

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาระบบสะสมพลังงานความร้อนแฝงร่วมความร้อนสัมผัส
สำหรับเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าแบบรวมรังสีแสงอาทิตย์

Development of Integrated Sensible and Latent Heat Storage System
for Concentrating Solar Power Technology

คณะผู้วิจัย สังกัด คณะวิทยาศาสตร์

โดย ผศ.ดร.สมชาย เจียจิตต์สวัสดิ์

รศ.สมชาย กฤตพลวิวัฒน์

ดร.ธวัช สุริวงษ์

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน..... ๘ - เม.ย. ๒๕๕๕
เลขทะเบียน..... ๖๗402๐๐
เลขเรียกหนังสือ..... ๑ 1K

๒๕๖๐
กย๒๕
๒๕๕๕

สนับสนุนโดยกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร

บทคัดย่อ

จากแนวคิดเบื้องต้นของงานวิจัย ที่ต้องการพัฒนาระบบสะสมความร้อนที่มีการนำวัสดุสะสมความร้อนแฝงและ ความร้อนสัมผัสมาใช้ร่วมกัน เพื่อเก็บความร้อนจากไอน้ำที่อุณหภูมิ 270 °C ความดัน 30 bar โดยระบบเก็บสะสมความร้อนแบบไม่ใช้พลังงาน (Passive storage system) ถูกเลือกมาใช้ในการศึกษา เนื่องจากระบบมีราคาถูก อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง การจัดหาวัสดุง่าย การลงทุนต่ำเพราะไม่ต้องใช้ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน จากการสำรวจเอกสารงานวิจัย พบว่า วัสดุที่เหมาะสมสำหรับกักเก็บความร้อนสัมผัสและ ความร้อนแฝง คือ คอนกรีตและ โซเดียมไนเตรท ตามลำดับ เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาไม่แพงและ สามารถทำงานได้ตามอุณหภูมิที่ต้องการ สำหรับการออกแบบท่อภายในสามารถประยุกต์ใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนได้

ต้นแบบถังเก็บสะสมความร้อนร่วมระหว่างความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง ได้ถูกสร้างและ ทดสอบ ผลการทดสอบพบว่า การประยุกต์ใช้ วัสดุสะสมพลังงานสัมผัส (คอนกรีต) ล้อมรอบด้วยวัสดุสะสมพลังงานแฝง (พาราฟิน) สามารถกักเก็บและคลายความร้อนได้ อีกทั้งยังสามารถควบคุมการแปรปรวนของอุณหภูมิของวัสดุสะสมพลังงานสัมผัสได้ในคลายความร้อนของถังเก็บ ทำให้อุณหภูมิของน้ำ/ไอน้ำ ขาออกมีค่าคงที่ ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการเก็บสะสมความร้อนของโรงไฟฟ้าไอน้ำแสงอาทิตย์ จากการศึกษาและเปรียบเทียบการลงทุนของวัสดุตัวกลางกับปริมาณของระบบที่ได้ พบว่า การเพิ่มปริมาณวัสดุสะสมความร้อนสัมผัสและ ปรับลดปริมาณวัสดุสะสมความร้อนแฝง ทำให้ราคาในการลงทุนลดลง แต่ปริมาณของระบบจะเพิ่มขึ้น

ข้อมูลที่ได้ศึกษามาเบื้องต้น ทั้งข้อมูลการเลือกชนิดวัสดุเก็บสะสมความร้อน รูปแบบในการเก็บสะสม ความร้อนและ วิธีการออกแบบตัวแลกเปลี่ยนความร้อน จะเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาระบบสะสมความร้อนสูงต่อไป

คำสำคัญ ระบบสะสมความร้อนแฝง ระบบความร้อนสัมผัส ระบบสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ตัวรับรังสีแบบรางพาราโบลา

Abstract

From basic concept of this research, its aim is to develop an integrated sensible and latent heat storage system in order to store the heat from steam at temperature of 270 °C with pressure of 30 bar. A passive storage system was chosen to study due to low cost, high heat transfer rate, availability, and low investment due to no heat exchanger needed. From a survey of research papers, it was found that the storage materials, suitable for sensible and latent heat, are concrete and NaNO₃, respectively, due to their availability, low cost, and desirable operating temperature. For geometry design of pipes, heat transfer theory for heat exchanger can be applied.

A prototype of the integrated sensible and latent heat storage system was fabricated and pre-tested. The testing results showed that application of the sensible heat material (concrete) enclosed with the latent heat material (paraffin) was capable to store and release the heat. It was also able to control the fluctuating temperature of the sensible heat material, while the storage was discharging, which results in constant temperature of outlet water and is appropriate to be used for heat storage of solar steam power plant. From the study and comparison between investment of storage materials and system volume, it was found that increase of the sensible heat material while decreasing the latent heat material would result in lower total investment but higher system volume.

The information obtained from basic study including selection of storage material, energy storage concepts, design of heat exchanger will be an alternative direction in development of high heat storage system in the future.

Key words: Latent heat storage system, Sensible Heat Storage, Solar energy storage, Solar power plant, Parabolic trough collector

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยและคณะ ใคร่ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวรที่อนุเคราะห์เงินอุดหนุน งบประมาณกองทุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2555

ขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนร่วมช่วยเหลือในการสร้างต้นแบบและ ทดสอบระบบ โดยเฉพาะ นิสิตชั้นปีที่ 3 สาขาฟิสิกส์และ ฟิสิกส์พลังงาน และขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามที่มีส่วนช่วยให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ของโครงการวิจัย	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ตัวกลางเก็บสะสมความร้อน	6
2.2 แนวคิดระบบเก็บสะสมความร้อนที่อุณหภูมิสูง	7
2.3 วัสดุเก็บสะสมความร้อนที่อุณหภูมิสูง	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	15
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	15
3.2 การเลือกวัสดุตัวกลางสะสมพลังงาน	16
3.3 การออกแบบระบบสะสมความร้อน	16
3.4 การทดสอบระบบต้นแบบ	19
3.4.1 ระบบหม้อไอน้ำ	19
3.4.2 ระบบสะสมความร้อนต้นแบบ	20
บทที่ 4 ผลการวิจัย	22
4.1 ระบบสะสมความร้อนสัมผัสร่วมความร้อนแฝง	22
4.2 ผลการทดสอบชุดหม้อไอน้ำ	22
4.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบต้นแบบ	23
บทที่ 5 บทสรุปและ ข้อเสนอแนะ	28
บรรณานุกรม	29

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากอัตราการขยายตัวของภาคเศรษฐกิจตามสาขาต่างๆ ของประเทศไทยที่สูงขึ้นไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรม ธุรกิจการค้า ขนส่ง เกษตรกรรม และบ้านอยู่อาศัย ส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น จากรายงานการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทย ปี 2552 พบว่าประเทศไทยใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 135,209 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง พลังงานที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า มาจากก๊าซธรรมชาติในอ่าวไทย คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 71.8 ซึ่งมีปริมาณสำรองเหลืออยู่เพียง 20 ปี และ พบว่าประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 2,439 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง คิดเป็นมูลค่า 3,529 ล้านบาท [1] ในปีต่อมา พบว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย 71,166 พันตันเทียบเท่า น้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 6.7 คิดเป็นมูลค่ารวม 1,294 พันล้านบาท [2] ดังนั้นการพัฒนาพลังงานทดแทนและจัดทำกำลังการผลิตไฟฟ้าเพื่อเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานให้กับประเทศจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

สำหรับประเทศไทยมีแหล่งพลังงานทดแทนหลายชนิดที่มีศักยภาพในการนำมาใช้งาน โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่สำคัญ และจากการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมและศักยภาพ (SWOT) ของกระทรวงพลังงานในการจัดทำแผนพลังงานทดแทน 15 ปี พบว่าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงและมีปริมาณมาก โดยค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมเฉลี่ยทั้งปีของประเทศไทยมีค่าประมาณ $18 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้ทั้งการผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อน อีกทั้งพลังงานแสงอาทิตย์มีโอกาสดึงตัวเองได้ในระยะยาว สามารถเป็นแหล่งผลิตพลังงานที่กระจายตัวอยู่ตามภูมิภาคต่างๆ ได้ และเป็นพลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ถึงแม้ว่าปัญหาและอุปสรรคของพลังงานแสงอาทิตย์ในปัจจุบันยังอยู่ในเรื่องราคา และต้นทุนการผลิตพลังงานที่สูง แต่หากมีการพัฒนาและส่งเสริมอย่างเป็นขั้นตอนก็จะสามารถส่งเสริมการผลิตและการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยให้สู่การพัฒนาที่ยั่งยืนได้

เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบ่งเป็น 2 แบบ คือ 1) การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยใช้กระบวนการโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic process) ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดังกล่าว เรียกว่า “โซลาร์เซลล์ (Solar cell)” และ 2) การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้าทางอ้อม โดยใช้ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ เพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปแบบพลังงานความร้อน จากนั้นเปลี่ยนพลังงานความร้อนที่ได้ให้อยู่ในรูปพลังงานกล เพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [3] ในปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ภายในประเทศกำลังได้รับความนิยม เนื่องจากกระทรวงพลังงานเล็งเห็นความสำคัญในการจัดหาแหล่งพลังงานที่หลากหลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานหมุนเวียนในประเทศ จึงมีนโยบายจะพัฒนาพลังงานทดแทนเป็นแหล่งพลังงานหลักของประเทศ และได้บรรจุนโยบายดังกล่าวในแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551 - 2565)

การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ โดยใช้เทคโนโลยีแบบรวมแสง (solar concentration technologies) ในช่วง 2 ทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีดังกล่าวอย่างกว้างขวางจนกระทั่งก่อตั้งโรงไฟฟ้าเพื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบสายส่งในเชิงพาณิชย์ ปัจจุบันทั่วโลกมีโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์แบบรวมแสง ที่ก่อสร้างแล้วเสร็จและผลิตไฟฟ้าแล้ว จำนวน 26 โรง กำลังการผลิตรวม 1,265.65 MW นอกจากนี้ยังอยู่ระหว่างก่อสร้าง จำนวน 30 โรง กำลังการผลิตรวม 1,830.40 MW [4] โดยต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าแบบนี้มีแนวโน้มจะต่ำกว่าการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์และ มีความสามารถที่จะสามารถแข่งขันได้กับพลังงานในรูปแบบต่างๆได้ในอนาคต

ตารางที่ 1 เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กระบวนการความร้อนแบบรวมแสง
(Solar concentration technologies) [5]

ชนิดโฟกัส ชนิดของตัวรับรังสี	รางโฟกัส ตัวสะท้อนรังสี แกนเดี่ยว เคลื่อนที่ ติดตามดวงอาทิตย์พร้อมกับสะท้อน รังสี ไปยังรางโฟกัส (เคลื่อนที่ติดตามดวงอาทิตย์อย่าง เรียบง่าย)	จุดโฟกัส ตัวสะท้อนรังสี แกนคู่ เคลื่อนที่ ติดตามดวงอาทิตย์ พร้อมกับ สะท้อนรังสี ไปยังโฟกัสจุดเดียว (ช่วยให้อุณหภูมิสูงขึ้น)
อยู่กับที่ ตัวรับรังสีอยู่กับที่ รอรับการสะท้อนรังสี ดวงอาทิตย์จากตัวสะท้อนรังสี (ลดการเดินทางของสารทำงาน)	Linear Fresnel Reflector	หอคอยพลังงาน
เคลื่อนที่ ตัวรับรังสีเคลื่อนที่ไปพร้อมกับรางโฟกัส (ได้รับความร้อนมากขึ้น)	รางพาราโบลา	จานพาราโบลา

