



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์เก็บรักษาลังงานโดยใช้หลักการดูดซับทางเคมี
Development of an energy storage prototype based on chemisorption technique

โดย วิภาวดี วงษ์สุวรรณ

มิถุนายน 2551

สัญญาเลขที่ MRG4780154

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์เก็บรักษาพลังงานโดยใช้หลักการดูดซับทางเคมี
Development of an energy storage prototype based on chemisorption technique

ผู้วิจัย สังกัดภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและ
สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. และ สกอ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้ดำเนินการได้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ด้วยการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ผู้วิจัยจึงขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณท่านเมธีวิจัย ศาสตราจารย์ ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ ที่ได้ให้คำแนะนำ การชี้แนะแนวทาง และคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ ตลอดระยะเวลาการทำโครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณทางครอบครัวผู้วิจัยที่ทำให้กำลังใจตลอดการดำเนินงานจนแล้วเสร็จ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ สกว. ทุกท่านที่เอาใจใส่ติดตามความก้าวหน้าโครงการวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบใจ นายอดิพงษ์ นันทพันธ์ นางสาวกันทิมา เอี่ยมมาก นายตะวัน รุ่งพิบูลย์โสภีษฐ์ นายวิโรจน์ ฤทธิ์ทอง นางสาวกัญยาพร ไชยวงศ์ นางสาววาสนา คำโอภาส นางสาวศนิษา วงศ์สวัสดิ์ นางสาวสุวัฒนา วปีนันทน์ และนางสาวโสฬส สมยศ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางเทคนิคในการประกอบอุปกรณ์ทดสอบจนกระทั่งแล้วเสร็จ

สุดท้ายนี้ หากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขอภัยในข้อบกพร่องและความผิดพลาดนั้น และหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเกิดประโยชน์ต่อทุกท่านที่สนใจ ตลอดจนเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบเก็บรักษาพลังงานต่อไป

วิภาวดี วงษ์สุวรรณ

มิถุนายน 2551

บทคัดย่อ

Project Code: MRG4780154

Project Title: การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์เก็บรักษาพลังงานโดยใช้หลักการดูดซับทางเคมี

Investigator: วิภาวดี วงษ์สุวรรณ สังกัดภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

E-mail Address: Vibhavavdee@yahoo.com, Wipawadee@dome.eng.cmu.ac.th

ระบบเก็บรักษาพลังงานแบบเคมี (MCES) เป็นระบบดูดซับทางเคมีที่ใช้คู่สารทำงานโซเดียมซัลไฟด์และน้ำ ได้รับการพัฒนาการออกแบบให้อยู่ในรูปแบบโมดูลที่กะทัดรัด และประกอบด้วยปฏิกิริยาหรือส่วนดูดซับ ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นในชุดเดียวกัน ระบบได้รับทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สะสมและเก็บรักษาพลังงานความร้อนทิ้งเปล่า ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะระบบ ได้แก่ อุณหภูมิการทำระเหย อุณหภูมิแหล่งความร้อน ส่วนผสมกับเกลือโซเดียมซัลไฟด์ในการขึ้นรูปแทนปฏิกิริยาในปฏิกิริยา ได้แก่ แกรไฟต์แบบธรรมดาและแบบนำความร้อน คาร์บอนไฟเบอร์ แป้งมัน และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ การทดสอบแสดงว่าสารผสมทั้งหมดทำให้ขึ้นรูปแทนปฏิกิริยาได้ดีขึ้น แทนปฏิกิริยามีค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น และระบบ MCES มีสัมประสิทธิ์สมรรถนะเพื่อการทำความร้อน (COP_h) ระหว่าง 1.00 – 3.47 ในขณะที่ความสามารถในการเก็บรักษาพลังงานความร้อนสูง คือ พลังความร้อนจำเพาะ (SHP) 2,254 W/kg และการจ่ายพลังงานความร้อนต่อปริมาตร (VHP) 7,896 kWh/m³ สำหรับการวิจัยภาคทฤษฎีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ MCES ได้รับการแก้ปัญหาโดยการโปรแกรมในคอมพิวเตอร์และเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลทดสอบจริงพบว่าแบบจำลองสามารถใช้งานได้ดี

Keywords: Modular Chemical Energy Storage, Solid Adsorption, Sodiumsulphide-water, Thermal energy storage, Experimental study

Abstract

Project Code: MRG4780154

Project Title: Development of an energy storage prototype based on chemisorption technique

Investigator: Wipawadee Wongsuwan, Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering, Chiang Mai University

E-mail Address: Vibhavavdee@yahoo.com, Wipawadee@dome.eng.cmu.ac.th

Modular Chemical Energy Storage (MCES) based on chemisorption, using sodiumsulphide-water working pair, was developed its design as module. It was compacted and composed of reactor or adsorber, evaporator and condensor. The system was tested in a laboratory to guideline its application for waste heat energy storage. The variables that influence system performance were evaporation temperature, heat source temperature, and binder of sodiumsulphide salt, to consolidate reactive bed in the reactor e.g. conventional and conductive graphite, carbon fibre, organic starch, and calcium-hydroxide. The tested results showed that these substances could enhance better reactive bed consolidation. The reactive bed would have higher thermal conductivity. The MCES system had coefficient of performance of heating (COP_h) between 1.00 – 3.47, and its energy storage capacity was increased; specific heating power (SHP) about 2,254 W/kg and volumetric heat production (VHP) about 7,896 kWh/m³. In theoretical study, the mathematical model of MCES was solved by computer programming. The simulated results were validated with tested results. It was found that the model is well applicable.

Keywords: Modular Chemical Energy Storage, Solid Adsorption, Sodiumsulphide-water, Thermal energy storage, Experimental study

สารบัญ

หน้าปก	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อ	ง
Abstract	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
รายการสัญลักษณ์และอักษรย่อ	ต

บทที่ 1	บทนำ	
1.1	ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา	1-1
1.2	วัตถุประสงค์	1-3
1.3	ขอบเขตของการวิจัย	1-3
1.4	ระเบียบวิธีวิจัย	1-4
บทที่ 2	วรรณกรรมวิจัย	
2.1	ประเภทของระบบเก็บสะสมพลังงาน	2-1
2.2	กลไกการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานทางเคมี	2-2
2.3	คู่มือการทำงาน	2-6
2.4	ปัจจัยที่มีผลต่อการเก็บสะสมพลังงาน	2-8
2.5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	2-9
	2.5.1 สมมติฐานการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	2-9
	2.5.2 สมดุลความร้อน	2-10
	2.5.3 สมดุลจลนศาสตร์	2-11
	2.5.3 สมดุลมวลสาร	2-11
	2.5.5 การแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	2-12
2.6	การใช้ประโยชน์ระบบเก็บรักษาพลังงาน	2-13
2.7	สรุปเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2-22

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
บทที่ 3	ระเบียบวิธีวิจัย	
3.1	ระบบทดสอบเก็บสะสมพลังงานแบบเคมี MCES 1	3-1
3.1.1	ภาพแสดงระบบ MCES 1	3-1
3.1.2	สารเคมี	3-9
3.1.3	เครื่องมือวัด	3-10
3.1.4	อุปกรณ์ประกอบ	3-11
3.1.5	การออกแบบการทดลองระบบ MCES 1	3-13
3.1.6	การทดสอบระบบ MCES 1 เบื้องต้น	3-14
3.1.7	ขั้นตอนการทดลองระบบ MCES 1	3-16
3.1.8	การวิเคราะห์ผลการทดสอบระบบ MCES 1	3-18
3.2	ระบบทดสอบเก็บสะสมพลังงานแบบเคมี MCES 2	3-18
3.2.1	แนวคิดการขึ้นรูปแท่นปฏิกิริยา	3-18
3.2.2	องค์ประกอบแท่นปฏิกิริยา (Reactive bed consolidation)	3-19
3.2.3	ขั้นตอนการเตรียมทดสอบระบบ MCES 2	3-20
3.2.4	อุปกรณ์ประกอบระบบ MCES 2	3-21
3.2.5	การออกแบบการทดลองระบบ MCES 2	3-22
3.2.6	ขั้นตอนการทดสอบระบบ MCES 2	3-26
3.3	การทดสอบชุดแลกเปลี่ยนความร้อนของส่วนทำระเหย	3-27
บทที่ 4	ผลการทดสอบและวิเคราะห์ระบบ MCES	
4.1	ระบบทดสอบ MCES 1	4-1
4.1.1	อุณหภูมิ	4-1
4.1.2	พลังงานของปฏิกิริยา	4-9
4.2	ระบบทดสอบ MCES 2	4-21
4.2.1	ผลการทดสอบการขึ้นรูปแท่นปฏิกิริยา (Reactive bed consolidation)	4-21
4.2.2	ผลการใช้กราฟไฟต์ชนิดค่าการนำความร้อนสูง (SGL Conductive Graphite)	4-22

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	4.2.3 การปรับปรุงกรรมวิธีการขึ้นรูปโดย Binder และ Additives	4-25
	4.2.4 ขั้นตอนการขึ้นรูป Reactive bed	4-27
	4.2.5 ผลของการเติม Additive (แคลเซียมไฮดรอกไซด์)	4-27
	4.2.6 ผลการทดสอบวัฏจักรทำงานของ MCES 2	4-29
4.3	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของส่วนทำระเหย	4-34
	4.3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่วนทำระเหย	4-34
	4.3.2 อุณหภูมิบรรยากาศ อุณหภูมิส่วนทำระเหย กับอัตราการไหล	4-35
	4.3.3 ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่สภาวะคงตัว	4-36
	4.3.4 สรุปผลการวิเคราะห์ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน	4-36
4.4	กรณีศึกษาการใช้ MCES กับระบบโรงงานอุตสาหกรรม	4-39
บทที่ 5	การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	
	5.1 แนวคิด	5-1
	5.2 สมมติฐาน	5-1
	5.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	5-4
	5.4 การเปลี่ยนแปลงพลังงาน	5-4
	5.5 การเปลี่ยนแปลง Degree of Advancement	5-7
	5.6 การวิเคราะห์ความไวของตัวแปร	5-7
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัย	
	6.1 สรุปผลการวิจัย	6-1
	6.1.1 ระบบ MCES 1	6-1
	6.1.2 ระบบ MCES 2	6-4
	6.1.3 ชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับส่วนทำระเหยของระบบดูดซับทางเคมี	6-5
	6.2 แนวทางการทำวิจัยต่อไป	6-6
	เอกสารอ้างอิง	7-1
	ภาคผนวก	7-7

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อมูลเปรียบเทียบระบบเก็บพลังงานทางเคมีที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาในแต่ ละคู่สาร	2-8
2.2	ข้อดีข้อด้อยของการสะสมพลังงานแบบต่าง ๆ	2-9
3.1	สภาวะและช่วงการทำงานที่ใช้ในการออกแบบการทดสอบระบบดูดซับ	3-13
4.1	ความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องทำระเหย	4-11
4.2	ความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารถ่ายโอนความ ร้อนในช่วง Desorption	4-14
4.3	ความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดและอัตราส่วนของสารผสม	4-18
4.4	ความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการทำปฏิกิริยาดูด ซับเคมี	4-20
4.5	กรณีทดสอบการผสม Binder และ Additives กับเกลือโซเดียมซัลไฟด์	4-26
4.6	ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว	4-38
4.7	ผลการประยุกต์ระบบ MCES เพื่อเก็บรักษาพลังงานในกรณีศึกษาระบบ โรงงานอุตสาหกรรม	4-40
5.1	เปรียบเทียบ ค่า COP_h และ SHP จากการทดสอบและแบบจำลอง	5-5
5.2	สรุปเปรียบเทียบค่า COP และ ค่าการเก็บพลังงานของงานวิจัยต่าง ๆ	5-6

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของ Huang <i>et al.</i> (2004)	2-2
2.2	แผนภูมิ Clausius-Clapeyron	2-5
2.3	ลักษณะของการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง (Bach, 2001)	2-6
2.4	การบรรจุสารทำงานในเครื่องดูดซับ (Bach, 2001)	2-7
2.5	ภาพแสดงระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (a) ระบบขณะเก็บสะสมพลังงาน (b) ระบบขณะจ่ายความร้อน (1) ปฏิกรณ์ MgO และ (2) ถังเก็บน้ำซึ่งเป็นสารทำงาน	2-13
2.6	แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบของระบบเก็บรักษาพลังงานแบบความร้อนเคมีและระบบทำความเย็นแบบอัดไอ โดยอาศัยพลังงานรังสีอาทิตย์สำหรับอาคารที่พักอาศัย	2-14
2.7	อุปกรณ์เก็บรักษาพลังงานแบบ Modular ที่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ	2-15
2.8	ภาพอย่างง่ายของโมดูลเครื่องดูดซับแบบพื้นฐานออกแบบโดย Tamainot-Telto และ Critoph (2003)	2-16
2.9	ภาพอย่างง่ายของโมดูลแบบที่มีครีป	2-17
2.10	ภาพถ่ายแสดงโมดูลต้นแบบ	2-17
2.11	ภาพต้นแบบระบบดูดซับแบบคู่ (Tamainot –Telto and Critoph, 2003)	2-18
2.12	แผนภาพกระบวนการ Chemical Heat Transformer (Haije <i>et al.</i> , 2002)	2-19
2.13	ลักษณะครีปที่เคลือบด้วย Epoxy ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Bach, 2001)	2-19
2.14	ภาพอย่างง่ายของโมดูล เครื่องดูดซับ/เครื่องทำระเหย/เครื่องควบแน่น	2-20
2.15	การออกแบบต่อเชื่อมโมดูลชุดดูดซับ	2-21
3.1	ภาพอย่างง่ายแสดงการติดตั้งชุดทดสอบ MCES 1	3-2
3.2	ภาพถ่ายแสดงการติดตั้งชุดทดสอบ MCES 1	3-2
3.3	อุปกรณ์หลักของชุดทดสอบ คือ 1) ปฏิกรณ์ 2) เครื่องควบแน่น และ 3) เครื่องทำระเหย	3-3
3.4	แผนภาพแสดงตำแหน่งวาล์วของระบบ MCES 1	3-3
3.5	ภาพอย่างง่ายแสดงลักษณะของส่วนปฏิกรณ์	3-6
3.6	การติดตั้งปฏิกรณ์ในถังสารถ่ายเทความร้อน	3-6
3.7	ภาพถ่ายส่วนปฏิกรณ์ที่หุ้มฉนวนแล้ว	3-7
3.8	ภาพแสดงภายในของถังสารถ่ายเทความร้อน	3-7

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.9	ภาพแสดงเครื่องควบแน่น	3-7
3.10	ภาพถ่ายแสดงการติดตั้งเครื่องควบแน่น	3-8
3.11	ภาพตัดขวางแสดงเครื่องทำระเหย	3-8
3.12	ภาพแสดงการติดตั้งเครื่องทำระเหย	3-8
3.13	ภาพถ่ายแสดงการติดตั้งเครื่องทำระเหย	3-9
3.14	สารโซเดียมซัลไฟด์ไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S} \cdot x\text{H}_2\text{O}$)	3-9
3.15	แกรไฟต์ (Graphite)	3-10
3.16	เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber)	3-10
3.17	ชุดเก็บบันทึกข้อมูล	3-11
3.18	เกจวัดความดัน	3-11
3.19	ปั๊มสุญญากาศ	3-12
3.20	ลักษณะของปฏิกรณ์	3-17
3.21	การติดตั้งปฏิกรณ์เข้ากับระบบ	3-17
3.22	ภาพอย่างง่ายแสดงลักษณะของระบบทดสอบ MCES 2	3-23
3.23	ภาพถ่ายแสดงระบบ MCES 2	3-24
3.24	ภาพถ่ายแสดงระบบพร้อมระบบคอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูล	3-24
3.25	ภาพถ่ายแสดงองค์ประกอบของ MCES 2 (ก) ปฏิกรณ์ (ข) วาล์ว (ค) ส่วนทำระเหย/ควบแน่น	3-25
3.26	ภาพถ่ายแสดง Data logger	3-25
3.27	ภาพด้านบนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องทำระเหย	3-29
3.28	ภาพด้านหน้าของเครื่องทำระเหย	3-29
3.29	ภาพสามมิติจากออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องทำระเหย	3-30
3.30	ภาพถ่ายด้านหน้าของชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับส่วนทำระเหย	3-30
3.31	ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์วัดและบันทึกข้อมูลการทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	3-31
3.32	ภาพถ่ายท่อความร้อนสำหรับทดสอบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	3-31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	การกระจายของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของปฏิกรณ์ตลอดช่วงการทดสอบ	4-1
4.2	การกระจายของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของปฏิกรณ์ในช่วง Adsorption	4-2
4.3	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารดูดซับตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิเครื่องทำระเหย 45, 50 และ 60 °C, สารถ่ายโอนความร้อนช่วง Desorption 80 °C	4-6
4.4	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงการเกิดปฏิกิริยาเคมี อุณหภูมิเครื่องทำระเหย 45, 50 และ 60 °C สารถ่ายโอนความร้อนช่วง Desorption 80 °C	4-6
4.5	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารดูดซับตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิของสารถ่ายโอนความร้อนช่วง Desorption 80, 90 และ 100 °C เครื่องทำระเหย 50 °C	4-7
4.6	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารดูดซับตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อผสมเส้นใยคาร์บอนที่อัตราส่วนต่าง ๆ และแกรไฟต์ ที่ 30 % อุณหภูมิเครื่องทำระเหย 50 °C และ อุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อนช่วง Desorption 80 °C	4-7
4.7	เปรียบเทียบอุณหภูมิสารดูดซับตลอดช่วงการทดสอบ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 30 และ 60 นาที อุณหภูมิเครื่องทำระเหย 50 °C และอุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อนช่วง Desorption 80 °C ผสมเส้นใยคาร์บอน 30 %	4-8
4.8	การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นในปฏิกรณ์ตลอดช่วงการทดสอบ	4-9
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิเครื่องทำระเหย 45 °C	4-12
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิเครื่องทำระเหย 50 °C	4-12
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิเครื่องทำระเหย 60 °C	4-13
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อน 80 °C	4-14
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อน 90 °C	4-14
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อน 100 °C	4-15
4.15	การเปลี่ยนแปลงพลังงานตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดและอัตราส่วนของสารผสม	4-16

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อใช้สารผสมแกรไฟต์ 30 %	4-16
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อใช้สารผสมเส้นใยคาร์บอน 10 %	4-17
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อใช้สารผสมเส้นใยคาร์บอน 20 %	4-17
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อใช้สารผสมเส้นใยคาร์บอน 30 %	4-17
4.20	การเปลี่ยนแปลงพลังงานตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการปฏิบัติกริยาเคมี	4-19
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที กรณีใช้สารผสมเส้นใยคาร์บอน 30 %	4-19
4.22	ความสัมพันธ์อย่างต่อเนื่องระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนของระบบดูดซับ	4-20
4.23	ค่า COP_h และ SHP ของทุกชุดการทดสอบ	4-21
4.24	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่นสารดูดซับ (เกลือผสมกับกราไฟต์แบบธรรมดา)	4-22
4.25	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างระหว่างตำแหน่งภายในแท่นดูดซับ บน-กลาง-ล่าง และระหว่างแหล่งความร้อนกับอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นสารดูดซับ	4-24
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นสารดูดซับ กรณีผสมกับกราไฟต์ต่างชนิดกัน	4-25
4.27	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่นปฏิกิริยาที่ผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์	4-28
4.28	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิปฏิกิริยาระยะ Regeneration ของ MCES 2	4-30
4.29	กราฟการเปลี่ยนอุณหภูมิเครื่องทำความเย็นของ MCES 2 ที่อุณหภูมิทำความเย็น 50 °C	4-32
4.30	กราฟการเปลี่ยนอุณหภูมิปฏิกิริยาของ MCES 2 ที่อุณหภูมิ Desorption 95 °C	4-32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.31	กราฟการเปลี่ยนอุณหภูมิเครื่องทำระเหยของ MCES 2 ที่อุณหภูมิน้ำร้อนส่วนทำระเหยเริ่มต้น 60 °C	4-33
4.32	กราฟการเปลี่ยนอุณหภูมิปฏิกรณ์ของ MCES 2 ที่อุณหภูมิ Desorption 85 °C	4-33
4.33	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยกับเวลาที่อัตราการจ่ายความร้อนต่างกัน ที่ระดับพัลลวม 30% voltage regulator	4-35
5.1	ลำดับการประมวลผล กระบวนการดูดซับสาร	5-3
5.2	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารดูดซับจากการทดสอบเปรียบเทียบกับแบบจำลอง	5-4
5.3	การเปลี่ยนแปลงพลังงานจากการทดสอบเปรียบเทียบกับแบบจำลอง	5-5
5.4	การเปรียบเทียบ COP และ SHP จากการทดสอบและแบบจำลอง	5-6
5.5	การเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนคู่สารทำงาน (Degree of Advancement) ที่เกิดขึ้น	5-7
5.6	ผลวิเคราะห์ร้อยละที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเครื่องทำระเหย อุณหภูมิช่วง Desorption สัดส่วนสารผสม และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะของระบบ (COP)	5-9
5.7	ผลวิเคราะห์ร้อยละที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเครื่องทำระเหย อุณหภูมิช่วง Desorption สัดส่วนสารผสม และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าการเก็บพลังงานจำเพาะ (SHP)	5-9

รายการสัญลักษณ์และอักษรย่อ

A	พื้นที่ผิวของผนังปฏิกรณ์ (m^2)
$C_{p,b}$	ค่าความร้อนจำเพาะของสารผสม (J/g.K)
$C_{p,m}$	ค่าความร้อนจำเพาะของโลหะ (J/g.K)
$C_{p,o}$	ค่าความร้อนจำเพาะของสารถ่ายโอนความร้อน (J/g.K)
$C_{p,s}$	ค่าความร้อนจำเพาะของโซเดียมซัลไฟด์ (J/g.K)
$C_{p,w}$	ค่าความร้อนจำเพาะของสารทำงาน (J/g.K)
E_a	พลังงานกระตุ้นของการดูดซับสาร (J/mol)
E_d	พลังงานกระตุ้นของการคายสาร (J/mol)
ΔH_r	ความร้อนจากปฏิกิริยาดูดซับเคมี (J/kg)
k	ค่าการนำความร้อน (W/m.K)
$k_{0,a}$	ค่าคงที่ในกระบวนการดูดซับสาร (s^{-1})
$k_{0,d}$	ค่าคงที่ในกระบวนการคายสาร (s^{-1})
m_b	มวลของสารผสม (g)
m_m	มวลของโลหะปฏิกรณ์ (g)
m_s	มวลของโซเดียมซัลไฟด์ (g)
$\dot{m}_o$	อัตราการไหลของสารถ่ายโอนความร้อน (g)
$\dot{m}_w$	อัตราการไหลของสารทำงาน (g)
M_a	อันดับการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับสาร
M_d	อันดับการเกิดปฏิกิริยาการคายสาร
M_{adb}	มวลรวมของสารดูดซับ (g)
MX	สารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาเคมี คือ $Na_2S \cdot 9H_2O$
n_1, n_2	จำนวนโมลของสารที่ใช้ทำปฏิกิริยา (mol)
n_s	จำนวนโมลของโซเดียมซัลไฟด์ (mol)
n_g	อัตราการไหลของสารทำงาน (g/s)
R	ค่าคงที่ของก๊าซ (8.31434 J/g.K)
s	ความหนาของผนังปฏิกรณ์ (m)
ΔS	ผลต่างเอนโทรปีของการเปลี่ยนสถานะ (J /mol.K)
t_{ads}	ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี (s)

รายการสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

T_c	อุณหภูมิสารดูดซับเริ่มต้น (K)
T_i	อุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อนเริ่มต้น (K)
T_e	อุณหภูมิเครื่องทำระเหย (K)
T_o	อุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อน (K)
T_s	อุณหภูมิสารดูดซับ (K)
COP_h	สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงานของระบบดูดซับ
Q_{ads}	พลังงานจากกระบวนการดูดซับทางเคมี (J)
Q_{des}	พลังงานที่ใช้กระบวนการคายสาร (J)
Q_{con}	พลังงานจากการควบแน่นของสารทำงาน (J)
Q_{cool}	พลังงานจากกระบวนการหล่อเย็น(J)
SHP	ค่าการเก็บพลังงานจำเพาะ (W/kg _{adb})
VHP	ค่าการเก็บพลังงานจำเพาะ (kWh/m ³)
x	สัดส่วนระหว่างสารทำงานกับสารดูดซับ (kg/kg)

ตัวห้อย

adb	adsorbent
ads	adsorption
b	binder
c	constraint
des	desorption
eq	equilibrium
g	gas
h	high
i	initial
l	low
m	metal
o	oil
r	reaction
s	salt

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ปัญหาที่ทำการวิจัย และความสำคัญของปัญหา

โรงงานอุตสาหกรรมและอาคารขนาดใหญ่ ล้วนต้องการระบบผลิตและระบบส่งจ่าย ความร้อน การส่งความร้อนจะใช้ของไหลแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนมากอยู่ในรูปอากาศร้อน จากเตาเผา ไอน้ำที่ผลิตจากหม้อไอน้ำ และน้ำร้อนจากหม้อต้มน้ำ โดยระบบผลิตความร้อน มักจะมีก๊าซไอเสีย น้ำร้อนที่เหลือใช้ คอนเดนเสท และโบล์วดาวนปล่อยทิ้งออกมาด้วย ของไหล ร้อนที่ปล่อยทิ้งเหล่านี้ยังมีพลังงานเหลืออยู่ หรือที่เรียกว่าแหล่งความร้อนทิ้งเปล่า (Waste heat source) การนำพลังงานจากแหล่งนี้มาใช้ ทำได้โดยติดตั้งระบบดึงกลับความร้อนทิ้งเปล่า (Waste heat recovery) ในลักษณะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ ยกตัวอย่าง เครื่อง อุ่นอากาศร้อนโดยใช้ความร้อนจากก๊าซไอเสีย และเครื่องอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ (วิทยา และ ทนงเกียรติ, 2539; สุนทร และคณะ, 2546)

หากช่วงเวลาปล่อยทิ้งความร้อน กับการใช้พลังงานในระบบอื่นๆในบริเวณใกล้เคียง ไม่ใช้ระยะเวลาเดียวกัน การสะสมพลังงานไว้ในระบบเก็บรักษาพลังงาน (Energy storage system) จึงเป็นสิ่งจำเป็น สถานการณ์ที่การปล่อยทิ้งพลังงานไม่ต่อเนื่อง โดยมีระบบแวดล้อมที่ ต้องการใช้พลังงานในระยะเวลาที่ต่างไป มักจะพบในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาด เล็กในประเทศไทย โดยเฉพาะอุตสาหกรรมด้านอาหารและการเกษตร หรือแม้แต่โรงแรมและ โรงพยาบาล

ระบบการนำความร้อนทิ้งเปล่ากลับมาใช้ประเทศไทย ส่วนมากจะออกแบบเป็นอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน โดยแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวกับของเหลว หรือ ระหว่าง ก๊าซกับของเหลว หากต้องการเก็บรักษาพลังงานก็มักอาศัยการสะสมในรูปความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage) เช่น ถังเก็บน้ำร้อน อย่างไรก็ตามอาจสะสมในรูปความร้อนแฝงของ การเปลี่ยนสถานะด้วยเทคโนโลยีทางเลือกอื่นๆ ได้แก่ ระบบสะสมพลังงานแบบใช้สารที่มีการ เปลี่ยนสถานะ (Phase change material) หรืออาศัยพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีแบบอ่อน ๆ ระหว่างของเหลวกับก๊าซ เช่น ระบบดูดซึม (Absorption system) และระหว่างของแข็งกับก๊าซ อาทิ ระบบดูดซับทั้งแบบกายภาพและแบบเคมี (Physisorption/ Chemisorption system) ซึ่ง การติดตั้งใช้งานส่วนใหญ่จะพบในเทคโนโลยีของต่างประเทศ และยังไม่ได้มีการนำมาใช้ ประโยชน์เท่าใดนักในประเทศไทย แม้ว่าจะมีงานวิจัยด้านนี้บ้างในประเทศไทย (เกศนที, 2545; ทนงเกียรติ และคณะ, 2541; ทนงเกียรติ และคณะ, 2545; Kiatsiriroat et al., 2001, 2003; Tiansuwan et al., 1995, 1997)

จากการพิจารณาระบบทั้งหลายในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ระบบทางเลือกที่ น่าสนใจมากคือระบบดูดซับทางเคมี ซึ่งความร้อนจะสะสมได้นานและการสูญเสียน้อย ระบบดูด ซับสามารถใช้เป็นแหล่งความร้อนต่อเนื่องสำหรับระบบอื่นๆ และยังใช้ทำความเย็นโดยอาศัย

การระเหยของสารทำงานที่เครื่องทำระเหยได้ด้วย ระบบนี้เหมาะสมต่อการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมเกษตรหรือโรงแรม ที่ส่วนใหญ่ต้องการการทำความร้อนแบบไม่ต่อเนื่อง และต้องการการทำความเย็นร่วมด้วย

ระบบเก็บรักษาพลังงานแบบดูดซับมีคู่สารดูดซับกับสารทำงานที่หลากหลาย สามารถเลือกนำมาใช้ให้เหมาะสมกับระดับอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่ต้องการ ระบบนี้ประกอบด้วย (1) เครื่องดูดซับ (หรือปฏิกิริยา) ที่ภายในบรรจุของแข็งที่ดูดซับก๊าซของสารทำงานไว้ในสมดุลระหว่างของแข็งและก๊าซ (2) เครื่องทำระเหยสารทำงานและ (3) เครื่องควบแน่นสารทำงาน ซึ่งภายในมีสารทำงานในสภาวะสมดุลของเหลวและก๊าซอยู่ ความร้อนที่สะสมภายในวัฏศูดูดซับอยู่ในรูปพลังงานเคมีที่รอการปลดปล่อยออกมาเป็นความร้อนเมื่อต้องการใช้งาน ระบบสะสมความร้อนแบบเคมีมีความจุในการสะสมพลังงานสูง เมื่อเทียบกับระบบดูดซับทางกายภาพ หรือระบบที่ใช้ความร้อนสัมผัสหรือความร้อนจากการเปลี่ยนสถานะ

ปัจจุบันระบบทำความร้อนและความเย็นที่มีการวางจำหน่ายในท้องตลาด ส่วนมากจะเป็นระบบดูดซึม เช่น ระบบดูดซึมแบบวัฏจักร GAX สำหรับอาคารบ้านเรือนโดยบริษัท N.Y.Gas ของอเมริกา (Phillipe 1999; Fiskman, 1996; NYGAS, 1999) นอกจากนี้บริษัท Yazaki corporation (Yazaki, 2003) จากประเทศญี่ปุ่นก็ได้จัดจำหน่ายระบบ Aroace double-effect chiller-heater ที่ใช้หลักการดูดซึมในการทำความร้อนและความเย็นเช่นกัน แม้ว่าระบบสะสมพลังงานเพื่อทำความร้อนและความเย็นโดยใช้หลักการดูดซับทางเคมี (Chemisorption energy storage) จะได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องมา 30 ปีแล้วในต่างประเทศ และในปัจจุบันก็กำลังจะมีการผลิตในเชิงพาณิชย์เพื่อจำหน่ายสู่ท้องตลาด (Fraunhofer ISE, 2003) แต่ในประเทศไทยการศึกษาเกี่ยวกับระบบดูดซับแทบทั้งหมด จะเกี่ยวกับระบบดูดซับแบบกายภาพ (Physisorption) และอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการ (Tiansuwan et al., 1995, 1997) ขนาดของเครื่องค่อนข้างใหญ่และต้องการพื้นที่ติดตั้งมาก และมีความซับซ้อนพอสมควรในการใช้งาน

