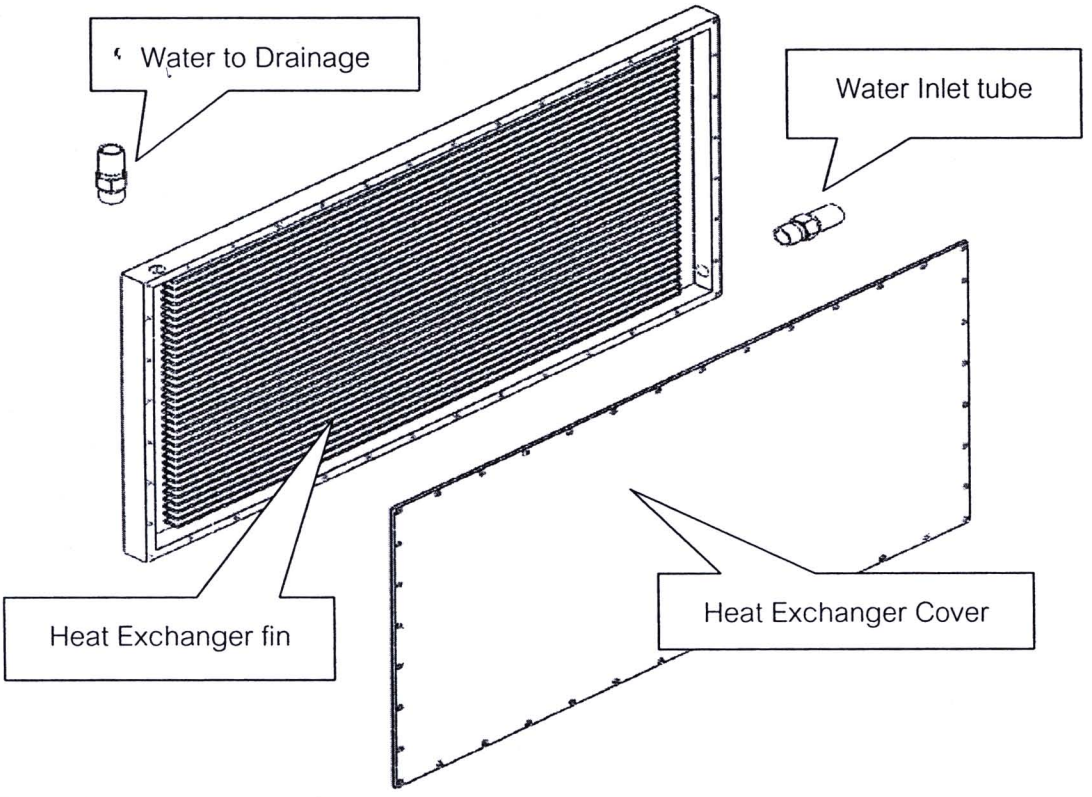
= 958.384 ตารางเซนติเมตรต่อลิตร

ชิ้นส่วนที่ใช้	ฝาครอบโมดูลขนาด	65 x 34	ตารางเซนติเมตร
	ท่อน้ำขาเข้าเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3/4 นิ้ว	2	ท่อ

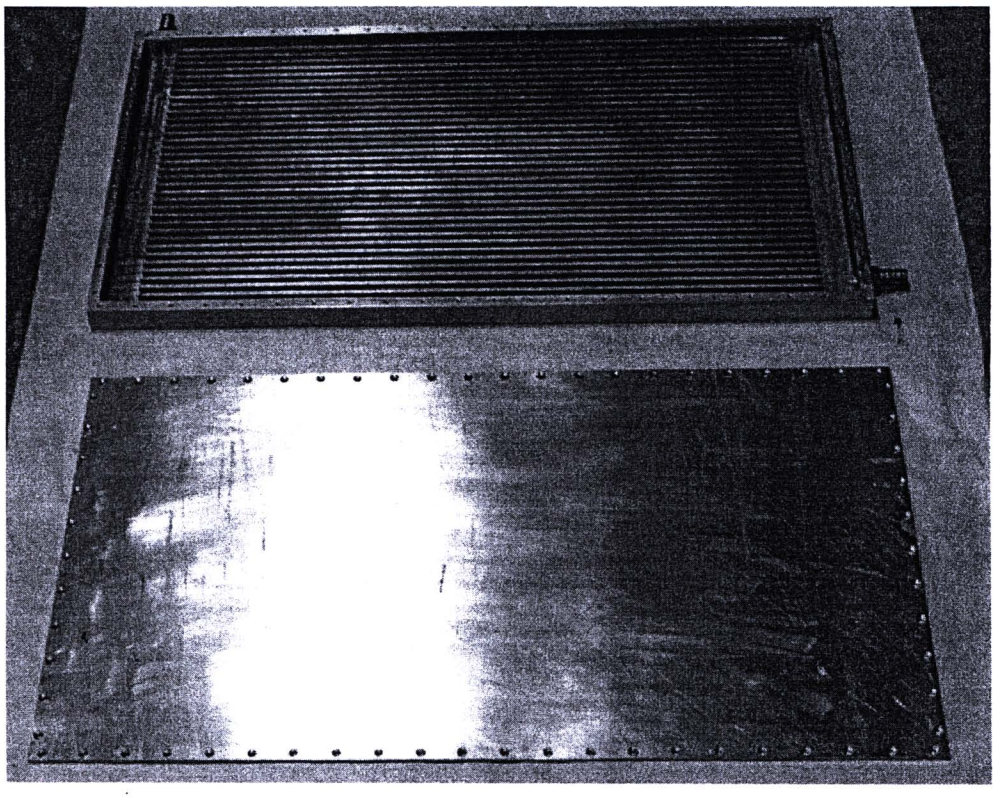
สกรูสเตนเลสขนาด M3 ยาว 0.8 เซนติเมตร 66 ตัว