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ได้ทำการศึกษาและวิจัยการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อน จากแสงอาทิตย์ ขนาด 10 kW ดังรูปที่ 1 โดยใช้เทคโนโลยีการรวมแสงแบบรางพาราโบลาที่ได้รับ ความนิยมสูงสุด (ดังแสดงในตารางที่ 2) เนื่องจากการลงทุนมีค่าต่ำสุด ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อน แสงอาทิตย์นี้ ได้นำระบบผลิตความร้อนชีวมวลโดยใช้หม้อไอน้ำ ขนาด 100 kW_{th} เป็นแหล่งพลังงานร่วมในกรณีที่ ไม่มีแสงอาทิตย์ และเพื่อเพิ่มความเสถียรภาพให้กับระบบและให้สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ครอบคลุมตามความต้องการ การทำงานของระบบอย่างย่อมีดังนี้ ในตอนกลางวันรางพาราโบล่าจะผลิตไอน้ำอัตรากว่าที่อุณหภูมิประมาณ 180 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 5 บาร์ เพื่อหมุนกังหันไอน้ำและชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ผลิตไฟฟ้าจ่ายให้ สำนักงานในช่วงเวลากลางวัน (Daytime Office) ในกรณีที่ผลิตไฟฟ้าได้เกินความต้องการระบบจะจ่ายไฟฟ้าคืนสู่ ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในวันที่ไม่มีแสงอาทิตย์/ช่วงกลางคืน ระบบจะดึงไฟฟ้ามาจากระบบ จำหน่าย พร้อมทั้งทำการเดินเครื่องระบบพลังงานชีวมวลเพื่อผลิตไฟฟ้า ปัจจุบันวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร กำลังทำการศึกษาาระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา ขนาด 25 kWe ดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นขนาดที่พร้อมสำหรับส่งเสริมการลงทุนในเชิงธุรกิจของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อน แสงอาทิตย์แบบรวมแสงในประเทศไทย อย่างไรก็ตามการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ของทั้ง 2 ระบบยังมีข้อจำกัด ในเรื่องการจัดหาชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำ และความไม่สม่ำเสมอของรังสี แสงอาทิตย์ เนื่องจากแสงอาทิตย์มีช่วงเวลาในการส่องแสงจำกัด ดังนั้นการนำความร้อนมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจึง ต้องหาวิธีการในการเก็บสะสมพลังงานความร้อน เพื่อเพิ่มสมรรถนะโดยรวมของระบบผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ไม่ มีแสงแดดพอเพียง หรือขาดแคลนเชื้อเพลิงชีวมวล



รูปที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ (แบบพาราโบลา) ร่วมกับระบบผลิตความร้อนชีวมวล ขนาด 10 กิโลวัตต์ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร



รูปที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ (แบบพาราโบลา) ร่วมกับระบบผลิตความร้อนชีวมวล ขนาด 25 กิโลวัตต์ ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร

ตารางที่ 2 สถานภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์กระบวนการความร้อนแบบรวมแสง (Solar concentration technologies) [5]

เทคโนโลยี	สถานะปัจจุบัน(มีนาคม 2554)			
	ผลิตไฟฟ้าแล้ว		กำลังก่อสร้าง	
	โรง	MW	โรง	MW
ระบบรางพาราโบลา	16	1,143	23	1,380
ระบบหอคอย	4	37.5	3	338.4
ISCC	1	75.0	3	65
Fresnel	3	8.4	-	-
ระบบงานพาราโบลาร่วมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	1	1.5	1	1
CSP (ไม่ระบุเทคโนโลยี)	1	0.25	-	-
รวม	26	1,265.65	30	1,830.40

การเก็บสะสมพลังงานความร้อนยังมีบทบาทและหน้าที่ที่สำคัญอย่างอื่นอีก ดังต่อไปนี้

1) ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการจัดการพลังงานความร้อนของโรงไฟฟ้าแสงอาทิตย์ นอกจากจะใช้เก็บสะสมความร้อนในช่วงเวลากลางคืนแล้ว ยังสามารถเก็บความร้อนไว้ใช้ผลิตไฟฟ้าในช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Peak load) ได้ ซึ่งในแง่ของธุรกิจการผลิตไฟฟ้านั้น ไฟฟ้าที่ขายได้ในช่วง Peak load จะมีราคาที่สูงกว่าราคาในช่วงความต้องการไฟฟ้าปกติ (Off peak) นอกจากนี้การเก็บสะสมพลังงานความร้อนยังเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยเป็นหลักประกันความมั่นคงของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ว่าสามารถผลิตไฟฟ้าป้อนให้ระบบได้ตลอดเวลา

2) ทำหน้าที่เป็นเสมือนตัวควบคุมความสม่ำเสมอ (Buffer) ในระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ในกรณีที่รังสีอาทิตย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจนไม่อยู่ในระดับที่จะผลิตความร้อนได้เพียงพอต่อการนำไปใช้ผลิตไฟฟ้า การสะสมความร้อนจะช่วยในการชดเชยความร้อนในส่วนที่ขาดหายไปเพื่อให้ระบบยังสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างปกติ และสม่ำเสมอ ซึ่งยังเป็นการช่วยป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบอีกด้วย

สำหรับวิธีการสะสมพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ สามารถทำได้ 3 รูปแบบ ดังนี้

1) การสะสมความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage) เป็นการสะสมความร้อนโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิตัวกลางที่ใช้สะสม เช่น น้ำ อากาศ หิน หวาย และดิน เป็นต้น

2) การสะสมความร้อนแฝง (Latent heat storage) เป็นการสะสมความร้อนโดยการเปลี่ยนสถานะของตัวกลางสะสมพลังงานความร้อน โดยอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะในช่วงที่ทำการสะสมพลังงาน เช่น พาราฟิน กรดไขมัน และเกลือ เป็นต้น

3) การสะสมความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical storage) เป็นการสะสมความร้อนในรูปปฏิกิริยาเคมีแบบคายความร้อนและ แบบดูดความร้อน จากตัวที่เป็นสารเคมี เช่น แอมโมเนีย มีเทน และ เมทานอล เป็นต้น

จากการสำรวจข้อได้เปรียบและ เสียเปรียบของวัสดุตัวกลางสะสมพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูง [6,7] พบว่า โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ ใช้วัสดุตัวกลางสะสมพลังงานความร้อนแบบสัมผัส อาทิ เช่น น้ำ น้ำมัน น้ำมันสังเคราะห์ คอนกรีต และอื่นๆ เนื่องจากมีราคาถูกและ อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง สำหรับข้อเสียของวัสดุดังกล่าวคือ มีค่าความจุความร้อนจำเพาะต่ำกว่า (ซึ่งหมายถึงระบบสะสมพลังงานจะมีขนาดใหญ่กว่า) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุตัวกลางสะสมพลังงานความร้อนแฝง สำหรับวัสดุตัวกลางสะสมความร้อนแฝงที่นิยมใช้คือ เกลือหลอมเหลว (Molten salts) ทั้งนี้วัสดุดังกล่าว มีราคาแพงและ มีความต้องการใช้ในปริมาณมากในระบบผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ จึงทำให้วัสดุเปลี่ยนสถานะดังกล่าวได้รับความนิยมรองลงมาจากวัสดุสะสมความร้อนสัมผัส และได้พบว่า มีการนำเสนอแนวคิดในการลดราคาต้นทุนระบบสะสมพลังงานความร้อนแฝง โดยการประยุกต์ใช้วัสดุสะสมความร้อนแฝง ร่วมกับวัสดุสะสมความร้อนสัมผัส เพื่อลดปริมาณการใช้วัสดุสะสมความร้อนแฝง นอกจากจะลดต้นทุนของระบบสะสมความร้อนแฝง ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บความร้อนแบบสัมผัสอีกด้วย สำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อนำแนวคิดดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ยังมีอยู่จำนวนน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดในการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อประยุกต์ใช้วัสดุสะสมความร้อนแฝง ร่วมกับวัสดุสะสมความร้อนสัมผัสขึ้นเองภายในประเทศ ซึ่งจะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ที่ให้การคุ้มค่าต่อการลงทุน

จากเหตุผลและ แนวคิดในการพัฒนาเทคโนโลยีสะสมพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพื่อนำไปใช้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์เช่นตอนกลางคืนหรือสภาพอากาศไม่อำนวย มีความจำเป็นต้องรีบดำเนินการอย่างเร่งด่วน เพราะนอกจากจะนำไปสู่การแก้วิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานของประเทศแล้วยังเป็นประโยชน์ต่อบุคลากรของหน่วยงานต่างๆทั้งในภาครัฐและภาคธุรกิจ ที่จะ

ได้รับความรู้ความเข้าใจในด้านระบบเก็บสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ อีกทั้งยังช่วยสนับสนุนแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี ของประเทศ ในส่วนของกรวิจัย พัฒนา และส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1) เพื่อศึกษา และสำรวจวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวกลางสะสมพลังงานความร้อนที่เหมาะสมเชิงประสิทธิภาพในการเก็บความร้อน

2) เพื่อออกแบบและ สร้าง ระบบสะสมพลังงานความร้อนแผ่ร่วมกับความร้อนสัมผัส เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองในการผลิตไฟฟ้าจากไอน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ แบบรางพาราโบลา

3) เพื่อศึกษาวิเคราะห์ศักยภาพในการเก็บความร้อนและความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบสะสมความร้อน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

การออกแบบ และสร้างระบบสะสมพลังงานความร้อนอุณหภูมิสูงต้นแบบ โดยใช้วัสดุสะสมความร้อนแผ่ร่วมวัสดุสะสมความร้อนสัมผัส สำหรับการเก็บความร้อนจากไอน้ำที่อุณหภูมิ 270 °C ความดัน 30 bar และศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะเชิงความร้อนและจุดคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบ

1.4 ประโยชน์ของโครงการวิจัย

1) ผลการวิจัยจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อประเทศในเรื่องการเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ทำให้เกิดความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ และเป็นข้อมูลในการส่งเสริมให้เกิดผู้ประกอบการในการผลิตโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์มากขึ้น

2) ได้ระบบสะสมพลังงานความร้อนอุณหภูมิสูงต้นแบบ ที่สามารถนำไปศึกษาเพื่อขยายผลสำหรับระบบสะสมพลังงานความร้อนของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในเชิงพาณิชย์

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตัวกลางเก็บสะสมความร้อน (Heat storage media)

ตัวกลางที่ใช้ในการเก็บสะสมพลังงานความร้อน สามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด ดังนี้

2.1.1 ตัวกลางสะสมความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage media) เป็นตัวกลางที่สะสมพลังงานความร้อนโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุ แต่ไม่เปลี่ยนสถานะ โดยคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของวัสดุเก็บความร้อนสัมผัส นอกจากความหนาแน่นและ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุแล้ว อุณหภูมิในการทำงาน ค่าการนำความร้อน การแพร่กระจายความร้อน ความดันไอ ความเข้ากันของวัสดุกับถังเก็บ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาตร รวมถึงราคาเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบตัวเก็บสะสมความร้อนอีกด้วย

ตัวเก็บสะสมความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage) ประกอบด้วย ตัวกลางที่ใช้เก็บสะสมความร้อน (Storage media) ภาชนะ (โดยทั่วไปใช้ถังเก็บ- tank) และ ช่องทางระบายเข้าและออก โดยที่ถังเก็บตัวกลางต้องสามารถกักเก็บตัวกลางและ ป้องกันการสูญเสียความร้อนได้

การเก็บสะสมความร้อนสัมผัสสามารถทำได้โดยใช้ตัวกลางที่อยู่ในสถานะของแข็งหรือ สถานะของเหลว ตัวกลางที่เป็นของแข็ง (Solid media) โดยทั่วไปถูกนำมาใช้สำหรับการสะสมความร้อนที่อุณหภูมิสูง อาทิเช่น คอนกรีตและ เซรามิก และส่วนใหญ่ตัวกลางของแข็งถูกบรรจุเป็นชั้น เพื่อให้ของของไหลไหลผ่านและ แลกเปลี่ยนความร้อน ข้อได้เปรียบของการใช้ตัวกลางที่เป็นของแข็ง ตัวอย่างเช่น คอนกรีต คือ หาง่าย ราคาถูก ค่าความจุความร้อนสูง คุณสมบัติเชิงกลที่ดี (เช่น ความต้านแรงกด) ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนในใกล้เคียงกับเหล็กที่ใช้ทำท่อและ แรงต้านเชิงกลต่อภาระความร้อนแบบวัฏจักร (Cyclic thermal loading) ที่สูง

การนำ ตัวกลางที่เป็นของเหลว (Liquid media) เช่น เกลือหลอมเหลว น้ำมันแร่ น้ำมันสังเคราะห์มาใช้ในระบบสะสมความร้อนที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากตัวกลางสามารถรักษาการแบ่งชั้นความร้อน (Thermal stratification) ได้ตามธรรมชาติ การแบ่งชั้นความร้อนของตัวกลางทำให้สามารถบรรจุความร้อน (Charging) โดยการป้อนของไหลที่ร้อนในส่วนด้านบนของถังเก็บ และปล่อยความร้อน (Discharging) โดยการระบายของไหลที่เย็นออกส่วนล่างของถังเก็บ วัสดุที่แตกต่างกันสามารถนำมาใช้เป็นตัวกลางที่เป็นของเหลวได้ เช่น ซิลิกอน น้ำมันสังเคราะห์ แต่มีราคาแพง และ ไนโตรเจนเหลวมีศักยภาพในการกักความร้อนได้