ดังนั้นเพื่อให้การพัฒนาอุปกรณ์เก็บรักษาพลังงาน โดยใช้หลักการดูดซับทางเคมีมีความเป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ริเริ่มพัฒนาต้นแบบของอุปกรณ์ประเภทนี้ ทดสอบจริงให้ทราบถึงเทคนิคการใช้งานที่เหมาะสม เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบเข้าสู่เชิงพาณิชย์ต่อไป เป้าหมายหลักของงานวิจัยชิ้นนี้จึงเน้นการออกแบบและจัดสร้างต้นแบบอุปกรณ์เก็บรักษาพลังงาน ให้มีความจุพลังงานจำเพาะสูง มีขนาดเล็กต้องการพื้นที่ติดตั้งน้อย ใช้งานได้ง่าย และสะดวก มีสมรรถนะที่สม่ำเสมอ และเหมาะต่อการใช้สะสมความร้อน จากแหล่งความร้อนทิ้งเปล่าของระบบผลิตไอน้ำของโรงงานอุตสาหกรรมและของอาคารขนาดใหญ่

1.2. วัตถุประสงค์

โครงการนี้มีมุ่งเน้นการพัฒนาและทดสอบระบบดูดซับทางเคมีที่มีลักษณะเป็นโมดูลอันประกอบด้วย ส่วนดูดซับหรือปฏิกิริยา ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นในชุดเดียวกัน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบเก็บรักษาพลังงานความร้อนทิ้งเปล่า โดยออกแบบต้นแบบโมดูลขนาดเล็กของระบบเก็บรักษาพลังงานที่ใช้หลักการดูดซับทางเคมี จากนั้นจัดสร้างและทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบ สำหรับศึกษาเทคนิคและปัญหาที่เกิดขึ้นในการเก็บรักษาพลังงาน เมื่อใช้สะสมพลังงานจากแหล่งความร้อนทิ้งเปล่าหรือแหล่งพลังงานหมุนเวียน รวมถึงการพัฒนาและทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบดูดซับดังกล่าวเพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมและสมรรถนะของระบบ

การดำเนินงานวิจัย โดยสืบค้นเอกสารอ้างอิงและทบทวนเอกสารทางวิชาการต่างๆ เกี่ยวกับระบบดูดซับแบบเคมี ประมวลผลข้อมูลการทดสอบปฏิกิริยา ที่ใช้คู่สารทำงานโซเดียมซัลไฟด์-น้ำ ($\text{Na}_2\text{S}/\text{H}_2\text{O}$) เป็นคู่สารทำงานในงานวิจัยที่ผ่านมา พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมเพื่อคำนวณ ออกแบบโมดูลและชุดอุปกรณ์การทดสอบ โดยเน้นการใช้เทคโนโลยีที่มีในประเทศ จัดสร้างโมดูลและติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบตามที่ได้ออกแบบไว้ ในห้องปฏิบัติการวิจัย ทดสอบ เก็บข้อมูล วิเคราะห์และวิจารณ์ผล สรุปผล และเปรียบเทียบผลคำนวณกับข้อมูลการทดสอบระบบดูดซับทางเคมีของงานวิจัยที่ผ่านมา

- 1) พัฒนาและทดสอบระบบดูดซับทางเคมีที่มีลักษณะเป็นโมดูลอันประกอบด้วย ส่วนดูดซับหรือปฏิกิริยา ส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น ในชุดเดียวกัน เพื่อใช้ออกแบบระบบเก็บรักษาพลังงาน
- 2) ออกแบบต้นแบบโมดูลขนาดเล็กของระบบเก็บรักษาพลังงาน ที่ใช้หลักการดูดซับทางเคมีระหว่างคู่สารสารโซเดียมซัลไฟด์กับน้ำ
- 3) จัดสร้างและทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบ สำหรับศึกษาเทคนิคและปัญหาที่เกิดขึ้นในการเก็บรักษาพลังงาน เพื่อเป็นแนวทางในการสะสมพลังงานจากแหล่งความร้อนทิ้งเปล่า

1.3. ขอบเขตของการวิจัย

- 1) สร้างโมดูลอุปกรณ์เก็บรักษาพลังงานขนาดเล็ก ที่มีความสามารถในการจุความร้อนอย่างน้อย 1-2 kWh
- 2) สร้างและประกอบอุปกรณ์โดยใช้เทคนิคที่ง่ายและทำได้ในประเทศไทย
- 3) การวัดอุณหภูมิเพื่อคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนจะวัดจากผิวสัมผัสภายนอก เพื่อไม่ให้อุปกรณ์วัตรบกวนระบบ และได้ลักษณะอุปกรณ์ที่เป็นต้นแบบอย่างแท้จริง
- 4) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นแบบ Lumped parameter model และหรือพิจารณาการคำนวณในหนึ่งมิติของรูปทรงกระบอกที่สมมาตร

- 5) พิจารณากรณีศึกษาของแหล่งความร้อนทิ้งเปล่าในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลาง เพื่อทำนายผลการประยุกต์ใช้ระบบสะสมพลังงานที่ประกอบด้วยหลายโมดูล

1.4. ระเบียบวิธีวิจัย

จากการทบทวนเอกสารอ้างอิงที่ผ่านมา สรุปได้ว่าการออกแบบชุดเก็บรักษาพลังงานแบบเคมี ควรจะมีลักษณะเป็นโมดูลขนาดเล็ก ซึ่งง่ายต่อการนำไปปรับใช้กับระบบจริง โมดูลนี้จะประกอบด้วย เครื่องดูดซับหรือปฏิกรณ์ เครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่น ซึ่งไม่มีส่วนประกอบที่เคลื่อนที่ได้ (Moving parts) ทำให้ง่ายต่อการประกอบ ติดตั้งและดูแลรักษา เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ ผู้วิจัยดำเนินงานตามระเบียบวิธีวิจัย ดังต่อไปนี้

- 1) สืบค้นเอกสารอ้างอิงและทบทวนเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ เกี่ยวกับระบบดูดซับแบบเคมีเพิ่มเติม
- 2) ประมวลผลข้อมูลการทดสอบเครื่องดูดซับหรือปฏิกรณ์ ที่ใช้คู่สารทำงานโซเดียมซัลไฟด์-น้ำ ($\text{Na}_2\text{S}/\text{H}_2\text{O}$) เป็นคู่สารทำงานในงานวิจัยที่ผ่านมา
- 3) สืบค้นหาสารผสมที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงความร้อนของแท่นปฏิริยาของสารดูดซับ
- 4) ปรับปรุงการขึ้นรูปแท่นปฏิริยา (Reactive bed) ของสารดูดซับโซเดียมซัลไฟด์ในปฏิกรณ์ เพื่อให้มีความคงรูปมากขึ้น และช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงความร้อน
- 5) ออกแบบโมดูลของระบบเก็บสะสมพลังงานทางเคมี (Modular Chemical Energy Storage, MCES) และชุดอุปกรณ์การทดสอบระบบดูดซับ สำหรับกรณีที่ไม่มีและมีการปรับปรุงแท่นปฏิริยาแล้ว (MCES 1 และ MCES 2) โดยเน้นการใช้เทคโนโลยีที่มีในประเทศในการจัดสร้าง
- 6) ออกแบบระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการจ่ายพลังงานให้ส่วนทำระเหยของระบบดูดซับทางเคมี
- 7) จัดสร้างและติดตั้งชุดอุปกรณ์ทดสอบทั้งสาม (MCES 1, MCES 2 และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน) ตามที่ได้ออกแบบไว้ในห้องปฏิบัติการวิจัย
- 8) ทดสอบระบบทั้งสาม เก็บบันทึกข้อมูล วิเคราะห์และวิจารณ์ผล
- 9) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมเพื่อการทำนายพฤติกรรมของระบบ
- 10) จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ พัฒนาโปรแกรมคำนวณ ทำซิมูเลชันและเปรียบเทียบผลคำนวณกับผลการทดสอบจริงของระบบดูดซับทางเคมี
- 11) สรุปและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่พบในเอกสารอ้างอิง
- 12) ทำนายผลการเก็บรักษาพลังงานด้วยระบบ MCES ในกรณีศึกษาความร้อนทิ้งเปล่าจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยอ้างอิงจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 2

วรรณกรรมวิจัย

การเก็บพลังงานทางเคมี (Chemical Energy Storage, CES) คือ การเก็บความร้อนในรูปของปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction) จะมีความจุพลังงานมากกว่าการเก็บพลังงานแฝงและพลังงานสัมผัส การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและสารทำงาน จะเกิดการสร้างพันธะขึ้นใหม่ระหว่างสารทั้งสองและปล่อยความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาออกมา ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) ส่วนการเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิของปฏิกิริยาหรือการให้พลังงานส่วนหนึ่งในการทำลายพันธะระหว่างคู่สารทำงานที่ทำปฏิกิริยากัน เรียกว่า ปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction) ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิสูง ทำให้ได้สารตั้งต้นออกมาอีกครั้ง โดยมีอุณหภูมิต่ำกว่าตอนเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงสามารถนำสารทำงานมาใช้ใหม่ได้

2.1 ประเภทระบบเก็บสะสมพลังงาน

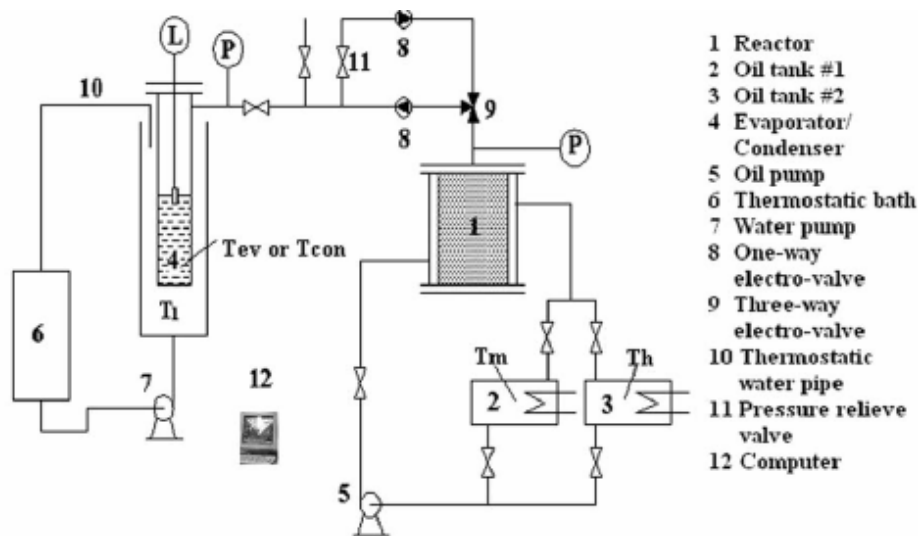
ระบบเก็บรักษาพลังงานความร้อน แบ่งเป็น 3 แบบ คือ ระบบสะสมพลังงานโดยอาศัยการประจุความร้อนจากการเพิ่มอุณหภูมิหรือใช้ความร้อนสัมผัส (Sensible heat storage) ระบบสะสมความร้อนโดยอาศัยความร้อนจากการเปลี่ยนสถานะ (Latent heat storage) หรือใช้วัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ เรียกว่า PCM (Phase change material) และระบบสะสมความร้อนแบบเคมี (Chemical energy storage)(Zalba et al., 2003) ซึ่งข้อมูลของกระบวนการสะสมความร้อน หลักการทำงาน และตัวอย่างการใช้งานได้สรุปไว้โดย Wongsuwan et al. (2001)

ระบบสะสมความร้อนแบบเคมีอาศัยปฏิกิริยาเคมีย้อนกลับได้ ซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยาดูดและคายความร้อน ปฏิกิริยาเคมีจะเกี่ยวข้องกับการแตกและสร้างพันธะระหว่างสารประกอบต่างชนิด ซึ่งจะเอื้อต่อการสะสมพลังงานในปริมาณมาก สารตั้งต้นอาจอยู่ในสถานะแตกต่างกัน เช่น ของเหลวกับก๊าซ หรือ ของแข็งกับก๊าซ ซึ่งสารตั้งต้นประเภทหลังนี้จะสะดวกต่อการใช้งาน และต้องการปริมาตรบรรจุน้อย สารประกอบต่างชนิดที่ทำปฏิกิริยากันนี้ เรียกอีกอย่างว่า คู่สารทำงาน (Working pair) คู่สารทำงานจะประกอบด้วยตัวดูดซึมหรือตัวดูดซับ (Absorbent/Adsorbent) กับสารทำงาน (Working substance) การเลือกสารทำงานขึ้นกับระดับและปริมาณพลังงานที่ต้องการสะสม สารดูดซึมมีสถานะเป็นของเหลว และวิธีการใช้งานและจัดการจะยุ่งยากกว่าสารดูดซับที่มีสถานะเป็นของแข็ง

การดูดซับแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี ซึ่งแบบเคมีมีข้อดีตรงที่ให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่สูง และสามารถออกแบบให้ระบบและอุปกรณ์มีขนาดเล็กกะทัดรัดได้ สารดูดซับอาจจำแนกได้อีก 2 แบบ คือ สารอินทรีย์ (Organic) และสารอนินทรีย์ (Inorganic) ซึ่งพบว่าสารอนินทรีย์จำพวกเกลือไฮเดรต (Hydrated salts) ที่ใช้น้ำ

เป็นสารทำงาน มีความจุความร้อนสูงสามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลายแม้แต่การเก็บสะสมพลังงานรังสีอาทิตย์ (Lane, 1986; Dincer and Rosen, 2002)

ระบบเก็บพลังงานความร้อนทางเคมี เป็นที่สนใจอย่างแพร่หลาย และประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ แบบจำลองของ Huang et al. (2004) ใช้กับการออกแบบที่เหมาะสมของปั๊มความร้อน ตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์และความร้อน คือ ความดัน และ อุณหภูมิ ส่วนตัวแปรทางกายภาพของสารทำงานหรือปฏิกิริยา เช่น รูปร่าง และมิติต่าง ๆ โดยในการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบในงานวิจัยแสดงดังรูป 2.1



รูป 2.1 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของ Huang et al. (2004)

2.2 กลไกการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานทางเคมี

ลักษณะการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานทางเคมีใช้หลักการของปั๊มความร้อนทางเคมี (Chemical Heat Pump, CHP) ซึ่งจะทำงานคู่กับแหล่งให้ความร้อนที่ประกอบด้วย

- 1) อุณหภูมิต่างกัน 3 ระดับ คือ
 - ก. ช่วงอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature, T_l)
 - ข. ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Intermediate Temperature, T_m)
 - ค. ช่วงอุณหภูมิสูง (High Temperature, T_h)
- 2) ความดันแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ
 - ก. ช่วงความดันต่ำ (Low Pressure, P_l) และ
 - ข. ช่วงความดันสูง (High Pressure, P_h)

กระบวนการเก็บพลังงานทางเคมี สามารถแบ่งกระบวนการออกได้เป็น 2 ช่วง ดังนี้

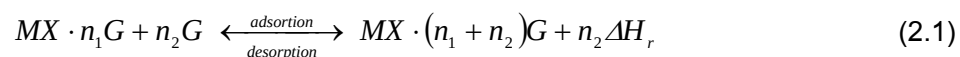
- 1) ช่วงสะสมหรือการดูดความร้อน (Storage or Endothermic Mode) เก็บสะสมพลังงานในรูปของพันธะเคมี โดยการทำลายพันธะหรือจัดเรียงพันธะใหม่
- 2) ช่วงใช้งานหรือการคายความร้อน (Discharge or Exothermic Mode) ปฏิกริยาจะย้อนกลับและสร้างพลังงานความร้อนออกมา และจะสร้างสารขึ้นมาใหม่ (Regeneration)

กลไกในการทำงานของระบบ มี 2 ช่วง คือ

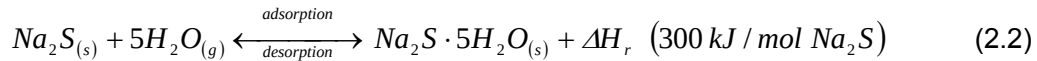
- (1) ช่วง Adsorption/Production ระหว่างช่วงของการดูดซับสาร เครื่องระเหยจะต่อเข้ากับปฏิกรณ์ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิในเครื่องระเหยต่ำลง และในเวลาเดียวกันจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับที่เป็นเกลือ และ ก๊าซของตัวถูกดูดซับในปฏิกรณ์ เกิดการคายความร้อนจากปฏิกิริยา
- (2) ช่วง Desorption/Regeneration ระหว่างช่วงของการคายสาร ปฏิกรณ์จะถูกทำให้ร้อนขึ้นจากแหล่งความร้อนสูง ทำให้อุณหภูมิของแท่นสารดูดซับ (Adsorbent bed) เพิ่มขึ้น ซึ่งเครื่องควบแน่นจะต่อเข้ากับปฏิกรณ์ เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่จะเกิดการแตกพันธะระหว่างคู่สารทำงานก๊าซหรือสารทำงานหลุดออกจากของแข็งจะไปควบแน่นในเครื่องควบแน่น

การเก็บรักษาความร้อนโดยอาศัยปฏิกิริยาเคมีแบบย้อนกลับได้ (Reversible Reaction) ปฏิกริยาเคมีประกอบด้วย ปฏิกริยาแบบดูดและคายพลังงานความร้อน (Endothermic or Exothermic Reaction) โดยมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในทิศทางที่สวนทางกัน

ปฏิกิริยาเคมีเกี่ยวข้องกับการแตกและสร้างพันธะระหว่างสารประกอบต่างชนิดกัน ซึ่งเอื้อต่อการเก็บรักษาพลังงานได้เป็นปริมาณมาก กระบวนการเปลี่ยนแปลงภายในระบบเก็บรักษาพลังงานความร้อนทางเคมี สามารถแสดงเป็นสมการอย่างง่ายดังนี้ (Huang *et al.*, 2004)



ในการวิจัยนี้จะใช้โซเดียมซัลไฟด์และน้ำเป็นสารตั้งต้นและสารทำงาน ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งพลังงานปฏิกิริยามีค่า 300 kJ/mol of Sodiumsulfide (Boer *et al.*, 2003) สมการของปฏิกิริยาแสดงได้ดังนี้



ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ (Reversible Reaction) พลังงานที่ให้เข้าไปจะทำให้สารตั้งต้น ($Na_2S \cdot 5H_2O$) แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ (Na_2S และ H_2O) ในทิศทางกลับกันเมื่อปล่อยให้ผลิตภัณฑ์ทำปฏิกิริยากัน เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) ทำให้ปล่อยพลังงานความร้อนออกมา สามารถนำเอาความร้อนจากส่วนนี้ไปใช้ประโยชน์ได้

ระบบเก็บรักษาพลังงานความร้อนประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 2 ส่วน คือ

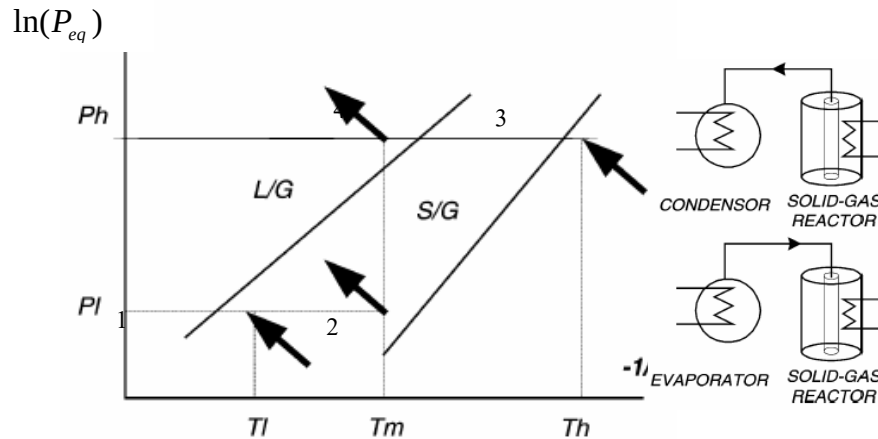
- (1) เครื่องปฏิกรณ์ ที่บรรจุสารดูดซับหรือสารตั้งต้น (Adsorbent or Reactive Bed) เพื่อทำปฏิกิริยาเคมี
- (2) เครื่องทำระเหยหรือเครื่องควบแน่น ที่มีภาชนะบรรจุของไหลทำงาน (Working Fluid) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนสถานะไปมาระหว่างของเหลวและไอ

สารทำงานจะไหลอยู่ระหว่างอุปกรณ์ส่วนแรกกับส่วนที่สอง โดยมีวาล์วควบคุมการถ่ายเทสารทำงานในแต่ละช่วงเวลาของการเกิดปฏิกิริยาดูดซับและคายสาร

กระบวนการในเครื่องทำระเหย (Evaporator) และเครื่องควบแน่น (Condenser) จะมีสมดุลไอ - ของเหลว เกิดขึ้น และในปฏิกรณ์จะเกิดสมดุลของปฏิกิริยาระหว่าง ก๊าซ-ของแข็ง และ ไอ-ของเหลว น้ำ เป็นการแปรผันเชิงเดี่ยวหรือแปรผันตามอุณหภูมิ โดยสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงได้ใน Clausius-Clapeyron Diagram สมการสมดุลระหว่างความดันไอและอุณหภูมิในระบบ คือ

$$\ln(P_{eq}) = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) สามารถเขียนแผนภูมิความดันสมดุลระหว่าง ความดันไอ (P) และอุณหภูมิ (T) ในสภาวะการทำงานต่าง ๆ ได้ดังรูป 2.2 โดยระบบจะทำงานที่สองระดับความดัน คือ ความดันสูง (P_h) และความดันต่ำ (P_l) และ 3 ระดับอุณหภูมิ คือ T_l , T_m และ T_h แกนนอนเป็นค่าลบของส่วนกลับอุณหภูมิและแกนตั้งจะเป็นกราฟ $\log$ ของความดัน สำหรับเส้น L/V แสดงสมดุลของของเหลวและไอในเครื่องทำระเหย และเครื่องควบแน่น และเส้น S/G แสดงสมดุลของของแข็งและไอระหว่างสารตั้งต้นทั้งสองในปฏิกรณ์



รูปที่ 2.2: แผนภูมิ Clausius-Clapeyron (Wongsuwan *et al.*, 2001)

จากรูป 2.2 อธิบายการทำงานของเครื่องดูดซับในขั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังนี้

- 1) ขั้นตอนที่ 1-2 ให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่ำ (T_l) กับ Evaporator ทำให้น้ำหรือสารทำงานระเหยกลายเป็นไอ เข้าสู่ปฏิกรณ์ เกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างโซเดียมซัลไฟด์กับน้ำ ทำให้ปฏิกรณ์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจากความร้อนที่ปฏิกิริยาคายออกมา (Evaporator จะต่อเข้ากับ Reactor) ซึ่งความร้อน (T_m) ที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้งาน
- 2) ขั้นตอนที่ 2-3 ให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิสูง (T_h) กับปฏิกรณ์เพื่อไล่น้ำหรือสารทำงานออกไปจากผลิตภัณฑ์ (Condenser จะต่อเข้ากับ Reactor)
- 3) ขั้นตอนที่ 3-4 ให้ความร้อนต่อไปจนไอ น้ำที่หลุดออกมาจากผลิตภัณฑ์ ถูกส่งไปควบแน่นในเครื่องควบแน่น
- 4) ขั้นตอนที่ 4 -1 ไอ น้ำที่เข้าทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลไฟด์และถูกคายออกมาจากการสลายพันธะเกิดควบแน่นใน Condenser กลายเป็นของเหลวไหลลงถึงเก็บ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ต่อไป

วัฏจักรการทำงานของระบบดูดซับ จะเริ่มจากการเกิดการดูดซับสาร (Adsorption) จากนั้นเป็นกระบวนการให้ความร้อน (Heating) เพื่อไล่น้ำหรือสารทำงานออกจากนั้นเป็นกระบวนการคายสารดูดซับ (Desorption) โดยสารทำงานจะถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลวเก็บไว้ในภาชนะเก็บและกระบวนการสุดท้ายเป็นการทำให้ระบบดูดซับเย็นตัวลง (Cooling) โดยใช้ของไหลไปหล่อเย็นที่ปฏิกรณ์ ระบบจึงทำงานครบวัฏจักรงานวิจัยต่างๆ ที่ได้ทำการศึกษามาก็นำหลักการนี้มาประยุกต์ใช้เช่นเดียวกัน

2.3 คู่สารทำงาน

การเลือกใช้งานของคู่สารทำงาน เป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะคู่สารทำงานแต่ละคู่จะมีสมบัติแตกต่างกันออกไป ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาว่าเป็นปฏิกิริยาดูดหรือคายความร้อน สภาวะที่เหมาะสมในการทำงาน การกักความร้อนขึ้นส่วนอุปกรณ์ ต่าง ๆ ซึ่งต้องคำนึงถึงก่อนที่จะทำการเลือกคู่สารทำงานนั้น ๆ ไปใช้งานต่อไป ข้อมูลเปรียบเทียบของระบบดูดซับต่าง ๆ ซึ่งใช้คู่สารทำงานที่แตกต่างกันออกไป แสดงไว้ในตาราง 2.1

ระบบปั๊มความร้อนเคมี โดยใช้ $SrCl_2 - NH_3$ เป็นคู่สารทำงาน จากงานวิจัยของ Huang *et al.* (2004) ซึ่งได้ประยุกต์แบบจำลองทางจลนศาสตร์ด้านความร้อนเคมี (Thermochemistry Kinetics) เพื่อทำนายพฤติกรรมทางพลศาสตร์ (Dynamics) ของปฏิกรณ์แบบฐานคงที่ของก๊าซ-ของแข็ง (Fixed Bed of Gas-Solid)

การวิเคราะห์รูปแบบของอุณหภูมิที่กระจายในแนวรัศมีของชั้นวางสารดูดซับ จากผลการจำลองพบว่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของสื่อกลางที่ไวต่อปฏิกิริยานั้นมีผลชัดเจนต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยอิทธิพลของค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่มีต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด ต้องมีค่ามากกว่า $15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ขึ้นไปจึงจะมีผล ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Coefficient) ระหว่างเกลือที่ไวต่อปฏิกิริยากับผนังของปฏิกรณ์ โดยต้องมีค่ามากกว่า $800 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ จึงจะมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดและรูปแบบการกระจายของอุณหภูมิในแนวรัศมี

สำหรับคู่สารโซเดียมซัลไฟด์กับน้ำ จากการทดสอบต้นแบบของ SWEAT ที่ได้มีการวัดคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) และจลนศาสตร์ (Kinetics) ของคู่สารทำงาน (Working Pairs) ได้แก่ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Heat Conductivity) เป็นต้น โดยลักษณะของการติดตั้งอุปกรณ์และการบรรจุสารดูดซับลงใน Adsorber แสดงไว้ในรูป 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ



รูปที่ 2.3: ลักษณะของการจัดตั้งอุปกรณ์การทดลอง (Bach, 2001)



รูปที่ 2.4: การบรรจุสารทำงานในเครื่องดูดซับ (Bach, 2001)

นอกจากนี้ยังได้มีงานวิจัยเบื้องต้นในการพัฒนาระบบดูดซับทางความร้อนเคมี ซึ่งอาศัยหลักการย้อนกลับได้ของปฏิกิริยาเคมี พบการศึกษาเกี่ยวกับความเสถียรและคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ โดย Boer *et al.* (2002) ศึกษาโครงสร้าง คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ และสถานะของคู่สารทำงาน $Na_2S - H_2O$ ที่ใช้งานในระบบปั๊มความร้อนเคมี โดยอาศัยเทคนิคของ RD, TG/DTA, จุดหลอมเหลว และความดันไอ

รูปผลึกโดยทั่วไปของเกลือโซเดียมซัลไฟด์ คือ $Na_2S \cdot 9H_2O$, $Na_2S \cdot 5H_2O$ และ $Na_2S \cdot 2H_2O$ ซึ่งเป็นเฟสที่เสถียรมาก มีค่าทางจลนศาสตร์ในการดึงน้ำออก (Dehydration Kinetic) ต่ำมาก ส่วน $Na_2S \cdot \frac{1}{2}H_2O$ เป็นเฟสที่ไม่เสถียร โดยพบว่าเทคนิค XRD ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติ ของการเปลี่ยนแปลงสถานะ โดยค่าความจุความร้อนของปฏิกิริยาในการดึงน้ำออกจากเกลือโซเดียมซัลไฟด์ คือ $Na_2S \cdot 5H_2O(s) \rightarrow Na_2S \cdot \frac{1}{2}H_2O(s) + 4\frac{1}{2}H_2O(g)$ ซึ่ง $\Delta H_r(298.15 K, 1 bar)$ มีค่าเท่ากับ $\pm 300 \text{ kJmol}^{-1}$ หรือคิดเป็น $3.84 \text{ MJ/kg}_{Na_2S}$ หรือ 1 kWh/kg_{Na_2S} โดยที่ 1 โมล ของโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) สามารถดูดซับน้ำ (H_2O) ได้ $4\frac{1}{2}$ โมล ซึ่งเท่ากับ 1 kg ของ H_2O ใน 1 kg ของเกลือแห้ง (Dry Salt)

Wongsuwan *et al.* (2004) ศึกษาการหาสมรรถนะของระบบเก็บความร้อนแบบความร้อนเคมี โดยใช้โซเดียมซัลไฟด์และน้ำเป็นคู่สารทำงาน และใช้สารผสมในการช่วยขึ้นรูปคือ แกรไฟต์ ที่อัตราส่วนต่างๆ ผลการศึกษาพบว่า ที่อัตราส่วนผสม 1/3 โดยมวล ระบบมีความสามารถในการดูดซับได้ดีที่สุด และการเพิ่มอุณหภูมิของไอน้ำในเครื่องระเหยส่งผลให้การดูดซับเกิดได้ดีขึ้น ระบบมีค่าการเก็บกักพลังงานสูงสุดเท่ากับ $2,713.59 \text{ kWh/m}^3$ และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ที่ได้เท่ากับ 1.334 อย่างไรก็ตามยังประสบปัญหาการกัดกร่อนและการรั่วซึมในระบบทดสอบอันเนื่องมาจากการวัดอุณหภูมิที่เนื้อสารโดยตรง

ตารางที่ 2.1: ข้อมูลเปรียบเทียบระบบเก็บพลังงานทางเคมีที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาในแต่ละคู่สาร (Riffat and Shankland, 1992)

คู่สารปฏิกิริยา	อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (°C)	ความร้อนของการดูดซับ (kJ/kg)	ความหนาแน่นของพลังงาน (kWh)	วิธีการเก็บพลังงาน
CaCl ₂ - CH ₃ OH	63	1,622	256	solid bed
CaCl ₂ -(4-8)NH ₃	60	2,354	350	solid bed
SrCl ₂ -(2-8)NH ₃	62	2,378	231	solid bed
Na ₂ S-5H ₂ O	54	3,120	673	solid bed
CaCl ₂ -2H ₂ O-(0-6)NH ₃	70	2,348	56	solid bed
H ₂ SO ₄ -H ₂ O	38-324	1,400	100	solution
NH ₃ - H ₂ O	50-80	-	58	solution
NH ₃ - NaSCN	78	1,281	65	solution
H ₂ O(sensible heat)	45	-	51	water

2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเก็บสะสมพลังงาน

ปัจจัยและหลักการที่ต้องนำมาพิจารณาถึงประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ มีดังนี้ (Ter-Gazarian, 1984)

- (1) การย้อนกลับได้ของปฏิกิริยา เป็นหลักการเก็บพลังงานทางเคมี (Chemical Energy Storage) โดยในทางทฤษฎีปฏิกิริยาเคมีต้องย้อนกลับได้อย่างสมบูรณ์ และไม่มีปฏิกิริยาข้างเคียง หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้น
- (2) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับ ต้องดูดซับพลังงานไว้มากพอ กับความต้องการ โดยความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาทั้งไปข้างหน้าและย้อนกลับสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ช่วยได้ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาต้องไม่ลดลงเมื่อนำกลับไปใช้ใหม่
- (3) การควบคุม จะต้องทำให้ปฏิกิริยาเกิดและหยุดได้โดยตัวควบคุมเพียงตัวเดียว เช่น ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากับการแยกผลิตภัณฑ์ การควบคุมอุณหภูมิและความดัน
- (4) ความสะดวกในการจัดเก็บ ในบางปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้เองโดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเรียกว่า Non-catalyst Reaction
- (5) ความปลอดภัย สารเคมีจะต้องปลอดภัยจากสารตกค้างเป็นพิษจากการลุกไหม้