3.4.2 การประกอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น

ชิ้นส่วนอุปกรณ์ตามแบบที่สร้างขึ้นได้นำจัดทิศทางการไหลของน้ำระบายความร้อนมาก่อนประกอบเข้าด้วยกันโดยใช้วัสดุซิลิโคนปะเก็นทนความร้อนทารอบร่องที่เซาะทำลิ่มเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำร้อน ก่อนที่จะยึดด้วยสกรูสเตนเลส อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็นประกอบขึ้นทั้งหมด 2 โมดูล ใน 1 โมดูลจะสามารถจัดเรียงเซลล์ความร้อนแบบอนุกรมกันได้จำนวน 96 เซลล์ ให้กำลังไฟฟ้าประมาณ 50 W โครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็นแสดงในแบบรูปที่ 3.5 และภาพถ่ายรูปที่ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 แบบประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น



รูปที่ 3.6 โครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น

3.5 การออกแบบและสร้างระบบผลิตความร้อนสำหรับการทดสอบ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้นนี้ ออกแบบให้สามารถใช้กับแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง (Waste Heat) เกรดต่ำที่เกิดจากการระบายความร้อนจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม ความร้อนจากการระบายความร้อนจากสารกัมมันตรังสีความแรงสูง การเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนจากแหล่งพลังงานอื่น เช่น การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง-ชีวมวลและพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น โดยความร้อนเหลือทิ้งดังกล่าวจะนำสู่ระบบโดยผ่านระบบแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อต้มน้ำดังแสดงในภาคผนวก จ. หรือหากเป็นน้ำร้อนสามารถป้อนไหลผ่านระบบได้โดยตรง แต่การทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบในงานวิจัยเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำ จำเป็นต้องผลิตความร้อนจากแหล่งกำเนิดที่ควบคุมและวัดการใช้พลังงานได้ง่ายด้วยการต้มน้ำด้วยฮีทเตอร์ไฟฟ้า (Heater) จัดระบบน้ำร้อนไหลเวียนแบบปิดด้วยกระบวนการเทอร์โมไซฟอน

3.5.1 การออกแบบอุปกรณ์ผลิตความร้อนสำหรับการทดสอบ

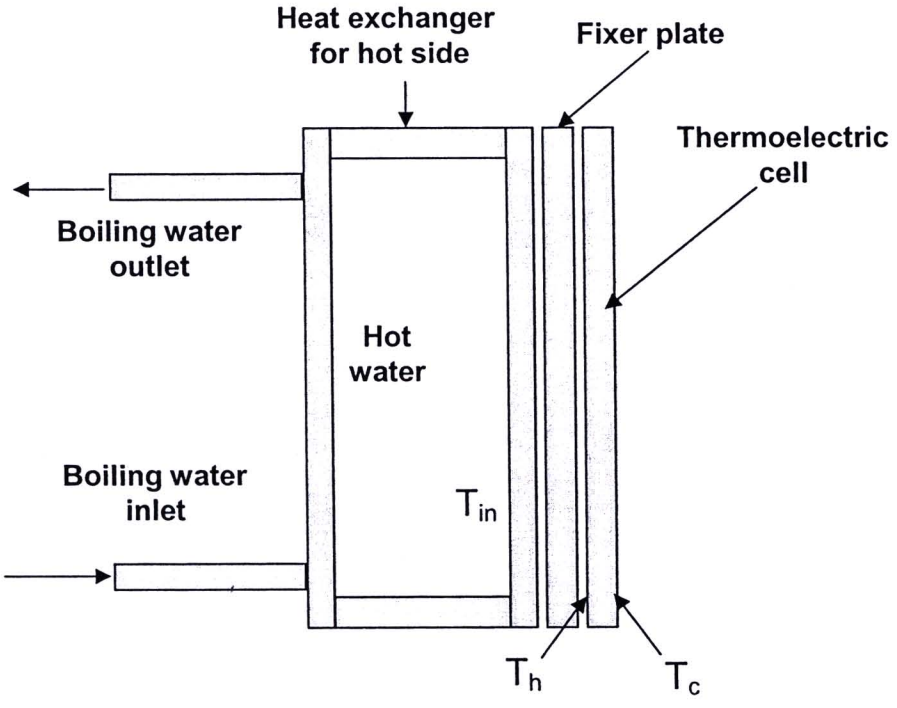
สิ่งที่นำมาพิจารณาในการเลือกอุปกรณ์ประกอบเพื่อการออกแบบระบบผลิตน้ำร้อน ได้แก่ ปริมาณน้ำไหลเวียน กำลังผลิตความร้อน คุณสมบัติของวัสดุและความปลอดภัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ระบบต้องทนต่อสภาพแรงอัดของน้ำร้อนในลูปปิด ในกรณีที่ต้องการน้ำเดือดอุณหภูมิสูงกว่า 100 ^{o}C เล็กน้อย และต้องมีมาตรวัดความดันและวาล์วปล่อยแรงดันเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน โดยแรงดันที่ประมาณการณ์ในการสร้างระบบไม่เกิน 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

2) หม้อต้มน้ำต้องทำด้วยวัสดุทนต่อสภาพการกัดกร่อนของน้ำร้อน เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม และมีความแข็งแรงที่จะทนแรงดันตามต้องการ

3) กำลังไฟฟ้าของฮีทเตอร์ไฟฟ้าประเมินจากความต้องการปริมาณความร้อนในหัวข้อ 3.2.3 ปริมาณความร้อนที่ต้องการประมาณ 5,504.53 W_{th} เผื่อกำลังไฟฟ้าของฮีทเตอร์ไว้ 10% จึงเลือกกำลังไฟฟ้าที่ 6,000 W

4) ระบบต้องผลิตน้ำร้อนที่ป้อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังด้านร้อน ซึ่งมีความจุของน้ำได้ 6 ลิตร ที่อุณหภูมิ T_{in} ตามแผนภาพในรูปที่ 3.7 อย่างน้อย 102.78 °C โดยคำนวณจากสมการที่ 2.18