2.1.2 ตัวกลางสะสมความร้อนแฝง (Latent heat storage media)

ตัวกลางสะสมความร้อนแฝงทำงานอยู่บนหลักการดูดและคายความร้อน ในขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะ เช่น จากสถานะของแข็งเป็นเหลว หรือสถานะของเหลวเป็นไอ และอื่นๆ โดยที่อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะมีค่าคงที่ ตัวเก็บความร้อนที่ใช้ตัวกลางสะสมความร้อนแฝง สามารถลดขนาดของตัวเก็บลงได้ อย่างไรก็ตาม การออกแบบการถ่ายเทความร้อนและ การเลือกวัสดุที่เหมาะสมยังมีความยาก

2.1.3 ตัวกลางสะสมความร้อนทางเคมี (Chemical storage media)

การเก็บสะสมความร้อนทางเคมี เป็นการเก็บความร้อนในรูปปฏิกิริยาทางเคมี สำหรับการเก็บความร้อนชนิดนี้ จะมีปฏิกิริยาทางเคมีมาเกี่ยวข้องและ เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับ (Reversible reaction) อย่างสมบูรณ์ ความร้อนที่ได้รับจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์จะไปกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีแบบดูดกลืนความร้อน (Endothermic

reaction) ถ้าปฏิกิริยานี้เป็นแบบผันกลับได้ พลังงานความร้อนที่ถูกดูดซับไปสามารถปล่อยกลับคืนได้อย่างสมบูรณ์

ข้อได้เปรียบทั่วไปของการเก็บความร้อนทางเคมี คือ สามารถเก็บพลังงานได้สูงต่อหน่วยปริมาตรและเก็บไว้ได้นานที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามการพัฒนาปฏิกิริยาเคมี-ความร้อนแบบผันกลับได้ยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น

2.2 แนวคิดระบบเก็บสะสมความร้อนที่อุณหภูมิสูง

(High temperature heat storage system concept)

ระบบเก็บสะสมความร้อนที่อุณหภูมิสูงในโรงไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Solar power plant) แบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ ระบบเก็บสะสมความร้อนโดยใช้พลังงาน (Active storage system) และระบบเก็บสะสมความร้อนโดยไม่ใช้พลังงาน (Passive storage system)

2.2.1 ระบบเก็บความร้อนแบบใช้พลังงาน (Active storage system) เป็นระบบที่ใช้หลักการพาความร้อนแบบบังคับ (Force convective heat transfer) โดยตัวกลางที่เก็บความร้อนสามารถไหลวนผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อนได้ เช่นตัวรับรังสีแสงอาทิตย์หรือ ตัวผลิตไอน้ำ ระบบเก็บความร้อนชนิดนี้จะใช้ถังเก็บจำนวน 1 หรือ 2 ถัง เพื่อกักเก็บตัวกลางสะสมความร้อน

ระบบนี้สามารถแบ่งย่อย ได้อีก 2 ระบบ ดังนี้ 1. ระบบเก็บสะสมความร้อนทางตรงแบบใช้พลังงาน (Active direct system) และ 2. ระบบเก็บสะสมความร้อนทางอ้อมแบบใช้พลังงาน (Active indirect system)

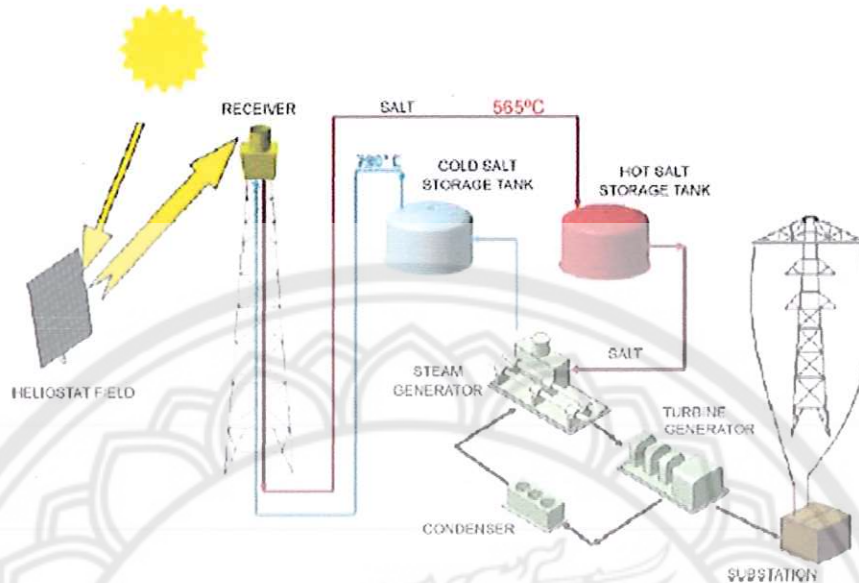
1) ระบบเก็บความร้อนทางตรง เป็นระบบที่ของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer fluid) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการสะสมความร้อนโดยตรง ซึ่งหมายความว่า วัสดุที่นำมาใช้ต้องมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนที่ดีและ ในเวลาเดียวกันต้องเก็บความร้อนได้ดีด้วยเช่นกัน

การใช้เกลือหลอมเหลว หรือ ไอน้ำ เป็นของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนและ เก็บความร้อนในเวลาเดียวกัน เพื่อลดต้นทุนสำหรับตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและ เพื่อให้อุณหภูมิในการทำงานของของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนในสนามแสงอาทิตย์ (Solar field) สูงขึ้น ดังนั้นระบบนี้จึงมีราคาถูก อย่างไรก็ตาม กรณีของเกลือหลอมเหลว เกลือจะแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120 – 220 องศาเซลเซียส ทำให้ระบบนี้ต้องได้รับการดูแลเป็นพิเศษในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าบำรุงรักษาและ ค่าดำเนินการที่สูงขึ้น จากการศึกษา [8] รายงานว่าการใช้เกลือหลอมเหลวเป็นของไหลที่ถ่ายเทความร้อนจะคุ้มทุนเมื่อโรงไฟฟ้าแสงอาทิตย์มีระบบกักเก็บความร้อน

ตัวอย่างระบบเก็บสะสมความร้อนทางตรงแบบใช้พลังงาน เช่น ระบบทางตรงแบบ 2 ถังเก็บ (two tank direct system) เป็นระบบที่ประกอบด้วยถังเก็บแบบร้อน (Hot tank) เป็นถังที่ใช้เก็บของไหลถ่ายเทความร้อนเพื่อใช้ในเวลากลางคืนหรือ ไม่มีแสง ถังเก็บแบบเย็น (Cold tank) เป็นถังเก็บของไหลที่ถ่ายเทความร้อนเย็นตัวลง และพร้อมบรรจุความร้อนจากสนามแสงอาทิตย์ รูปที่ 3 เป็นแผนภาพโรงงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ที่ใช้เกลือหลอมเหลว (โซเดียมไนเตรท (NaNO_3) และ โพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3))

ข้อดีของระบบแสงอาทิตย์แบบ 2 ถังเก็บ คือ การแยกเก็บวัสดุเก็บความร้อนที่ร้อนและ เย็นออกจากกัน กระบวนการเก็บความร้อนมีความเสี่ยงต่ำ ความเป็นไปได้ในการเพิ่มอุณหภูมิของของไหลออกจากสนามแสงอาทิตย์ได้ถึง 450/500 องศาเซลเซียส (สนามแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลิก) ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า ข้อเสียของระบบนี้ คือ วัสดุที่นำมาใช้ราคาแพง ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนมีราคาแพง ความต้องการ

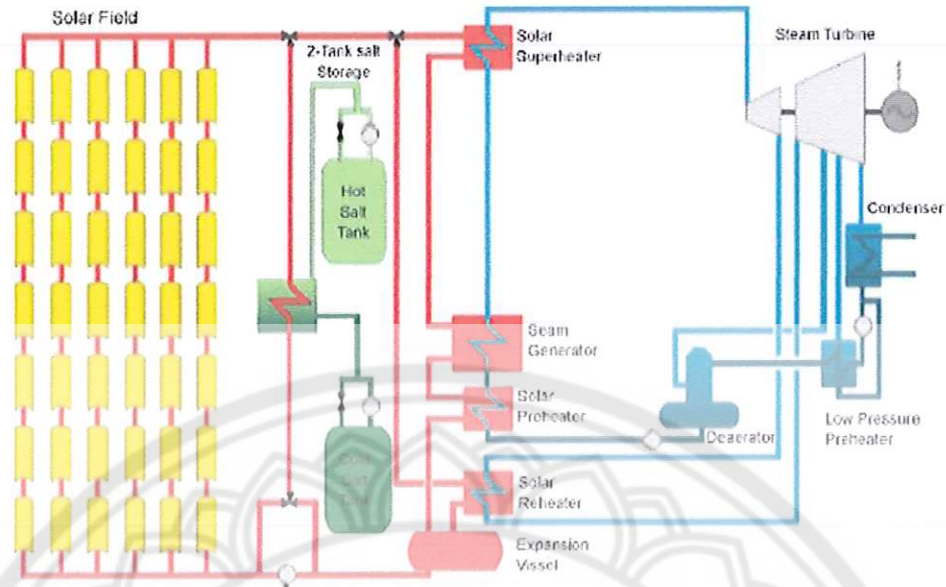
ถึงเก็บความร้อนเพิ่มขึ้น ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างถังเย็นและ ถังร้อนน้อย ความเสี่ยงที่เกิดจากการแข็งตัวของเกลือภายในท่อ การสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มถังเก็บ



รูปที่ 3 ระบบเก็บสะสมความร้อนทางตรงแบบ 2 ถังเก็บ [9]

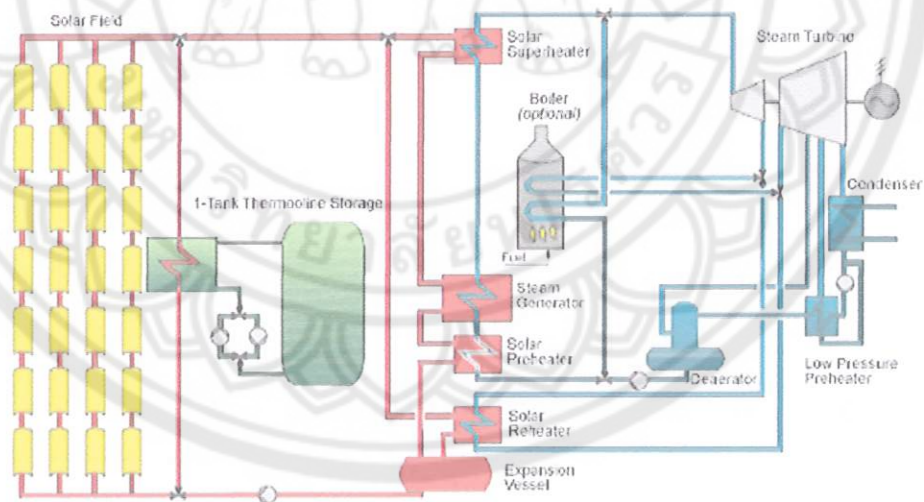
2) ระบบเก็บความร้อนทางอ้อม เป็นระบบที่ใช้ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนและ เก็บสะสมความร้อนต่างชนิดกัน ระบบนี้มีทั้งแบบ 2 ถังเก็บและ ถังเก็บเดียว ระบบทางอ้อมแบบ 2 ถังเก็บ เป็นระบบที่ใช้ของไหลในการถ่ายเทความร้อนภายในสนามแสงอาทิตย์กับตัวกลางเก็บความร้อนผ่านทางอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากรูปที่ 4 ระบบเก็บความร้อนทางอ้อมแบบ 2 ถังเก็บ ที่ใช้น้ำมันเป็นสารถ่ายเทความร้อนและ ใช้เกลือหลอมเหลวเป็นตัวกลางเก็บสะสมความร้อน สำหรับระบบ 2 ถังเก็บ ถังหนึ่งใช้เก็บตัวกลางที่ร้อนและ อีกถังใช้เก็บตัวกลางที่เย็น ในช่วงบรรจุและปล่อยความร้อน น้ำมันส่วนหนึ่งที่ไหลผ่านตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ในสนามแสงอาทิตย์แล้วถูกส่งไปยังตัวแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเกลือและน้ำมัน ที่ซึ่งอุณหภูมิของน้ำมันที่ทางเข้า 391 องศาเซลเซียส จะลดลงที่อุณหภูมิทางออก 298 องศาเซลเซียส เกลือไนเตรทในถังเก็บไหลผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิทางเข้า 291 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิสูงขึ้นที่ทางออก 384 องศาเซลเซียส จากนั้นถูกกักเก็บที่ถังเก็บแบบร้อน ในช่วงเวลาปล่อยความร้อน น้ำมันและเกลือจะไหลสวนทางภายในตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากเกลือไปสู่น้ำมันเพื่อใช้ในการผลิตไอน้ำ