- (6) ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและอายุการใช้งาน ตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้อัตราปฏิกิริยาที่สูงขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องราคาถูก และไม่แปรสภาพเมื่อถูกนำไปใช้ใหม่

เมื่อพิจารณาการเก็บพลังงานในลักษณะต่างๆ สามารถสรุปข้อดีข้อด้อยของแต่ละวิธีของการเก็บพลังงานโดยแสดงไว้ดังตารางที่ 2.2

ตาราง 2.2 ข้อดีข้อด้อยของการสะสมพลังงานแบบต่างๆ (Ter-Gazarian, 1984)

คุณลักษณะ	ระบบเก็บพลังงานแบบความร้อนสัมผัส	ระบบเก็บพลังงานแบบความร้อนแฝง	ระบบเก็บพลังงานแบบความร้อนเคมี
ความจุ	ต่ำ	ต่ำ	สูง
พลังงานที่สูญเสีย	มาก	ปานกลาง	น้อย
อุณหภูมิทำงาน	ต่ำ	ต่ำ	สูง
อายุการใช้งาน	นาน	จำกัด	ไม่จำกัด(ทางทฤษฎี)
ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	ไม่มี	ไม่มี	บางครั้งเกิดอันตราย
การเคลื่อนย้าย	เล็กน้อย	เล็กน้อย	ได้ไกล
เทคโนโลยี	ง่าย	ง่าย	ยุ่งยาก

2.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมระบบป้อนความร้อนเคมี ซึ่งต้องพิจารณาถึงปัจจัยทางจลนศาสตร์ และปัจจัยทางความร้อนร่วมกัน โดยอาศัยแบบจำลองโดยรวมของระบบ (Lumped Parameter Model) รายละเอียดสมการความสัมพันธ์ในแต่ละส่วนและวิธีแก้ไขปัญหาดังนี้

2.5.1. สมมติฐานการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- (1) ความดันก๊าซที่ผ่านตลอดชั้นสารดูดซับมีลักษณะเดียวกัน
- (2) ความดันตกคร่อมมีค่าใกล้กับศูนย์
- (3) อุณหภูมิในสารดูดซับมีค่าเท่ากันตลอดทั้งปฏิกิริยา
- (4) ความจุความร้อนและการนำความร้อนของสารดูดซับไม่เป็นฟังก์ชันกับปริมาณสารผลิตภัณฑ์

- (5) ไม่มีการถ่ายโอนความร้อนในแนวชั้นวางสารดูดซับ
 (6) ไม่มีการถ่ายโอนความร้อนจากการพา เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซต่ำมาก

2.5.2. สมดุลความร้อน

(1) ขณะเกิดการดูดซับสาร (Cho Soon-haeng and Kim Jong-nam, 1992)

$$\begin{aligned} & \left((mc_p)_m + (mc_p)_s + (mc_p)_b + (m_s c_{p,w} x(t)) \right) \frac{dT}{dt} = \\ & - n_s \Delta H_r \frac{dx(t)}{dt} + (\dot{m} c_p)_o (T_o - T_i) + m_s c_{p,w} (T_e - T_s) \frac{dx(t)}{dt} \end{aligned} \quad (2.4a)$$

เมื่อ c_{pb} , c_{pm} , c_{ps} , c_{pw} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารผสมปฏิกรณ์
 เกลือและน้ำตามลำดับ

ΔH_r คือ เอนทัลปีแตกต่างของการเกิดปฏิกิริยา (kJ/mol)
 m_b , m_m , m_s คือ มวลของสารผสมปฏิกรณ์ และเกลือโซเดียมซัลไฟด์ (g)
 m_o คือ อัตราการไหลของน้ำมันถ่ายโอนความร้อน (g/s)
 T_e , T_i , T_o , T_s คือ อุณหภูมิของเครื่องทำความเย็น น้ำมันถ่ายโอนความร้อนเริ่มต้น
 และที่เปลี่ยนแปลงไป และสารดูดซับ ตามลำดับ (K)

จากสมการ (2.4a) พจน์ทางซ้ายมือแสดงความร้อนสัมผัสที่เกิดขึ้น
 โดยรวมของระบบ และพจน์แรกทางขวามือคือความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี
 พจน์ถัดไปเป็นความร้อนสัมผัสของสารถ่ายโอนความร้อน และพจน์สุดท้ายความ
 ร้อนสัมผัสระหว่างสารทำงานกับสารดูดซับ

(2) ขณะเกิดการคายสาร (Cho Soon-haeng and Kim Jong-nam, 1992)

$$\begin{aligned} & \left((mc_p)_m + (mc_p)_s + (mc_p)_b + (m_s c_{p,w} x(t)) \right) \frac{dT}{dt} = \\ & n_s \Delta H_r \frac{dx(t)}{dt} + (\dot{m} c_p)_o (T_o - T_i) \end{aligned} \quad (2.4b)$$

จากสมการ 2.4b) เครื่องหมายของพจน์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อนจากการ
 เกิดปฏิกิริยาเคมีตรงข้ามกับกระบวนการดูดซับสาร และพจน์ความร้อนสัมผัสระหว่างสาร
 ทำงานกับสารดูดซับจะไม่พิจารณา เงื่อนไขเริ่มต้น ($t=0$) ของสมการที่ (2.4a) และ
 (2.4b) มีดังนี้

$$\text{เงื่อนไขเริ่มต้น:} \quad T_s(0) = T_c \quad (2.5a)$$

$$x(0) = 0 \quad (2.5b)$$

อธิบายได้ว่าที่เวลาเริ่มต้น อุณหภูมิของสารดูดซับมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ T_c และ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีค่าเริ่มต้นเท่ากับศูนย์

2.5.3. สมดุลจลนศาสตร์

สมดุลจลนศาสตร์มี 2 รูปแบบคือ Phenomenon-Bases/Intrinsic และ Global Model ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้รูปแบบสมการแบบ Global Model เพื่อแสดงเป็นค่าดัชนีสมรรถนะโดยรวมของปรากฏการณ์ โดยแบบจำลองมีโครงสร้างแตกต่างกันในทางจลนศาสตร์ สำหรับปฏิกิริยาย้อนกลับของก๊าซกับของแข็ง (Gas–Solid reversible reaction) แบบจำลองใช้ในการคำนวณหาปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของปฏิกรณ์ (Degree of Advancement) ที่เวลาต่างๆ กัน, $x(t)$ โดยอาศัยกฎของอาร์เรเนียส (The Arrhenius Law) ดังนี้

(1) สำหรับกระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) (Azpiazu et al., 2003)

$$\frac{dx(t)}{dt} = k_{0a} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_s(t)}\right) \cdot [1-x(t)]^{M_a} \quad (2.6)$$

(2) สำหรับกระบวนการคาย (Desorption Process) (Azpiazu et al., 2003)

$$\frac{dx(t)}{dt} = k_{0d} \exp\left(-\frac{E_d}{RT_s(t)}\right) \cdot [1-x(t)]^{M_d} \quad (2.7)$$

เงื่อนไขเริ่มต้นของสมการที่ (2.6) และ (2.7) คือ $t = 0, x(0) = 0$ (2.8)

สำหรับตัวกลางถ่ายโอนความร้อน

$$(\dot{m}c_p)_o (T_o - T_i) = \frac{kA(T_s - T_o)}{s} \quad (2.9)$$

พิจารณาความร้อนที่ถ่ายโอนระหว่างสารดูดซับผ่านผนังปฏิกรณ์สู่สารถ่ายโอนความร้อน

2.5.4. สมดุลมวลสาร

สมการสมดุลมวลสารระหว่างสารทำงานและสารดูดซับ (Sakoda and Suzuki, 1984) ดังนี้

$$m_s \frac{dx(t)}{dt} + \frac{dm_w}{dt} = 0 \quad (2.10)$$

พจน์แรก คือ อัตราการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ และพจน์หลัง คือ อัตราการลดลงของสารทำงาน และสมการความสัมพันธ์ทางความร้อนและจลนศาสตร์ (Temperature Gradient and Kinetics) ดังนี้

$$\frac{dT}{dt} = -\left(\frac{T_s - T_c}{1 - x(t)}\right) \frac{dx(t)}{dt} \quad (2.11)$$

2.5.5. การแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการที่ (2.7) และ (2.9) ถูกใช้ในการคำนวณหาค่า x และ T ของแบบจำลองโดยทั่วไป (Global Model) โดยการแก้สมการทั้งทางจลนศาสตร์และการถ่ายโอนความร้อนควบคู่กันไป

การหาสมรรถนะการทำงานของระบบดูดซับแบบเคมี จะอาศัยสมการในการคำนวณดังต่อไปนี้ ซึ่งระบุโดยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะในการทำความร้อน (Coefficient of Performance for heating; COP_h) หาจากอัตราส่วนระหว่างผลรวมของความร้อนที่ได้จากกระบวนการดูดซับ ($Q_{adsorption}$) ความร้อนที่ระบายจากเครื่องควบแน่น (Q_{cond}) และความร้อนจากการระบายความร้อนจากเครื่องดูดซับในช่วงการหล่อเย็น ($Q_{cooling}$) กับความร้อนที่จ่ายให้กับระบบในช่วงการคายสารดูดซับ (Q_{input})

$$COP_h = \frac{Q_{adsorption} + Q_{cond} + Q_{cooling}}{Q_{input}} \quad (2.12)$$

ความจุของการเก็บรักษาพลังงานระบุโดยค่าการเก็บพลังงานความร้อนจำเพาะ 2 ตัว ได้แก่ การสะสมพลังงานความร้อนจำเพาะ (Specific Heating Power, SHP) คำนวณจากความร้อนที่ได้จากกระบวนการดูดซับหารด้วยผลคูณของเวลาทำงานของวัฏจักรกับมวลของสารดูดซับ และ การจ่ายความร้อนต่อปริมาตรของระบบดูดซับ (Volumetric Heat Production, VHP) คำนวณได้จากความร้อนที่ได้จากกระบวนการดูดซับหารด้วยปริมาตรของปฏิกรณ์ (Wongsuwan et al., 2001)

$$SHP = \frac{Q_{adsorption}}{t_{cycle} M_{ads}} ; W / kg_{adb} \quad (2.13b)$$

$$VHP = \frac{Q_{adsorption}}{V_{reactor}} ; kWh / m^3 \quad (2.13a)$$

เมื่อ	COP_h	คือ	สัมประสิทธิ์สมรรถนะในการทำความร้อนของระบบ
	M_{ads}	คือ	มวลของสารโซเดียมซิลไฟด์ (kg)
	$Q_{adsorption}$	คือ	พลังงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับสาร (kJ/min)

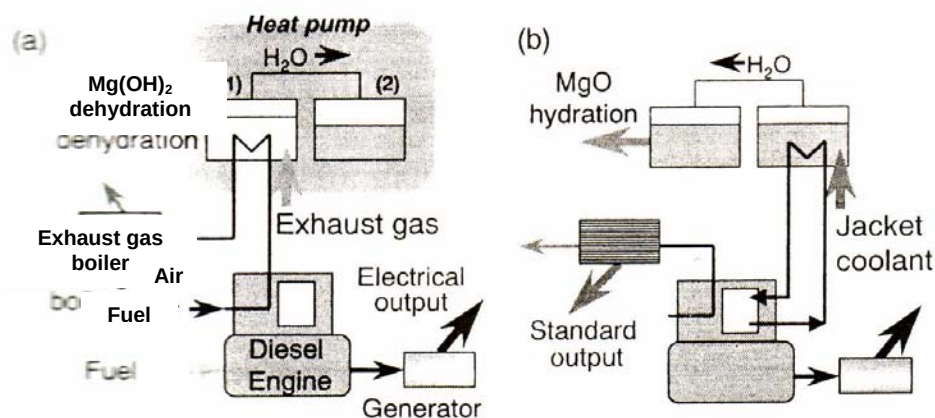
$Q_{cooling}$	คือ	พลังงานในกระบวนการหล่อเย็นระบบ (kJ/min)
Q_{cond}	คือ	พลังงานจากการควบแน่นของสารทำงาน (kJ/min)
Q_{input}	คือ	พลังงานที่จ่ายให้กับระบบ (kW)
t_{cycle}	คือ	ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา (s)
$V_{reactor}$	คือ	ปริมาตรของปฏิกรณ์ (m^3)

2.6 การใช้ประโยชน์ระบบเก็บรักษาพลังงาน

ระบบเก็บรักษาพลังงานสามารถใช้งานได้ 2 แนวทาง (Zalba et al., 2003) คือ

- (1) การเก็บสะสมความร้อนที่ต้องการค่าการนำความร้อนที่สูง เพื่อให้สามารถจ่ายพลังงานออกได้รวดเร็ว
- (2) การป้องกันความร้อน (Thermal protection) ที่ต้องการค่าการนำความร้อนของสารดูดซับที่ต่ำ

การนำระบบเก็บรักษาพลังงานมาใช้จะช่วยให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมยกตัวอย่าง ในระบบผลิตไฟฟ้าที่นำเสนอโดย Kato และ Yoshizawa (2001) พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้ระบบเก็บรักษาพลังงานที่ทำงานเป็นอีทปั๊มด้วย เพื่อสะสมพลังงานในระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (Cogeneration) ของเครื่องยนต์ดีเซลและหม้อไอน้ำที่ใช้ก๊าซไอเสียเป็นแหล่งพลังงาน (Diesel engine/exhaust gas boiler) และมีการทำงานแบบกะหรือไม่ต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งคู่สารทำงานคือแมกนีเซียมออกไซด์และน้ำ (Magnesium oxide/water) ระบบดังกล่าวสามารถสะสมพลังงานในช่วงความต้องการไฟฟ้าต่ำในรูปสารเคมีตั้งต้น และจะปลดปล่อยความร้อนออกมาในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงได้ถึง 177 kW ต่อตันของสารทำงาน

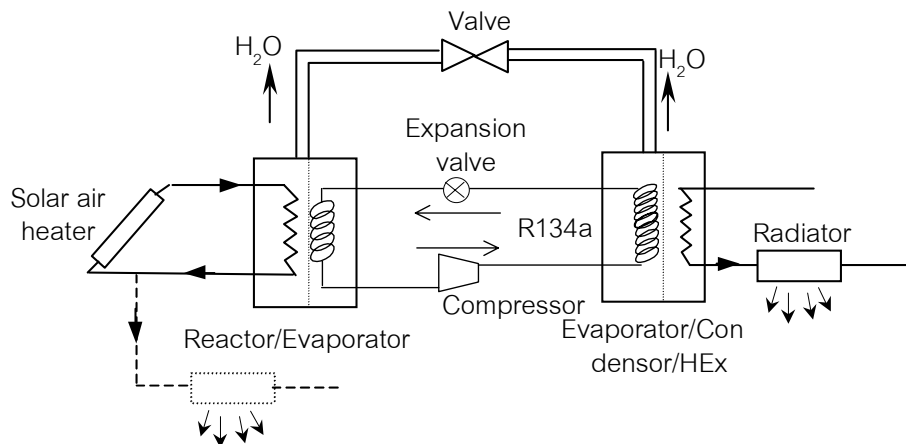


รูปที่ 2.5: ภาพแสดงระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (a) ระบบขณะเก็บสะสมพลังงาน (b) ระบบขณะจ่ายความร้อน (1) ปฏิกรณ์ MgO และ (2) ถังเก็บน้ำซึ่งเป็นสารทำงาน

(Kato and Yoshizawa, 2001)

อีกตัวอย่าง คือ ระบบสะสมพลังงานที่ออกแบบสำหรับที่พักอาศัย เป็นระบบทำความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ควบกับระบบเก็บรักษาพลังงานแบบเคมีที่ใช้โซเดียมซัลไฟด์/น้ำ ($\text{Na}_2\text{S}/\text{H}_2\text{O}$) เป็นคู่สารทำงาน ระบบทำงานร่วมกับวัฏจักรทำความเย็นแบบอัดไอที่ใช้ R134a เป็นสารทำงาน ดังรูปที่ 2.6 นำเสนอโดย Riffat และ Shankland (1992) ซึ่งจากการศึกษาทางทฤษฎีและเปรียบเทียบกับคู่สารทำงานอื่นๆ พบว่า คู่สารโซเดียมซัลไฟด์และน้ำ ($\text{Na}_2\text{S}/\text{H}_2\text{O}$) ให้ค่าความจุในการเก็บรักษาพลังงานสูงสุด และให้ค่าอุณหภูมิเพิ่มที่เหมาะสมกับอาคารบ้านเรือนมากที่สุด ระบบดังกล่าวประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ

- 1) ส่วนรับพลังงานรังสีอาทิตย์ เพื่อจ่ายความร้อนให้กับเครื่องทำระเหย (Evaporator) ของสารทำความเย็น (R134a) และแยกสารทำงาน (H_2O) ออกจากส่วนดูดซับของปฏิกิริยา (Reactor) ในช่วงกลางวัน
- 2) ส่วนเครื่องควบแน่น (Condensor) ของสารทำความเย็นซึ่งจะถ่ายเทต่อไปให้เครื่องทำความร้อน (Radiator) เพื่อทำความอบอุ่นภายในบ้าน ทำงานได้แม้ในขณะที่เมฆเต็มท้องฟ้า
- 3) ส่วนของปฏิกิริยาซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อคายความร้อน เนื่องจากน้ำที่ระเหยจากเครื่องทำระเหยที่ได้รับความร้อนจากเครื่องควบแน่นของวัฏจักรทำความเย็น R134a เพื่อคายความร้อนและถ่ายเทให้กับเครื่องทำความร้อนเช่นกันในช่วงกลางคืน



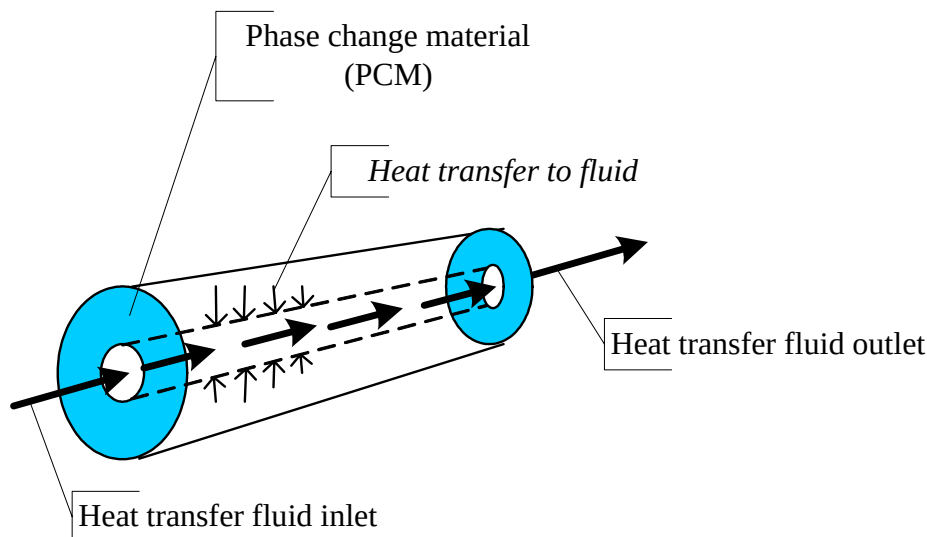
รูปที่ 2.6: แผนภาพแสดงการทำงานของระบบควบของระบบเก็บรักษาพลังงานแบบความร้อนเคมีและระบบทำความเย็นแบบอัดไอ โดยอาศัยพลังงานรังสีอาทิตย์สำหรับอาคารที่พักอาศัย

Riffat และ Shankland (1992)

สำหรับประเทศเขตร้อน ระบบนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำน้ำร้อน เพื่อการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม อาคารที่พักอาศัยหรือโรงแรม ที่มีระบบผลิตไอน้ำหรือน้ำร้อนอยู่แล้ว และต้องการเก็บน้ำร้อนในถังขนาดใหญ่ที่ระดับอุณหภูมิที่ต้องการเป็นระยะเวลานาน มีความเป็นไปได้ที่จะออกแบบระบบเก็บรักษาพลังงานให้น้ำความร้อนทิ้งเปล่ามาใช้หรือใช้สะสม

พลังงานรังสีอาทิตย์ เพื่อลดชั่วโมงทำงานของหม้อไอน้ำหรือหม้อต้มน้ำ หรือลดการใช้งานอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริม (Auxiliary heater) ในงานวิจัยของ Mehling et al., (2003) ได้นำเสนอผลการวิจัยการนำโมดูลของระบบดูดซับติดตั้งเข้ากับด้านบนของถังน้ำที่มีการแบ่งชั้นอุณหภูมิ (Stratified water tank) พบว่าสามารถเพิ่มค่าการเก็บสะสมพลังงานความร้อนและทำให้ถึงน้ำร้อนมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ นอกจากนี้การระเหยที่เครื่องทำระเหยของระบบเก็บรักษาพลังงานสามารถนำมาใช้ทำความเย็นได้ด้วย เช่น การเก็บสะสมความเย็นเพื่อการทำให้พืชผักเย็นลง (Vegetable cooling) ดังในงานวิจัยของ Kowata et al. (2002) หรือการทำให้อากาศที่เข้ากังหันก๊าซเย็นลง (Bekenhus, 2000)

เกี่ยวกับการออกแบบระบบเก็บรักษาพลังงาน พบว่า Bellecci และ Conti (1993) สามารถออกแบบโมดูลเก็บรักษาพลังงาน (Modular thermal energy storage) โดยใช้วัสดุ PCM โมดูลประกอบด้วยท่อที่ถูกล้อมรอบด้วยกระบอกกลางที่มีแนวเส้นผ่านศูนย์กลางร่วมกัน (Coaxial cylinder) ช่องว่างระหว่างท่อตัวในและกระบอกด้านนอกจะเป็นที่บรรจุสาร ของไหลถ่ายเทความร้อนจะไหลผ่านทางด้านใน และเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนตลอดทางเดินของท่อ (รูปที่ 2.7)



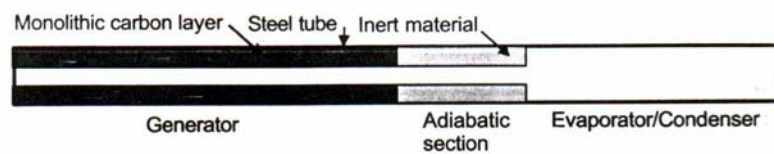
รูปที่ 2.7: อุปกรณ์เก็บรักษาพลังงานแบบ Modular ที่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Bellecci และ Conti ,1993)

การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์เก็บรักษาพลังงาน โดยใช้ท่อติดครีปเป็นที่ยอมรับมาก และมีงานวิจัยหลายชิ้นที่ใช้วิธีนี้ (Abhat et al., 1981; Morcos, 1990; Sadasuke and Naokatsu, 1991; Costa et al., 1998; Velraj et al., 1999; Ismail, 2001) วิธีการอื่นๆ ได้แก่ การบรรจุสารตั้งต้นลงบนโครงข่ายโลหะ (Metal matrix) (Hoogendoom and Bart, 1992; Khan and Rohatgi, 1994; Tong et al., 1996) หรือการทำสารดูดซับเป็นสารประกอบของกราไฟต์ โดยตรึงตัวดูดซับไปบนโครงข่ายกราไฟต์ (Graphite matrix) ก็เป็น

อีกเทคนิคที่น่าสนใจ วิธีนี้จะเพิ่มค่าการนำความร้อนได้โดยไม่ลดปริมาณพลังงานที่สะสม และ ยังเหมาะสำหรับการลดสภาวะเป็น subcooling ในพวกเกลือไฮเดรทได้ด้วย (Mehling et al., 1999; Mehling et al., 2000, Py et al., 2001) เมื่อออกแบบแต่ละโมดูลให้ที่มีค่าการสะสมและการนำความร้อนที่ดีแล้ว เราสามารถต่อเชื่อมหลายโมดูลเข้าด้วยกันเป็นอนุกรม อาจจะใช้สารดูดซับในสภาพเกลือนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน ยกตัวอย่าง การออกแบบให้เป็นโมดูลของอุปกรณ์สะสมพลังงานแบบความร้อนสัมผัสที่ประกอบด้วย PCM ทั้งสองด้าน (Zalba et al., 2003)

เมื่อต้องการจ่ายพลังงานให้โมดูลหรือการดึงพลังงานออกจากโมดูล อาจเลือกออกแบบให้ของไหลถ่ายโอนความร้อนไหลผ่านด้านใน หรือด้านนอกของตัวดูดซับก็ได้ ในงานวิจัยของ Wongsuwan และคณะ (2546) ซึ่งใช้โซเดียมซัลไฟด์และน้ำ ($\text{Na}_2\text{S}/\text{H}_2\text{O}$) เป็นคู่สารทำงาน พบว่า หากให้ไอสารทำงานไหลผ่านด้านในของเครื่องดูดซับที่เป็นท่อทรงกระบอกสองชั้นในลักษณะแนวดิ่ง จะพบชั้นของระดับอุณหภูมิที่แตกต่างกันของตัวดูดซับในช่วงการดูดซับน้ำ แสดงว่ามีการกระจายอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารทำงานกับตัวดูดซับ ดังนั้นการบรรจุตัวดูดซับ ต้องคำนึงถึงการถ่ายเทมวลของไอสารทำงาน และการส่งผ่านความร้อนที่ดี

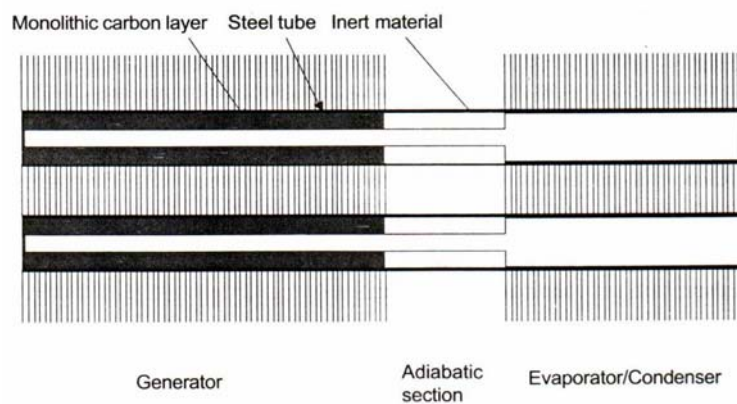
Tamainot-Telto และ Critoph (2003) ได้พัฒนาโมดูลของเครื่องดูดซับที่ใช้คาร์บอน-แอมโมเนียเป็นคู่สารทำงาน และมีสารทำงานไหลผ่านด้านใน 2 แบบด้วยกัน แบบแรกไม่มีการติดตั้งครีป แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วยท่อ Stainless Steel (SS) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 mm ความหนา 0.25 mm และยาว 600 mm โดยบรรจุชั้นของ Monolithic carbon ที่ติดแบบฝังตรึงไว้ข้างในเพื่อให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้นระหว่างเปลือก SS และคาร์บอน มวลของคาร์บอนในโมดูลส่วน Generator คือ 40 g อีกด้านของโมดูลเป็นเครื่องทำระเหย/เครื่องควบแน่น (Evaporator/Condenser) ซึ่งเป็นส่วนที่บรรจุสารทำงานซึ่งเป็นแอมโมเนีย และมีวัสดุที่เสถียร (Inert material) ที่ทำจาก PTFE ทรงกระบอกใส่ไว้ระหว่าง Generator และ Evaporator/Condenser เพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนระหว่างกัน (Adiabatic section)



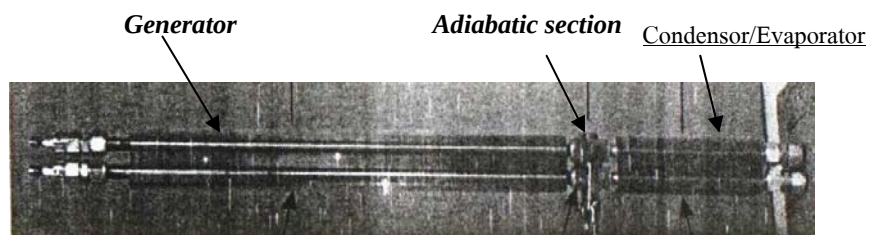
รูปที่ 2.8: ภาพอย่างง่ายของโมดูลเครื่องดูดซับแบบพื้นฐานออกแบบโดย Tamainot-Telto และ Critoph (2003)

Tamainot-Telto และ Critoph (2003) ได้พัฒนาดันแบบระบบดูดซับ ใช้คู่สารทำงาน คือ คาร์บอน-แอมโมเนีย โดยมีสารทำงานไหลอยู่ด้านใน ลักษณะของต้นแบบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

โมดูลอีกแบบจะมีครีبد้านนอกเพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ดังรูปที่ 2.9 และภาพถ่ายแสดงไว้ในรูปที่ 2.10 และ 2.11 ครีบอลูมิเนียมเป็นแบบ L-fin type ซึ่งโมดูลนี้จะประกอบด้วยโมดูลสองอัน ที่มีทั้ง ส่วนดูดซับที่เรียกว่า Generator และส่วนบรรจุสารทำงาน ติดกับครีบอลูมิเนียมสี่เหลี่ยม (55 mm x 27.5 mm) หนา 0.125 mm ระยะห่างระหว่างครีป 1 mm (26 ครีปต่อนิ้ว) ระยะห่างระหว่างท่อคือ 27.5 mm น้ำหนักรวมของครีปมากกว่าน้ำหนักของ Generator สองอันรวมกันถึง 75% จากผลการศึกษาพบว่าโมดูลสองอันคู่แบบที่สองนี้ เหมาะสมต่อการสร้างเป็นโมดูลชุด ซึ่งประกอบด้วย 2 บล็อกที่มี 16 โมดูลคู่ ทำงานสลับกัน เพื่อให้สามารถทำความเย็นได้อย่างต่อเนื่องที่ 1.5 kW และกำลังทำความเย็นจำเพาะ 0.6 kW/kg ของสารดูดซับหรือคาร์บอน และมีสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) เป็น 0.5 ถ้าอุณหภูมิแหล่งความร้อนเพื่อสลายพันธะคู่สารทำงานเป็น 100 °C

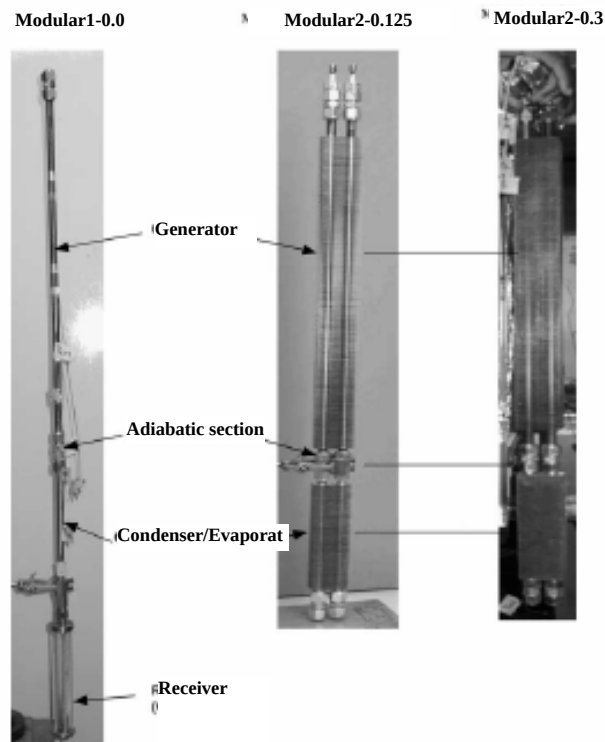


รูปที่ 2.9: ภาพอย่างง่ายของโมดูลแบบที่มีครีป (Tamainot-Telto และ Critoph ,2003)



รูปที่ 2.10: ภาพถ่ายแสดงโมดูลต้นแบบ (Tamainot-Telto และ Critoph ,2003)