รูปที่ 3.7 โครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนเป็นการนำความร้อนดังนั้น การหาความนำความร้อนผ่านวัสดุตามกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ ได้จากสมการที่ 2.18

$$Q_{conduction} = -kA\frac{(T_h - T_{in})}{\Delta x}$$

โดยที่ $Q_{conduction}$ คือ ค่าการนำความร้อนผ่านวัสดุ (W)

k คือ thermal conductivity ของวัสดุ (W/m·K)

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (m^2)

$T_h - T_{in}$ คือ ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างพื้นที่ที่ความร้อนเคลื่อนผ่าน (K)

Δx คือ ระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ (m)

เมื่อ ความนำความร้อนของอลูมิเนียม (K) เบอร์ AA5083 มีค่า 120 W/m-K

พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (37.5 cm x 65 cm) x 2 0.4875 m^2

ระยะทางความร้อนเคลื่อนที่ได้จากความหนาของแผ่นอลูมิเนียม 6 mm + 5mm

ความร้อนที่ถ่ายเทจากไอน้ำไปยังแผ่นอลูมิเนียม 33.867 kW

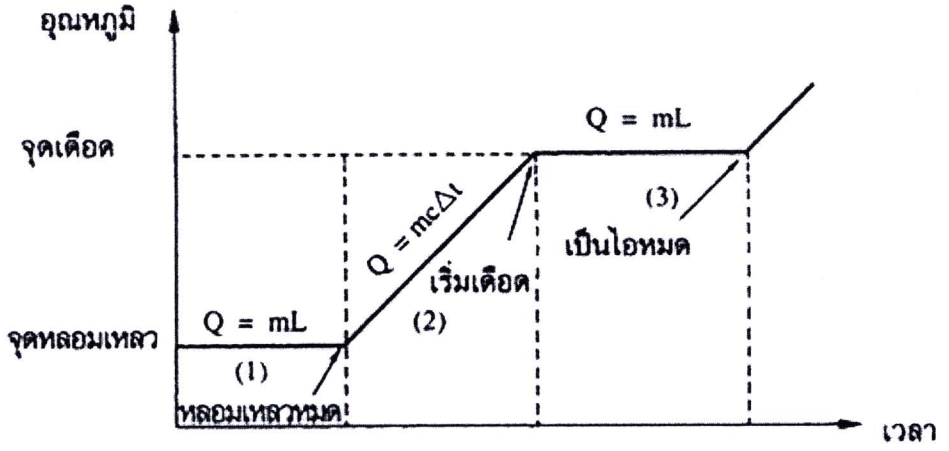
ถ้าต้องการ T_h ที่ 96 °C หรือ 369.15 K

จะได้

$$33.867 \times 10^3 = -120 \times 0.4875 \times \frac{(369.15 - T_{in})}{0.011}$$

T_{in} = 375.935 K = 102.78 °C

5) ระบบผลิตความร้อนต้องสามารถผลิตความร้อนได้ต่อเนื่องและควบคุมอุณหภูมิได้ มีปริมาตรน้ำที่เพียงพอในระบบไหลเวียน การคำนวณหาปริมาตรน้ำปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำร้อนเปลี่ยนสถานะในช่วงไม่เกินบริเวณเริ่มน้ำเดือดและมีบางส่วนกลายเป็นไอ โดยพิจารณาจากสมการในช่วงที่ 2 ของกราฟในรูปที่ 3.8 ผลการคำนวณได้ปริมาตรน้ำที่ใช้ 32.56 ลิตร การคำนวณแสดงได้ต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ได้รับความร้อนกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของน้ำ

ปริมาณความร้อน (Q) ที่ทำให้จากอุณหภูมิห้องเป็นน้ำร้อนคำนวณได้จากสมการ

$$Q = mc\Delta T \quad \text{..... 3.1}$$

หรือ $$m = Q/ c\Delta T \quad \text{..... 3.2}$$

โดยที่ m คือ มวลของน้ำร้อนทั้งระบบ

c คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ 1 cal/g ^{o}C

ΔT คือ ความแตกต่างอุณภูมิน้ำจากอุณหภูมิห้องไปเป็นอุณหภูมิ T_{in}

ปริมาณความร้อน 5,504.53 W_{th} ที่ต้มน้ำจากอุณหภูมิห้องไปเป็นอุณหภูมิ T_{in} ในเวลา 30 นาที (30 x 60 = 1,800 วินาที คิดเป็นพลังงาน 5,504.53 x 1,800 = 9.91 MJ และแปลงเป็นหน่วยความร้อนได้เท่ากับ 9.91 / 4.186 = 2.37 Mcal (1 cal (Calories) = 4.186 J)

ดังนั้นจากสมการที่ 3.2 $m = (2.37 \times 10^{6}) / (1) \times (102.78 - 30)$

$= 32.56$ kg

6) จากการคำนวณข้างต้นสามารถประเมินความจุน้ำของหม้อต้มได้โดยหักความจุน้ำในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนออกจากความจุของน้ำที่ต้องการจากการคำนวณจากสมการที่ 3.2 จะได้ความจุน้ำหม้อต้มเท่ากับ 32.56 – 6 = 26.56 ลิตร หรือเผื่อความจุให้มากขึ้นเป็น 30 ลิตร

7) น้ำในหม้อต้มน้ำรวมกับน้ำในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนรวมกันมีปริมาตร 36 ลิตร เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะขยายตัวและเกิดแรงดันในระบบปิด เพื่อไม่เกิดแรงดันสูงมากจะออกแบบระบบอ่างสำรองน้ำรองรับการขยายตัวของน้ำ โดยจากการคำนวณตามสมการที่ 3.3 พบว่าน้ำ

ปริมาตร 36 ลิตร ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 28 °C เมื่อต้มเป็นน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ความดันบรรยากาศ จะมีปริมาตรขยายตัวเพิ่มขึ้น 8 ลิตร ดังนี้

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2} \qquad \text{..... 3.3}$$

เมื่อ P1=P2 คือ ความดันบรรยากาศปกติ

V1 คือ ปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิเริ่มต้น T1

V2 คือ ปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิ T2

T1 คือ อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น (K)