ข้อดีของระบบทางอ้อมแบบ 2 ถัง คือ การแยกเก็บของตัวกลางที่ร้อนและ เย็น และวัสดุเก็บความร้อนที่ไหลผ่านถังเก็บเย็นและ ร้อน โดยไม่ผ่านรางพาราโบลา ข้อเสียของระบบเหมือนกับระบบเก็บความร้อนทางตรงแบบ 2 ถังเก็บ



รูปที่ 4 ระบบเก็บสะสมความร้อนทางอ้อมแบบ 2 ถังเก็บ [10]

ระบบทางอ้อมแบบถังเก็บเดี่ยว เป็นระบบที่ตัวกลางเก็บสะสมความร้อนถูกกักเก็บอยู่ภายในถังเดียวกัน และมีการแบ่งชั้นความร้อน (Thermocline) เกิดขึ้น แผนภาพของระบบแสดงดังรูปที่ 5 ข้อดีของระบบถังเก็บเดี่ยว คือ ต้นทุนที่ต่ำลง เนื่องจากการลดจำนวนถังเก็บ ข้อเสีย จุดหลอมเหลวที่สูงของเกลือทำให้มีความจำเป็นต้องรักษาอุณหภูมิขั้นต่ำ ความยากในการกักเก็บตัวกลางที่ร้อนและ เย็น ความยากในการควบคุมชั้นความร้อนในขณะบรรจุและ ปล่อยความร้อน



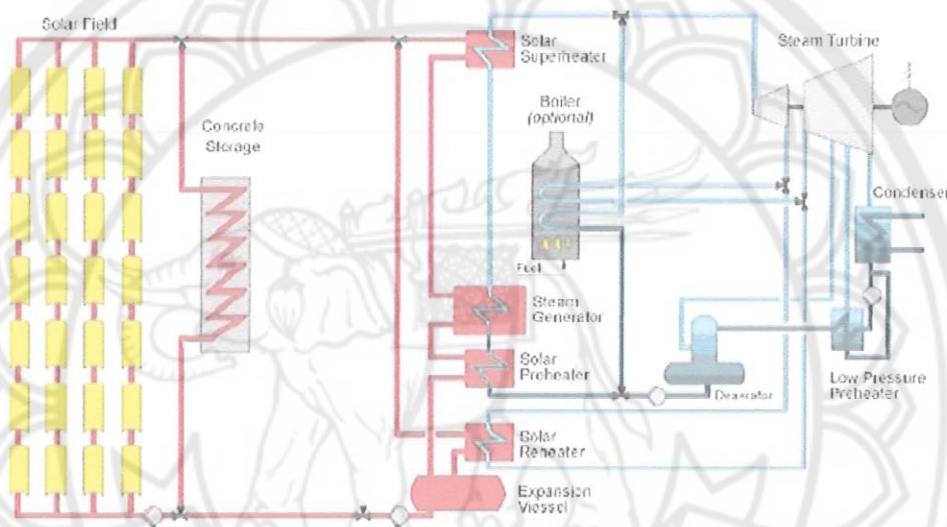
รูปที่ 5 ระบบเก็บสะสมความร้อนทางอ้อมแบบถังเก็บเดี่ยว [10]

2.2.2 ระบบเก็บความร้อนแบบไม่ใช้พลังงาน (Passive storage system) โดยทั่วไปเป็นระบบแบบตัวกลางคู่ (dual storage system) ระบบนี้ของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนจะไหลผ่านถังเก็บความร้อนเฉพาะช่วงบรรจุ และ ปล่อยความร้อนให้กับวัสดุเก็บสะสมความร้อนเท่านั้น โดยที่ของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนจะได้รับ

พลังงานจากแหล่งพลังงานและ ถ่ายเทให้กับตัวกลางที่เก็บความร้อนในช่วงบรรจุความร้อนและ ดูดซับพลังงาน กลับจากถังเก็บความร้อนในช่วงปล่อยความร้อน ตัวกลางที่ใช้เก็บความร้อนสำหรับระบบนี้ ส่วนใหญ่เน้นตัวกลางที่เป็นของแข็งเช่น คอนกรีตและ เซรามิก

กรณีตัวเก็บความร้อนชนิดคอนกรีต ความร้อนที่ได้จากสนามแสงอาทิตย์ถูกถ่ายเทให้กับของไหลที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนให้กับตัวเก็บความร้อนที่เป็นของแข็งที่ท่อจำนวนฝังอยู่ภายในเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลและ ตัวกลางเก็บความร้อน ดังรูปที่ 6 การออกแบบทางด้านเรขาคณิตมีความสำคัญมาก เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและ จำนวนท่อที่นำมาใช้

ข้อดีของระบบนี้ คือ ราคาถูก อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง การจัดการวัสดุง่าย การลดการถ่ายเทความร้อนของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำ ข้อเสียของระบบ คือ อุณหภูมิของของไหลที่ถ่ายเทความร้อนจะลดลงในช่วงปล่อยความร้อน ในขณะที่อุณหภูมิเก็บสะสมความร้อนจะเย็นตัวลง ปัญหาอีกอย่างคือ การถ่ายเทความร้อนของระบบนี้ค่อนข้างต่ำ เพราะไม่มีการสัมผัสระหว่างของไหลถ่ายเทความร้อนกับวัสดุเก็บความร้อนโดยตรง



รูปที่ 6 ระบบเก็บสะสมความร้อนแบบไม่ใช้พลังงาน [10]

แนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบสะสมความร้อน มีดังนี้

- Ulf Herrmann, Bruce Kelly และ Henry Price [11] ศึกษากระบวนการสะสมพลังงานความร้อนแบบ 2 ถัง โดยใช้ Heat Transfer Fluid (HTF) เป็นของเหลวในการถ่ายเทความร้อนและเป็นสื่อกลางในการสะสมพลังงานของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ขนาด 13.8 MW ไฟฟ้า 120MW ความร้อน และขนาด 10 MW ไฟฟ้า 105 MW ความร้อน พบว่า Heat transfer Fluid มีราคาแพงมาก ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้ามีราคาสูง ต่อมาได้ศึกษาความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ของการนำเกลือหลอมเหลวมาเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนแทน Heat transfer Fluid พบว่ามีราคาอยู่ที่ 30-40 US/kWความร้อน ขึ้นอยู่กับขนาดของระบบ
- Doerte Laing, Thomas Bauer, Dorothea Lehmanh และ Carsten Bahl [12] ศึกษาการทำงานร่วมกันของระบบสะสมพลังงานความร้อนสัมผัสและระบบสะสมพลังงานความร้อนแฝง ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิและเอ็นทัลปี ของน้ำและไอน้ำ โดยให้ระบบสะสมพลังงานความร้อนแฝงสะสมพลังงานในช่วงของการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นไอน้ำ และระบบสะสมพลังงานความร้อนสัมผัสในคอนกรีตทำหน้าที่รับความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์มา preheating และ superheating เพื่อส่งความร้อนไปยัง power block การทดสอบระบบ

ต้นแบบความร้อนแฝง ใช้ NaNO_3 จำนวน 140 กิโลกรัม เป็นสื่อกลางในเพิ่มประสิทธิภาพและอุณหภูมิของ PCMs ในการถ่ายเทความร้อนขณะ discharge ความร้อนออกจากระบบ ภายหลังจากได้ 172 รอบ พบว่า อุณหภูมิของการหลอมเหลว NaNO_3 อยู่ที่ 306°C การทดสอบคุณสมบัติของแท่งคอนกรีตผสมโดยการอบในเตาอบความร้อนสูงและทำสอบวัดค่าความแข็งแรง ได้ผลลัพธ์ที่สนับสนุนว่าคอนกรีตน่าจะสามารรถเก็บความร้อนได้ถึง 500°C หลังจากประสบผลสำเร็จในห้องปฏิบัติการ ได้นำผลการทดสอบไปออกแบบระบบสะสมพลังงานความร้อนสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ความร้อนรวมแสงแบบรางพาราโบลา ชนิด Direct Steam Generation ขนาด 1 MW ที่มี ใช้น้ำ 110 บาร์ อุณหภูมิ 400°C

- C.Y. Zhao และ Z.G. Wu [13] ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้โฟมโลหะและแกรไฟต์ ในการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสำหรับระบบสะสมพลังงานความร้อนอุณหภูมิสูง ผลการทดลองพบว่าวัสดุที่มีรูพรุน สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีและช่วยลดความแตกต่างของอุณหภูมิของระบบสะสมพลังงานความร้อนแฝงแบบ PCMs อีกทั้งทำให้ระยะเวลาในการประจุและคายความร้อนจากระบบสะสมพลังงานสั้นลง โครงสร้างของโฟมโลหะและการขยายตัวของแกรไฟต์ ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในของแข็งและยับยั้งการพาความร้อนตามธรรมชาติของของเหลว สมรรถนะระบบโดยรวมของโฟมโลหะดีกว่าของแกรไฟต์ ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสะสมพลังงานความร้อนแบบ PCMs ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุตัวกลาง เช่น ของแข็ง ของแข็ง/ของเหลว และของเหลว เป็นต้น
- Doerte Laing, Wolf Dieter Steinmann, Rainer Tamme และ Christoph Richter [14] ศึกษาคุณสมบัติของของแข็งเพื่อเป็นตัวกลางในระบบสะสมพลังงานความร้อน สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบรางพาราโบลา Plataforma Solar de Almeria ของประเทศสเปน ที่ใช้น้ำมันสังเคราะห์เป็นของไหลตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำการทดสอบระบบสะสมพลังงานความร้อนต้นแบบ 2 ชนิด ได้แก่ Castable Ceramic และ คอนกรีตผสม ด้วย storage capacity 350 kWh อุณหภูมิสูงสุด 390°C ผลการทดสอบพบว่าวัสดุทั้งสองมีความเหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุตัวกลางในระบบสะสมพลังงานความร้อน เนื่องจากสูญเสียความร้อนในระบบต่ำ และเมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิตพบว่า คอนกรีตผสม มีต้นทุนต่ำกว่า Castable Ceramic
- Fengwu Bai และ Chao Xu [15] วิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของระบบสะสมความร้อนแบบ 2 ระยะ ที่ซึ่งระยะที่ 1 คอนกรีตถูกนำมาใช้เพื่อเก็บความร้อนที่อุณหภูมิสูง และระยะที่ 2 ตัวเก็บไอน้ำนำมาใช้เพื่อเก็บความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนพบว่า ประสิทธิภาพของคอนกรีตขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อนของคอนกรีตและ ระยะห่างระหว่างท่อภายใน สำหรับความเร็วในการปล่อยไอน้ำของตัวเก็บไอน้ำมีผลกระทบโดยตรงกับพฤติกรรมของความร้อนภายในคอนกรีต
- Horst Michels และ Robert Pitz-Paal [16] รายงานผลการศึกษาดูเก็บสะสมความร้อนแฝงแบบหลายชั้น เชื่อมต่อกัน ตัวระบบทดสอบทำจากท่อเหล็กรูปวงแหวนที่ตั้งในแนวตั้ง โดยน้ำมันถูกใช้เป็นสารถ่ายเทความร้อนที่ไหลภายในท่อชั้นใน ส่วนท่อชั้นนอกบรรจุเกลือ 3 ชนิด คือ โพแทสเซียมไนเตรท (บรรจุส่วนบนของท่อ) สารผสมระหว่างโพแทสเซียมไนเตรทกับโพแทสเซียมคลอไรด์ (บรรจุส่วนกลางท่อ) และโซเดียมไนเตรท (บรรจุส่วนล่างของท่อ) ในการบรรจุความร้อน (charging) สารทำงาน หรือน้ำมันจะไหลจากด้านบนไปด้านล่างของท่อ ในทางตรงกันข้าม น้ำมันจะไหลจากด้านล่างขึ้นบนเพื่อปล่อยความร้อน (discharging) จากการศึกษาพบว่าการเชื่อมต่อวัสดุความร้อนแฝงหลายชนิด ทำให้อุณหภูมิขาออกคงที่มากขึ้น และพบว่า โซเดียมไนเตรทมีความร้อนแฝงและ การกักร้อนที่เหมาะสมกับระบบ