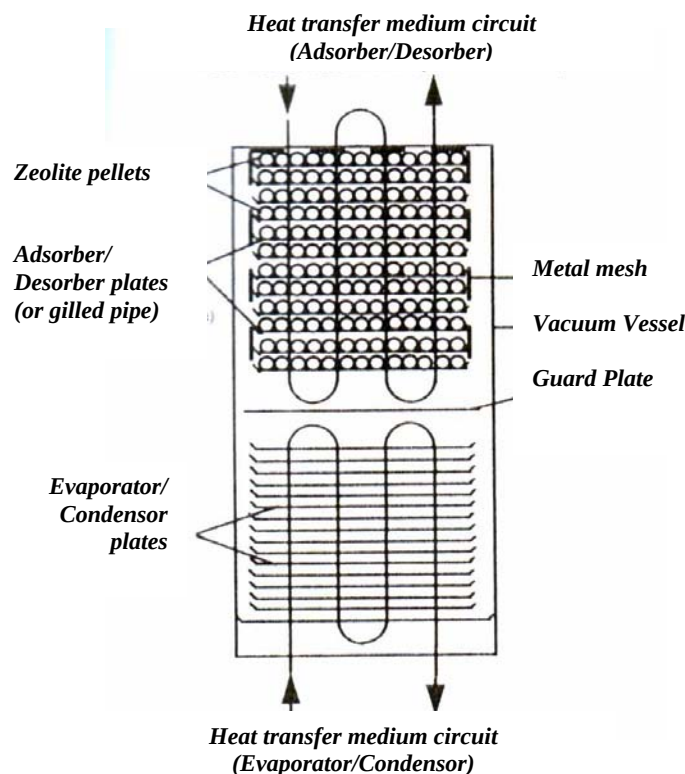
จากผลการศึกษาพบว่า ต้นแบบระบบดูดซับแบบที่ 2 มีความเหมาะสมในการก่อสร้างมากกว่า โดยมีการทำงานสลับกัน เพื่อให้สามารถทำความเย็นได้อย่างต่อเนื่องขนาด 1.5 kW ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) เท่ากับ 0.5 ใช้อุณหภูมิในการสลายพันธะคู่สารทำงานเท่ากับ 100 °C



รูปที่ 2.11: ภาพต้นแบบระบบดูดซับแบบคู่ (Tamainot –Telto and Critoph, 2003)

การประยุกต์ใช้ระบบดูดซับในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ (Waste Heat Recovery) นำเสนอโดย Haije et al. (2002) ซึ่งศึกษาการนำความร้อนทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมกลับมาใช้กระบวนการผลิต ที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยการประยุกต์ใช้หลักการดูดซับโดยหลักการของ Heat Transformer เนื่องจากมีความร้อนทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก ประมาณ 110 พิกะจูลต่อปี ที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 50 -200 °C จึงได้นำกระบวนการ Heat Transformer ทางเคมีที่อาศัยกระบวนการสังเคราะห์ย้อนกลับ (Reversible Synthesis) และกระบวนการแยกโมเลกุล (Decomposition) ของ NH_3 ออกจากโมเลกุลของ MnSO_4 และ NiCl_2 โดยยกระดับให้ความร้อนทิ้ง (Waste Heat upgrading) จากอุณหภูมิประมาณ 150 °C เพิ่มขึ้นเป็น 240 °C ที่ความดัน 33 bar จากการทำนายสมรรถนะพบว่ามีประสิทธิภาพ 33 % โดยกระบวนการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่แบบ Heat Transformer ทางเคมี แสดงไว้ในรูป 2.12

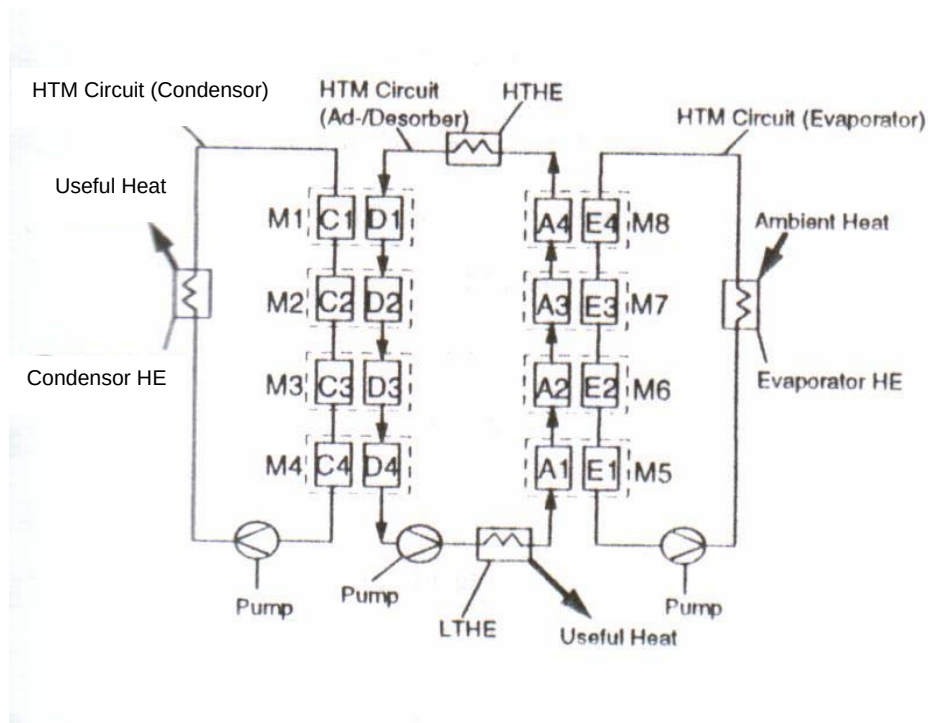
อีกแนวคิดที่ใช้โมดูลแบบคล้ายๆกันที่นำมาต่อเชื่อมกัน โดยแต่ละโมดูลประกอบด้วย เครื่องดูดซับและเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่นครบชุด (Rainer et al., 1999) ใช้คู่สารทำงานระหว่างซีโอไลต์กับน้ำ (Zeolite/water) ภาพอย่างง่ายของโมดูลเดี่ยวแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 เป็นทรงกระบอกสุญญากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm และยาว 800 mm มีแผ่นกั้นแบบรูพรุน (Perforated guard plate) เพื่อป้องกันการแผ่รังสีระหว่างสองส่วนที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันแต่อนุญาตให้มีการถ่ายเทมวลระหว่างส่วนชุดดูดซับและส่วนเครื่องทำระเหย/เครื่องควบแน่น แท่งตัวดูดซับ ซีโอไลต์ (zeolite pellet) วางอยู่บนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแนวนอนเป็นชั้นๆ และถูกหุ้มด้วยตะแกรงโลหะเพื่อป้องกันการสูญเสียตัวดูดซับ ชุดเครื่องทำระเหย/เครื่องควบแน่นก็ออกแบบในลักษณะเดียวกับชุดเครื่องดูดซับ มีท่อของสารถ่ายเทความร้อนขดไปมา และมีชุดแผ่นแนวนอนเพื่อขังคอนเดนเสทไว้ การออกแบบเช่นนี้ทำให้ง่ายต่อการประกอบ จะเห็นว่าระบบนี้ไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ (moving parts) เลย



รูปที่ 2.14: ภาพอย่างง่ายของโมดูล เครื่องดูดซับ/เครื่องทำระเหย/เครื่องควบแน่น (Rainer et al., 1999)

การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบดูดซับ สามารถทำได้โดยลดอุณหภูมิแตกต่างระหว่างช่วงเริ่มต้นการดูดซับ (Adsorption) สารทำงานเข้าสู่ตัวดูดซับ และช่วงการไล่สารทำงาน (Desorption) ออกจากตัวดูดซับ ซึ่งอาจใช้วิธีประกอบหลายๆ โมดูลเข้าด้วยกัน (Rainer et al., 1999) ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งมีทั้งหมด 8 โมดูล สารถ่ายเทความร้อนจะผ่านเครื่องดูดซับ (Adsorber, A1-A4) และเครื่องดูดซับช่วงไล่สาร (Desorber, D1-D4) ขณะเดียวกันทางด้านเครื่องทำระเหย

ของแต่ละโมดูล (E1-E4) ก็จะมีสารถ่ายเทความร้อนไหลผ่านเช่นกัน เครื่องควบแน่นของแต่ละโมดูล (C1-C4) จะมีสารถ่ายเทความร้อนอีกชุดไหลผ่าน เพื่อนำความร้อนออกไปใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 2.15: การออกแบบต่อเชื่อมโมดูลชุดดูดซับ (Rainer et al., 1999)

ตัวอย่างสุดท้ายของโครงการขนาดใหญ่ที่ใช้อุปกรณ์ในลักษณะโมดูลที่ใช้สำหรับการเก็บรักษาพลังงานรังสีอาทิตย์ตลอดฤดูกาล (Seasonal storage) โดยใช้หลักการดูดซับ เรียกว่า Na_2S Salt Water Energy Accumulation and Transformation system (SWEAT) ที่ได้รับการติดตั้งในเนเธอร์แลนด์ และดำเนินการโดยโครงการร่วมระหว่าง Delft University และ ECN (Beijer and Horsman, 1993) โมดูล SWEAT เป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 m และสูง 1.7 m แต่ละโมดูลสามารถจุความร้อนได้ 5 kWh และความเย็นได้ 3 kWh ซึ่งสามารถนำโมดูลหลายอันมาประกอบใช้ร่วมกันได้หลายๆ แบบทำให้ได้ค่าความจุความร้อนตามแต่ต้องการ

จากข้อมูลทางด้านการออกแบบพบว่ารูปทรงที่เหมาะสมคือเป็นทรงกระบอก โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มักจะใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมและออกแบบโมดูลเป็นแบบสองมิติ ดังในงานของ Tather et al. (1999, 2000) ซึ่งศึกษาเครื่องดูดซับแบบทอสเตนเลสที่มีของไหลถ่ายเทความร้อนไหลผ่านด้านใน และมีตัวดูดซับที่เป็นซีโอไลต์เคลือบด้านนอก

นอกจากนี้ Zhang and Wang (1999) และ Zhang (2000) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สองมิติตามแนวท่อและรัศมี ที่สามารถใช้ทำนายการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างตัวดูดซับกับสารทำงานในแนวทั้งสอง จากผลการศึกษาพบว่าผลการทำนายและผลการทดลองสอดคล้องกันดี และมีการถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีมากกว่าในแนวท่อ ซึ่งสอดคล้อง

กับงานของ Wongsuwan และคณะ (2546) ที่พบความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ในแนวทอระหว่างการดูดซับ

2.7 สรุปเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สารเกลือโซเดียมซัลไฟด์กับน้ำ เป็นคู่สารทำงานที่ให้ค่าการเก็บพลังงานจำเพาะที่สูงในระบบดูดซับทางเคมี ประกอบกับน้ำเป็นสารทำงานที่หาได้ง่าย อุณหภูมิที่ใช้ในการปฏิบัติการมีค่าไม่สูงมากนัก คือ ประมาณ 70°C ทำให้ในขั้นตอนของการ Regeneration สามารถนำเอาแหล่งพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ หรือแหล่งความร้อนเหลือใช้อื่น ๆ มาใช้ได้ ชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบเก็บรักษาพลังงาน สามารถออกแบบให้ทุกองค์ประกอบรวมกันเป็นชุดเดียวกัน จะทำให้สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย และการเพิ่มกำลังการเก็บพลังงานสามารถกระทำได้ง่ายขึ้นโดยการเพิ่มจำนวนของต้นแบบ

การออกแบบในลักษณะ Modular เพื่อให้มี Energy density สูงและสามารถเพิ่มหรือลดจำนวนได้โดยง่าย จากการนำโมดูลเหล่านี้มาประกอบกันเป็นอนุกรมหรือเป็นบล็อก และออกแบบทางเดินของของไหลถ่ายเทความร้อน ระหว่างโมดูลหรือบล็อก เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้สะสมพลังงานจากแหล่งความร้อนทิ้งเปล่าต่อไป

ระบบเก็บรักษาพลังงานแบบเคมีจะให้ค่าพลังงานสะสมจำเพาะสูง มีขนาดเล็กกะทัดรัด ใช้พื้นที่น้อยลง สะดวกและใช้งานง่าย ดังนั้นแนวทางการวิจัยที่เหมาะสม คือ การพัฒนาอุปกรณ์เก็บรักษาพลังงานแบบดูดซับทางเคมีที่รูปแบบเป็นโมดูล เรียกว่า Modular Chemical Energy Storage (MCES) อันประกอบด้วย ส่วนดูดซับ ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นครบชุดในตัว โดยคู่สารทำงานที่น่าสนใจคือเกลือไฮเดรตและน้ำ ควบคู่ไปกับการศึกษาสมรรถนะระบบทางทฤษฎี โดยพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทรงกระบอก เพื่อทำนายอุณหภูมิและอัตราการสะสมและการจ่ายพลังงาน

สำหรับประเทศไทยได้มีการริเริ่มดำเนินงานวิจัย เพื่อพัฒนาด้านแบบอุปกรณ์เก็บรักษาความร้อนแบบความร้อนเคมีขึ้นภายใต้โครงการวิจัยการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทมวลและความร้อนในระบบทางด้านความร้อน ณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยในระยะแรก จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ได้มีการออกแบบ สร้างและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเก็บความร้อนทางเคมี เพื่อทดลองและศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน การถ่ายเทความร้อนและอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นและสารทำงาน ลักษณะของการบรรจุสารเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุด ซึ่งปัจจุบันระบบเก็บสะสมความร้อนทางเคมีเป็นที่น่าสนใจมากขึ้นในต่างประเทศ แต่ในประเทศไทยยังไม่พบงานวิจัยทางด้านนี้มากนัก

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัยดังนำเสนอในบทนี้ ประกอบด้วย รายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินการวิจัย อุปกรณ์ วัสดุ สารเคมี เครื่องมือวัด ภาพถ่ายชุดอุปกรณ์ทดสอบ การทดสอบเบื้องต้น และขั้นตอนการทดสอบโดยละเอียด ของระบบเก็บรักษาพลังงานโดยหลักการดูดซับทางเคมี 2 รูปแบบ คือ MCES 1 และ MCES 2 รวมไปถึงระบบให้ความร้อนกับส่วนทำระเหยของท่อความร้อนที่เสมือนระบบดูดซับทางเคมี

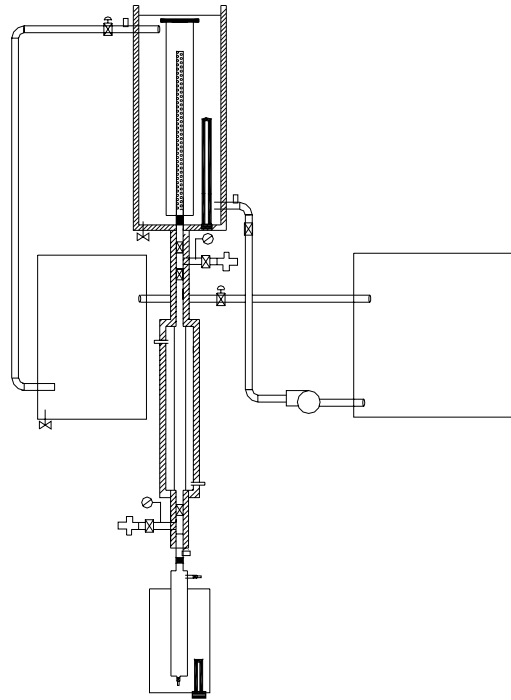
3.1 ระบบทดสอบเก็บสะสมพลังงานแบบเคมี MCES 1

3.1.1. ภาพแสดงระบบ MCES 1

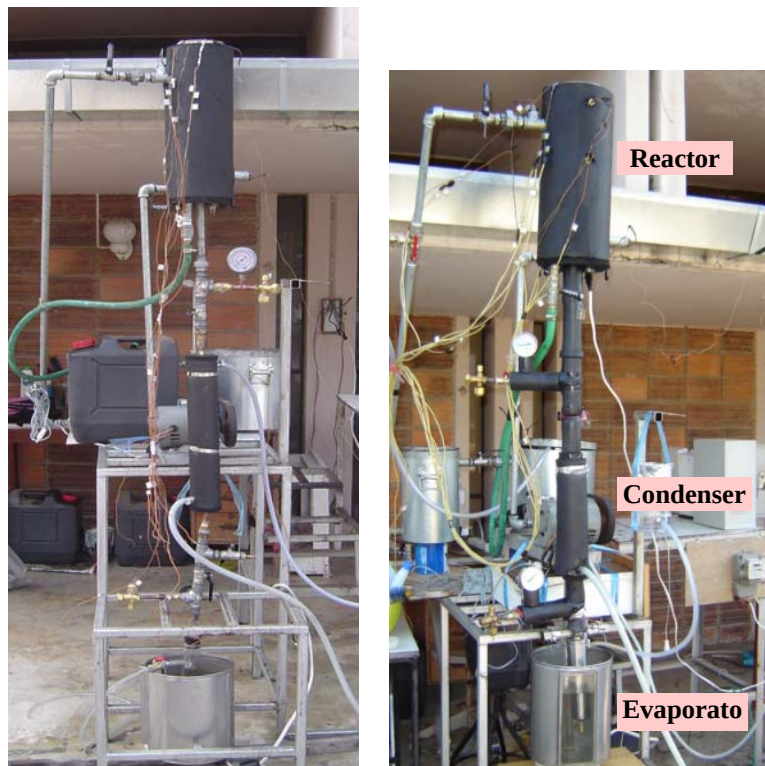
ระบบทดสอบ Modular Chemical Energy Storage (MCES) มีการพัฒนาเป็น 2 รูปแบบ รูปแบบแรก (MCES 1) เป็นการออกแบบและสร้างต้นแบบให้ปฏิกิริยา เครื่องควบแน่น และเครื่องทำระเหยดังแสดงในรูปที่ 3.1 ระบบ MECS 1 ถูกออกแบบเพื่อให้มีสมรรถนะการทำงานที่ดี โดยมีลักษณะเป็นชุดสำเร็จ ประกอบและติดตั้งส่วนประกอบสำคัญในแนวดิ่ง เพื่อให้ประหยัดเนื้อที่ในการจัดวางชุดทดสอบ เครื่องควบแน่นแยกออกและอยู่ตำแหน่งสูงกว่าเครื่องทำระเหย นอกจากนี้ระยะทางระหว่างอุปกรณ์ทั้งสามก็มากกว่า MCES รูปแบบที่ 2 (MCES 2) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 3.2

อุปกรณ์การทดสอบที่แสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ปฏิกิริยา (Reactor) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้บรรจุสารดูดซับและที่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างคู่สารทำงานเกลือโซเดียมซัลไฟด์ และน้ำ ปฏิกิริยาติดตั้งอยู่ด้านบนสุด ถัดลงมาเป็นเครื่องควบแน่น (Condenser) และด้านล่างสุดเป็นเครื่องระเหย (Evaporator) ทำหน้าที่บรรจุสารทำงาน (น้ำ) และเกิดการระเหยเมื่อได้รับความร้อนได้ไอสารทำงาน ซึ่งจะถ่ายโอนไปทำปฏิกิริยาเคมีกับสารดูดซับโซเดียมซัลไฟด์ที่บรรจุภายในปฏิกิริยา

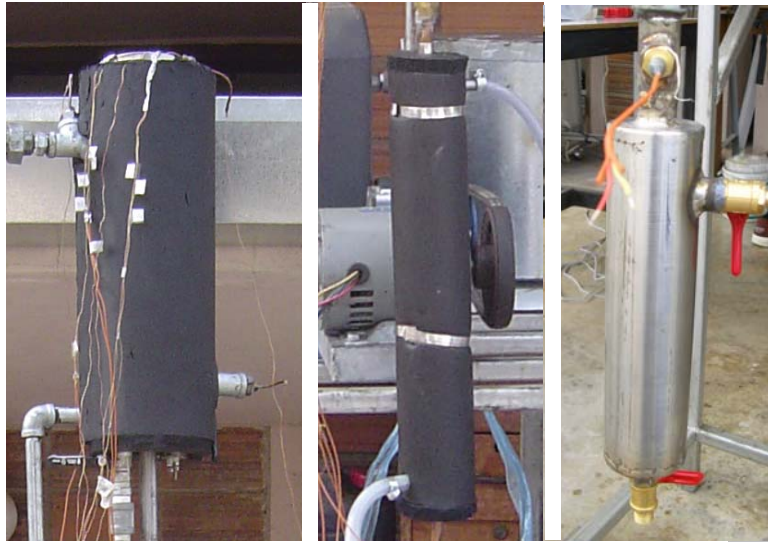
รูปที่ 3.2 แสดงภาพถ่ายของระบบที่มีการประกอบเชื่อมระหว่างอุปกรณ์สำคัญเข้าด้วยกัน (Assembly) และประกอบกับอุปกรณ์เสริม (ระบบให้ความร้อนและระบายความร้อน) เรียบร้อยแล้ว และรูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์หลักที่หุ้มฉนวนแล้ว (ปฏิกิริยา เครื่องควบแน่น และเครื่องทำระเหย) สำหรับตำแหน่งการติดตั้งวาล์วและปั๊มในการปรับทิศทางการไหลเวียนของสารทำงานและสารถ่ายโอนความร้อน จากถังพักสารไปยังอุปกรณ์หลัก เพื่อการให้ความร้อนและระบายความร้อนกับปฏิกิริยา เครื่องทำระเหย และเครื่องควบแน่น แสดงดังรูปที่ 3.4



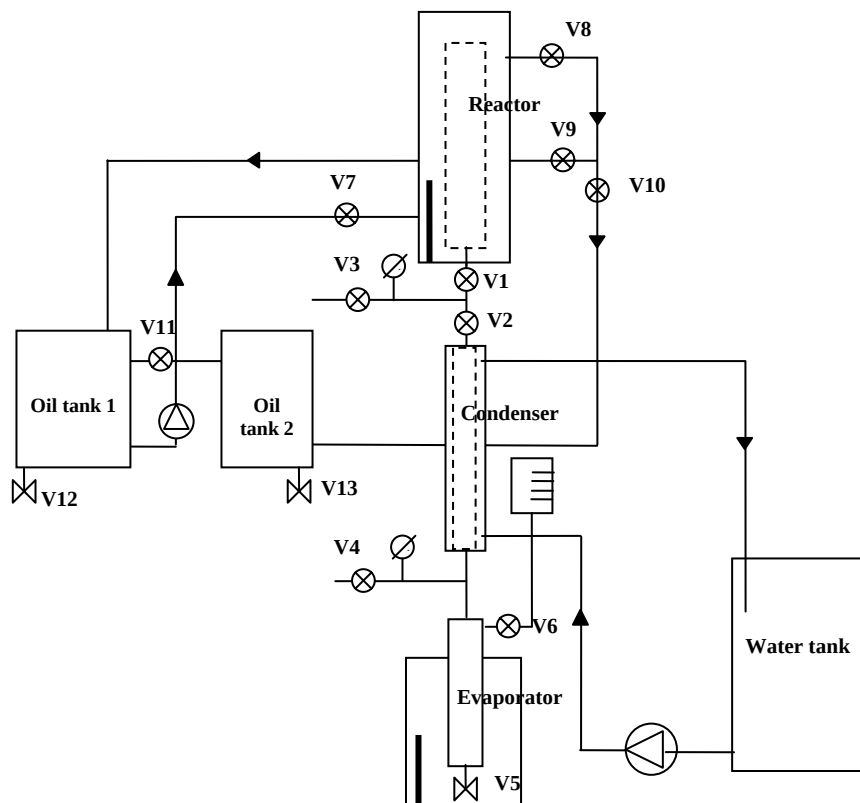
รูปที่ 3.1: ภาพอย่างง่ายแสดงการติดตั้งชุดทดสอบ MCES 1



รูปที่ 3.2: ภาพถ่ายแสดงการติดตั้งชุดทดสอบ MCES 1



รูป 3.3 อุปกรณ์หลักของชุดทดสอบ คือ 1) ปฏิกรณ์ 2) เครื่องควบคุมแรงดัน และ 3) เครื่องทำระเหย



รูปที่ 3.4: แผนภาพแสดงตำแหน่งวาล์วของระบบ MCES 1

รายละเอียดการออกแบบอุปกรณ์หลักทั้ง 3 คือ ปฏิกรณ์ เครื่องควบแน่น และ เครื่องทำระเหย ดังนี้

ปฏิกรณ์ (Reactor)

ปฏิกรณ์เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างเกลือโซเดียมซัลไฟด์กับน้ำ เกิดเป็นเกลือโซเดียมซัลไฟด์ไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S} \cdot x\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งปฏิกิริยาดูดซับทางเคมีนี้ นับเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ หากปฏิกิริยาไปข้างหน้าจะเกิดการคายความร้อนของการดูดซับออกมา และหากย้อนกลับทิศทางจำเป็นจะต้องให้ความร้อนเข้าไป คือ เมื่อเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างเกลือ Na_2S (สารดูดซับ) กับน้ำ (สารถูกดูดซับ) จะได้รับความร้อนของการดูดซับ (Q_{ads}) ออกมา ในทางกลับกันหากใส่ความร้อนเพื่อการคายสารดูดซับ (Q_{des}) เข้าไปจะเป็นการแตกพันธะน้ำออกจากเกลือในรูปของไอน้ำที่จะถูกขับออกมา

ปฏิกรณ์ที่บรรจุสารดูดซับถูกออกแบบอย่างง่าย ให้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก ซึ่งมักเป็นรูปแบบที่พบในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ปฏิกรณ์ทำจากโลหะ สแตนเลส (Stainless Steel) เพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อนของกรดที่อาจเกิดขึ้นเป็น by product ของปฏิกิริยา มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm สูง 35 cm ภายในติดตั้งท่อขนาด 2.54 cm สูง 30 cm เจาะรูขนาด 0.5 cm ทั่วโดยรอบ เพื่อเป็นช่องทางเดินของไอน้ำเข้าและออกจากปฏิกรณ์ มีรูที่เจาะโดยรอบ (Perforated tube) เพื่อให้ไอน้ำกระจายสู่เกลือได้อย่างทั่วถึง และมีตะแกรงสแตนเลส ขนาด 100 mesh หุ้มรอบท่อไอน้ำไว้เพื่อให้เกลือคงรูปเป็นทรงกระบอกได้ เนื่องจากเกลือโซเดียมซัลไฟด์มีลักษณะเป็นเม็ดแฉะและขึ้นรูปได้ยาก และตะแกรงยังช่วยป้องกันไม่ให้สารดูดซับรั่วผ่านเข้ามาในช่องทางเดินไอน้ำได้ ด้านบนมีฝาปิดอย่างแน่นหนา แต่สามารถถอดเข้าออกได้เพื่อการเปลี่ยนสารทดสอบตามแบบการทดลองที่ได้กำหนดไว้ ลักษณะของปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.5

การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่และออกจากปฏิกรณ์ ใช้น้ำมันถ่ายโอนความร้อนเป็นตัวกลาง โดยออกแบบเปลือกอีกชั้นทางด้านนอกปฏิกรณ์ ที่มีท่อนำน้ำมันเข้า และท่อนำน้ำมันออก และติดตั้งลวดฮีตเตอร์ไฟฟ้า เพื่อเป็นตัวแทนการแหล่งความร้อน อุณหภูมิสูงสำหรับไล่ไอน้ำจากปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยระหว่างช่วงการให้ความร้อนกับปฏิกรณ์ และการระบายความร้อนออกจากปฏิกรณ์ จะอาศัยระบบการไหลเวียนของน้ำมันร้อนหรือโดยไหลเวียนจากถังเก็บน้ำมันดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะถูกเปิดในช่วงให้ความร้อนโดยเทอร์โมสแตทช่วยในการควบคุมอุณหภูมิ และน้ำมันร้อนจะถูกถ่ายออกเพื่อแทนที่ด้วยน้ำมันเย็นในช่วงการดึงความร้อนออกจากปฏิกรณ์

รูปที่ 3.7 และ 3.8 แสดงภาพถ่ายของปฏิกรณ์หลังจากที่หุ้มฉนวนแล้ว และภาพถ่ายจากด้านบนของปฏิกรณ์ที่ติดตั้งในถังน้ำมันแล้ว ซึ่งจะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลต่อ

probe เข้าไปยังภายในปฏิกรณ์เพื่อวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในขณะใดใดของวงจรการทำงานของระบบ MCES 1

เครื่องควบแน่น (Condensor)

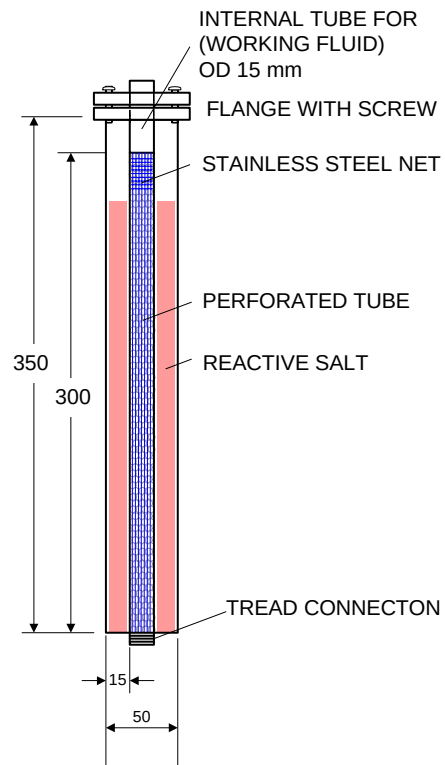
เครื่องควบแน่นเป็นส่วนที่เกิดการควบแน่นของสารทำงานไอน้ำที่ถูกคายออกจากปฏิกรณ์โดยเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว และระบายความร้อนจากการควบแน่นออกไปโดยน้ำหล่อเย็น ส่วนของเหลวน้ำ (Condensate) ที่เกิดจากการควบแน่นจะไหลลงมาสะสมไว้ที่ส่วนทำระเหยด้านล่างสุด

เครื่องควบแน่นออกแบบอย่างง่ายเป็นท่อทรงกระบอก 2 ชั้น ทำจากโลหะสแตนเลสเช่นกัน ท่อนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm และท่อใน 2.54 cm สูง 30 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และ 3.10 การระบายความร้อนจากเครื่องควบแน่นจะใช้น้ำหล่อเย็นจากน้ำประปา ที่ไหลเข้าและออกผ่านท่อทางเข้าและท่อทางออกดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 จากภาพส่วนควบแน่นจะอยู่ระหว่างปฏิกรณ์และเครื่องทำระเหย ภาพเครื่องควบแน่นที่หุ้มฉนวนแล้วแสดงดังรูปที่ 3.3

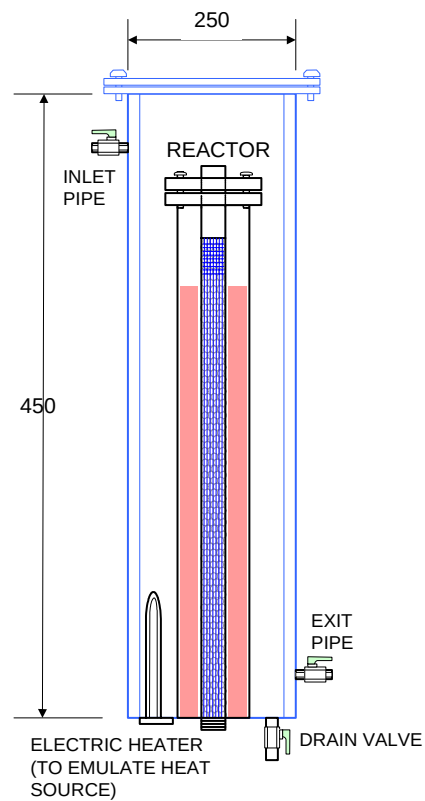
เครื่องทำระเหย (Evaporator)