T2 คือ อุณหภูมิของน้ำที่ขยายตัว (K)

$$\frac{3.6\times10^4}{307} = \frac{V_2}{373}$$

$$V_2 = 43{,}739.41 \text{ cm}^3$$

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ขยายตัวจะได้จาก

$$\begin{aligned} V_{net} &= V2 - V1 \\ &= 43{,}739.41 - 36{,}000 \\ &= 7{,}739.41 \text{ cm}^3 \\ &= 7.7 \text{ ลิตร หรือประมาณ } 8 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

จะต้องออกแบบอ่างสำรองน้ำเผื่อ 20% คิดเป็นปริมาตรประมาณ 10 ลิตร

ข้อพิจารณาดังกล่าวจึงเลือกใช้หม้อต้มน้ำร้อนผลิตภัณฑ์ของบริษัท ยูนิตี้ อีควิปเม้นท์ แอนด์เซอร์วิส จำกัด Model : WB - 30 ตัวถังหม้อต้มทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม สามารถปรับอุณหภูมิของน้ำได้ 30-110 °C แต่กำลังไฟฟ้าของฮีทเตอร์มีขนาด 3,000 W จึงต้องเพิ่มฮีทเตอร์ให้มีกำลังรวมเป็น 6,000 W โครงสร้างของระบบผลิตน้ำร้อนที่ออกแบบ มีลักษณะดังนี้

กำลังไฟฟ้า	6,000	วัตต์
ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ	220V / 50Hz	
ช่วงปรับอุณหภูมิการทำงาน	30-110	องศาเซลเซียส
มาตรวัดความดัน	0 – 30	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
มีขนาดความจุ	30	ลิตร

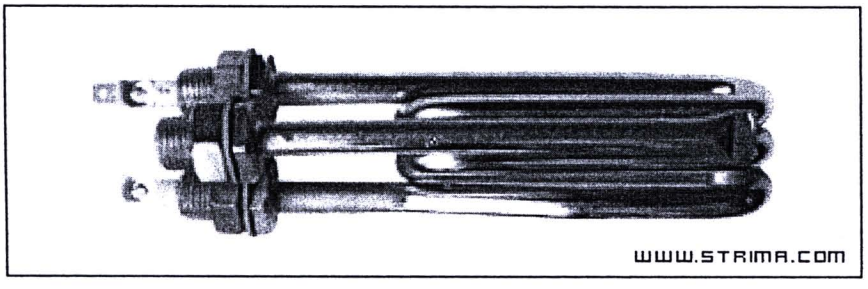
ปริมาตรอ่างสำรองน้ำ	10	ลิตร
ท่อน้ำขาเข้าเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3/4 นิ้ว	2	ท่อ
วาล์วปล่อยแรงดันน้ำและวาล์วเปิดปิดน้ำ	1	ชุด

มีขีดบอกระดับน้ำด้านหน้าและไฟบอกสถานะการทำงาน

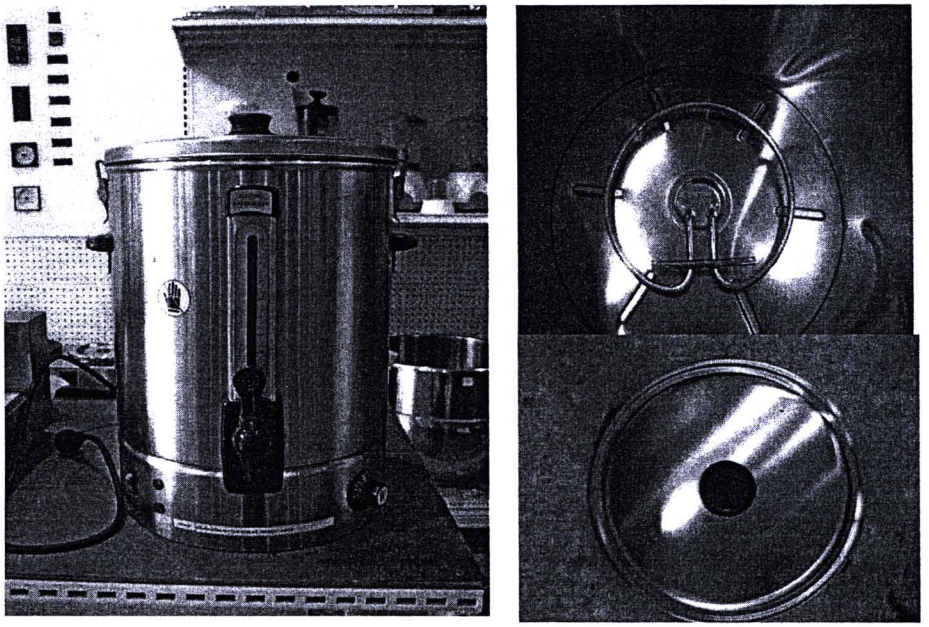
3.5.2 การประกอบอุปกรณ์ผลิตความร้อนสำหรับการทดสอบ

ในการประกอบอุปกรณ์ผลิตความร้อน ได้ปรับสภาพของหม้อต้มน้ำร้อนโดยดัดแปลงถังเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยการเจาะช่องทางน้ำไหลเวียน ติดตั้งท่อน้ำ มาตรวัดความดันและวาล์วปล่อยแรงดัน ที่ด้านฝาครอบ และเจาะติดตั้งท่อน้ำไหลกลับแทนทางเปิดใช้น้ำร้อนเดิม พร้อมทั้งติดตั้งฮีทเตอร์ขนาด 3,000 W ดังในรูปที่ 3.9 เพิ่มภายในหม้อต้มอีก 1 ชุด ทำให้กำลังไฟฟ้ารวมเป็น 6,000 W ซึ่งต้องเพิ่มอัตราทนกระแสของสายไฟฟ้าเป็น 30 A และได้สร้างอุปกรณ์โครงรัดฝาครอบกับตัวถังต้มให้สามารถทนแรงดันเพิ่มเติมด้วย