2.3 วัสดุเก็บสะสมความร้อนที่อุณหภูมิสูง (High temperature thermal energy storage materials)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึง วัสดุ 2 ชนิดที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ วัสดุเก็บความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage material) และวัสดุเก็บความร้อนแฝง (Latent heat storage material)

2.3.1 วัสดุเก็บความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage material) เป็นวัสดุที่ถูกกำหนดในกลุ่มวัสดุที่ไม่เปลี่ยนสถานะในช่วงอุณหภูมิเก็บสะสมความร้อน โดยปริมาณความร้อนที่วัสดุสามารถสะสมได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = \rho \bar{c}_p V \Delta T$$

โดยที่ Q คือ ปริมาณความร้อนถูกกักเก็บ (J) ; ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)
 \bar{c}_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg K) ; V คือ ปริมาตรของวัสดุที่ใช้ (m^3)
 ΔT คือ ช่วงอุณหภูมิที่ทำงาน ($^{\circ}\text{C}$)

ความสามารถในการกักเก็บความร้อนได้ขึ้นอยู่กับตัวแปร $\rho \bar{c}_p$ (หรือ ความจุความร้อน) สำหรับวัสดุที่จะนำมาประยุกต์ใช้สำหรับตัวเก็บสะสมความร้อนจะต้องมีราคาถูก และความจุความร้อนที่ดี อีกตัวแปรที่สำคัญคือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดี ตัวกลางในรูปของแข็งหรือ ของเหลวสามารถนำมาใช้ได้

กรณีวัสดุรูปของแข็ง เช่น คอนกรีตและ เซรามิก ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง เนื่องจากวัสดุมีราคาถูก และมีค่าการนำความร้อนที่ดี ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติของวัสดุสะสมความร้อนชนิดของแข็งที่พบในเอกสารงานวิจัย ในทางตรงกันข้าม วัสดุรูปของเหลวหลากหลายชนิดได้ถูกทดสอบการถ่ายเทความร้อนเช่น น้ำ อากาศ น้ำมัน ก่อนที่เกลือหลอมเหลวถูกเลือกเป็นวัสดุที่ดีที่สุด เกลือหลอมเหลวถูกนำมาใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์เพราะ เกลืออยู่ในสถานะของเหลวที่ความดันบรรยากาศ ราคาถูก และอุณหภูมิการทำงานสูง วัสดุรูปของเหลวที่นิยมใช้ คือ เกลือแสงอาทิตย์ (Solar salt) และเกลือพาณิชย์ (Commercial salt) เช่น HitecXL เกลือแสงอาทิตย์เป็นเกลือส่วนประกอบคู่ (Binary salt) ที่ประกอบด้วย 60 % โซเดียมไนเตรท (NaNO_3) และ 40% โพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) และมีจุดหลอมเหลวที่ 221 องศาเซลเซียส เกลือชนิดนี้จะถูกกักเก็บในถังเก็บแบบเย็นที่อุณหภูมิ 288 องศาเซลเซียส เกลือพาณิชย์ เช่น HitecXL เป็นเกลือส่วนประกอบ 3 อย่าง คือ 48% แคลเซียมไนเตรท ($\text{Ca(NO}_3)_2$) 7% โซเดียมไนเตรท (NaNO_3) และ โพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3)[17] และมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 142 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุสะสมความร้อนชนิดของแข็ง [18]

ตัวกลางเก็บความร้อน	อุณหภูมิ		ความหนาแน่นเฉลี่ย (kg/m ³)	การนำความร้อนเฉลี่ย (W/m K)	ความจุความร้อนเฉลี่ย (kJ/kg K)	ความจุความร้อนเฉลี่ยต่อปริมาตร (kWh/m ³)	ราคาต่อมวล (US\$/kg)	ราคาต่อความจุความร้อน (US\$/kW)
	เย็น (C)	ร้อน (C)						
Sand-rock-mineral oil	200	300	1700	1.0	1.30	60	0.15	4.2
Reinforced concrete	200	400	2200	1.5	0.85	100	0.05	1.0
NaCl (solid)	200	500	2160	7.0	0.85	150	0.15	1.5
Cast iron	200	400	7200	37.0	0.56	160	1.00	32.0
Cast steel	200	700	7800	40.0	0.60	450	5.00	60.0
Silica fire bricks	200	700	1820	1.5	1.00	150	1.00	7.0
Magnesia fire bricks	200	1200	3000	5.0	1.15	600	2.00	6.0

2.3.2 วัสดุเก็บความร้อนแฝง (Latent heat storage material) หรือเรียกว่า วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase change material, PCM) ระบบเก็บความร้อนที่ใช้สารเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ได้รับการพิจารณาเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพดีกว่าระบบเก็บสะสมความร้อนสัมผัส ข้อดีของการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะคือ ความแตกต่างของอุณหภูมิน้อยในช่วงการบรรจุและ ถ่ายความร้อนและ ความจุความร้อนสูงกว่าวัสดุเก็บความร้อนสัมผัส แต่วัสดุเปลี่ยนสถานะส่วนใหญ่ มีค่าการนำความร้อนต่ำทำให้อัตราการบรรจุและปล่อยความร้อนต่ำ

ในปัจจุบัน วัสดุเปลี่ยนสถานะหลากหลายวางขายอยู่ในท้องตลาด (ตารางที่ 4) วัสดุเหล่านี้สามารถจำแนกได้เป็น วัสดุอินทรีย์ (Organic material) และอนินทรีย์ (Inorganic material) ดังแสดงในตารางที่ 5 และ 6 การนำสารเปลี่ยนสถานะมาใช้ยังประสบกับปัญหาที่จำเป็นต้องแก้ไขคือ ค่าการนำความร้อนที่ต่ำและ การสะสมของแข็งบนพื้นผิวที่ถ่ายเทความร้อน การแก้ปัญหาเรื่องค่าการนำความร้อนสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนโดยใช้การถ่ายเทมวลหรือ การพาความร้อนที่เกิดเฉพาะในสถานะของเหลว และ การปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนโดยการเติมสารที่มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าลงในสารเปลี่ยนสถานะที่บริสุทธิ์

ตารางที่ 4 วัสดุเปลี่ยนสถานะตามท้องตลาด [18]

ชื่อ	ชนิด	ผู้ผลิต	อุณหภูมิ	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ความร้อนแฝงจำเพาะ (kJ/kg)	ความร้อนแฝงต่อปริมาตร (MJ/m ³)	ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg K)	ค่าการนำความร้อน (W/m K)
			หลอมเหลว (°C)					
RT110	พาราฟิน	Rubitherm	112	N.A	213	N.A	N.A	N.A
E117	อินทรีย์	EPS	117	1450	169	245	2.61	0.70
A167	อินทรีย์	EPS	164	1500	306	459	N.A	N.A

ตารางที่ 5 สารอินทรีย์ที่มีศักยภาพใช้เป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะ [18]

สารประกอบ	อุณหภูมิ หลอมเหลว	ความร้อนแฝง ของการ หลอมเหลว	ความหนาแน่น	ความจุ ความร้อน จำเพาะ	ค่าการนำความร้อน
	(°C)	(kJ/kg)	(kg/m ³)	(kJ/kg)	(W/m K)
MgCl ₂ ·6H ₂ O	117	168.6	145 (ของเหลว, 120 °C)	-	0.570 (ของเหลว, 120 °C)
	115	165	1442 (ของเหลว, 78 °C)	-	0.598 (ของเหลว, 140 °C)
	116		1569 (ของแข็ง, 20 °C)	-	0.694 (ของแข็ง, 90 °C)
			1570 (ของแข็ง, 20 °C)	-	0.704 (ของแข็ง, 110 °C)
Hitec: KNO ₃ -NaNO ₂ -NaNO ₃	120	-	-	-	-
Hitec XL: 48%Ca(NO ₃) ₂ - 45%KNO ₃ -7%NaNO ₃	130	-	-	-	-
Mg(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O	130	-	-	-	-
KNO ₃ -NaNO ₂ -NaNO ₃	132	275	-	-	-
68%KNO ₃ -32%LiNO ₃	133	-	-	-	-
KNO ₃ -NaNO ₂ -NaNO ₃	141	75	-	-	-
Isomalt	147	275	-	-	-
LiNO ₃ -NaNO ₃	195	252	-	-	-
40%KNO ₃ - 60%NaNO ₃	220	-	-	-	-
54%KNO ₃ - 46%NaNO ₃	220	-	-	-	-
NaNO ₃	307	172	2260	-	0.5
	308	174	2257	-	-
		199	-	-	-
KNO ₃ /KCl	320	74	2100	1.21	0.5
KNO ₃	333	266	2110	-	0.5
	336	116	-	-	-
KOH	380	149.7	2044	-	0.5
MgCl ₂ /KCl/NaCl	380	400	1800	0.96	-
AlSi ₁₂	576	560	2700	1.038	160
AlSi ₂₀	585	460	-	-	-
MgCl ₂	714	452	2140	-	-
80.5%LiF-19.5%CaF ₂ eutetic	767	790	2100/2670	1.97	1.7
NaCl	800	492	2160	-	5
	802	466.7	-	-	-
NaCO ₃ -BaCO ₃ /MgO	500-850	-	2600	-	5
LiF	850	1800 MJ/m ³	-	-	-
Na ₂ CO ₃	854	275.7	2533	-	2
KF	857	452	2370	-	-
K ₂ CO ₃	897	235.8	2290	-	2
KNO ₃ /NaNO ₃ eutetic	-	94.25	-	-	0.8

ตารางที่ 6 สารอินทรีย์ที่มีศักยภาพใช้เป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะ [18]

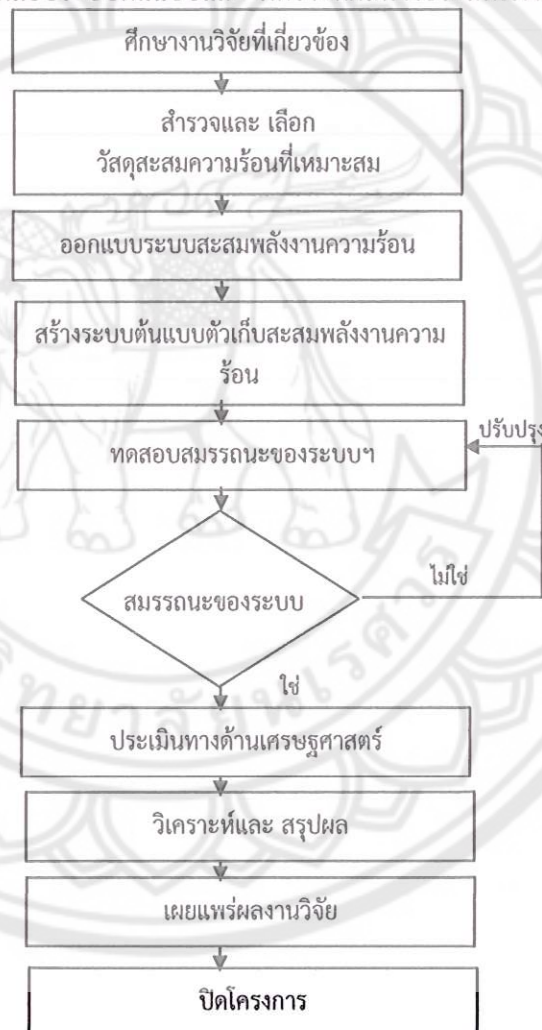
สารประกอบ	จุดหลอมเหลว (°C)	ค่าความร้อนแฝง (kJ/kg)
Isomalt ((C ₁₂ H ₂₄ O ₁₁ ·2H ₂ O)+(C ₁₂ H ₂₄ O ₁₁))	147	275
Adipic acid	152	247
Dimethylol propionic acid	153	275
Pentaerythritol	187	255
AMPL ((NH ₂) ₂ CH ₂ C(CH ₂ OH) ₂)	112	28.5
TRIS ((NH ₂) ₂ C(CH ₂ OH) ₃)	172	27.6
NPG ((CH ₂) ₂ C(CH ₂ OH) ₂)	126	44.3
PE (C(CH ₂ OH) ₄)	260	36.9

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทที่ 3 นี้ อธิบายขั้นตอนการดำเนินโครงการ การเลือกวัสดุตัวกลาง การออกแบบ สร้างและทดสอบระบบต้นแบบ