เครื่องทำระเหยเป็นอุปกรณ์ที่เกิดการเปลี่ยนสถานะของสารถูกดูดซับ (น้ำ) จากของเหลวเป็นไอ ที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ (Vacuum pressure) โดยระดับต่ำของความดันที่ทำได้ จะขึ้นอยู่กับเทคนิคการประกอบและต่อระบบว่าสามารถควบคุมการรั่วไหลได้ดีแค่ไหน และสามารถดึงอากาศออกจากระบบได้ดีเพียงใด (Vacuum technique) ส่วนนี้จะทำหน้าที่เก็บสารทำงานที่ถูกควบแน่นมาจากส่วนควบแน่น เพื่อการระเหยเป็นไอน้ำไปยังช่วงการทำงาน (Phase) ถัดไป ไอน้ำที่ระเหยจะไหลย้อนขึ้นไปสู่ปฏิกรณ์ด้วยแรงลอยตัวและความดันต่างระหว่างเครื่องทำระเหยและปฏิกรณ์ เพื่อไปทำปฏิกิริยากับชั้นสารดูดซับภายในปฏิกรณ์

เครื่องทำระเหยออกแบบให้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก ทำจากโลหะสแตนเลสเช่นกัน ท่อนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.81 cm สูง 20 cm ลักษณะของเครื่องทำระเหยแสดงดังรูปที่ 3.11 และการให้ความร้อนกับเครื่องทำระเหยจะอาศัยน้ำมันถ่ายโอนความร้อนที่บรรจุในถังน้ำ การติดตั้งเครื่องทำระเหยในถังน้ำแสดงดังรูปที่ 3.12 ซึ่งตามทฤษฎีหากการทำ Vacuum ในระบบดีพอ น้ำจะต้องสามารถระเหยได้ด้วยความดันและอุณหภูมิมีมั่วที่ต่ำ จนถึงระดับที่เกิดการทำคามเย็นที่ส่วนทำระเหยได้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดในด้านเทคโนโลยีการสร้างส่วนทำระเหย ที่ยังต้องได้รับการปรับปรุงต่อไป จึงยังพบความบกพร่องในการทำระเหย ทำให้อุณหภูมิทำระเหยสูงถึง 40 – 60 °C รูปที่ 3.13 แสดงภาพถ่ายการติดตั้งเครื่องทำระเหยในถังน้ำ



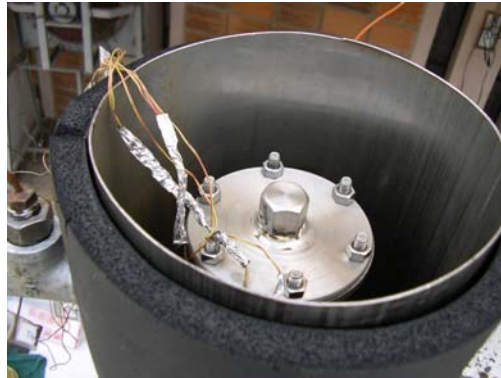
รูปที่ 3.5: ภาพอย่างง่ายแสดงลักษณะของส่วนปฏิกรณ์



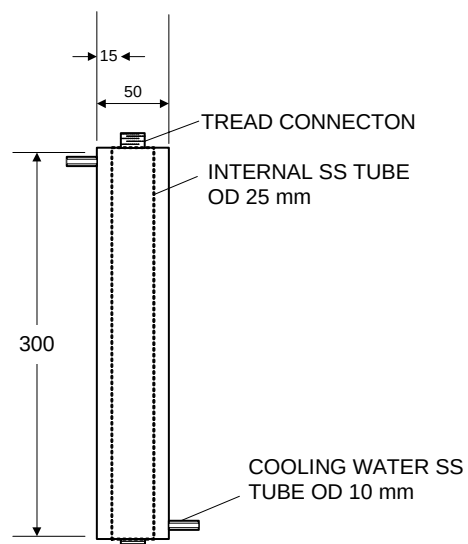
รูปที่ 3.6: การติดตั้งปฏิกรณ์ในถังสารถ่ายเทความร้อน
หมายเหตุ: Drawing มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) ทุกรูป



รูปที่ 3.7: ภาพถ่ายส่วนปฏิบัติการที่หุ้มฉนวนแล้ว



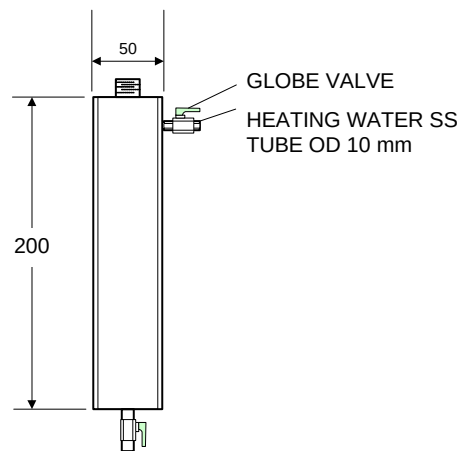
รูปที่ 3.8: ภาพแสดงภายในของถังสารถ่ายเทความร้อน



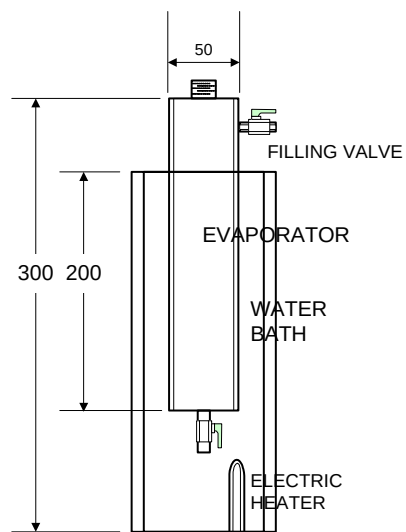
รูปที่ 3.9: ภาพแสดงเครื่องควบแน่น



รูปที่ 3.10: ภาพถ่ายแสดงการติดตั้งเครื่องควบแน่น



รูปที่ 3.11: ภาพตัดขวางแสดงเครื่องทำระเหย



รูปที่ 3.12: ภาพแสดงการติดตั้งเครื่องทำระเหย

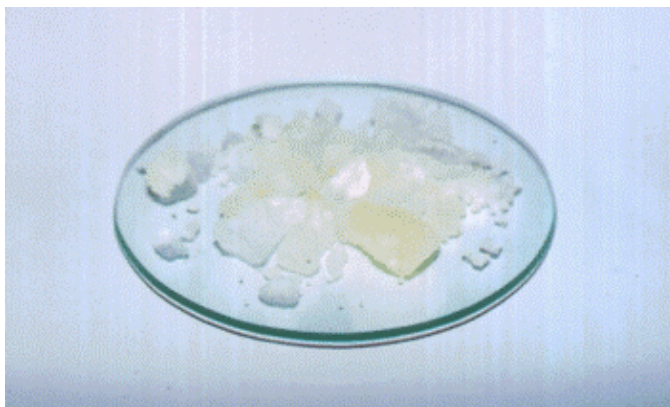


รูปที่ 3.13: ภาพถ่ายแสดงการติดตั้งเครื่องทำระเหย

3.1.2. สารเคมี

สารเคมีหลักสำหรับระบบ MCES คือ คู่สารทำงาน ประกอบด้วย สารดูดซับ ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S} \cdot x\text{H}_2\text{O}$) มีเนื้อสาร Na_2S ประมาณ 35 % โดยน้ำหนัก ของบริษัท MERCK ดังรูป 3.14 และสารถูกดูดซับ คือ น้ำกลั่นบริสุทธิ์ (Distilled Water) นอกจากนี้ยังได้ทดสอบสารผสม (Binder) 2 ชนิด เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนในแท่นสารดูดซับ คือ แกรไฟต์ (Graphite) ดังรูปที่ 3.15 และเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber)

เส้นใยคาร์บอนมีจำหน่ายเป็นม้วน และถูกนำมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ชิ้นละ 5 mm ก่อนผสมกับโซเดียมซัลไฟด์ ดังรูป 3.16 ส่วนสารเคมีอื่นๆ ได้แก่ น้ำมันถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer Oil) ชนิด PTT HITEMP 500



รูปที่ 3.14: สารโซเดียมซัลไฟด์ไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S} \cdot x\text{H}_2\text{O}$)



รูปที่ 3.16: แกรไฟต์ (Graphite)



รูปที่ 3.15: เส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber)

3.1.3. เครื่องมือวัด

เครื่องมือวัดมีความจำเป็นสำหรับระบบ ซึ่งต้องเก็บข้อมูลการทดสอบเพื่อนำไปวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ ระบบดูดซับมีข้อมูลการทดสอบที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และอัตราการไหล การวัดอุณหภูมิมีทั้งการอ่านค่าเฉพาะจุดควบคู่กับการอ่านพร้อมกับบันทึกผลโดยเครื่องบันทึกผล (ดังรูปที่ 3.17) โดยใช้เครื่องมือวัดดังนี้

- 1) เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท (Hg Thermometer)
- 2) สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด K
- 3) เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) ยี่ห้อ TSUS Model TDL K 002

สำหรับการวัดความดันจะใช้เกจวัดความดัน (Pressure Gage) แบบสูญญากาศ ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17: ชุดเก็บบันทึกข้อมูล

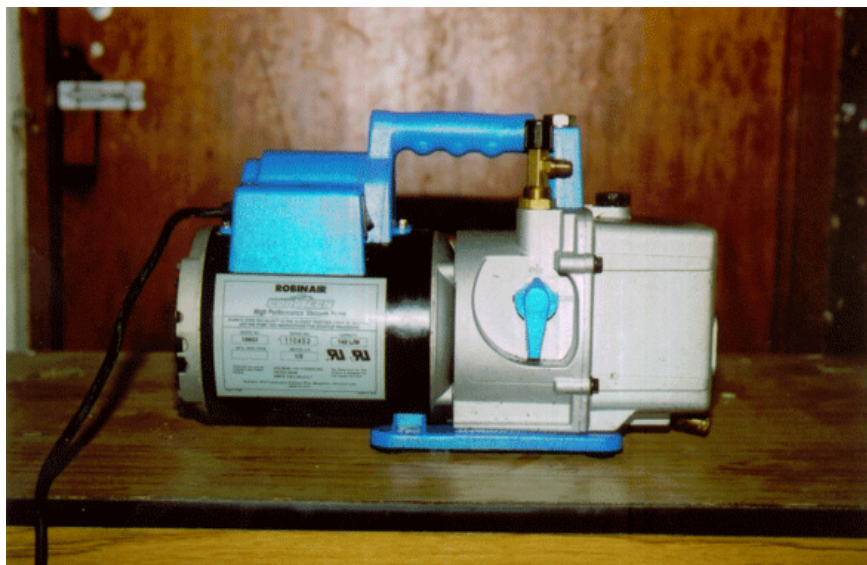


รูปที่ 3.18: เกจวัดความดัน

3.1.4. อุปกรณ์ประกอบ

อุปกรณ์ประกอบหมายถึงระบบให้ความร้อน อาทิ ในช่วงการคายสารดูดซับ และระบบให้ความเย็นหรือระบายความร้อน อาทิ ในช่วงการดูดซับ เมื่อทำการออกแบบ สร้างและประกอบ อุปกรณ์สำคัญ 3 ตัว ได้แก่ ปฏิกิริยา, เครื่องทำระเหย และ เครื่องควบแน่น เรียบร้อยแล้ว จึงได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์เสริม เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ระบบแวลวล้อมเหล่านี้ ได้แก่ อ่างน้ำมันถ่ายโอนความร้อน, อ่างน้ำถ่ายโอนความร้อน, ถังน้ำมัน, การต่อระบบปั๊มน้ำมันและน้ำ, การต่อระบบสุญญากาศ ฯลฯ ซึ่งข้อมูลลักษณะจำเพาะของอุปกรณ์ประกอบ มีดังต่อไปนี้

- อ่างน้ำมันถ่ายโอนความร้อนบริเวณปฏิกรณ์ (Thermal oil bath) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากโลหะสแตนเลส มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm สูง 45 cm ทำหน้าที่บรรจุน้ำมันถ่ายโอนความร้อนเพื่อตั้งและให้ความร้อนแก่ปฏิกรณ์ บริเวณด้านล่างของอ่าง ติดตั้งฮีทเตอร์ความร้อน ขนาด 1000 วัตต์
- อ่างเก็บน้ำมันถ่ายโอนความร้อน (Oil storage tank) มีสองขนาดบรรจุ คือ ขนาดบรรจุ 20 และ 10 ลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 และ 20 cm สูง 30 cm ทำจากสแตนเลส ทำหน้าที่บรรจุน้ำมันถ่ายโอนความร้อนที่ส่งและไหลกลับลงมาจากถังน้ำมันที่ติดตั้งกับปฏิกรณ์ และช่วยการหมุนเวียนน้ำมันถ่ายโอนความร้อน
- ถังน้ำ (Water bath) ทำหน้าที่ให้ความร้อนกับเครื่องระเหย โดยติดตั้งแท่งโลหะให้ความร้อน ที่บริเวณด้านล่าง ลักษณะทำจากโลหะสแตนเลสโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 cm สูง 30 cm
- ปั๊มน้ำมันและปั๊มน้ำ (Oil pump and water pump) เพื่อหมุนเวียนน้ำมันและน้ำสำหรับการตั้งหรือให้ความร้อน และ หล่อเย็นระบบ
- ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ยี่ห้อ Rubinair Cool Tech. สำหรับทำระบบให้มีความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ โดยไล่อากาศภายในระบบ และไล่สารที่ตกค้างอยู่ในระบบออกไป ดังรูปที่ 3.19
- เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) สำหรับการทดสอบรอยรั่วของระบบ



รูปที่ 3.19: ปั๊มสุญญากาศ

3.1.5. การออกแบบการทดลองระบบ MCES 1

การทดลองหนึ่งเท่ากับหนึ่งวัฏจักรการทำงานของระบบดูดซับ สภาวะการทำงานถูกกำหนดโดยระดับอุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิแหล่งความร้อนสำหรับการคายสารดูดซับ (โดยอุณหภูมิน้ำมันถ่ายโอนความร้อน) อุณหภูมิแหล่งระบายความร้อนสำหรับการดูดซับ (โดยอุณหภูมิน้ำมันถ่ายโอนความร้อน) และอุณหภูมิของเครื่องทำระเหยในช่วงการดูดซับ นอกจากนี้ยังถูกกำหนดโดยระยะเวลาของวัฏจักร (Cycle time) อีกด้วย ซึ่งเงื่อนไขการทำงานของระบบในการออกแบบการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 สภาวะและช่วงการทำงานที่ใช้ในการออกแบบการทดสอบระบบดูดซับ

สภาวะการทำงาน	ช่วงการทำงาน
อุณหภูมิของน้ำมันถ่ายโอนความร้อน	
ช่วงปฏิกิริยาคายสารดูดซับ	80 – 100 °C
ช่วงเกิดปฏิกิริยาดูดซับ	25 – 30 °C
อุณหภูมิของเครื่องระเหย	45 – 60 °C
อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นในเครื่องควบแน่น	25 – 30 °C
ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกรณ์	30 – 60 นาที

การทดสอบหนึ่งวัฏจักรการทำงานของระบบดูดซับ แบ่งเป็น 4 ช่วงหลัก ได้แก่

- 1) ช่วงที่ 1 Production Phase (Reaction Phase) ปลอยไอน้ำจากเครื่องระเหย ที่ทราบอุณหภูมิแน่นอนเข้าไปทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลไฟด์ ภายในเสื้อน้ำมัน (Oil jacket) ของปฏิกรณ์บรรจุน้ำมันถ่ายโอนความร้อนเพื่อดึงความร้อนออกจากระบบ โดยปฏิกิริยาจะสิ้นสุดเมื่ออุณหภูมิของสารดูดซับภายในปฏิกรณ์คงที่ รวมทั้งความดันของระบบจะคงที่ด้วยเช่นกัน
- 2) ช่วงที่ 2 Cooling Phase ใช้น้ำมันถ่ายโอนความร้อนอุณหภูมิต่ำดึงความร้อนจากปฏิกรณ์ ทำให้มีอุณหภูมิลดลงจนคงที่
- 3) ช่วงที่ 3 Regeneration Phase ใช้น้ำมันถ่ายโอนความร้อนอุณหภูมิสูงให้ความร้อนแก่ปฏิกรณ์ เพื่อไล่สารทำงานน้ำออกจากโซเดียมซัลไฟด์ โดยอุณหภูมิของสารภายในปฏิกรณ์เพิ่มสูงขึ้นและคงที่เมื่อไล่ น้ำออกหมดแล้ว
- 4) ช่วงที่ 4 Cooling Phase ใช้น้ำมันถ่ายโอนความร้อนอุณหภูมิต่ำดึงความร้อนจากปฏิกรณ์ออก เพื่อให้มีอุณหภูมิลดลงหลังการไล่ น้ำออก

ข้อมูลตัวแปรสำคัญที่วัดในการทดลอง ได้แก่

- (1) อุณหภูมิ ซึ่งวัดโดยการติดตั้งสายวัด (Sensor) ของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในไอน้ำเครื่องทำระเหย, น้ำร้อน, โซเดียมซัลไฟด์บริเวณผิวสัมผัสภายนอกของปฏิกรณ์ และน้ำมันถ่ายโอนความร้อนในอ่างน้ำมัน โดยติดตั้งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังต่อไปนี้
 - 1) ปฏิกรณ์ ติดตั้ง 3 ระดับ คือ บน กลางและล่าง ระดับละ 3 ตำแหน่ง และภายในปฏิกรณ์ วางตามแนวรัศมีของปฏิกรณ์ 2 ตำแหน่ง และรวมจุดวัดทั้งหมด 8 ตำแหน่ง
 - 2) อ่างน้ำมันถ่ายโอนความร้อน ติดตั้งตามแนวตั้ง 2 ระดับ วางตามแนวรัศมี 2 ตำแหน่ง และบริเวณทางเข้าและออก รวมจุดวัดทั้งหมด 6 ตำแหน่ง
 - 3) เครื่องทำระเหย ติดตั้งไว้ที่ด้านบนก่อนที่จะไอน้ำจะไหลเข้าสู่ปฏิกรณ์
 - 4) เครื่องควบแน่น ติดตั้งบริเวณทางเข้าและทางออกของน้ำหล่อเย็น
- (2) ความดันของระบบ ใช้เกจวัดความดัน (Pressure Gauge) อ่านความดันจากเกจวัดความดัน ซึ่งติดตั้งที่บริเวณเครื่องทำระเหย เพื่อวัดความดันอิมัตว์ของไอน้ำปฏิกรณ์ และความดันภายในปฏิกรณ์ก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยา
- (3) ปริมาณสารทำงานน้ำที่ถูกดูดซับในปฏิกรณ์ในแต่ละวัฏจักร วัดโดยการตวงปริมาณน้ำที่เหลือในเครื่องทำระเหยเมื่อสิ้นสุดแต่ละวัฏจักรทำงาน

3.1.6. การทดสอบระบบ MCES 1 เบื้องต้น

การเตรียมระบบเพื่อการทดสอบเบื้องต้น มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เริ่มจากการเตรียมการใช้งานของระบบดูดซับ โดยบรรจุสารดูดซับลงในปฏิกรณ์
- 2) ทำระบบปฏิกรณ์ให้เป็นสุญญากาศ
- 3) ขณะเดียวกันที่เครื่องระเหยทำระบบให้เป็นสุญญากาศ
- 4) บรรจุน้ำกลั่นสำหรับเป็นสารทำงาน
- 5) ให้ความร้อนแก่เครื่องระเหยโดยใช้ขดลวดไฟฟ้าให้ความร้อนแก่อ่างน้ำด้านล่าง เพื่อระเหยสารทำงาน
- 6) ปลอ่ยไอน้ำให้เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารดูดซับในปฏิกรณ์
- 7) เปิดปั๊มน้ำมันถ่ายโอนความร้อนเพื่อให้ไปหมุนเวียนบริเวณปฏิกรณ์
- 8) ให้ความร้อนแก่ปฏิกรณ์เพื่อแยกไอน้ำออกจากสารดูดซับ โดยอาศัยขดลวดไฟฟ้าให้ความร้อนแก่น้ำมันถ่ายโอนความร้อน

- 9) หมุนเวียนน้ำหล่อเย็นบริเวณเครื่องควบแน่น เพื่อควบแน่นไอน้ำที่ถูกไล่
ออก
- 10) คอนเดนเสทจะถูกเก็บไว้ที่เครื่องทำระเหย

ข้อมูลจำเพาะในการเตรียมระบบมีดังนี้

- 1) เตรียมสารดูดซับ กำหนดอัตราส่วนผสมแกรไฟต์ 75 กรัม (30 %) เกลือ
โซเดียมซัลไฟด์ จำนวน 175 กรัม น้ำหนักรวม 250 กรัม แล้วบรรจุลงใน
ปฏิกรณ์
- 2) ทำระบบให้เป็นสุญญากาศ จากนั้นให้ความร้อนแก่ปฏิกรณ์โดยน้ำมันถ้ายอน
ความร้อนอุณหภูมิ 50-60 °C ประมาณ 4 ชั่วโมง เพื่อไล่ไอน้ำที่ตกค้างอยู่ใน
สารดูดซับ
- 3) ทดสอบการรั่วโดยให้ระบบอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ 24 ชั่วโมง

การทดสอบเบื้องต้น มีขั้นตอน ดังนี้

- 1) ทำระบบเป็นสุญญากาศทั้งเครื่องทำระเหยและปฏิกรณ์ ปิดวาล์วกันทั้งสอง
อุปกรณ์ไว้ ให้ความร้อนระดับปานกลางกับเครื่องทำระเหยโดยใช้น้ำร้อนสัมผัส
โดยตรงเพื่อระเหยน้ำให้กลายเป็นไอ ความดันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเริ่ม
คงที่ ใช้เวลาประมาณ 60 นาที
- 2) เปิดวาล์วกันระหว่างปฏิกรณ์กับเครื่องทำระเหย ให้ไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับสาร
ดูดซับภายในปฏิกรณ์ ความดันของระบบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเปลี่ยนแปลง
อย่างช้า ๆ จนกระทั่งคงที่ (ประมาณ 60 นาที)
- 3) ปิดวาล์วกัน ในขณะที่เดียวกันหมุนเวียนน้ำมันถ้ายอนความร้อนเย็นเพื่อดึง
ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมีออกอย่างต่อเนื่อง เพื่อป้องกันการหยุดชะงักของ
ปฏิกิริยา และหล่อเย็นต่อไปอีกเป็นเวลา 60 นาที
- 4) บันทึกความดันก่อนและหลังทดสอบ ปริมาณน้ำที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยากับ
สารดูดซับ
- 5) ทำระบบให้เป็นสุญญากาศ จากนั้นให้ความร้อนแก่ปฏิกรณ์โดยใช้น้ำมันถ้ายอน
ความร้อนอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 6) หมุนเวียนน้ำมันถ้ายอนความร้อนเย็นหมุนเวียนเพื่อดึงความร้อนออกทำให้
ระบบเย็นลง

3.1.7. ขั้นตอนการทดลองระบบ MCES 1

- 3.1.7.1. ตรวจสอบบรยร้วของระบบ โดยใช้ปั้มสุญญากาศดูดอากาศภายในระบบออก ปล่อยทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง บันทึกความดัน
- 3.1.7.2. ต่อสายเทอร์โมคัปเปิลที่จุดวัดบริเวณปฏิกรณ์ ถังน้ำมันถ่ายโอนความร้อน น้ำหล่อเย็น และอื่นๆ เข้ากับเครื่อง Data Logger
- 3.1.7.3. การเตรียมคู่สารทำงาน
 - 1) โซเดียมซัลไฟด์กับสารผสม
 - บดสารโซเดียมซัลไฟด์ให้ละเอียด ซึ่งตามอัตราส่วนที่กำหนด
 - ผสมเกลือโซเดียมซัลไฟด์กับสารผสม (Binder) ในภาชนะและกวนให้เข้ากัน บรรจุสารดูดซับลงในปฏิกรณ์พยายามทำให้เนื้อสารมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งปฏิกรณ์
 - 2) ของไหลทำงาน
 - บรรจุน้ำกลั่นลงในภาชนะ ปริมาตร 100 mL
- 3.1.7.4. ติดตั้งปฏิกรณ์ที่บริเวณด้านบนสุดของชุดทดสอบ หมุนเกลียวให้แน่น ดังรูปที่ 3.20 และ 3.21
- 3.1.7.5. ทำระบบของส่วนปฏิกรณ์และเครื่องทำระเหยให้เป็นสุญญากาศ โดยเปิดวาล์ว 1, 2 และ 3 (ดังแสดงในรูปที่ 3.4) ทำระบบให้เป็นสุญญากาศโดยใช้ปั้มสุญญากาศ ประมาณ 10 นาที (จนกระทั่งความดันคงที่)
- 3.1.7.6. ปิดวาล์ว 3 และสวิตช์ของปั้มสุญญากาศ บันทึกความดันของระบบ
- 3.1.7.7. เปิดปั้มเพื่อสูบน้ำมันถ่ายโอนความร้อนเข้าไปยังอ่างน้ำมันของปฏิกรณ์ โดยเปิดวาล์ว 7 และปรับระดับวาล์วเพื่อหมุนเวียนน้ำมัน โดยเปิดวาล์ว 8, 9 วัดอัตราการไหลของน้ำมันถ่ายโอนความร้อน
- 3.1.7.8. เปิด Heater ที่อ่างน้ำมันของปฏิกรณ์ ตั้งอุณหภูมิไว้ $50^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$ เพื่อไล่น้ำ (Dehydrate) บันทึกเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ต้องการใช้เวลา ประมาณ 3-4 ชั่วโมง ปิด Heater และ ปั้มน้ำมันถ่ายโอนความร้อน
- 3.1.7.9. เปิดปั้มน้ำหล่อเย็นจ่ายให้เครื่องควบแน่น วัดปริมาตรคอนเดนเสท
- 3.1.7.10. ทำระบบให้เย็นลงโดยหมุนเวียนน้ำมันถ่ายโอนเย็น จนกระทั่งอุณหภูมิของปฏิกรณ์คงที่เท่ากับอุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิคงที่) ใช้เวลา 1 ชั่วโมง
- 3.1.7.11. ทำระบบของส่วนปฏิกรณ์และเครื่องระเหยให้เป็นสุญญากาศ
- 3.1.7.12. เติมน้ำกลั่นเข้าไปในเครื่องทำระเหย 100 mL และเปิด Heater ที่อ่างน้ำเพื่อทำระเหยไอน้ำ กำหนดอุณหภูมิ $50^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$ บันทึกอุณหภูมิ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ต้องการ และปล่อยให้สารทำงานเดือดประมาณ 60 นาที

- 3.1.7.13. เปิดวาล์ว 2 เพื่อให้ไอน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารดูดซับภายในปฏิกรณ์ ปลอยให้ทำปฏิกิริยา 30 หรือ 60 นาที ปิดวาล์ว 2 แล้วเปิดปั๊มน้ำหล่อเย็น เพื่อควบแน่นไอน้ำที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา
- 3.1.7.14. หมุนเวียนน้ำมันถ่ายโอนความร้อนต่อไป ประมาณ 60 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่
- 3.1.7.15. เปิด Heater ที่ปฏิกรณ์โดยตั้งอุณหภูมิไว้ 80°C (90°C หรือ 100°C) เพื่อระเหยไอน้ำที่เข้าทำปฏิกิริยา ใช้เวลา 120 นาที
- 3.1.7.16. ทำการทดลองซ้ำ เพื่อเปลี่ยนสภาวะการทดลอง ได้แก่อุณหภูมิที่อ่างน้ำทำระเหย อุณหภูมิของน้ำมันถ่ายโอนร้อน และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาในปฏิกรณ์



รูปที่ 3.20: ลักษณะของปฏิกรณ์



รูปที่ 3.21: การติดตั้งปฏิกรณ์เข้ากับระบบ

3.1.8. การวิเคราะห์ผลการทดสอบระบบ MCES 1

ข้อมูลอุณหภูมิของโซเดียมซัลไฟด์ สารทำงานน้ำ ปริมาตรของน้ำที่เหลือในเครื่องทำระเหย และความดันระบบในช่วงการทดสอบ ได้รับการวิเคราะห์และคำนวณค่าต่างๆ ดังด้านล่าง ทำให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับชุดอุปกรณ์ลักษณะอื่น และใช้เป็นข้อมูลในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะของระบบต่อไป

- (1) การเปลี่ยนแปลงพลังงานตลอดช่วงการทดสอบ
- (2) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนระหว่างปฏิกรณ์กับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำมันถ่ายโอนความร้อน
- (3) สัมประสิทธิ์สมรรถนะเพื่อการทำความร้อน (COP_h)
- (4) ค่าการเก็บพลังงานความร้อนจำเพาะ (SHP)
- (5) ความสามารถในการจ่ายพลังงานความร้อนต่อปริมาตร (VHP)

3.2 ระบบทดสอบเก็บสะสมพลังงานแบบเคมี MCES 2

ระบบ MCES 2 ได้รับการปรับปรุงการออกแบบจากแบบ MCES 1 เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยคงแนวคิดการออกแบบในลักษณะเดียวกัน คือระบบ MCES 2 ประกอบด้วย ปฏิกรณ์ (Reactor) ที่ต่อเชื่อมในแนวดิ่งกับเครื่องควบแน่น ซึ่งควบรวมกับเครื่องทำระเหย (Condensor/Evaporator: CD/EV) ในลักษณะเป็นชุดเดี่ยวหรือ Modular เพื่อความกะทัดรัดของการออกแบบ มีสัมประสิทธิ์สมรรถนะและค่าความจุในการเก็บรักษาพลังงานสูงตลอดจนง่ายต่อการขยายขนาดระบบและการติดตั้ง

คู่สารทำงานที่เลือกใช้คือ เกลือโซเดียมซัลไฟด์-น้ำ ($Na_2S \cdot xH_2O/H_2O$) เช่นเดียวกัน ซึ่งอาศัยกระบวนการดูดซับแบบ Chemical Adsorption บนพื้นฐานของปฏิกิริยา Hydration/Dehydration ที่ให้ค่าพลังงานการดูดซับสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคู่สารอื่น และใช้สารทำงานน้ำซึ่งเป็นของไหลทำงานที่ดีที่สุด โดยมีการปรับปรุงส่วนผสมของสารดูดซับในปฏิกรณ์ในการขึ้นรูปแทนปฏิกิริยา เพื่อลดข้อยุ่งยากในการประจุเกลือโซเดียมซัลไฟด์ โดยการผสมกับสารผสม (binder) และสารเสริมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ (additives) อื่นด้วย

3.2.1 แนวคิดการขึ้นรูปแทนปฏิกิริยา

จากการค้นคว้าเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การขึ้นรูปสารตั้งต้นประเภทเกลือโซเดียมซัลไฟด์ทำได้ยาก เนื่องจากเกลือโซเดียมซัลไฟด์ไฮเดรตมีลักษณะคล้ายเกลือสีขาวขุ่นและจับตัวเป็นก้อนๆ เมื่ออบแล้วจะเป็นของแข็งที่ชุ่มมากคล้ายเกลือเปียกไม่สามารถขึ้นรูปได้ อาจขึ้นรูปโดยการฉาบบนผิวของปฏิกรณ์โดยตรงและใช้ Epoxy เป็นตัวประสาน (แต่เลือก Epoxy ได้ยากและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย) และจะมีปัญหาเรื่องน้ำหนักของปฏิกรณ์ ดังนั้นการขึ้นรูปแทนปฏิกิริยา (Reactive bed) หรือแทนสารดูดซับ (Adsorbent bed)

ในงานวิจัยนี้ จึงต้องเน้นการขึ้นรูปให้เป็นของแข็ง (Consolidation) เพื่อให้ Reactive bed สามารถขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกได้ภายในปฏิกรณ์รูปทรงกระบอก Stainless Steel โดยการผสมเกลือโซเดียมซัลไฟด์กับ Additive และ Binder ที่เหมาะสมทำให้ขึ้นรูปได้และช่วยในการถ่ายโอนมวลและความร้อน

จากการค้นคว้าและทดสอบ Additive กับ Binder หลากหลายตัวและหลายส่วนผสม ปรากฏว่าส่วนผสมที่ดีที่สุดที่ทำให้สารผสมปฏิกิริยา (Reactive mixture) สามารถคงรูปอยู่ได้ดีที่สุด ประกอบด้วย กราไฟต์แบบนำความร้อนได้ดี (SGL Conductive Graphite), แป้งมัน (Organic Starch), และสาร Additive แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) โดยสารทั้งหมดได้รับการบดและผสมกันก่อนการนำมาขึ้นรูปในท่อ Stainless steel ได้ลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกกลวง ซึ่งเจาะรูตรงกลางตามแนวยาว สำหรับให้อิหร่านผ่าน