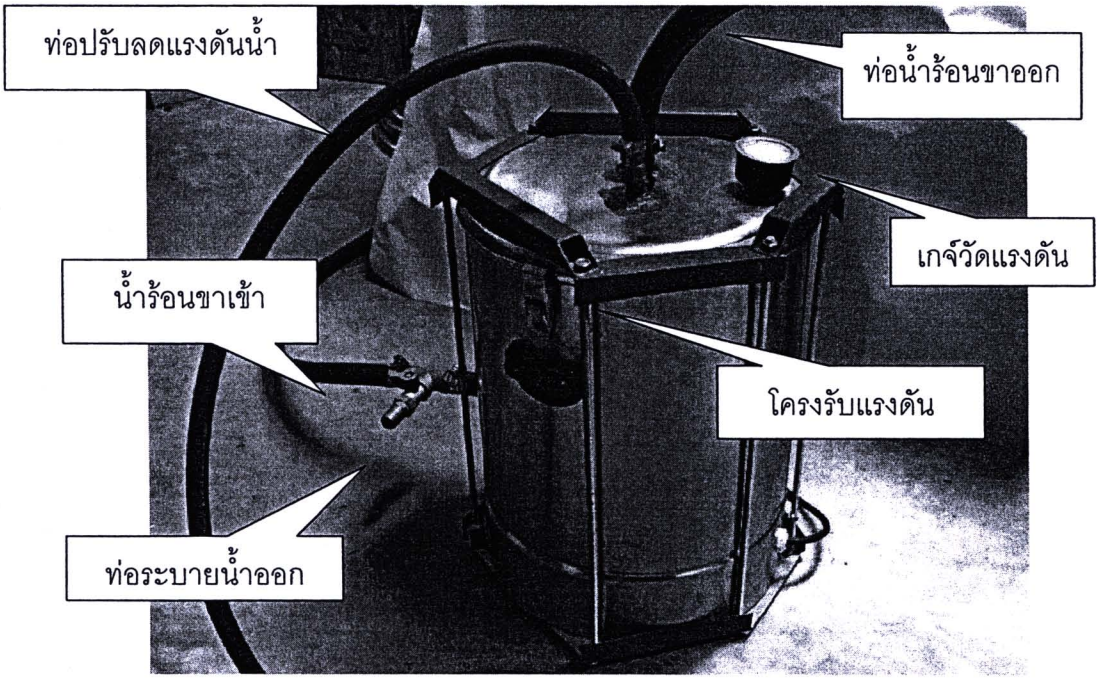
การดัดแปลงส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.10 โดยในการประกอบส่วนฝาครอบและอุปกรณ์เพิ่มเติมจะใช้วัสดุซิลิโคนปะเก็นทนความร้อนทาผนึกปากถังจนสนิทไม่ให้เกิดการรั่วไหลของน้ำ ก่อนยึดโครงรัดฝาครอบ เพื่อให้ทนต่อสภาพการทำงานภายใต้แรงดันน้ำร้อนภายในลูปปิดได้ โครงสร้างของระบบผลิตน้ำร้อนที่สร้างขึ้นแสดงในรูปที่ 3.11 และขณะประกอบใช้งานกับระบบจะใช้ฉนวนกันความร้อนหุ้มท่อน้ำร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนจากระบบ



รูปที่ 3.9 ฮีทเตอร์ขนาด 3,000 W ที่ติดตั้งเพิ่มภายในหม้อต้ม



รูปที่ 3.10 การดัดแปลงหม้อต้มน้ำร้อนที่ใช้ในระบบผลิตน้ำร้อน



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของระบบผลิตน้ำร้อนที่สร้างขึ้น

3.6 การประกอบและติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อน

อุปกรณ์ที่ออกแบบและสร้างในแต่ละส่วน ได้แก่ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็นและระบบผลิตความร้อนสำหรับการทดสอบ ได้นำมาประกอบเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก ขนาดกำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ โดยสิ่งสำคัญในการประกอบและติดตั้งทางเทคนิค ได้แก่

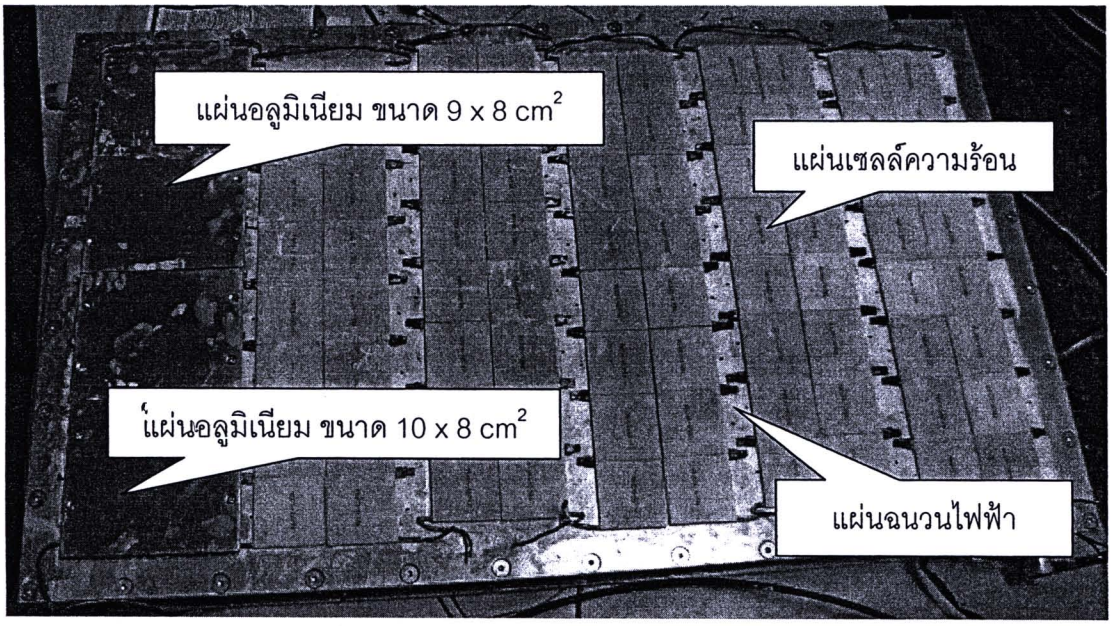
1) น้ำหนักกดบนแผ่นเซลล์ความร้อนที่ติดตั้งและการขยายตัวเมื่อได้รับอุณหภูมิเพื่อป้องกันการแตกร้าวของเซลล์ความร้อน
2) การใช้สารซิลิโคนประสานผิวเซลล์ความร้อนสองด้านกับผนังแผ่นโมดูลแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน
3) ความเรียบระนาบผิวผนังแผ่นโมดูลแลกเปลี่ยนความร้อนและความสม่ำเสมอของแรงกดจะช่วยการกระจายความร้อนทั่วถึง ทำให้เซลล์ความร้อนผลิตไฟฟ้าได้เต็มกำลัง
4) ความยาวของท่อน้ำร้อนไม่ควรจะยาวเกินไป จะเป็นสาเหตุของการสูญเสียความร้อนระหว่างการพาความร้อนไปยังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน
4) การทาปะเก็นซิลิโคนผนึกรอยต่อบริเวณต่างๆ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต้องมีความละเอียด เพื่อป้องกันการรั่วซึม