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 3 ส่วนหลักที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 7 ดังนี้ 1) การสำรวจวัสดุ และ เลือกวัสดุที่เหมาะสมกับการเก็บความร้อนของไอน้ำที่ อุณหภูมิ 270 °C ความดัน 30 bar 2) การออกแบบระบบสะสมพลังงาน 3) การสร้าง ทดสอบระบบต้นแบบและ วิเคราะห์ผลทางประสิทธิภาพและ เศรษฐศาสตร์



รูปที่ 7 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 การเลือกวัสดุตัวกลางสะสมความร้อน

การเลือกวัสดุตัวกลางสะสมความร้อนสัมผัสและ ความร้อนแฝงที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการออกแบบตัวเก็บสะสมความร้อน โดยสามารถพิจารณาจากคุณสมบัติของวัสดุได้ดังนี้

การเลือกวัสดุตัวกลางสะสมพลังงานความร้อนสัมผัส (Sensible Heat Storage Material) ให้พิจารณาจากปริมาณพลังงานความร้อน (Q) ที่วัสดุสามารถเก็บสะสมได้ โดยสามารถพิจารณาได้จากสมการด้านล่าง

$$Q = \rho \cdot \bar{c}_p \cdot V \cdot \Delta T$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ; \bar{c}_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ; V คือ ปริมาตรของวัสดุ

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ

วัสดุตัวกลางที่เหมาะสม ต้องมีค่าความจุความร้อนที่ดี หรือต้องมีค่า $(\rho \cdot \bar{c}_p)$ ที่มาก และที่สำคัญต้องมีราคาถูก อีกตัวแปรที่สำคัญในการเลือกวัสดุตัวกลาง คือ การนำความร้อนของวัสดุ ซึ่งจะเป็นตัวบอกอัตราหรือ เวลาที่ใช้ในการบรรจุและ ปลดปล่อยความร้อนออกจากวัสดุ

การเลือกวัสดุตัวกลางสะสมพลังงานความร้อนแฝง (Latent Heat Storage Material)

การเลือกวัสดุสะสมพลังงานความร้อนแฝง หรือวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material, PCM) ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุทั้งทางด้านกายภาพ เคมี เทอร์โมไดนามิกส์ และ เศรษฐศาสตร์ ในการเลือกวัสดุเปลี่ยนสถานะนั้น อุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะของวัสดุต้องเท่าหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิของการทำงานที่ต้องการ วัสดุที่เลือกต้องมีค่าความจุความร้อนสูงเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อช่วยลดขนาดของตัวเก็บสะสมความร้อน ค่าการนำความร้อนทั้งในสถานะของแข็งและ ของเหลวเป็นที่ปรารถนาเพื่อปรับปรุงบรรจุความร้อนและ กระบวนการแยกความร้อน และเพื่อให้การกระจายอุณหภูมิกงที่ภายในตัวเก็บสะสมความร้อน

3.3 การออกแบบระบบสะสมความร้อน

นอกจากการเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุตัวกลางสำหรับการเก็บสะสมความร้อนสัมผัสและ ความร้อนแฝงแล้ว เงื่อนไขอื่นๆ เช่น ปริมาณความร้อนที่ต้องการเก็บ ชนิดและรูปแบบในการเก็บความร้อน ราคา ต้นทุน รวมไปถึงข้อจำกัดทางด้านเทคนิคและ สิ่งแวดล้อม สำหรับราคาของระบบส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับวัสดุเก็บความร้อนที่นำมาใช้ ตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและ พื้นที่ในการติดตั้งระบบ

จากแนวคิดเบื้องต้นของงานวิจัย ที่ต้องการพัฒนาระบบสะสมความร้อนที่มีการนำวัสดุสะสมความร้อนแฝง และ ความร้อนสัมผัสมาใช้ร่วมกัน เพื่อเก็บความร้อนจากไอน้ำที่อุณหภูมิ 270 °C ความดัน 30 bar โดยระบบเก็บสะสมความร้อนแบบไม่ใช้พลังงาน (Passive storage system) ถูกเลือกมาใช้ในการศึกษา เนื่องจากระบบมีราคาถูก อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง การจัดหาวัสดุง่าย การลงทุนต่ำเพราะไม่ต้องใช้ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 8 ระบบประกอบด้วยกลุ่มท่อไอน้ำวางเรียงขนานกันในแนวตั้ง และถูกล้อมรอบด้วยวัสดุสะสมความร้อนสัมผัสและ วัสดุสะสมความร้อนแฝง ตามลำดับ

และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อตั้งได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q_{st} = UA \times (T_v - T_s)$$

ที่ซึ่ง T_v = อุณหภูมิไอน้ำที่บรรจุ; T_s = อุณหภูมิของวัสดุเริ่มต้น

เมื่อทราบค่า UA และ ชนิดของท่อนำความร้อนที่จะนำมาใช้แล้ว จำนวนท่อนำความร้อนที่ต้องใช้สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\frac{n}{UA} = \frac{d_o}{kA_o} + R_w + \frac{1}{h_i A_i}$$

ที่ซึ่ง n = จำนวนท่อที่ติดตั้งภายในถังเก็บ; h_i = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนพื้นที่ผิวภายในท่อ; d_o = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อกายนอก; R_w = ความต้านทานความร้อนของผนังท่อ; A_i = พื้นที่ผิวภายในท่อ k = ค่าการนำความร้อนของวัสดุเก็บความร้อน;

$$R_w = \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi L_{pipe} k_w}$$

ที่ซึ่ง r_o = รัศมีท่อกายนอก ; r_i = รัศมีท่อกายใน; L_{pipe} = ความยาวท่อ; k_w = ค่าการนำความร้อนของผนังท่อ

$$h_i = Nu \times \frac{k}{d_i}$$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ h_i สามารถหาได้จาก

กรณีที่ $\frac{L_{tube}}{d_i} \leq 0.0425 \times Re \times Pr$

$$Nu = \left[3.66^3 + 1.61^3 \cdot Re \cdot Pr \cdot \frac{d_i}{L_{tube}} \right]^{1/3}$$

กรณีอื่นๆ

$$Nu = 4.364$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน h_i สามารถหาได้จาก

$$Nu = 0.0214 \cdot (Re^{0.8} - 100) \cdot Pr^{0.4} \quad (Pr \leq 1.5)$$

$$Nu = 0.012 \cdot (Re^{0.87} - 280) \cdot Pr^{0.4} \quad (Pr > 1.5)$$

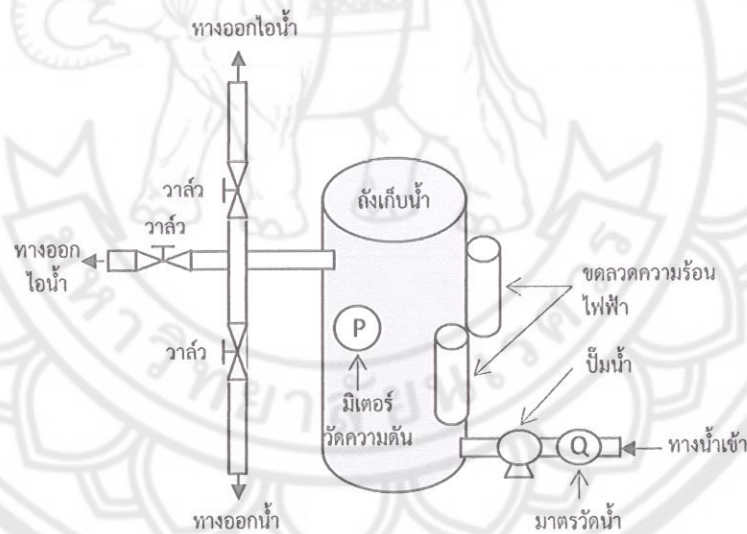
3.4 การทดสอบระบบต้นแบบ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการทดสอบระบบ 2 ระบบ คือ ระบบหม้อไอน้ำที่ใช้สำหรับผลิตไอน้ำสำหรับทดสอบระบบสะสมความร้อนต้นแบบ และ ระบบสะสมความร้อนต้นแบบ

3.4.1 หม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำ เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สำคัญสำหรับการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพระบบสะสมความร้อนต้นแบบ หม้อไอน้ำที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ ตามรูปที่ 9 และ 10 ประกอบด้วยถังเก็บน้ำ (บรรจุน้ำได้ 30 กิโลกรัม) ระบบทำความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้า (ขนาด 20 kW) และชุดควบคุมการตัดต่อขดลวดความร้อน โดยมีท่อปล่อยไอน้ำ 2 ทาง และท่อปล่อยน้ำ 1 ทาง ในขณะที่ทำการทดสอบ ได้จัดบันทึกค่าความดันและ อุณหภูมิภายในหม้อไอน้ำ รวมไปถึงอัตราการไหลของน้ำที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (มีค่าเท่ากับปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้)

การทดสอบการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำ โดยการปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดไฟฟ้าเพื่อผลิตไอน้ำจากหม้อไอน้ำที่ความดันต่างๆ กัน ดังนี้ 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.8 2.2 2.4 และ 2.6 bars (อ่านจากมิเตอร์วัดความดันของหม้อไอน้ำ) ในขณะที่สามารถปรับความดันของหม้อไอน้ำได้คงที่ค่าหนึ่ง จะทำการบันทึกอุณหภูมิภายในหม้อไอน้ำ พร้อมปล่อยไอน้ำออกเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการบันทึกปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปในหม้อไอน้ำจากมาตรวัดน้ำ



รูปที่ 9 แผนภาพชุดหม้อไอน้ำ



รูปที่ 10 ชุดหม้อไอน้ำ

3.4.2 ระบบสะสมความร้อนต้นแบบ

ระบบสะสมความร้อนต้นแบบถูกออกแบบภายใต้ข้อจำกัดของชุดผลิตไอน้ำที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ และทำการสร้างเป็นจำนวน 2 ชุด ดังนี้ ชุดที่ 1) ระบบสะสมความร้อนที่ใช้วัสดุคอนกรีตเพียงอย่างเดียวและมีขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร พร้อมชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำจากท่อทองแดงจำนวน 4 ท่อ (แต่ละท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร) และชุดที่ 2) ระบบสะสมความร้อนที่ใช้วัสดุคอนกรีตร่วมกับพาราฟิน ระบบนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนย่อย คือ ส่วนที่ 1) ถังคอนกรีตขึ้นรูปขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร พร้อมชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำจากท่อทองแดงจำนวน 4 ท่อ (แต่ละท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร) ที่อยู่ในแนวตั้ง ส่วนที่ 2) ถังเหล็กขนาดความกว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร และสูง 35 เซนติเมตร ทำหน้าที่เป็นกล่องหุ้มชั้นนอกของถังคอนกรีต โดยช่องว่างระหว่างผนังเหล็กกับผนังปูน ถูกบรรจุด้วยสารเปลี่ยนสถานะ/พาราฟิน คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตัวกลางเก็บความร้อนที่นำมาใช้สร้างระบบต้นแบบ ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตัวกลางเก็บความร้อน

คุณสมบัติทางกายภาพ	คอนกรีต	พาราฟิน ชนิดMicrocrystalline
1. ความหนาแน่น (kg/m ³)	2,200	786
2. ค่าการนำความร้อน(W/m K)	1.5	-
4. ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg K)	0.85	-
5. จุดหลอมเหลว (°C)	-	77-81
6. ค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลว (kJ/kg)	-	182

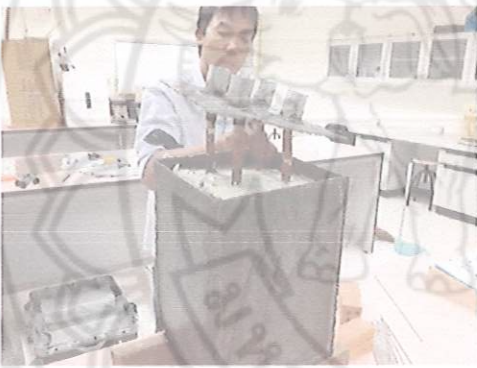
ในการสร้างระบบสะสมความร้อนทั้ง 2 ชุด ชุดที่ 1 จะถูกขึ้นรูปด้วยคอนกรีตจำนวน 2 ชุด โดยชุดแรกนำไปทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน ส่วนชุดที่ 2 นำไปบรรจุในกล่องเหล็กเพื่อบรรจุพาราฟินรอบๆ กล่องคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 11