3.2.2 องค์ประกอบแท่งปฏิกิริยา (Reactive bed consolidation)

จากการทดสอบหลากหลายส่วนผสมของ Reactive bed ของโซเดียมซัลไฟด์ ให้สามารถขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกได้ภายในปฏิกรณ์ทรงกระบอก Stainless Steel โดยการผสมเกลือโซเดียมซัลไฟด์กับ Additive กับ Binder ที่ได้ค้นคว้าและทดสอบในหลากหลายตัว และหลายส่วนผสม ซึ่งจะทำให้การถ่ายโอนมวลและความร้อนดีขึ้น ปรากฏว่าส่วนผสมที่ดีที่สุดที่ทำให้สารผสมปฏิกิริยา (Reactive mixture) สามารถคงรูปอยู่ได้ดีที่สุด ประกอบด้วย

- 1) Salt: เกลือโซเดียมซัลไฟด์ ($\text{Na}_2\text{S} \cdot x\text{H}_2\text{O}$) ทำหน้าที่สารดูดซับ (Adsorbent) กับสารทำงานน้ำ ความหนาแน่นเกลือนี้นี้ประมาณ 2500 kg/m^3
- 2) Graphite: สาร Binder เพื่อเพิ่มความสามารถในการถ่ายโอนความร้อน ได้แก่ Conductive graphite (จากบริษัท SGL Graphite ประเทศเยอรมัน) ความหนาแน่น 800 kg/m^3
- 3) Binder: สาร Binder เพื่อการคงรูปของ Reactive bed ได้แก่ แป้งมัน (Organic Starch) ซึ่งจะสามารถทำให้เกลือโซเดียมซัลไฟด์ และ กราไฟต์เกาะเกี่ยวกันและคงรูปได้ ความหนาแน่นแป้งมันประมาณ 2000 kg/m^3
- 4) Additive: สารเสริมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ หรือ Additive เพื่อช่วยการเกาะตัว และแข็งตัวและดูดซับน้ำที่ปนอยู่ใน Reactive mixture ซึ่งเป็นสารที่มีองค์ประกอบคล้ายซีเมนต์ ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ความหนาแน่นประมาณ 2000 kg/m^3

สารตั้งต้นเพื่อการขึ้นรูป Reactive mixture ทั้ง 4 ตัว ได้รับการชั่งตวงตามอัตราส่วน Salt: Graphite: Binder: Additive ในหน่วยกรัม เป็น 24.3/ 74.9/ 4.1/ 8.1 หรือ 3: 9.25: 0.5: 1 (โดยมวล) และมีอัตราส่วนโดยมวล (mass fraction) เป็น 0.22, 0.67, 0.04, 0.07 ตามลำดับ ทำให้สารผสมปฏิกิริยามีความหนาแน่นโดยเฉลี่ย $1,302.3 \text{ kg/m}^3$ จากนั้นสารทั้งหมดได้รับการบดและผสมกันก่อนการนำมาขึ้นรูปในท่อ Stainless steel ได้ลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกกลวง (มีการเจาะรูตรงกลางตามแนวยาว) สำหรับให้อิหร่านผ่าน โดยปริมาตรของท่อทรงกระบอก คือ 18.5 cm^3 ทำให้มวลของเกลือโซเดียมซัลไฟด์ที่อยู่ใน Reactive mixture เป็น 24 g โดยประมาณ และมวลรวมของ Reactive mixture ประมาณ 111 g

3.2.3 ขั้นตอนการเตรียมทดสอบระบบ MCES 2

- 1) ประกอบปฏิกรณ์ (Reactor) ที่มี Reactive mixture บรรจุอยู่ กับส่วนเครื่องควบแน่นที่ควบรวมกับเครื่องทำระเหย (CD/EV) โดยติดตั้งวาล์ว Swagelok ขนาด $\frac{1}{2}$ " ตรงกลาง (วาล์วจำเป็นต้องมีการทำ support เพื่อให้ยึดและเปิดปิดได้เพราะวาล์วค่อนข้างหนักและก้านวาล์วใหญ่) โดยข้อต่อทั้งหมดเป็น Stainless Steel (SS) จากบริษัท Swagelok ที่สามารถถอดเปลี่ยนได้ง่าย โดยการทดสอบแรกกำหนดความยาวส่วน Reactor และ CD/EV เป็น 300 mm เท่ากัน
- 2) ปิดจุดที่ด้านปลายของ Reactor และที่ด้านปลายส่วนของ CD/EV โดยที่ปลายส่วนของ CD/EV จะมีระบบท่อและวาล์วสำหรับเติมสารทำความเย็นประกอบอยู่ด้วย
- 3) เชื่อมต่อระบบ Water jacket (เพื่อการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารถ่ายโอนความร้อน (น้ำ) กับระบบ) เข้ากับส่วน Reactor และ CD/EV โดยออกแบบ Water Jacket ให้เป็นแบบถอดประกอบได้ดังรูปที่ 3.22
- 4) ปิดวาล์วระหว่าง Reactor และ CD/EV เพื่อทำระบบด้าน CD/EV ให้เป็นสุญญากาศ
- 5) เตรียมความพร้อมของ Reactive mixture โดยการ Desorption แก๊สที่ปนอยู่, อิหร่าน และแก๊สที่ไม่ควบแน่น โดยการหมุนเวียนสารถ่ายโอนความร้อน (น้ำ) ผ่าน Water jacket ของส่วน Reactor จนกระทั่งอุณหภูมิผนังของ Reactor ประมาณ $70 - 80^\circ\text{C}$ จากนั้นตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ให้อุณหภูมิคงที่ระยะหนึ่งและเริ่มลดลง) และทำการเปิดวาล์วเพื่อไล่สาร (Desorption/Regeneration) ออกจากปฏิกรณ์และสารจะไหลเข้าสู่ส่วนของ CD/EV ขณะเดียวกันหมุนเวียนน้ำถ่ายโอนความร้อนเพื่อระบายความร้อนจาก CD ให้แก๊สเหล่านั้นควบแน่น จากนั้นปิดวาล์ว
- 6) ระบายสารที่ถูกไล่ออกจาก Reactor ทั้งส่วนที่ควบแน่นและไม่ควบแน่นใน CD ออกจนหมด แล้วทำระบบให้เป็นสุญญากาศอีกครั้งหนึ่ง เพื่อเตรียมการเติมสารทำงาน (น้ำ)

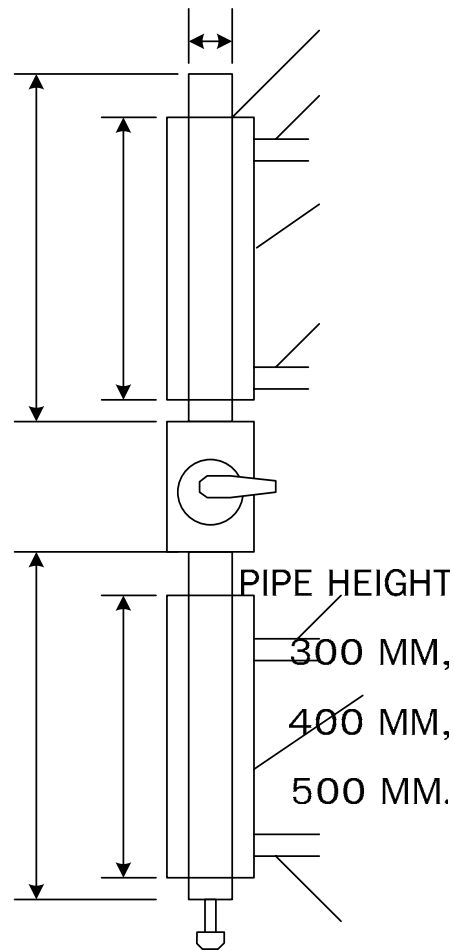
- 7) ในการเติมสารทำงาน (น้ำ) ทำการดูดสารออกจากส่วน CD/EV (Suction) โดยปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) เพื่อไล่อากาศและ non-condensable gas ออกไป และทำระบบให้เป็นสุญญากาศ จากนั้นดูดสารทำงานน้ำ (De-ionized water) จากภาชนะตามปริมาณที่คำนวณไว้ (พยายามไม่ให้อากาศเข้าสู่ระบบ)
- 8) ติดตั้ง Thermocouple ที่ต่อเข้ากับระบบ Data logger เพื่อบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ (ผนังของ Reactor, ผนังของ CD/EV, น้ำถ่ายโอนความร้อนขาเข้าและขาออก Water jacket ทั้งด้าน Reactor และ CD/EV, ผนังด้านบนและล่างของวาล์ว Swagelok)
- 9) ทำการทดสอบเบื้องต้นโดยให้ระบบ MCES นี้ทำงานครบวงจร (Desorption และ Adsorption)
 - (i) ช่วง Desorption หมุนเวียนน้ำร้อนเข้าสู่ Reactor water jacket และหมุนเวียนน้ำเย็นเข้าสู่ CD/EV water jacket ไอน้ำถูกไล่ออกจาก Reactor ไปควบแน่นใน CD
 - (ii) ช่วง Adsorption หมุนเวียนน้ำเย็น (เพื่อเป็นแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ) เข้าสู่ส่วน CD/EV water jacket และหมุนเวียนน้ำระบายความร้อนที่อุณหภูมิบรรยากาศเข้าสู่ส่วน Reactor ไอน้ำจะระเหยจาก EV ไปดูดซับกับโซเดียมซัลไฟต์ใน Reactor
- 10) เตรียมการบันทึกอัตราการไหลของสารถ่ายโอนความร้อน

3.2.4 อุปกรณ์ประกอบระบบ MCES 2

- 1) เครื่อง MCES 2 ที่ประกอบด้วยปฏิกรณ์ วาล์ว และ เครื่องทำระเหยควบรวมกับเครื่องควบแน่น
- 2) ถังน้ำร้อน (เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ความสูง 28 cm ความจุน้ำ 9.8 L) สำหรับให้ความร้อนปฏิกรณ์ และภายในติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 kW พร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ
- 3) ถังน้ำหล่อเย็น (เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm สูง 40 cm ความจุน้ำ 25.1 L) สำหรับระบายความร้อนปฏิกรณ์
- 4) ถังน้ำให้ความร้อนและระบายความร้อนสำหรับเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่น (เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm สูง 30 cm ความจุน้ำ 14.1 L)
- 5) ปั๊มน้ำระบายความร้อน 2 ตัว ติดตั้งในถังน้ำหล่อเย็นทั้งสองถัง ถังละ 1 ตัว (ใช้ปั๊มแบบเดียวกับปั๊มอ่างปลา)
- 6) ปั๊มน้ำร้อนแบบต่อมอเตอร์ภายนอก ยี่ห้อ Venz Super power ขนาด ¼ แรงม้า
- 7) เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ Task Instruments
- 8) ชุดคอมพิวเตอร์สำหรับเก็บและประมวลผลข้อมูลจาก Data logger ของ Task Instruments ซึ่งสามารถส่งข้อมูลไปเก็บบันทึกและแสดงผล (Monitoring) ได้บนหน้าจอคอมพิวเตอร์

3.2.5 การออกแบบการทดลองระบบ MCES 2

- 1) การบันทึกค่าอุณหภูมิที่ 8 ตำแหน่ง ทุก $\frac{1}{2}$ นาที ได้แก่
 - น้ำถ่ายโอนความร้อนที่ทางเข้าและทางออกของ Water jacket ของปฏิกรณ์ 2 ตำแหน่ง
 - $T_{hw,i}$ และ $T_{hw,o}$ ช่วงการคายสารดูดซับ และ
 - $T_{cw,i}$ และ $T_{cw,o}$ ช่วงการดูดซับ
 - น้ำถ่ายโอนความร้อนที่ทางเข้าและทางออกของ Water jacket ของเครื่องควบแน่น/เครื่องทำระเหย 2 ตำแหน่ง
 - $T_{hw,ev,i}$ และ $T_{cw,ev,o}$ ช่วงการดูดซับ และ
 - $T_{cw,cd,i}$ และ $T_{cw,cd,o}$ ช่วงคายสารดูดซับ
 - อุณหภูมิผิวของ Water jacket ทางด้านปฏิกรณ์ ($T_{s,rct}$) 1 ตำแหน่ง และอุณหภูมิผิวของ Water jacket ทางด้านเครื่องทำระเหย/เครื่องควบแน่น (T_s, EV) 1 ตำแหน่ง
 - อุณหภูมิไอสารทำงานน้ำโดยวัดที่ผิวของท่อทางด้านบนและด้านล่างของวาล์ว ($T_{vapor,u}$ และ $T_{vapor,l}$) 2 ตำแหน่ง
- 2) กำหนดอัตราการไหลของสารถ่ายโอนความร้อนที่ด้าน Reactor และ CD/EV คงที่ประมาณ (1 L/min หรือ 0.3 kg/s)
- 3) ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยน
 - (i) อุณหภูมิของน้ำร้อนในถังเพื่อจ่ายความร้อนในช่วง Desorption 2 ค่าคือ 85°C และ 95°C
 - (ii) อุณหภูมิของน้ำแหล่งความร้อนในถัง เพื่อให้ความร้อนกับเครื่องทำระเหยช่วง Adsorption 2 ค่าคือ 35°C , 50°C และ 60°C
- 4) นำผลการวัดอุณหภูมิและอัตราการไหล ใช้ในการคำนวณหาค่า COP, SCP และ VCP สำหรับแต่ละวัฏจักรการทำงานของระบบดูดซับ



Dia = $\frac{1}{2}$ "

WATER JACKET
H = 240 mm

รูปที่ 3.22: ภาพอย่างง่ายแสดงลักษณะของระบบทดสอบ MCES 2

ระบบที่ติดตั้งกับอุปกรณ์รายล้อม เพื่อการทดสอบเรียบร้อยแล้วแสดงดังรูปที่ 3.23 ถึง 3.26

PIPE HEIGHT

300 MM,

400 MM,

500 MM.

WATER JACKET
H = 240 mm



รูปที่ 3.23: ภาพถ่ายแสดงระบบ MCES 2



รูปที่ 3.24: ภาพถ่ายแสดงระบบพร้อมระบบคอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูล



รูปที่ 3.25: ภาพถ่ายแสดงองค์ประกอบของ MCES 2



(ก) ปั๊ม



(ข) วาล์ว



(ค) ส่วนทำระเหย/ควบแน่น



รูปที่ 3.26: ภาพถ่ายแสดง Data logger

3.2.6 ขั้นตอนการทดสอบระบบ MCES 2

ระบบ MCES 2 มีขั้นตอนการทดสอบวัฏจักรของการดูดซับทางเคมี ดังต่อไปนี้ ซึ่งขั้นตอนการทำงานของวัฏจักรโดยรวมเหมือนกับระบบ MCES 1 คือ ประกอบด้วย 4 phase ที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1.5

การทดลองที่ 1: การเตรียมปฏิกรณ์โดยการไล่น้ำและก๊าซอื่นจากปฏิกรณ์ (Regeneration/Desorption) โดยใช้ความร้อนถ่ายโอนความร้อน 95 °C

การทดลองที่ 2: การทำระเหยที่อุณหภูมิทำระเหยต่ำ 35 °C

การทดลองที่ 3: วัฏจักรการดูดซับและการไล่น้ำสารดูดซับ โดยแต่ละวัฏจักรกำหนด อุณหภูมิถ่ายโอนความร้อนสำหรับการทำระเหย 50 °C และ 60 °C และอุณหภูมิน้ำร้อนสำหรับการ Desorption เป็น 95 °C และ 85 °C ตามลำดับ

ขั้นตอนการทดลองที่ 1

- 1) เตรียมระบบทั้งหมดให้เป็นสุญญากาศ (ปฏิกรณ์ และ เครื่องทำระเหย/เครื่องควบแน่น)
- 2) เปิด Heater ซึ่งตั้งระดับอุณหภูมิไว้ที่ 95 °C เพื่อให้ความร้อนกับน้ำถ่ายโอนความร้อน (Heating water)
- 3) เมื่ออุณหภูมิได้ระดับตามต้องการ เปิดปั๊มหมุนเวียนน้ำถ่ายโอนความร้อนมายังปฏิกรณ์
- 4) เก็บบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของปฏิกรณ์
- 5) เปิดปั๊มหมุนเวียนน้ำระบายความร้อน (Cooling water) ที่เครื่องควบแน่น
- 6) เมื่อพบว่าอุณหภูมิของปฏิกรณ์ถึง 85 °C ปิดวาล์วระหว่างปฏิกรณ์กับเครื่องควบแน่นให้อากาศที่ถูกคายออกจากปฏิกรณ์ควบแน่นในเครื่องควบแน่น ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
- 7) ปิดวาล์วระหว่างปฏิกรณ์และเครื่องควบแน่น จากนั้นหยุดการทำงานของระบบ
- 8) บันทึกข้อมูลอุณหภูมิ คำนวณ และวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบ

ขั้นตอนการทดลองที่ 2

- 1) ปิดวาล์วระหว่างปฏิกรณ์และเครื่องทำระเหย
- 2) ตรวจสอบระบบทางด้านเครื่องทำระเหยเป็นสุญญากาศ
- 3) บรรจุสารทำงานน้ำจาก De-ionized water ปริมาตร 28 mL

- 4) เปิดปั๊มหมุนเวียนน้ำให้ความร้อนจากถังเก็บที่อุณหภูมิที่กำหนดมายังเครื่องทำระเหย ประมาณ 30 นาที
- 5) บันทึกข้อมูลอุณหภูมิ คำนวณ และวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบ

ขั้นตอนการทดลองที่ 3

- 1) เปิดระบบน้ำถ่ายโอนความร้อนสำหรับการระบายความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์
- 2) เปิดวาล์วระหว่างปฏิกรณ์กับเครื่องทำระเหยให้เกิดกระบวนการดูดซับทางเคมี
- 3) ใช้เวลาประมาณ 30 ชั่วโมง ปิดวาล์วระหว่างปฏิกรณ์กับเครื่องทำระเหย
- 4) เปิดระบบน้ำให้ความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิที่กำหนด เพื่อไล่สารดูดซับออกจากปฏิกรณ์ ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
- 5) เปิดระบบน้ำระบายความร้อนจากเครื่องควบแน่น
- 6) เปิดวาล์วระหว่างปฏิกรณ์กับเครื่องควบแน่น ใช้เวลาประมาณ 30 นาที
- 7) ปิดวาล์วระหว่างปฏิกรณ์กับเครื่องควบแน่น
- 8) เปิดระบบน้ำระบายความร้อนปฏิกรณ์ ใช้เวลาประมาณ 30 นาที
- 9) เมื่อครบวัฏจักรการทำงานการดูดซับทางเคมี (การทำระเหย, การดูดซับ, การคายสารดูดซับ และ การระบายความร้อนจากปฏิกรณ์) หยุดการทำงานของระบบ
- 10) บันทึกข้อมูลอุณหภูมิ คำนวณ และวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบ

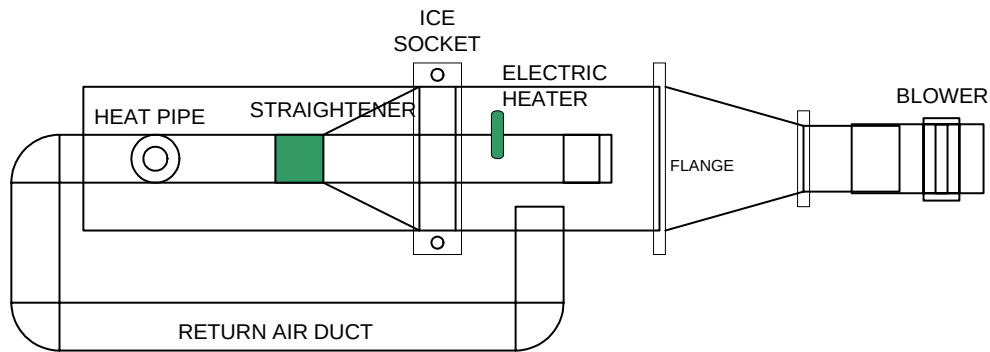
3.3 การทดสอบชุดแลกเปลี่ยนความร้อนของส่วนทำระเหย

นอกจากนี้ เพื่อความสมบูรณ์ของงานวิจัย กรณีมีการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศร้อน (ที่ใช้แทนความร้อนทิ้งเปล่าจากก๊าซร้อนในอุตสาหกรรม) สู่สารทำงานน้ำในเครื่องทำระเหย ผู้วิจัยได้ทดลองออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับส่วนทำระเหย ให้มีลักษณะการทำงานเหมาะสมที่จะใช้อากาศเป็นแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำสำหรับระบบได้ โดยชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.27 – 3.31 และแทนที่ MCES ด้วยท่อความร้อนดังแสดงในรูปที่ 3.32 ซึ่งท่อความร้อนมีหลักการทำงานอย่างง่ายโดยเป็นอุปกรณ์ระบบปิด ที่ภายในบรรจุสารทำความเย็น โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนทำระเหย ส่วน Adiabatic และส่วนควบแน่น ซึ่งส่วนทำระเหยจะนำมาทดสอบเพื่อแทนส่วนทำระเหยของ MCES ได้ และมีการออกแบบระบบป้อนลมเพื่อการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีของส่วนทำระเหย ผลการทดสอบที่ได้จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อออกแบบการติดตั้ง MCES กับระบบการดึงความร้อนในส่วนทำระเหยต่อไป

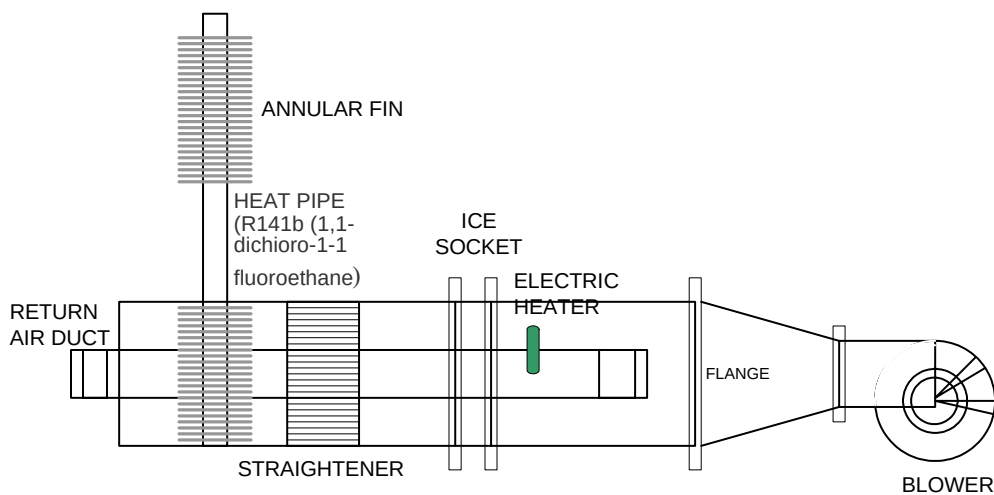
ขั้นตอนการทดสอบชุดแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่

- (1) ออกแบบ สร้างและทดสอบสมรรถนะของชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับส่วนทำระเหยของตู้ความเย็น ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับระบบดูดซับแบบความเย็น-เคมีได้
- (2) ตู้ความเย็นถูกออกแบบให้เป็นแบบท่อและครีปซึ่งสามารถสร้างและประกอบได้ง่ายและใช้ต้นทุนต่ำ และมีสมรรถนะที่ดีในระดับหนึ่ง
- (3) การทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ใช้อากาศเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อนไหลผ่านภายในระบบ ภายในทางด้านปลายติดตั้งตู้ความเย็นบรรจุสารทำงาน R141b (1,1-dichloro-1-1 fluoroethane)
- (4) อากาศร้อนใช้แทนความร้อนจากแหล่งความร้อนทิ้งเปล่า
- (5) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนติดตั้งเพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน
 - ขั้นแรก: ปรับค่าพลังงานความร้อนที่ป้อนให้ระบบ คือ 1.0, 1.5 และ 2.0 กิโลวัตต์ ตามลำดับ
 - ขั้นที่สอง: ปรับค่าอัตราการไหลของอากาศ ควบคุมโดยเครื่องปรับความเร็วรอบพัดลม ซึ่งเปลี่ยนค่า % Voltage regulator ทั้งหมด 7 ค่าได้แก่ 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55% และ 60%

ภาพด้านบนและด้านข้างของชุดอุปกรณ์การทดลองระบบปรับอากาศ ที่ภายในอุปกรณ์จะมีส่วนที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศและปริมาณความร้อนที่ต้องการป้อนให้แก่ระบบ แสดงดังรูปที่ 3.27 และ 3.28 และภาพสามมิติแสดงดังรูปที่ 3.29 โดยชุดอุปกรณ์มี blower ติดตั้งที่ปลายด้านหนึ่งของท่อลม และมีฮีทเตอร์เพื่อปรับระดับอุณหภูมิของอากาศ ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนของ Evaporator นอกจากนี้ ยังเตรียมช่องใส่ น้ำแข็ง เพื่อช่วยปรับอุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ในกรณีที่ทำการทดสอบการดึงความร้อนโดยตู้ความเย็นที่ระดับต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ จากนั้นจะเป็น Straightener ซึ่งช่วยปรับให้กระแสการไหลของอากาศราบเรียบมากขึ้นก่อนที่จะผ่านส่วนทำระเหยของตู้ความเย็น (ที่ใช้แทนส่วนทำระเหยของ MCES) โดยที่ด้านทางออกจะมีทางป้อนอากาศย้อนกลับเข้าสู่ระบบท่อลมหลัก (Return air duct) ด้วย



รูปที่ 3.27: ภาพด้านบนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องทำระเหย



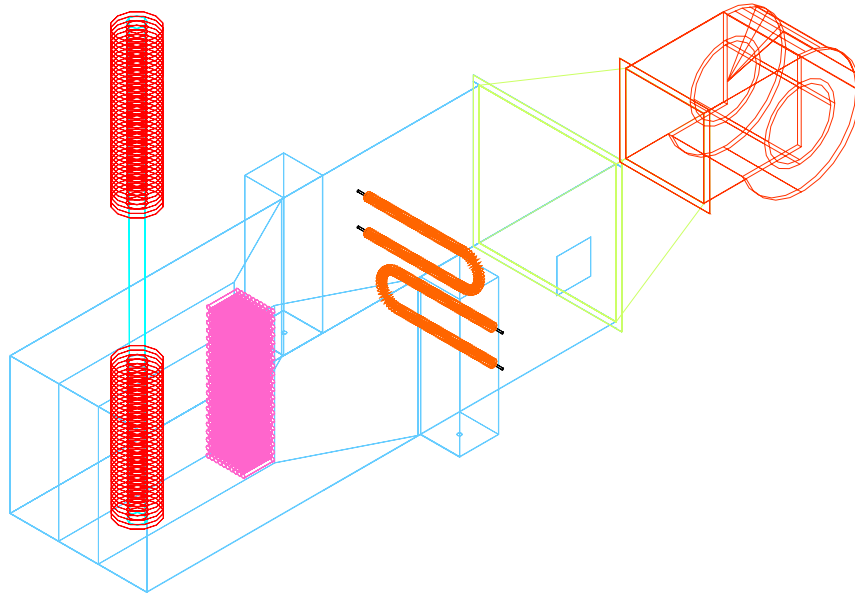
รูปที่ 3.28: ภาพด้านหน้าของเครื่องทำระเหย

รูปที่ 3.30 และ 3.31 แสดงภาพถ่ายระบบชุดท่อลมสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนกับส่วนทำระเหย ในห้องปฏิบัติการความร้อน-ของไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยในรูปที่ 3.31 จะเห็นการติดตั้ง Data logger สำหรับบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในชุดอุปกรณ์ทดสอบที่เวลาใดก็ได้

สำหรับส่วนของท่อความร้อน (Heat pipe) ดังรูปที่ 3.32 สำหรับใช้ทดสอบแทน MCES มีองค์ประกอบ ดังนี้

- (1) ส่วนทำระเหย (Evaporator section) ของท่อความร้อนทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $1 \frac{5}{8}$ in และยาว 110 cm โดยในการทดสอบจะใช้ท่อความร้อนนี้เป็นตัวทดสอบการทำงานของชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้ (R141-b) เป็นสารทำงานบรรจุภายในท่อความร้อน
- (2) ครีป (Fin) ทำมาจากทองแดงหนา 0.45 cm มีรัศมีภายนอก 1.95 in และรัศมีภายใน 0.8125 in มีจำนวน 60 ครีปสำหรับติดท่อความร้อน ทำหน้าที่เพิ่มสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเครื่องทำระเหยกับลมร้อนก่อนผ่านเข้าท่อความร้อน

- (3) ส่วนควบแน่น (Condensor section) เป็นส่วนปลายของท่อทองแดงอีกด้าน และติดตั้ง fin เช่นเดียวกันเพื่อช่วยการระบายความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม และมีความยาวเท่ากับส่วนทำระเหย



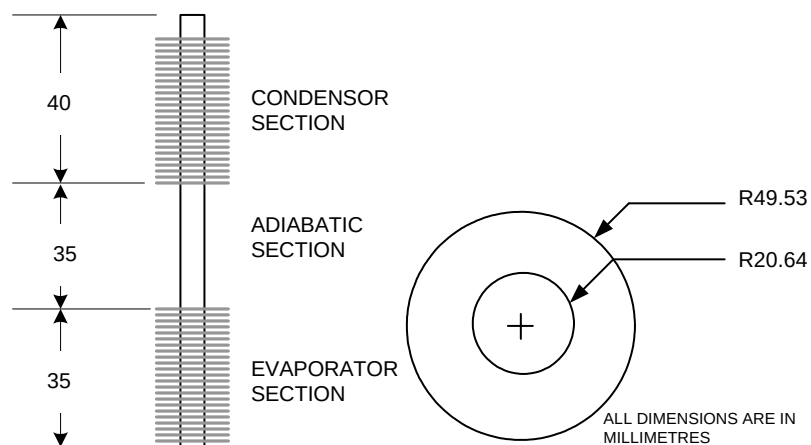
รูปที่ 3.29: ภาพสามมิติจากออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องทำระเหย



รูปที่ 3.30: ภาพถ่ายด้านหน้าของชุดทดสอบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับส่วนทำระเหย



รูปที่ 3.31: ภาพถ่ายการติดตั้งอุปกรณ์วัดและบันทึกข้อมูลการทดสอบ
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 3.32: ภาพถ่ายท่อความร้อนสำหรับทดสอบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ขั้นตอนการทดสอบระบบให้ความร้อนกับส่วนทำระเหย

- (1) เดินเครื่องชุดอุปกรณ์ทดสอบการจ่ายความร้อนให้กับส่วนทำระเหย
- (2) กำหนดตัวแปรที่ทดสอบ คือ อัตราการไหลของอากาศ โดยกำหนดให้ภาระงานคงที่ และ พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ โดยอัตราการไหลอากาศคงที่
- (3) เปิดพัดลมดูดอากาศ เปิด Air heater เพื่อป้อนพลังงานความร้อนให้กับระบบและควบคุมอุณหภูมิอากาศ ควบคุมตัวแปรอื่นให้ระบบอยู่ในสภาวะที่ได้ออกแบบไว้
- (4) วัดอุณหภูมิโดยอาศัยเทอร์โมคัปเปิ้ลติดตั้งที่จุดต่างๆ และวัดอุณหภูมิจนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว
- (5) ปรับค่า % Voltage regulator 30%– 60% เพิ่มทีละ 5% และตั้ง Load heater 1.0 kW 1.5 kW และ 2.0 kW
- (6) วัดอุณหภูมิทุกจุดที่ติดตั้งและบันทึกโดย Data logger ทุก 30 วินาที
- (7) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 50 นาที จึงหยุดการทดลอง
- (8) บันทึกผลการทดสอบและนำข้อมูลที่ได้อ่านวิเคราะห์หาสมรรถนะของชุดอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน
- (9) ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวแปรให้อยู่ในสภาวะอื่นที่กำหนดไว้