การประกอบและติดตั้งชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยความร้อนที่พัฒนาขึ้นมีรายละเอียดเป็นส่วนๆ ดังนี้

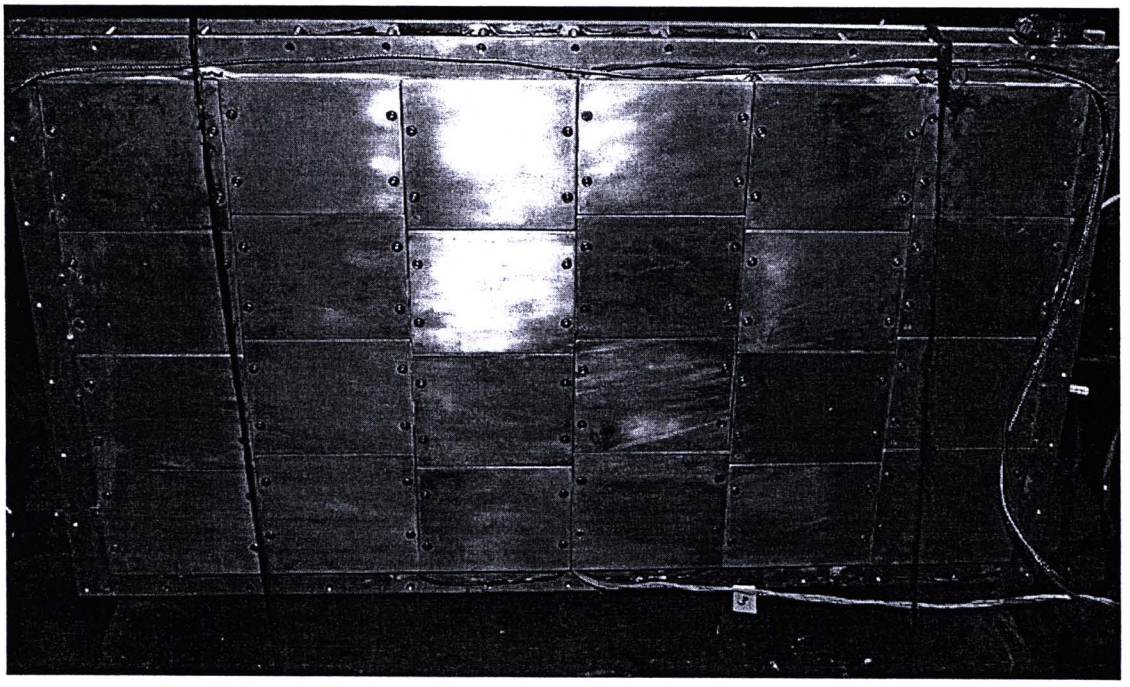
3.6.1 การประกอบโมดูลผลิตไฟฟ้ากับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น

เซลล์ความร้อนจะติดตั้งบนพื้นผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น โดยเซลล์ความร้อนทั้งหมดจำนวน 192 เซลล์ ถูกแบ่งเป็น 2 ชุด ชุดละ 96 เซลล์ต่ออนุกรมกันบนพื้นผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ผนังอุปกรณ์จะจัดแบ่งให้วางชุดเซลล์ความร้อนเป็น 6 คอลัมน์ ในแต่ละคอลัมน์ จะมีแผ่นอลูมิเนียมขนาดพื้นที่ 10 x 8 และ 9 x 8 ตารางเซนติเมตร เป็นอุปกรณ์ในการยึดประกบเซลล์ความร้อนให้แนบชิดพื้นผิวผนังถ่ายเทความร้อน ชุดละ 4 ตัว จำนวน 4 ชุด โดยใช้ซิลิโคนถ่ายเท่ความร้อนประสานกับผนังถ่ายเทความร้อน บริเวณระหว่างช่องว่างคอลัมน์ซึ่งเป็นแนวหัวต่อไฟฟ้าของเซลล์ความร้อนจะวางฉนวนไฟฟ้าเพื่อป้องกันการลัดวงจรลงผนังโลหะทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 3.12 สำหรับแผ่นอลูมิเนียมยึดประกบเซลล์ความร้อนจะปรับระนาบและแรงกดที่สม่ำเสมอทั่วบริเวณ ดังแสดงโมดูลผลิตไฟฟ้าที่ประกอบ

สมบูรณ์ในรูปที่ 3.13 โมดูลผลิตไฟฟ้านี้จะสร้างขึ้น 2 โมดูลก่อนที่จะประกบเข้ากับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังด้านร้อน และขณะใช้งานรอบขอบด้านนอกจะห่อหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนผิวที่สัมผัสไปกับบรรยากาศแวดล้อม