สร้างกล่องเหล็ก



บรรจุกล่องคอนกรีตในกล่องเหล็ก



บรรจุพาราฟินในกล่องเหล็ก



ปิดฝาด้านบนของกล่องเหล็ก

รูปที่ 11 ขั้นตอนการสร้างระบบต้นแบบ

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 ระบบสะสมความร้อนสัมผัสร่วมความร้อนแฝง

จากแนวคิดเบื้องต้นของงานวิจัย ที่ต้องการพัฒนาระบบสะสมความร้อนที่มีการนำวัสดุสะสมความร้อนแฝง และ ความร้อนสัมผัสมาใช้ร่วมกัน เพื่อเก็บความร้อนจากไอน้ำที่อุณหภูมิ 270 °C ความดัน 30 bar โดยระบบเก็บสะสมความร้อนแบบไม่ใช้พลังงาน (Passive storage system) ถูกเลือกมาใช้ในการศึกษา เนื่องจากระบบมีราคาถูก อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง การจัดหาวัสดุง่าย การลงทุนต่ำเพราะไม่ต้องใช้ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ระบบเก็บความร้อนชนิดนี้ ประกอบด้วยกลุ่มท่อไอน้ำวางเรียงขนานกันในแนวตั้ง และถูกล้อมรอบด้วยวัสดุสะสมความร้อนสัมผัสและ วัสดุสะสมความร้อนแฝง ตามลำดับ

จากการสำรวจเอกสารงานวิจัย พบว่า วัสดุที่เหมาะสมสำหรับกักเก็บความร้อนสัมผัสและ ความร้อนแฝง คือ คอนกรีตและ โขี้เตียมไนเตรท ตามลำดับ เนื่องจากวัสดุ 2 ชนิดหาได้ง่าย ราคาไม่แพงและ สามารถทำงานได้ตามอุณหภูมิที่ต้องการ สำหรับการเลือกชนิดของท่อที่นำมาใช้งานจะต้องทนความดันและอุณหภูมิ ดังนั้นจึงต้องมีคุณสมบัติพิเศษ ถ้าเป็นท่อเหล็กจะต้องผสมโลหะอื่นๆ เข้าไปด้วย เช่น โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม และซิลิคอน พวกโลหะต่างๆ เหล่านี้เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ช่วยให้ท่อทนต่อการเสียดสี, ทนการกัดกร่อนและ ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงและ มีความแข็งแรงแตกต่างกันไป

การคำนวณหาขนาดของถังเก็บสะสมความร้อน (V) สามารถคำนวณได้จากสมการ $V = \frac{Q_{st}}{\rho L}$ ที่ซึ่ง Q_{st} คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องการเก็บ; L คือ ค่าความร้อนแฝงของวัสดุเก็บสะสมความร้อน; ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุเก็บ;

การคำนวณหาจำนวนท่อ (n) ที่ต้องใช้สำหรับตัวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในแนวตั้ง สามารถคำนวณจากสมการ $n = UA \cdot \left(\frac{d_o}{kA_o} + R_w + \frac{1}{h_i A_i} \right)$ ที่ซึ่ง UA คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม; d_o = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อภายนอก; k = ค่าการนำความร้อนของวัสดุเก็บความร้อน; A_i = พื้นที่ผิวภายในท่อ; A_o = พื้นที่ผิวภายนอกท่อ; R_w = ความต้านทานความร้อนของผนังท่อ; และค่า h_i สามารถหาได้จากตัวเลข Nu สำหรับของไหลที่ไหลภายในท่อแบบปั่นป่วน (อ้างอิง ในบทที่ 3)

4.2 ผลการทดสอบชุดหม้อไอน้ำ

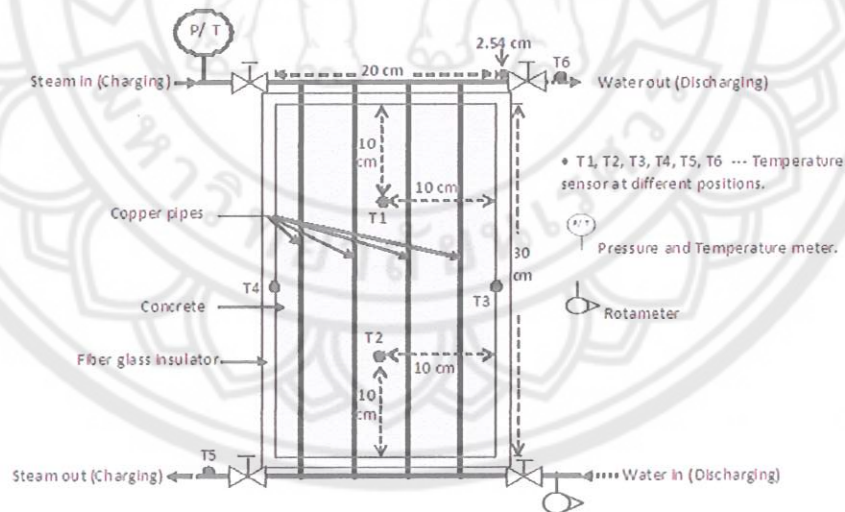
การทดสอบการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำ โดยการปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้ชุดหลอดไฟฟ้าเพื่อผลิตไอน้ำจากหม้อไอน้ำที่ความดันต่างๆ กัน ดังนี้ 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.8 2.2 2.4 และ 2.6 bars (อ่านจากมิเตอร์วัดความดันของหม้อไอน้ำ) ในขณะที่ความดันของหม้อไอน้ำคงที่ค่าหนึ่ง ทำการบันทึกอุณหภูมิภายในหม้อไอน้ำพร้อมปล่อยไอน้ำออกเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการบันทึกปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปในหม้อไอน้ำจากมาตรวัดน้ำ ผลการทดสอบการผลิตไอน้ำที่ความดันและ อุณหภูมิต่างกันแสดงในตารางที่ 8 รวมถึงผลการคำนวณปริมาณความร้อนของไอน้ำที่ผลิตได้

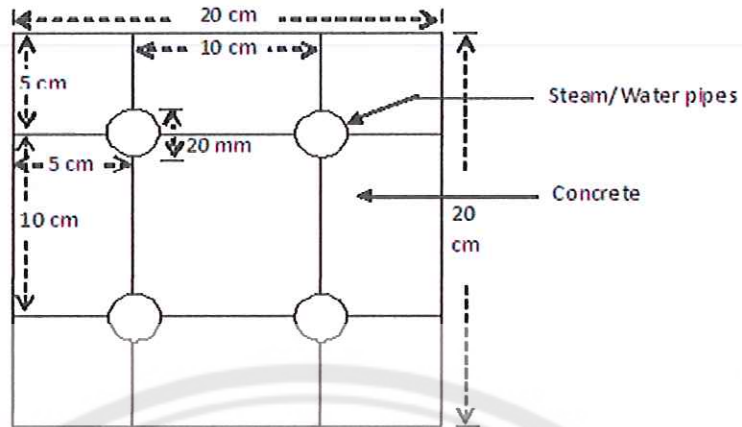
ตารางที่ 8 ผลการทดสอบการผลิตไอน้ำที่ความดันและ อุณหภูมิต่างๆ กัน

ความดันหม้อไอน้ำ (bar)	อุณหภูมิหม้อไอน้ำ (°C)	ปริมาณไอน้ำที่ 15 นาที (kg)	ปริมาณไอน้ำที่ 1 ชั่วโมง (kg)	ความร้อนจากไอน้ำ (kJ/hr)	ความร้อนจากไอน้ำ (W)
0.40	108	0.0088	0.0352	78.74	21.87
0.60	110	0.0102	0.0406	89.94	24.98
0.80	115	0.0104	0.0416	92.16	25.60
1.00	120	0.0125	0.0500	109.9	30.60
1.20	122	0.0145	0.0581	127.19	35.33
1.80	130	0.0225	0.0901	195.54	54.32
2.20	135	0.0234	0.0937	201.45	55.96
2.40	138	0.0261	0.1043	224.39	62.33
2.60	140	0.0248	0.0992	213.42	59.28

4.3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบต้นแบบ

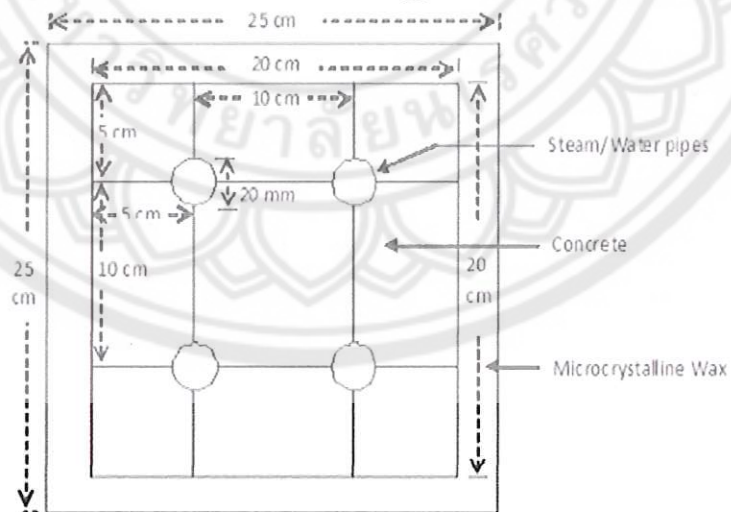
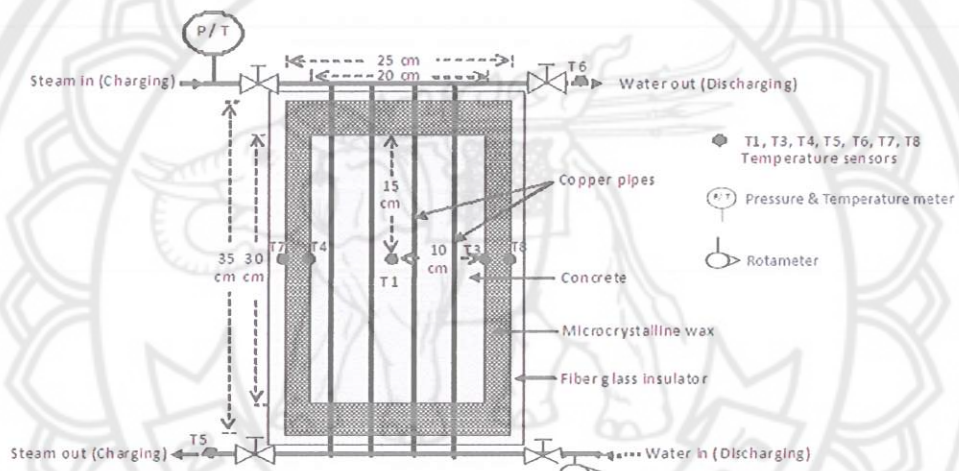
ระบบสะสมความร้อนต้นแบบถูกออกแบบภายใต้ข้อจำกัดของชุดผลิตไอน้ำที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ และทำการสร้างเป็นจำนวน 2 ชุด ดังนี้ ชุดที่ 1) ระบบสะสมความร้อนที่ใช้วัสดุคอนกรีตเพียงอย่างเดียว (รูปที่ 12) และชุดที่ 2) ระบบสะสมความร้อนที่ใช้วัสดุคอนกรีตร่วมกับพาราฟิน (รูปที่ 13) ในการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของชุดต้นแบบทั้ง 2 ชุด หัววัดอุณหภูมิ มิเตอร์ความดันและ มาตรวัดน้ำได้ถูกติดตั้งในตำแหน่งต่าง ๆ กัน (รูปที่ 12 และ 13) และ ตัวแปรทั้งหมดถูกบันทึกทุกๆ 1 นาที