ระบบทั้งสามดังกล่าวข้างต้น ได้แก่ ต้นแบบระบบเก็บรักษาพลังงาน โดยใช้หลักการดูดซับทางเคมีแบบ MCES 1 และ MCES 2 และระบบให้ความร้อนกับส่วนทำระเหยของระบบดูดซับ ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนำเสนอในบทนี้ ได้นำเสนอผลการทดสอบ การวิเคราะห์ อภิปราย และวิจารณ์ผลไว้ในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

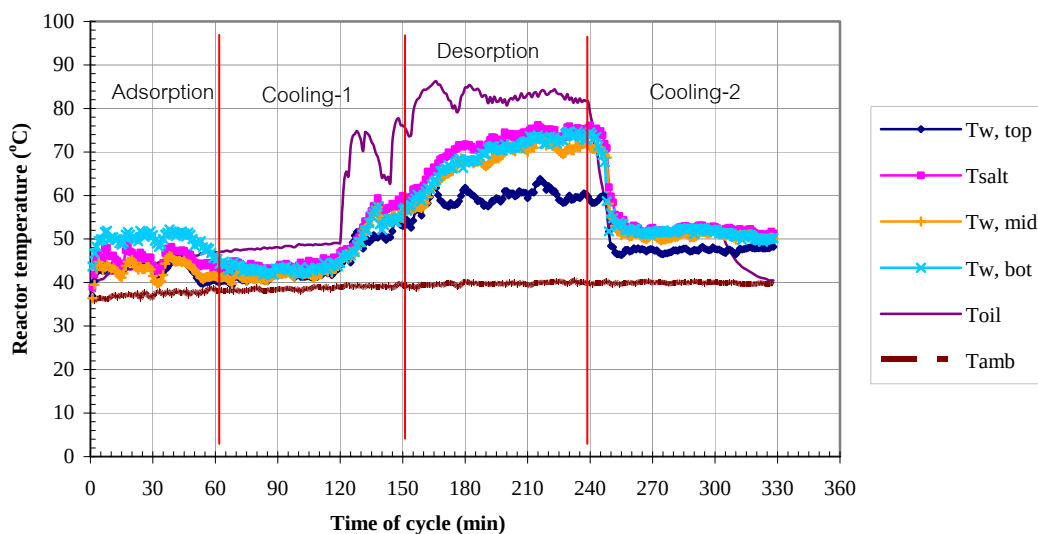
ผลการทดสอบและวิเคราะห์ระบบ MCES

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ระบบ MCES ที่ใช้โซเดียมซัลไฟด์-น้ำเป็นคู่สารทำงานทั้ง 2 รูปแบบ คือ MCES 1 และ MCES 2 ซึ่งได้รับการออกแบบในลักษณะโมดูลที่ประกอบด้วย ปฏิกรณ์ เครื่องควบแน่น และเครื่องทำระเหยเป็นชุดเดียวกัน และวางตัวในแนวดิ่ง รวมถึงผลการทดสอบระบบจ่ายลมร้อนให้กับส่วนทำระเหยของระบบดูดซับ ได้นำเสนอดังต่อไปนี้

4.1. ระบบทดสอบ MCES 1

4.1.1 อุณหภูมิ

ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดวัฏจักรการทำงาน ของบริเวณต่างๆ ของระบบ MCES 1 ที่ประกอบด้วย ช่วงการดูดซับ (Adsorption) ช่วงการระบายความร้อนหรือหล่อเย็นหลังกระบวนการดูดซับ (Cooling-1) ช่วงการคายสารดูดซับ (Desorption) และช่วงการระบายความร้อนหรือหล่อเย็นหลังการคายสารดูดซับ (Cooling-2) แสดงดังกราฟรูปที่ 4.1



$T_{w,top}$ = อุณหภูมิผนังปฏิกรณ์ด้านบน

T_{oil} = อุณหภูมิน้ำมันถ่ายโอนความร้อน

T_{salt} = อุณหภูมิสารดูดซับ

T_{amb} = อุณหภูมิอากาศ

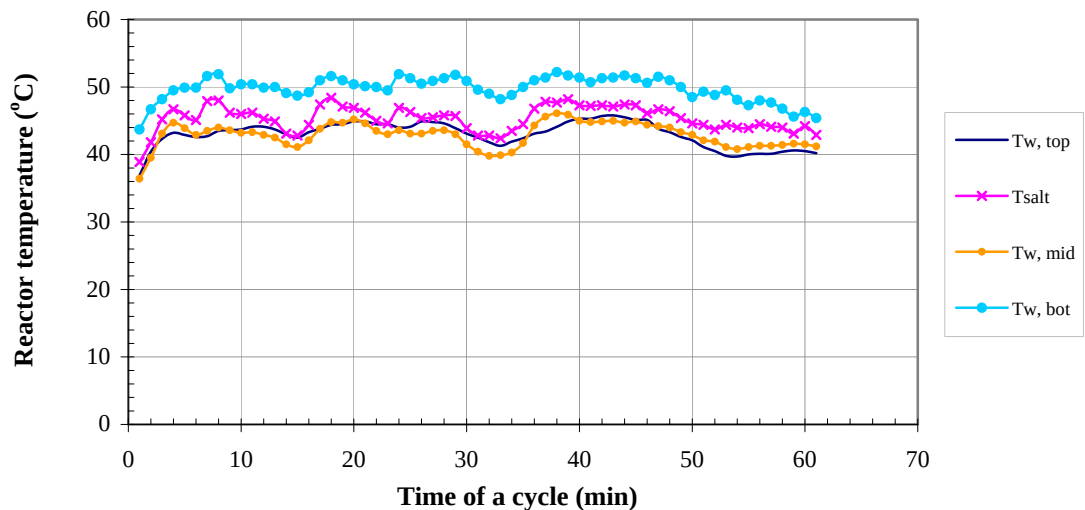
$T_{w,mid}$ = อุณหภูมิผนังปฏิกรณ์ตรงกลาง

$T_{w,bot}$ = อุณหภูมิผนังปฏิกรณ์ด้านล่าง

รูปที่ 4.1: การกระจายของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของปฏิกรณ์ตลอดช่วงการทดสอบ

ลักษณะการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของปฏิกรณ์ ในแต่ละช่วงของวัฏจักร การดูดซับอธิบายได้ดังนี้

- 1) ช่วงสารเกิดปฏิกิริยาดูดซับทางเคมี (Adsorption) เมื่อไอน้ำถูกปล่อยเข้าไปในปฏิกรณ์ พบว่าสารด้านล่างสุดเริ่มเกิดปฏิกิริยาก่อน แล้วจึงเกิดในระดับที่สูงขึ้นไป



รูปที่ 4.2: การกระจายของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของปฏิกรณ์ในช่วง Adsorption

อุณหภูมิสารดูดซับด้านล่างสุดในรูปที่ 4.2 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว รองลงมาคือ อุณหภูมิของเกลือปฏิกิริยา ผนังปฏิกรณ์ที่ระดับกลางและที่ด้านบน เนื่องจากระบบดูดซับนี้มีการต่อเชื่อมอุปกรณ์ในแนวดิ่ง ไอน้ำจึงเข้าสู่ปฏิกรณ์ทางด้านล่าง และทำปฏิกิริยากับสารดูดซับด้านล่างก่อน แล้วจึงแพร่ขึ้นไปยังสารทางด้านบน

การแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุลไอน้ำซึ่งเข้าไปเกาะที่ผิวหน้าของสารดูดซับ และทำปฏิกิริยากัน อุณหภูมิที่ตำแหน่งล่างของปฏิกรณ์จึงสูงกว่าตำแหน่งอื่น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาก่อน และถัดไปเป็นที่บริเวณเนื้อสารดูดซับซึ่งจูดัวอยู่กึ่งกลางของปฏิกรณ์ และที่ระดับความสูงเดียวกัน

ผลจากการถ่ายโอนมวลและพลังงานจากการเกิดปฏิกิริยาในสารดูดซับ อุณหภูมิที่ผนังด้านนอกของปฏิกรณ์จึงต่ำกว่าที่เนื้อสาร เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งจะเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ จนปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุล จึงจำเป็นต้องดึงความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาออกในอัตราที่เพียงพอกับอัตราการให้ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคู่สารทำงาน เพื่อให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าไม่หยุดชะงัก

- 2) ช่วงหล่อเย็น 1 (Cooling-1) เพื่อดึงความร้อนออกจากสารดูดซับและปฏิกรณ์ โดยหมุนเวียนสารถ่ายโอนความร้อนประมาณ 60 นาที อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ดังกราฟรูปที่ 4.1
- 3) ช่วงคายสารดูดซับ (Desorption) ให้ความร้อนกับปฏิกรณ์โดยสารถ่ายโอนความร้อน อุณหภูมิประมาณ 80 °C เป็นเวลา 120 นาที ความร้อนจากผนังปฏิกรณ์จะถ่ายเทสู่สารดูดซับ จนถึงสภาวะเหมาะสมไอน้ำจะเริ่มหลุดออกจากโซเดียมซัลไฟด์ในสภาพไอน้ำ และเคลื่อนลงสู่เครื่องควบแน่น เมื่อไอน้ำควบแน่นความร้อนจะถ่ายโอนสู่น้ำหล่อเย็น และคอนเดนเสทจะเก็บสะสมอยู่ในเครื่องทำระเหยต่อไป
- 4) ช่วงหล่อเย็น 2 (Cooling-2) หมุนเวียนสารถ่ายโอนความร้อนเพื่อดึงความร้อนออกจากปฏิกรณ์และสารดูดซับ ทำให้ระบบดูดซับเย็นลง และระบบพร้อมสำหรับวัฏจักรต่อไป

การทดสอบระบบเก็บสะสมพลังงานทางเคมี แบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดสอบ โดยการแปรผันตัวแปรต้น ดังต่อไปนี้

- (1) อุณหภูมิของเครื่องทำระเหย
- (2) อุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อนในช่วงคายสารดูดซับ (Desorption)
- (3) อัตราส่วนผสมเส้นใยคาร์บอนและแกรไฟต์
- (4) ช่วงเวลาการทำปฏิกิริยาเคมี

การทดสอบแต่ละวัฏจักรมีสภาวะและตัวแปรควบคุม ดังนี้

- (1) สารดูดซับ (โซเดียมซัลไฟด์+สารผสม) รวม 250 กรัม
- (2) ปริมาณน้ำในเครื่องทำระเหย 100 กรัม
- (3) อัตราการไหลของสารถ่ายโอนความร้อน
 - ก. ช่วง Adsorption ระหว่าง 20 – 30 kg/h และ
 - ข. ช่วง Desorption มีค่าระหว่าง 30 – 50 kg/h
- (4) ความดันระบบก่อนทำการทดสอบอยู่ในช่วง 2-4 cm.Hg (2.67-4.00 kPa)
- (5) ความดันระบบเมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุลอยู่ในช่วง 8-10 cm.Hg (10.66-13.33 kPa)

4.1.1.1 อุณหภูมิเครื่องทำระเหย

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องทำระเหยมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องทำระเหย 3 ระดับ คือ 45, 50 และ 60 °C กำหนด

อุณหภูมิของสารถ่ายโอนความร้อนเพื่อการระบายความร้อนช่วง Adsorption เป็น 30°C และ สารถ่ายโอนให้ความร้อนในช่วง Desorption เป็น 80°C และสัดส่วนโดยน้ำหนักของเส้นใยคาร์บอนต่อมวลรวม 30 % แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.2

อุณหภูมิของสารดูดซับตลอดช่วงการทดสอบ ดังรูป 4.3 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิระเหยต่างกันมีลักษณะคล้ายกัน แต่แตกต่างกันในช่วงเกิดปฏิกิริยา พบว่าอุณหภูมิของเครื่องทำระเหยที่สูงทำให้ความดันไอระบบสูงขึ้น ทำให้ความดันระหว่างปฏิกรณ์กับเครื่องทำระเหยแตกต่างกันมากขึ้น เมื่อเปิดวาล์วให้น้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาในปฏิกรณ์ แรงขับเคลื่อนให้น้ำเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วส่งผลให้โอกาสการชนกันของโมเลกุลคู่สารดูดซับมีมากขึ้น และเกิดเป็นผลิตภัณฑ์มากขึ้น ผลของแรงขับเคลื่อนเนื่องจากความดันต่ำสามารถเอาชนะแรงต้านจากเนื้อสารได้ดี ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารดูดซับได้เร็ว และทำให้น้ำเกิดการดูดซับปริมาณมากขึ้น

รูป 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารดูดซับภายในปฏิกรณ์ ในช่วงการเกิดปฏิกิริยาดูดซับทางเคมี พบว่าเมื่อให้อุณหภูมิของเครื่องทำระเหยเป็น 45°C อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเกลือโซเดียมซัลไฟด์กับไอน้ำน้อยมาก สังเกตจากอุณหภูมิเกลือจากการทำปฏิกิริยาค่อนข้างต่ำ และอุณหภูมิของเครื่องทำระเหยที่เหมาะสม คือ 50°C เช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 60°C เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นกลไกการเคลื่อนที่ของไอน้ำจากการพามวลสารจะดีขึ้น (Bulk Flow by Convection Mass Transfer) พบว่าผนังด้านนอกของปฏิกรณ์กับอุณหภูมิของสารดูดซับมีอุณหภูมิแตกต่างกันอยู่ในระหว่าง $1-4^{\circ}\text{C}$ เนื่องจาก ค่าการนำความร้อนของสารดูดซับและผนังของปฏิกรณ์ซึ่งเป็นโลหะสแตนเลส มีค่าไม่สูงนัก ($\sim 21 \text{ W/m.K}$)

อุณหภูมิช่วงเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าอุณหภูมิของไอน้ำไม่มากนัก และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Wongsuwan *et al.* (2004) ซึ่งมีอุณหภูมิสารดูดซับประมาณ $70-80^{\circ}\text{C}$ ภายในเวลา 5-10 นาที ในขณะที่งานวิจัยนี้มีอุณหภูมิ $50 - 70^{\circ}\text{C}$ ภายในเวลาเดียวกัน เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการหมุนเวียนสารถ่ายโอนความร้อนตลอดเวลา และสามารถดึงความร้อนออกจากปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง

4.1.1.2 อุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อนช่วง Desorption

ศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิของสารถ่ายโอนความร้อนที่ให้กับปฏิกรณ์โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อน $80, 90$ และ 100°C อุณหภูมิเครื่องทำระเหย 50°C กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของปฏิกรณ์ตลอดช่วงการทดสอบ ดังรูป 4.5 พบว่าอุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนกับสารดูดซับอยู่ระหว่าง $5 - 10^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่สูงขึ้นสามารถเอาชนะระดับพลังงานกระตุ้นขั้นต่ำที่ต้องการสำหรับการแตกพันธะระหว่างโมเลกุล Na_2S กับ xH_2O ได้ดีขึ้น ทำให้พันธะของไอน้ำหลุด

ออกได้ง่ายและเร็วขึ้น แต่ต้องควบคุมไม่ให้สูงเกินไปเพราะอาจเกิดการหลอมเหลวของเกลือโซเดียมซัลไฟต์ได้

จากการทดสอบพบว่ากรณีของอุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อน 90 °C (อุณหภูมิสารดูดซับประมาณ 70-90 °C) มีอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาที่สูงมาก ซึ่งเป็นเพราะสารเกิดปฏิกิริยาอย่างรุนแรงทำให้ถึงความร้อนในช่วงแรกออกไม่ทัน ส่วนอุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อนที่ให้กับปฏิกิริยาในช่วง Desorption เมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการไล่สารทำงานออกได้ง่ายและเร็วขึ้น

4.1.1.3 ชนิดและอัตราส่วนผสมของเส้นใยคาร์บอนและแกรไฟต์

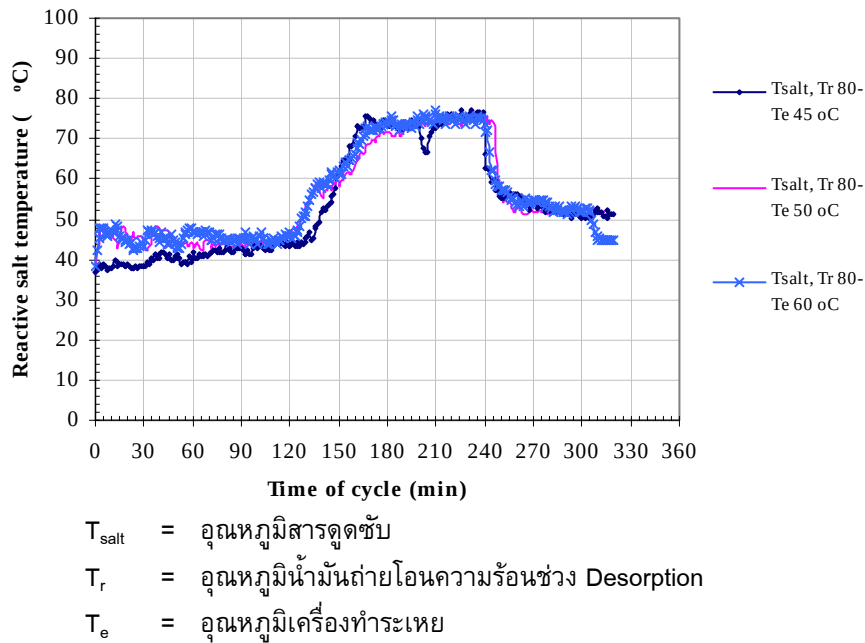
เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติสารดูดซับ จึงได้ทดสอบผสมส่วนผสมแกรไฟต์ 30% และเส้นใยคาร์บอนในโซเดียมซัลไฟต์ ในอัตราส่วนต่างกัน คือ 10, 20 และ 30 % โดยมวลของสารดูดซับทั้งหมด อุณหภูมิของเครื่องทำระเหย 50 °C และอุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อนช่วง Desorption 80 °C และช่วง Cooling 30 °C สำหรับสารผสมแกรไฟต์ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของสารดูดซับได้ และที่อัตราส่วนผสม 30 % คุณสมบัติของสารดูดซับจะดีที่สุด (Wongsuwan *et al*, 2004) ผลทดสอบแสดงในรูป 4.6

กราฟรูป 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปฏิกิริยา เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมเส้นใยคาร์บอนและอัตราส่วนแกรไฟต์ 30 % พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างกัมีลักษณะคล้ายคลึงกัน เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำที่ดูดซับได้ไม่แตกต่างกัน เมื่อลดส่วนเส้นใยคาร์บอนต่างกัน แต่พบว่าเมื่อผสมสารดูดซับสามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่า และอุณหภูมิของสารดูดซับสูงกว่ากรณีผสมเส้นใยคาร์บอน เนื่องจากแกรไฟต์มีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากกว่าเส้นใยคาร์บอน แต่ข้อเสียคือช่วงการไล่น้ำออกต้องใช้เวลาในการไล่สารมากกว่าและต้องระวังการหลอมเหลวของสารดูดซับ

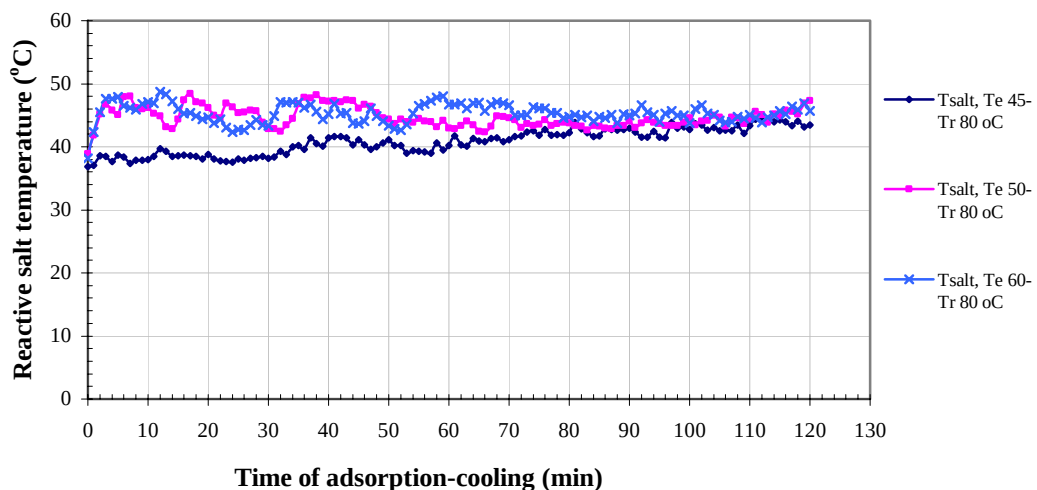
ในช่วงกระบวนการดูดซับสาร สารผสมแกรไฟต์จะทำให้อุณหภูมิของสารดูดซับสูงที่สุด และถัดไปคือ เส้นใยคาร์บอน 30 % และ 20 % ส่วนเส้นใยคาร์บอน 10 % มีอุณหภูมิต่ำสุด เนื่องจาก สารผสมแกรไฟต์มีรูพรุนสูง มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาและโมเลกุลของไอน้ำสามารถที่จะเข้าไปเกาะได้ ทำให้ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยามีมากขึ้นและถ่ายโอนไปสู่ผนังและน้ำมันถ่ายโอนความร้อนได้มากขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิในส่วนนี้สูงขึ้นคือประมาณ 60 °C เมื่อเปรียบกับเส้นใยคาร์บอน ซึ่งมีค่าประมาณ 50 °C เนื่องจากมีความพรุนตัวต่ำกว่าแกรไฟต์ เมื่อผสมสารกับโซเดียมซัลไฟต์ ทำให้การดูดซับไอน้ำมีประสิทธิภาพไม่ดีนัก

ดังนั้นจึงควรศึกษาการปรับปรุงกระบวนการนำเส้นใยคาร์บอนหรือแกรไฟต์มาใช้เป็นสารผสม การผสมและขึ้นรูปสารดูดซับในปฏิกิริยาหรือพิจารณาสารผสมตัวอื่นที่อาจ

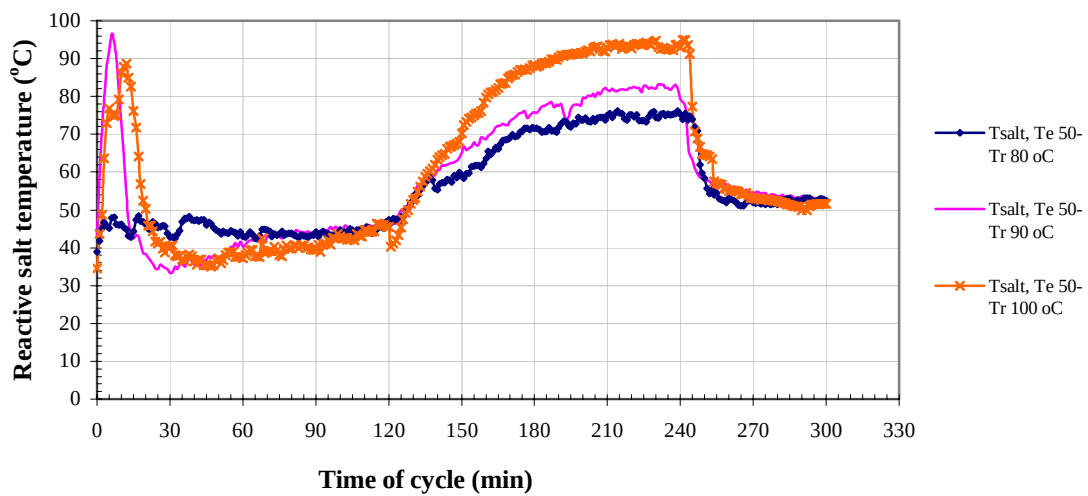
ช่วยให้คุณสมบัติและปฏิกิริยาของคู่สารทำงานดียิ่งขึ้น ซึ่งเป็นที่มาของการพัฒนาแท่นปฏิกิริยาของระบบ MCES 2



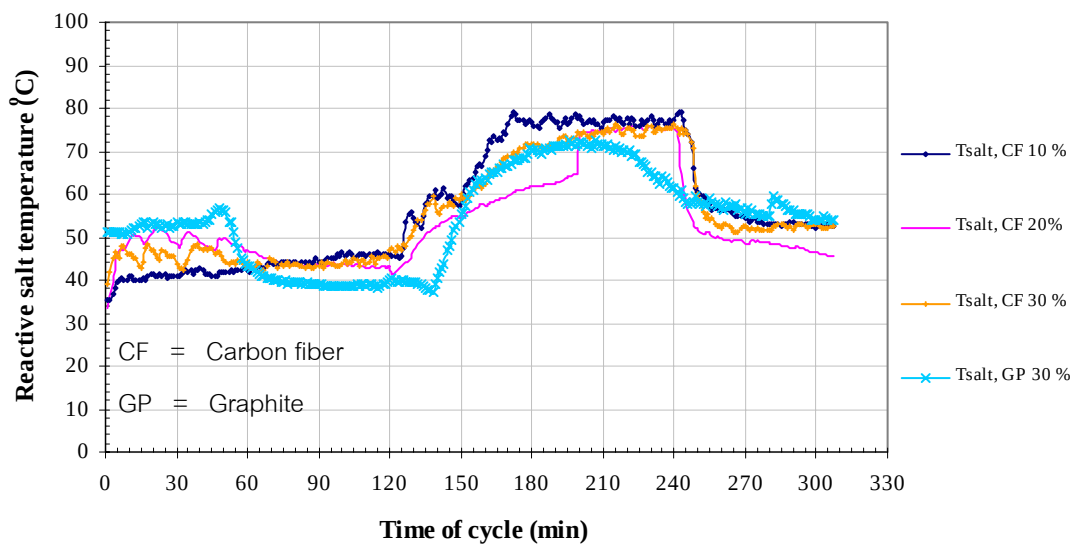
รูปที่ 4.3: เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารดูดซับตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิเครื่องทำระเหย 45, 50 และ 60 °C, สารถ่ายโอนความร้อนช่วง Desorption 80 °C



รูปที่ 4.4: การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงการเกิดปฏิกิริยาเคมี อุณหภูมิเครื่องทำระเหย 45, 50 และ 60 °C สารถ่ายโอนความร้อนช่วง Desorption 80 °C



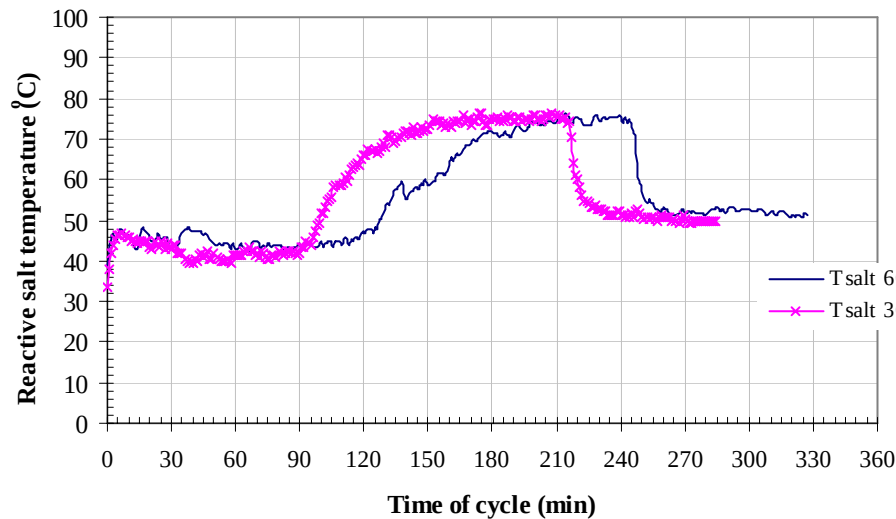
รูปที่ 4.5: เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารดูดซับตลอดช่วงการทดสอบ อุณหภูมิของสารถ่ายโอนความร้อนช่วง Desorption 80, 90 และ 100 °C เครื่องทำระเหย 50 °C



รูปที่ 4.6: เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารดูดซับตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อผสมเส้นใยคาร์บอน ที่อัตราส่วนต่างๆ และแกรไฟต์ ที่ 30 % อุณหภูมิเครื่องทำระเหย 50 °C และอุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อนช่วง Desorption 80 °C

4.1.1.4 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเคมี

ระยะเวลาของวัฏจักรทำงาน กำหนดโดยแปรผันระยะเวลาการดูดซับ (Adsorption) เป็น 30 และ 60 นาที อุณหภูมิเครื่องทำระเหย 50°C และสารถ่ายโอนความร้อนช่วง Desorption 80°C ผลการทดสอบแสดงในรูป 4.7



รูปที่ 4.7: เปรียบเทียบอุณหภูมิสารดูดซับตลอดช่วงการทดสอบ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา เป็น 30 และ 60 นาที อุณหภูมิเครื่องทำระเหย 50°C และอุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อน ช่วง Desorption 80°C ผสมเส้นใยคาร์บอน 30 %

จากกราฟรูปที่ 4.7 ระยะเวลาเกิดปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลไฟด์กับไอน้ำมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่มากนัก เนื่องจากไอน้ำที่ถูกขับโดยแรงดันต่างระหว่างปฏิกรณ์กับเครื่องทำระเหยสุญญากาศ โดยปริมาณที่เข้าทำปฏิกิริยาในช่วงแรกมาก (Degree of Advancement สูง) และไอน้ำส่วนที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาจะไหลย้อนกลับลงมาสู่เครื่องทำระเหย การเกิดปฏิกิริยาต้องอาศัยระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาช่วงระยะหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาดัง โดยปกติสารดูดซับเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ สังเกตจากความดันจะเพิ่มสูงขึ้นและคงที่

อัตราการเกิดปฏิกิริยาตอนช่วงแรก (3-5 นาที) จะมีค่าสูง แล้วจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสารตั้งต้น ถ้าสัดส่วนสารตั้งต้นมาก อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วมาก และอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงเมื่อสัดส่วน Na_2S ลดลง (ปรีชา พหลเทพ, 2536) จากผลการทดสอบปฏิกรณ์จะเข้าสู่สมดุลหลังจาก 30 นาทีแล้ว

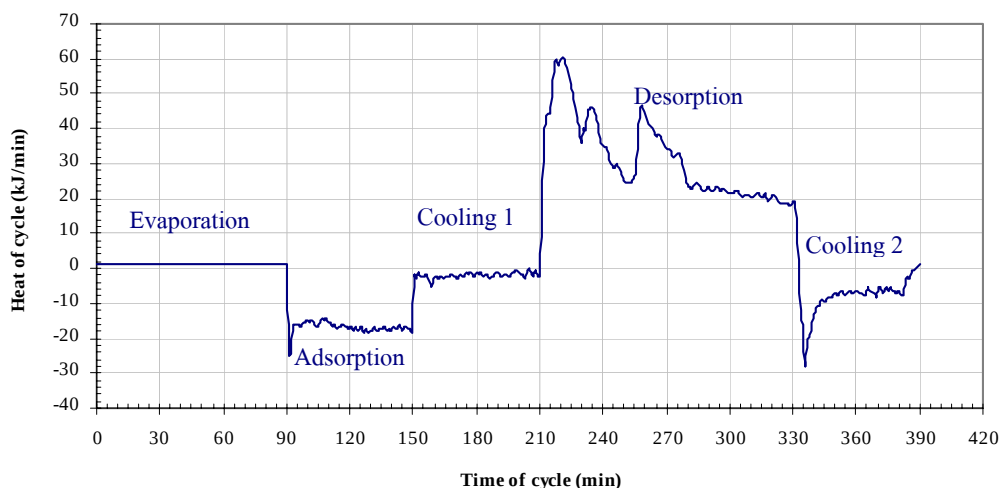
จากการทดสอบพบว่าปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับสารดูดซับเมื่อกำหนดระยะเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาทียังไม่เข้าสู่สมดุล มีผลทำให้ความร้อนที่ควรเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาซึ่งจะถ่ายโอนไปยังผนังและสารถ่ายโอนความร้อนน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