รูปที่ 3.12 การจัดเรียงเซลล์ความร้อนต่อแบบอนุกรมบนผิวพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

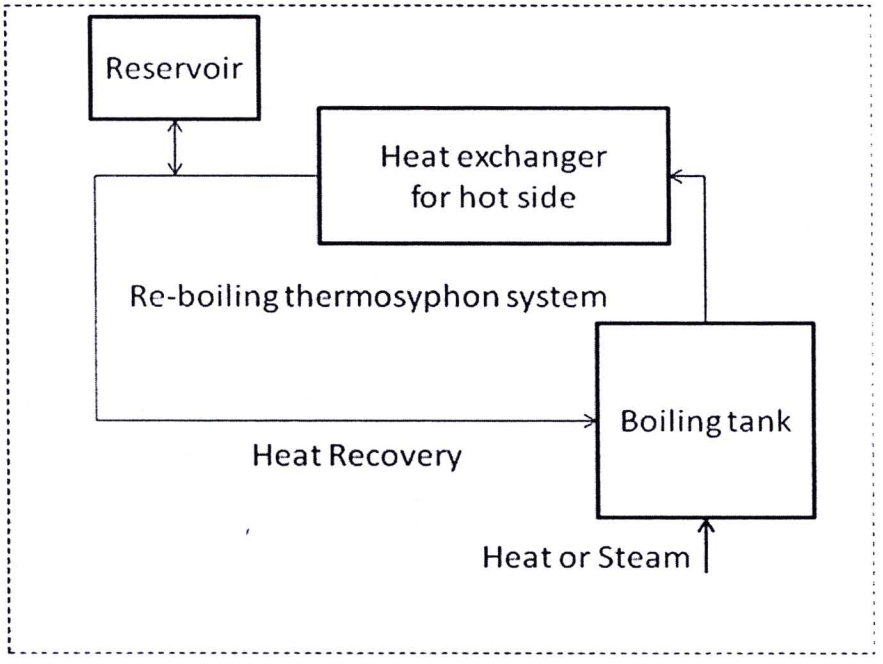


รูปที่ 3.13 โมดูลผลิตไฟฟ้าที่ประกอบสมบูรณ์บนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น

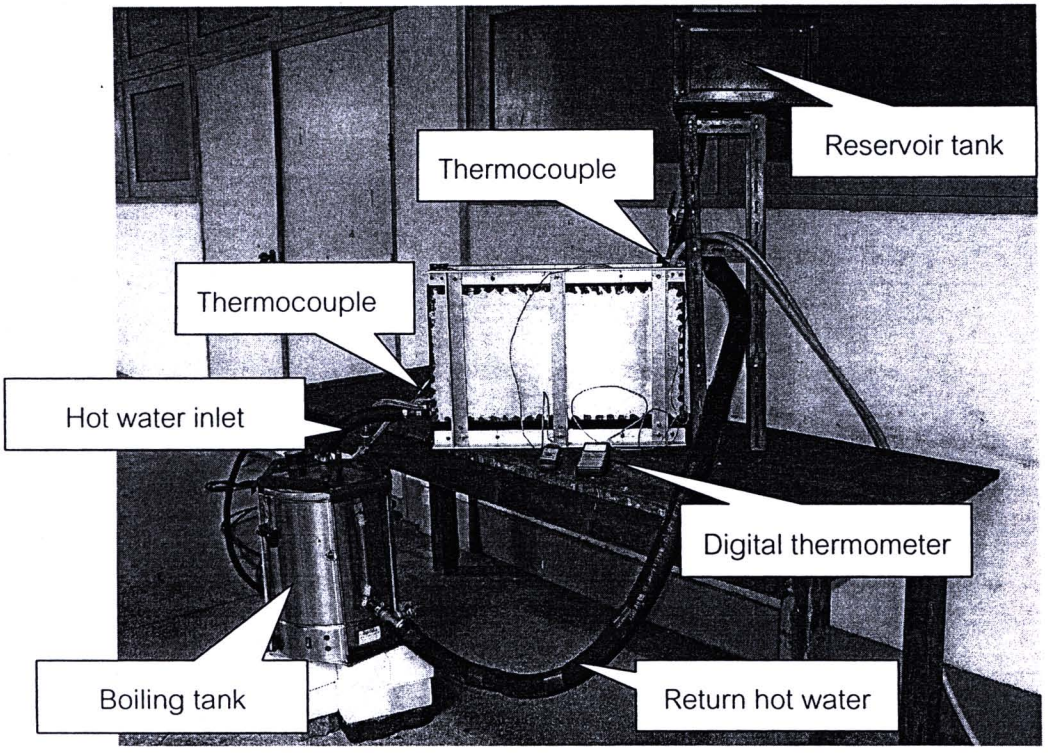
3.6.2 การติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน

ระบบผลิตน้ำร้อนที่สร้างขึ้นจะประกอบเข้ากับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน ด้วยการจัดทางเข้าและออกของน้ำร้อน เพื่อให้เกิดการไหลเวียนของน้ำร้อนตามหลักการของระบบไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติในลูปปิดแบบเทอร์โมไซฟอนเพื่อการต้มน้ำซ้ำ (Reboiling thermosyphon) เป็นการเพิ่มความร้อนให้น้ำร้อนไหลกลับที่ได้ถ่ายเทให้กับผนังอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไป แผนภาพของระบบแสดงในรูปที่ 3.14

ในการจัดระบบ ถังต้มน้ำจะวางที่ระดับต่ำกว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน น้ำร้อนที่ออกทางท่อด้านบนฝาหม้อต้มจะพาความร้อนจ่ายเข้าท่อทางเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้านล่างผ่านท่อยางทนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว หลังถ่ายเทความร้อนให้ผนังโมดูลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะถูกดันออกที่ท่อทางออกด้านบนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่ท่อทางออกนี้น้ำไหลเวียนจะแยกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะไหลกลับเข้าถังต้มน้ำด้านล่าง อีกส่วนหนึ่งที่มีปริมาตรเพิ่มจากการขยายตัวจะไหลขึ้นไปพักในอ่างสำรองน้ำ (Reservoir) และจะไหลลงด้วยแรงโน้มถ่วงผสมกับน้ำร้อนในท่อที่กลับไปต้มใหม่ตามสมดุลของระบบ ดังภาพถ่ายของระบบที่ประกอบเพื่อทดสอบการแลกเปลี่ยนความร้อนในรูปที่ 3.15 นอกจากนี้ที่บริเวณท่อทางเข้าและออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนยังติดตั้งหัวเทอร์โมคับเปิล (Thermocouple) เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิทางเข้าและทางออกระหว่างการทดลองด้วย