Cross-section

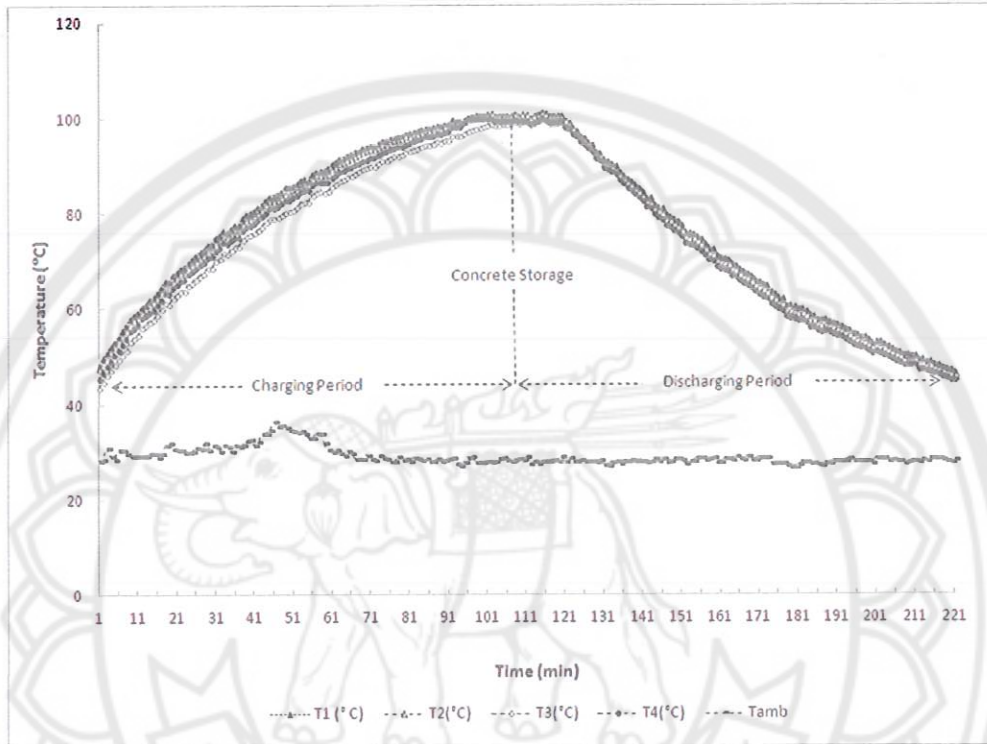
รูปที่ 12 แผนภาพระบบสะสมความร้อนที่ใช้วัสดุคอนกรีตเพียงอย่างเดียว



Cross-section

รูปที่ 13 แผนภาพระบบสะสมความร้อนที่ใช้วัสดุคอนกรีตร่วมกับพาราฟิน

ตัวเก็บสะสมความร้อนคอนกรีต (ชุดที่ 1) ได้ถูกทดสอบโดยการบรรจุความร้อนด้วยไอน้ำอันทันที่อุณหภูมิ 110 °C ความดัน 0.6 bar และปล่อยความร้อนด้วยน้ำที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (26 – 28 °C) ตัวเก็บสะสมต้นแบบนี้ ถูกทดสอบภายใต้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมระหว่าง 27 – 35 °C ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 14 ในช่วงการบรรจุความร้อน อุณหภูมิภายในถังคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและ เข้าถึง 100 °C ภายในเวลา 1 ชั่วโมง 45 นาที ในขณะที่ทำการทดสอบการปล่อยความร้อนออกจากถังเก็บคอนกรีตพบว่า อุณหภูมิภายในถังเก็บลดลงอย่างมาก และ เข้าสู่อุณหภูมิที่ 40 °C ภายในเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 14 ผลทดสอบการบรรจุและปล่อยความร้อนของตัวเก็บสะสมความร้อนคอนกรีต

ตัวเก็บสะสมร่วมระหว่างความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง (ชุดที่ 2) ได้ถูกทดสอบโดยการบรรจุและคลายความร้อน ภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 15 ในช่วงการบรรจุความร้อน อุณหภูมิภายในถังคอนกรีต (T₁) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนกระทั่งอุณหภูมิคอนกรีตเท่ากับ 100 °C กราฟแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในคอนกรีต (ชุดที่ 2) มีค่ามากกว่าถังเก็บชุดที่ 1 อาจเกิดจากการสะสมความร้อนภายในคอนกรีตและการกระจายความร้อนที่ช้าระหว่างคอนกรีตกับพาราฟิน ส่วนอุณหภูมิอื่นๆ (T₃, T₄, T₇, T₈) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกก่อนที่จะเกิดการแปรปรวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นช่วงเวลาในการเปลี่ยนสถานะของพาราฟิน (77-81 °C) ในช่วงการคลายความร้อนออกจากถังเก็บ อุณหภูมิ (T₃, T₄, T₇, T₈) ลดลงอย่างช้าเมื่อเปรียบเทียบกับถังเก็บชุดที่ 1 การลดลงของอุณหภูมิอย่างช้าอาจเกิดจากพาราฟินที่มีความจุความร้อนมากซึ่งส่งผลให้ความคุมอุณหภูมิภายในคอนกรีตได้และเหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการเก็บสะสมความร้อนของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

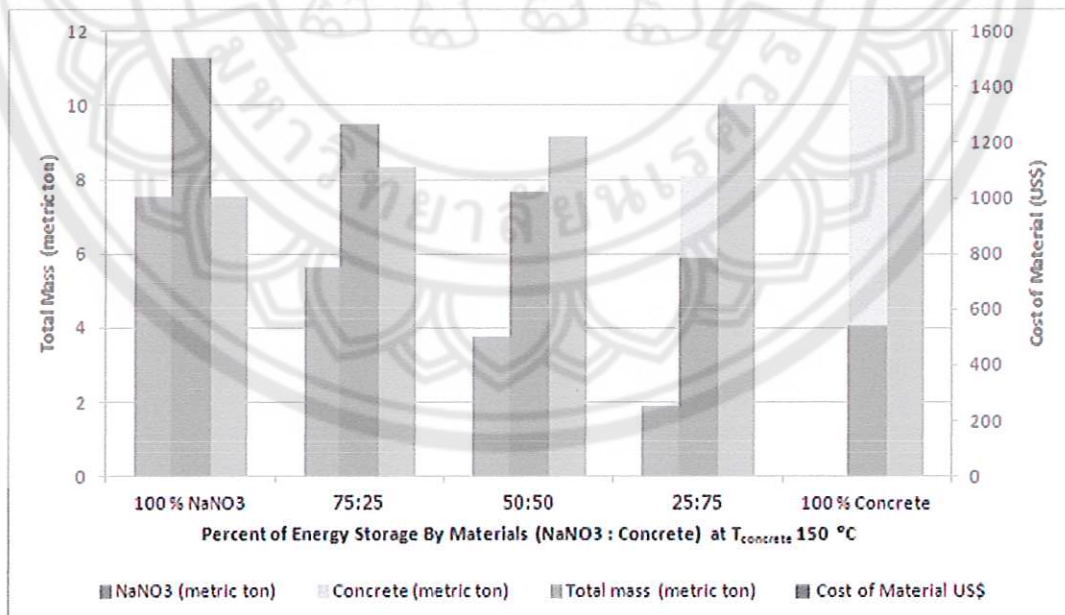
อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาที่น่าเสนอนี้มาจากการคำนวณปริมาณความร้อนสัมผัสและ ความร้อนแฝงของ วัสดุตัวกลางที่ใช้และ สมมติให้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัสดุคอนกรีตทำได้เท่ากับ 150 °C โดยไม่คำนึงถึงเวลา ในการบรรจุหรือคลายความร้อนที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับการออกแบบการถ่ายเทความร้อนภายในถังเก็บ

ตารางที่ 9 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตัวกลางเก็บความร้อน สำหรับกรณีศึกษา

วัสดุ	ความจุความร้อนจำเพาะ	จุดหลอมเหลว	ค่าความร้อนแฝง	ความหนาแน่น	ราคาวัสดุต่อ kWh	ราคาวัสดุต่อ kg	ความจุความร้อนต่อ m ³
	kJ/kg K	°C	kJ/kg	kg/m ³	US\$/kWh	US\$/kg	kWh/m ³
Concrete	0.8	-	-	2,200	1	0.05	100
NaNO ₃	-	306	172	2,261	3.6	0.2	125
			เฉลี่ย	2,230.5			

ตารางที่ 10 ตัวแปรและ ผลการคำนวณ สำหรับกรณีศึกษา

ร้อยละของวัสดุที่นำมาใช้	ปริมาณพลังงานที่สะสมของแต่ละวัสดุ		ปริมาณวัสดุที่ใช้		ปริมาณวัสดุที่ใช้รวม	ปริมาตรรวม	เงินลงทุนรวม
	NaNO ₃	Concrete	NaNO ₃	Concrete			
NaNO ₃ :Concrete	(MJ)	(MJ)	(metric ton)	(metric ton)	(metric ton)	(m ³)	US\$
100 % NaNO ₃	1296	0	7.53	0	7.53	3.38	1506.98
75:25	972	324	5.65	2.7	8.35	3.74	1265.23
50:50	648	648	3.77	5.4	9.17	4.11	1023.49
25:75	324	972	1.88	8.1	9.98	4.48	781.74
100 % Concrete	0	1296	0.00	10.8	10.80	4.84	540.00



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบปริมาณวัสดุที่ใช้ต่อการลงทุนและ มวลรวมของถังเก็บ

บทที่ 5 บทสรุปและ ข้อเสนอแนะ

จากแนวคิดเบื้องต้นของงานวิจัย ที่ต้องการพัฒนาระบบสะสมความร้อนที่มีการนำวัสดุสะสมความร้อนแฝงและ ความร้อนสัมผัสมาใช้ร่วมกัน เพื่อเก็บความร้อนจากไอน้ำที่อุณหภูมิ 270 °C ความดัน 30 bar โดยระบบเก็บสะสมความร้อนแบบไม่ใช้พลังงาน (Passive storage system) ถูกเลือกมาใช้ในการศึกษา เนื่องจากระบบมีราคาถูก อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง การจัดหาวัสดุง่าย การลงทุนต่ำเพราะไม่ต้องใช้ตัวแลกเปลี่ยนความร้อน จากการสำรวจเอกสารงานวิจัย พบว่า วัสดุที่เหมาะสมสำหรับกักเก็บความร้อนสัมผัสและ ความร้อนแฝง คือ คอนกรีตและ โซเดียมไนเตรท ตามลำดับ เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาไม่แพงและ สามารถทำงานได้ตามอุณหภูมิที่ต้องการ สำหรับการออกแบบท่อภายในสามารถประยุกต์ใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของตัวแลกเปลี่ยนความร้อนได้

ต้นแบบถังเก็บสะสมความร้อนร่วมระหว่างความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง ได้ถูกสร้างและ ทดสอบ ผลการทดสอบพบว่า การประยุกต์ใช้ วัสดุสะสมพลังงานสัมผัส (คอนกรีต) ล้อมรอบด้วยวัสดุสะสมพลังงานแฝง (พาราฟิน) สามารถกักเก็บและคลายความร้อนได้ อีกทั้งยังสามารถควบคุมการแปรปรวนของอุณหภูมิของวัสดุสะสมพลังงานสัมผัสได้ในคลายความร้อนของถังเก็บ ทำให้อุณหภูมิของน้ำ/ไอน้ำ ขาออกมีค่าคงที่ ซึ่งเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการเก็บสะสมความร้อนของโรงไฟฟ้าไอน้ำแสงอาทิตย์ จากการศึกษาและเปรียบเทียบการลงทุนของวัสดุตัวกลางกับปริมาตรของระบบที่ได้ พบว่า การเพิ่มปริมาณวัสดุสะสมความร้อนสัมผัสและ ปรับลดปริมาณวัสดุสะสมความร้อนแฝง ทำให้ราคาในการลงทุนลดลง แต่ปริมาตรของระบบจะเพิ่มขึ้น

เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือทดสอบ (หม้อผลิตไอน้ำ มีขนาดเล็ก) และงบประมาณ ทำให้ไม่สามารถสร้างตัวเก็บสะสมความร้อนสูงได้ตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ ดังนั้นระบบต้นแบบที่ได้จึงมีขนาดเล็กและ มีความซับซ้อนน้อย ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากระบบต้นแบบจึงไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อสะท้อนให้ทราบถึงความคุ้มค่าในระบบขนาดใหญ่ได้ อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้ศึกษามาเบื้องต้น ทั้งข้อมูลการเลือกชนิดวัสดุเก็บสะสมความร้อน รูปแบบในการเก็บสะสมความร้อน และ วิธีการออกแบบตัวแลกเปลี่ยนความร้อน จะเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาระบบสะสมความร้อนสูงต่อไป

ข้อเสนอแนะสำหรับโครงการวิจัย มีดังนี้

- ระบบสะสมความร้อนสัมผัสร่วมความร้อนแฝงที่น่าเสนอ ไม่ได้คำนึงถึงการเพิ่มค่าการนำความร้อนของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ดังนั้นการค้นหาวัดหรือ วิธีการที่สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากถังเก็บจึงเป็นหัวข้อหนึ่งที่น่าสนใจในการทำวิจัยต่อไป
- การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของระบบสะสมความร้อนสัมผัสร่วมความร้อนแฝงยังเป็นหัวข้อวิจัยที่น่าสนใจ