รูปที่ 3.14 แผนภาพการติดตั้งระบบไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติแบบเทอร์โมไซฟอน

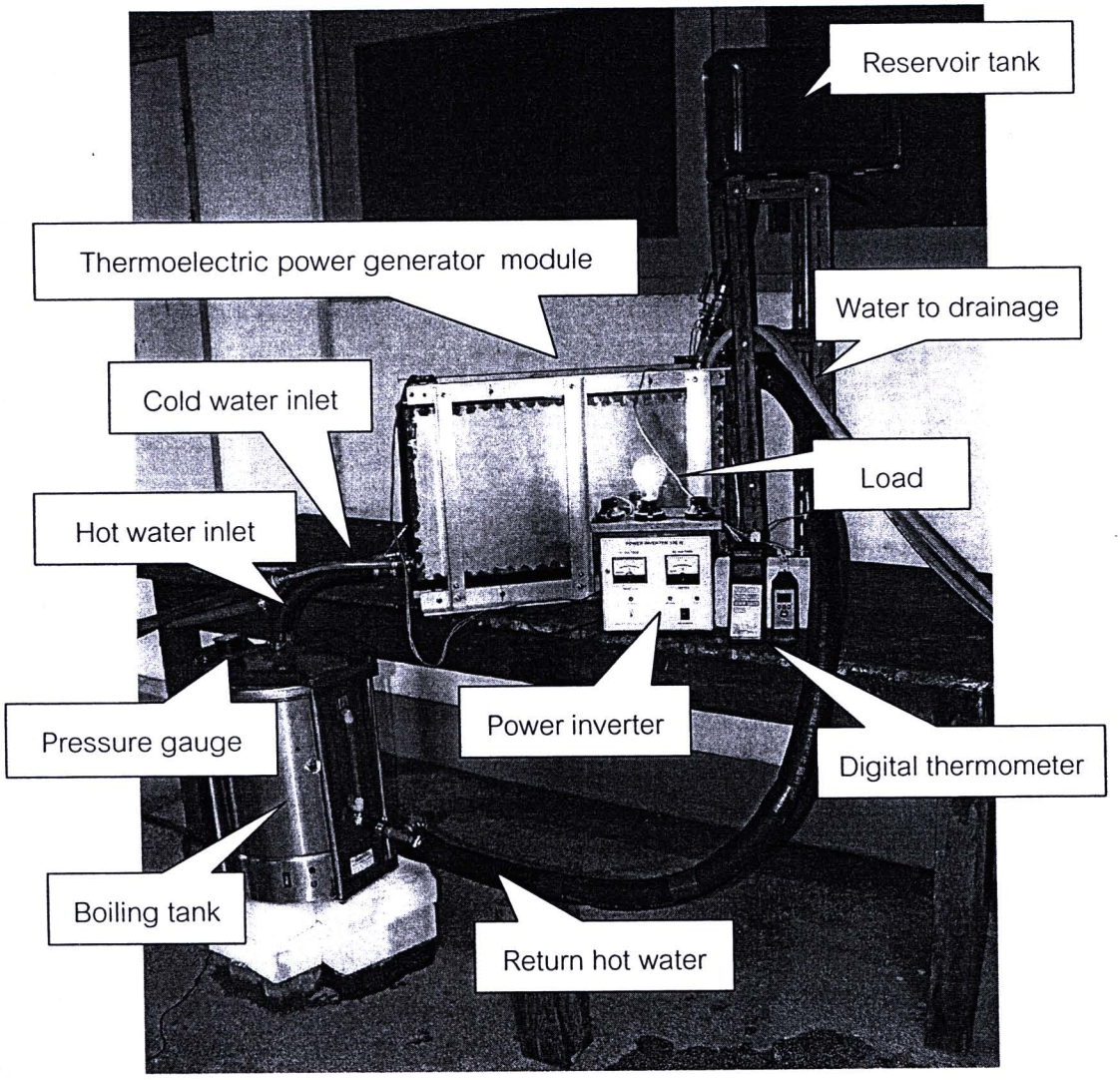


รูปที่ 3.15 ระบบไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติในลูปปิดแบบเทอร์โมไซฟอนที่ประกอบขึ้น

3.6.3 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้น

ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกขนาดกำลังไฟฟ้า 100 W ประกอบด้วย ส่วนต่างๆ 5 ส่วน ได้แก่ แผงโมดูลผลิตไฟฟ้า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อน ระบบผลิตน้ำร้อนและระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ได้นำมาจัดระบบตามแผนรูปที่ 3.1 ที่ออกแบบไว้

ในการติดตั้งแผงโมดูลผลิตไฟฟ้าที่ประกอบบนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านเย็น 2 ชุด จะถูกประกบ (Sandwich) เข้ากับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผนังเซลล์ด้านร้อนที่ประกอบร่วมกับระบบผลิตน้ำร้อนด้วยโครงยึดระบบ ซึ่งโครงยึดระบบนี้ออกแบบขึ้นให้เป็นอุปกรณ์รองรับการติดตั้งและเป็นขาตั้งในเวลาเดียวกัน ปลายสายของแผงโมดูลผลิตไฟฟ้าแต่ละด้านจะนำมาต่ออันดับกันเพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงป้อนเข้าระบบแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับผลิตไฟฟ้า 220 VAC, 50 Hz ดังแสดงการติดตั้งในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยความร้อนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกที่พัฒนาขึ้น