4.1.2 พลังงานของปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาจะมีการรับและจ่ายพลังงานตามกระบวนการในวัฏจักรโดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานของปฏิกิริยา เป็นผลมาจากพลังงานความร้อนในส่วนของการสัมผัสของโซเดียมซัลไฟด์ สารผสม และโลหะ ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยา การระเหยและการควบแน่นของคู่สารทำงาน ดังสมการ (4.1)(Cho Soon-haeng and Kim Jong-nam, 1992)

$$\begin{aligned} & \left((mc_p)_m + (mc_p)_s + (mc_p)_b + (m_s c_{p,w} x(t)) \right) \frac{dT}{dt} = \\ & -n_s \Delta H_r \frac{dx(t)}{dt} + (\dot{m} c_p)_o (T_o - T_i) + m_s c_{p,w} (T_e - T_s) \frac{dx(t)}{dt} \end{aligned} \quad (4.1)$$

กราฟความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกิดขึ้น แสดงในรูป 4.8 และการคำนวณดัชนีต่าง ๆ เพื่อบ่งบอกสมรรถนะของระบบ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.8: การเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาตลอดช่วงการทดสอบ

ก) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

แบ่งพิจารณาเป็น 2 ช่วง โดยใช้สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม (U_p) เหมือนกันทั้งสองช่วง (Wongsuwan et al., 2004)

- ช่วงเกิดปฏิกิริยาดูดซับทางเคมี หาค่าจากพลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาถ่ายโอนให้กับผนังและสารถ่ายโอนความร้อน
- ช่วงการให้ความร้อนแก่ปฏิกิริยา และดึงความร้อนออกจากปฏิกิริยา

$$U_p = \frac{m_s C_{ps} \frac{dT_s}{dt}}{A_{sw} (T_{hf} - T_s)} \quad (4.2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขึ้นกับความร้อนสัมผัสของสารถ่ายโอนความร้อน แก๊สโซเดียมซัลไฟด์ สารผสม และโลหะของปฏิกรณ์ โดยแปรผกผันกับพื้นที่ผิวสัมผัส และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำมันถ่ายโอนความร้อนกับสารดูดซับ

ข) สมรรถนะของระบบ (COP)

สมรรถนะของระบบ คือ สัดส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อ ปริมาณพลังงานที่ป้อนเข้าไป สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$COP_h = \frac{Q_{adsorption} + Q_{cond} + Q_{cooling}}{Q_{input}} \quad (4.3)$$

เมื่อ	$Q_{adsorption}$	คือ	พลังงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับสาร (kJ/min)
	$Q_{cooling}$	คือ	พลังงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อเย็นระบบ (kJ/min)
	Q_{cond}	คือ	พลังงานที่จากการควบแน่นของสารทำงาน (kJ/min)
	Q_{input}	คือ	พลังงานที่จ่ายให้กับระบบ (kW)

ค) ค่าการเก็บพลังงานจำเพาะ (Specific/Volume Heating Power, SHP/VHP)

$$VHP = \frac{Q_{adsorption}}{V_{reactor}} ; \text{ kWh/m}^3 \quad (4.4a)$$

หรือ

$$SHP = \frac{Q_{adsorption}}{t_{cycle} M_{ads}} ; \text{ W/kg}_{adb} \quad (4.4b)$$

เมื่อ	COP_h	คือ	สมรรถนะของระบบ
	M_{ads}	คือ	มวลของสารโซเดียมซัลไฟด์ (kg)
	t_{cycle}	คือ	ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา (s)
	$V_{reactor}$	คือ	ปริมาตรของปฏิกรณ์ (m^3)
	VHP, SHP	คือ	ค่าการเก็บพลังงานจำเพาะ (kWh/m^3 หรือ W/kg)

4.1.2.1 อุณหภูมิเครื่องทำระเหย

รูป 4.9-4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานเมื่ออุณหภูมิทำระเหยต่างกัน (45, 50, 60 °C) พบว่ากราฟมีลักษณะคล้ายกัน เมื่อค่าพลังงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเครื่องทำระเหยและปริมาณไอน้ำที่ถูกดูดซับ เนื่องจากอุณหภูมิระเหยเพิ่มขึ้นความดันไอน้ำจะมากขึ้น ทำให้ไอน้ำสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ปฏิกรณ์ได้มาก แต่ถ้าอุณหภูมิของไอน้ำสูงเกินไป และปริมาณไอน้ำที่ถ่ายเทมากเกินไป สารดูดซับจะไม่สามารถดูดซับได้ทัน ทั้งนี้ การเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา ต้องอาศัยปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราการชนกันของโมเลกุล ทิศทางการชนที่เหมาะสมจึงจะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์โซเดียมซัลไฟด์ไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ที่ต้องการได้ และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของดัชนีต่าง ๆ ดังตาราง 4.1

เมื่อเปรียบเทียบพลังงานที่เกิดขึ้นตลอดช่วงการทดสอบ พบว่าพลังงานของช่วงดูดซับสาร ในกรณีอุณหภูมิเครื่องทำระเหย 60 และ 50 °C ปริมาณพลังงานที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน ถัดไปคือ 45 °C ส่วนสาเหตุที่ทำให้พลังงานของกรณีอุณหภูมิเครื่องทำระเหย 50 °C มีค่าพลังงานช่วงดูดซับสารมากกว่า เพราะปริมาณไอน้ำที่เข้าไปทำกับสารดูดซับ เกิดการชนกันในทิศทางที่เหมาะสม ที่สามารถจะไปเกาะกับผิวหน้าของสารดูดซับ และดูดซับไอน้ำไว้ได้มากกว่า ดังนั้นอุณหภูมิของเครื่องทำระเหยที่เหมาะสม คือ 50 °C ถ้าสูงกว่าความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ได้เพิ่มขึ้นมากนัก

สมรรถนะของระบบจะแปรผันตรงกับพลังงานที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยา และแปรผกผันกับพลังงานที่จ่ายให้กับระบบในขั้นตอน Desorption สมรรถนะของระบบมีค่าเป็น 2.83, 1.67 และ 1.27 ที่อุณหภูมิเครื่องทำระเหย 45, 50 และ 60 °C ตามลำดับ

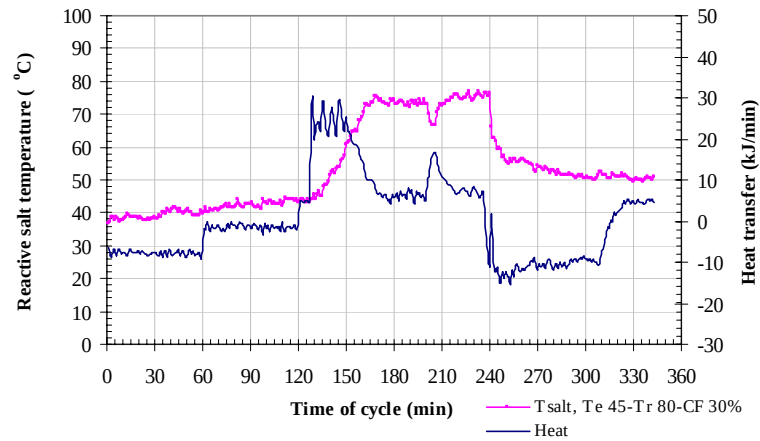
ค่าการเก็บพลังงานจำเพาะขึ้นอยู่กับพลังงานในช่วงดูดซับสารซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของสารดูดซับทั้งหมด กรณีอุณหภูมิเครื่องทำระเหย 50 และ 60 °C มีค่าสูงและใกล้เคียงกัน คือ 816 และ 958 W/kg_{adb} ส่วนกรณีอุณหภูมิไอน้ำ 45 °C มีค่าน้อยสุด คือ 518 W/kg_{adb}

ตารางที่ 4.1: ความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องทำระเหย

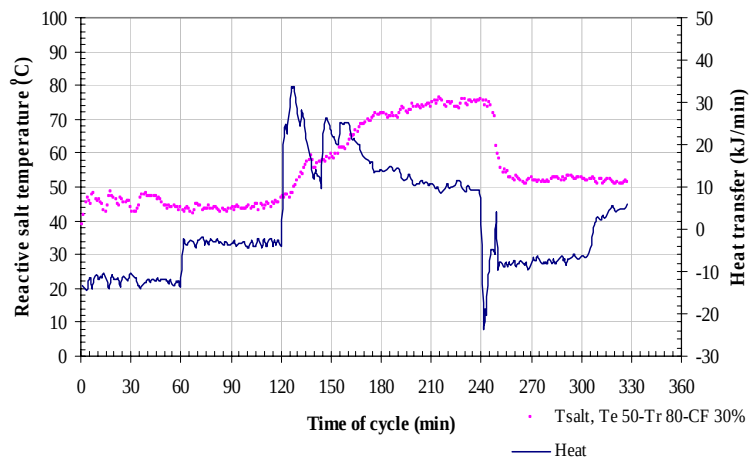
$T_E, ^\circ\text{C}$	w_1 (g)	w_2 (g)	Q_{ads} (kJ)	Q_{des} (kJ)	U_{ads} ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)	U_{des} ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)	COP_h (-)	VHP (kWh/m^3)	SHP (W/kg_{adb})
45	20	15	81.65	310.87	32.7-51.2	32.8-117.2	2.83	1,979	518
50	30	25	143.26	490.60	34.7-164.9	17.4-92.4	1.67	3,473	816
60	45	42	142.62	673.85	124.7-266.9	24.0-78.0	1.27	4,034	958

จากตาราง 4.1 จะเห็นว่าปริมาณไอน้ำที่ถูกดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิทำระเหย พิจารณาที่อุณหภูมิทำระเหย 50 และ 60 °C พลังงานจากปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกัน คือ

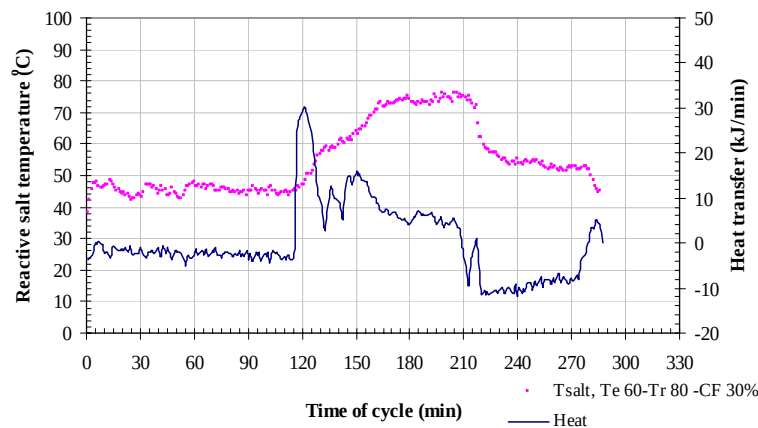
143.26 และ 142.62 kJ แต่พลังงานช่วงคายสารมีค่าต่างกัน คือ 490.60 และ 673.85 kJ ตามลำดับ เนื่องจากต้องใช้พลังงานที่สูงในช่วงคายสารทำงาน



รูปที่ 4.9: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิเครื่องทำระเหย 45°C



รูปที่ 4.10: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิเครื่องทำระเหย 50°C



รูปที่ 4.11: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิเครื่องทำระเหย 60 °C

4.1.2.2 อุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อนช่วง Desorption

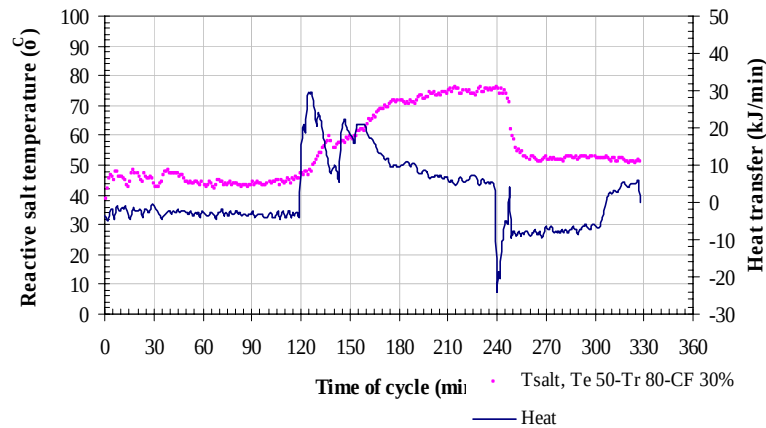
จากรูป 4.12 – 4.14 พบว่าที่อุณหภูมิการไล่สารทำงานต่างกัน $Q_{adsorption}$ มีค่าใกล้เคียงกัน และขึ้นกับปริมาณไอน้ำที่ถูกดูดซับในปฏิกรณ์ ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาและความร้อนสัมผัสจากวัสดุอื่นจึงไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามหากพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงมีค่าสูงขึ้น พลังงานที่ต้องให้กับระบบจะสูงขึ้น สมรรถนะของระบบ (COP, SHP, VHP) ที่แปรผกผันกับพลังงานส่วนนี้จะลดลง แม้ว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่สูงสามารถทำให้พันธะไอน้ำหลุดออกจากสารดูดซับได้ง่ายและมากขึ้น ดังนั้นการหาจุดเหมาะสมของระบบต่อไปต้องคำนึงถึงข้อดีและข้อด้อยของระดับอุณหภูมิสำหรับการไล่สารทำงานจากปฏิกรณ์ ตลอดจนแหล่งความร้อนที่มีอยู่ด้วยเช่นกัน

ความร้อนที่ให้กับระบบในช่วง Desorption มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของสารถ่ายโอนความร้อน ปริมาณพลังงานในส่วนนี้มีผลอย่างมากต่อสมรรถนะการทำงานของระบบ พบว่า สมรรถนะของระบบเท่ากับ 1.67, 1.66 และ 1.12 ของอุณหภูมิน้ำมันถ่ายโอนความร้อน 80, 90 และ 100 °C ตามลำดับ เนื่องจากพลังงานที่จ่ายให้กับระบบมีค่าที่สูงขึ้น ค่าการเก็บพลังงานจากการคำนวณ มีค่าเท่ากับ 816 และ 957 และ 1,041 W/kg_{adb} ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำที่ไล่ออกได้จึงมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ถูกดูดซับไว้ในตอนแรก สรุปผลการทดสอบแสดงไว้ในตาราง 4.2

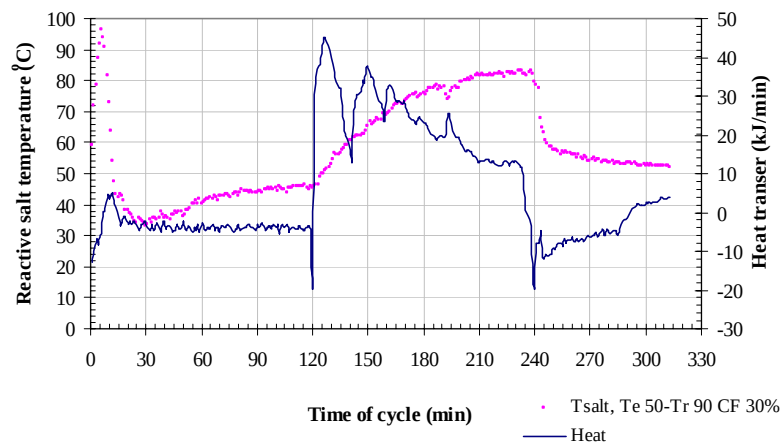
ตารางที่ 4.2: ความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารถ่ายโอนความร้อนในช่วง Desorption

$T_R, ^\circ\text{C}$	w_1 (g)	w_2 (g)	Q_{ads} (kJ)	Q_{des} (kJ)	U_{ads} ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)	U_{des} ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)	COP (-)	VHP (kWh/m^3)	SHP (W/kg_{adb})
80	30	25	143.26	490.60	34.7-164.9	17.4-92.4	1.67	3,473	816
90	35	30	188.30	601.96	36.5-63.6	15.3-38.1	1.27	4,565	957
100	43	40	110.69	804.86	35.8-54.8	11.1-321.3	1.12	2,683	1,041

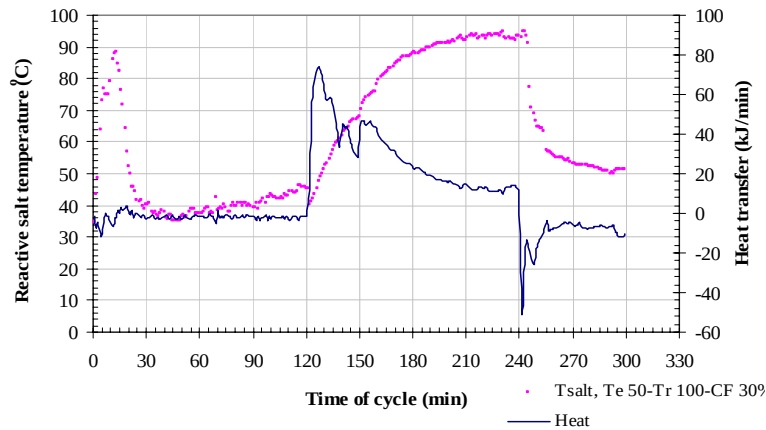
จากตารางจะเห็นว่า อุณหภูมิช่วงไล่สารที่สูงขึ้น ทำให้ปริมาณไอน้ำถูกไล่ออกจากสารดูดซับได้ดีขึ้น แต่เมื่อพิจารณาพลังงานที่ต้องจ่ายให้กับปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้นตามลำดับ ทำให้สมรรถนะของระบบมีค่าลดลง



รูปที่ 4.12: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อน 80 °C



รูปที่ 4.13: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อน 90 °C



รูปที่ 4.14: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่ออุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อน 100 °C

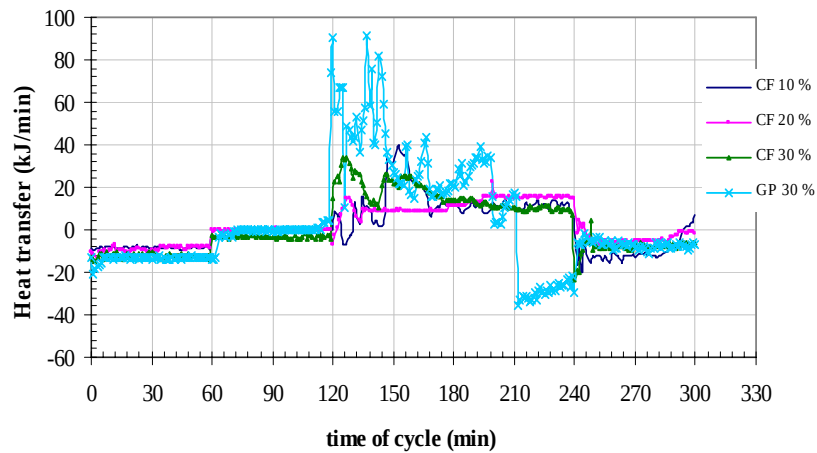
4.1.2.3 ชนิดและอัตราส่วนของสารผสม

ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาดูดซับทางเคมีระหว่างไอน้ำกับสารดูดซับ (เส้นใยคาร์บอนหรือแกรไฟต์ผสมกับสารโซเดียมซัลไฟด์) แสดงดังรูป 4.15-4.19 ในกรณีผสมแกรไฟต์ค่าความร้อนมากที่สุด เนื่องจากแกรไฟต์มีรูพรุน และมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารทำงานมากกว่าเส้นใยคาร์บอน และสามารถดูดซับน้ำได้เช่นกัน และสามารถสรุปความสัมพันธ์ของค่าความร้อน สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน และดัชนีสมรรถนะไว้ในตาราง 4.3

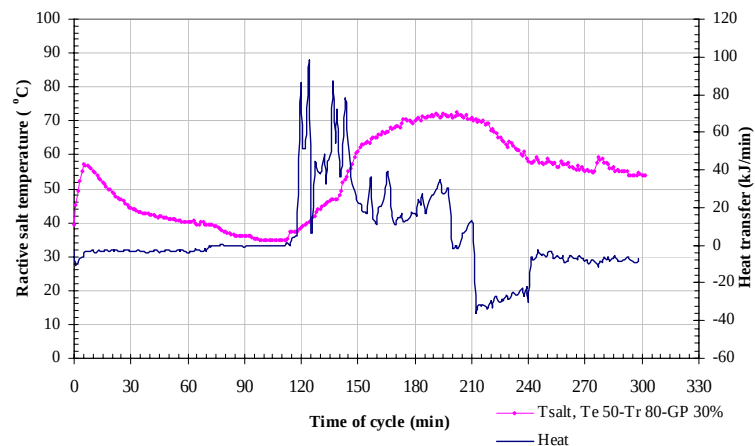
จากตาราง 4.3 จะเห็นว่า ปริมาณไอน้ำที่ถูกดูดซับของกรณีผสมแกรไฟต์มีมากที่สุด แต่สารทำงานที่ถูกไล่ออกจากสารดูดซับ มีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเส้นใยคาร์บอนที่สัดส่วนต่าง ๆ สำหรับพลังงานจากปฏิกิริยากรณีผสมแกรไฟต์มีค่าความร้อนมากที่สุด เมื่อพลังงานที่จ่ายให้กับปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้สมรรถนะของระบบเมื่อผสมแกรไฟต์มีค่าสูงกว่ากรณีอื่นๆ รูป 4.15 พบว่าพลังงานในช่วงดูดซับสาร เมื่อใช้สารผสมเป็นแกรไฟต์ 30% ค่าพลังงานที่ได้มีค่าสูงมาก ถัดไปคือ เส้นใยคาร์บอน 30 %, 20% และ 10 % ตามลำดับ

แกรไฟต์มีค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) สูงกว่าเส้นใยคาร์บอน ทำให้ความร้อนสัมผัสที่ได้มีค่าสูง รวมทั้งความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับสารโซเดียมซัลไฟด์มีมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิและพลังงานที่เกิดขึ้นมีค่าสูง และอัตราส่วนของเส้นใยคาร์บอนที่มากขึ้น พลังงานสูงขึ้นตาม ข้อดีของเส้นใยคาร์บอนคือสามารถทนต่อความร้อนในช่วง Desorption ได้สูง ทำให้สารดูดซับไม่เกิดการหลอมเหลว สมรรถนะของระบบ มีค่าเท่ากับ 3.47, 1.67, 0.81 และ 1.08 ของแกรไฟต์ 30% เส้นใยคาร์บอน 30 %, 20 % และ 10 % ตามลำดับ พลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงดูดซับสารในแต่ละกรณีแตกต่างกัน ในขณะที่พลังงานที่จ่ายให้กับระบบมีค่าใกล้เคียงกัน สรุปได้ว่าสมรรถนะของระบบขึ้นอยู่กับปริมาณ

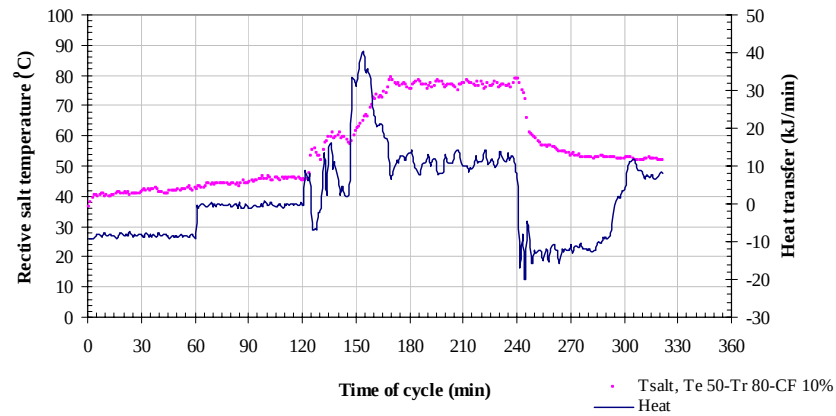
พลังงานที่เกิดขึ้นและชนิดและอัตราส่วนของสารผสม ค่าการเก็บพลังงานจำเพาะ มีค่าเท่ากับ 948, 816, 615 และ 561 W/kg_{adb} ของแกรไฟต์ 30% เส้นใยคาร์บอน 30 %, 20 % และ 10 % ตามลำดับ



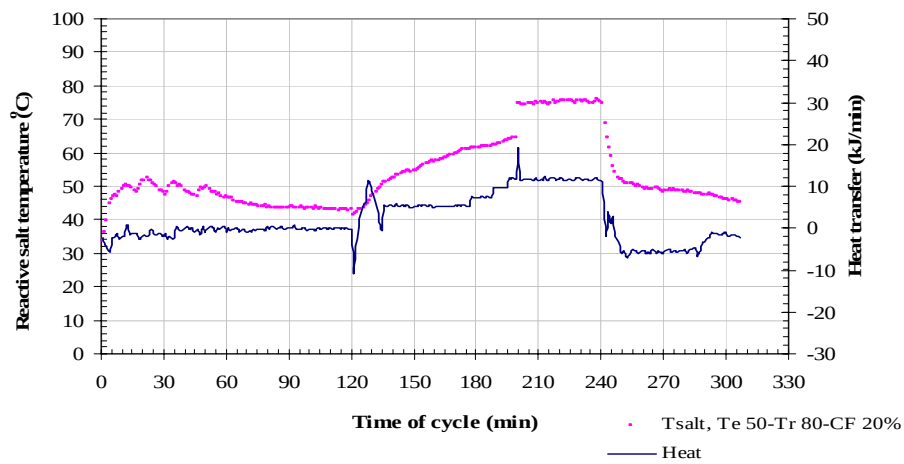
รูปที่ 4.15: การเปลี่ยนแปลงพลังงานตลอดช่วงการทดสอบ
เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดและอัตราส่วนของสารผสม



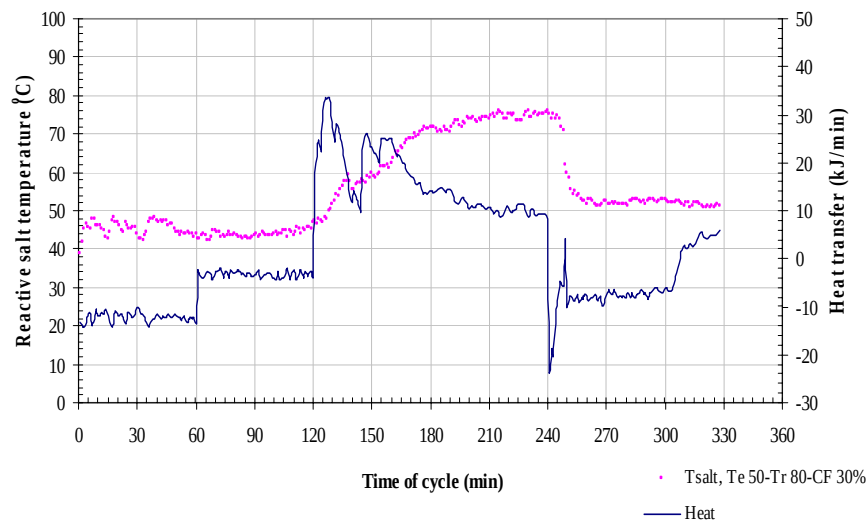
รูปที่ 4.16: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อน
ที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อใช้สารผสมแกรไฟต์ 30 %



รูปที่ 4.17: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อใช้สารผสมเส้นใยคาร์บอน 10 %



รูปที่ 4.18: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อใช้สารผสมเส้นใยคาร์บอน 20 %



รูปที่ 4.19: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อใช้สารผสมเส้นใยคาร์บอน 30 %

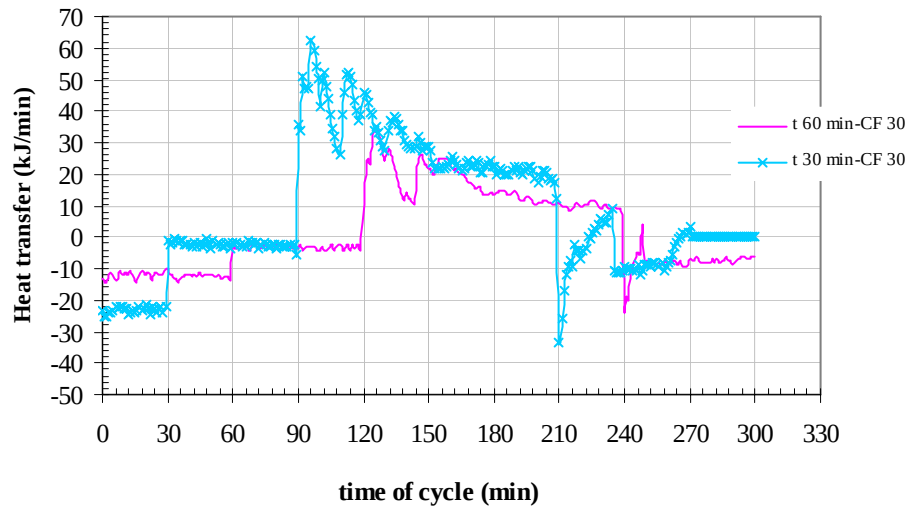
ตารางที่ 4.3: ความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดและอัตราส่วนของสารผสม

สารผสม	w_1 (g)	w_2 (g)	Q_{ads} (kJ)	Q_{des} (kJ)	U_{ads} (W/m ² .K)	U_{des} (W/m ² .K)	COP_h (-)	VHP (kWh/ m ³)	SHP (W/kg _{adb})
GP = 30%	33	20	218.94	427.54	17.0-34.2	46.3-106.1	3.47	5,573	948
CF = 10%	25	23	24.96	468.45	121.5-137.1	41.6-96.2	1.09	605	561
CF = 20%	25	23	73.37	466.19	9.8-19.1	14.8-37.8	0.81	1,779	615
CF = 30%	30	25	143.26	490.60	34.7-164.9	17.4-92.4	1.67	3,473	816

4.1.2.4 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาดูดซับเคมี

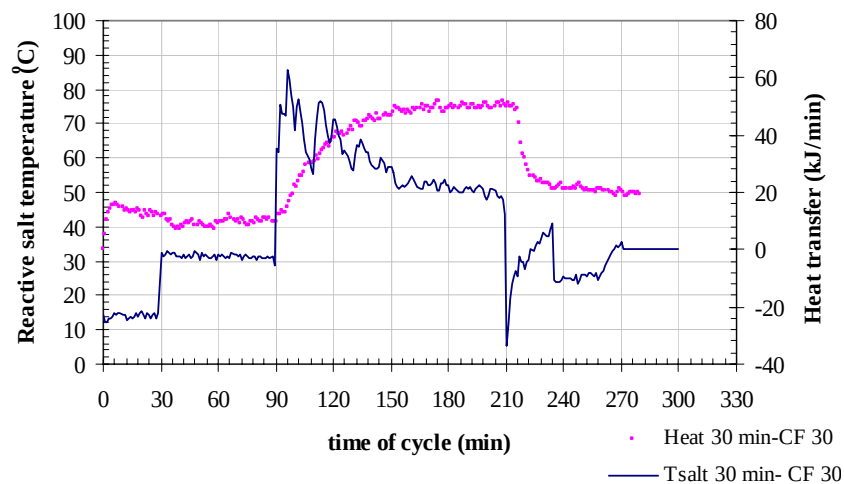
พิจารณาอิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่ามีอิทธิพลในกรณีที่วัสดุผสมมีอัตราส่วนมากขึ้น ดังแสดงในรูป 4.20 การดูดซับไอน้ำของสารดูดซับที่มีสารตั้งต้นอยู่มากนั้นไอน้ำจะค่อยๆแทรกตัวเข้าไปตามรูพรุนของสารผสม ถ้าระยะเวลาการทำปฏิกิริยาน้อยเกินไป การดูดซับยังไม่ถึงจุดอิ่มตัวหรือเต็มความสามารถที่สารจะดูดซับไอน้ำไว้ได้ และการถ่ายโอนความร้อนจากปฏิกิริยาไปสู่ผนังปฏิกรณ์และสารถ่ายโอนความร้อนไม่มากค่าความร้อนสัมผัสที่สะสมได้จึงต่ำ และสรุปผลวิเคราะห์ดังตาราง 4.4

จากตาราง 4.4 จะเห็นว่าระยะเวลาการทำปฏิกิริยามีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ให้ความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยามีค่าน้อยลงเกือบ 50 % ทำให้ค่าสมรรถนะของระบบลดลง และค่าการเก็บพลังงานจำเพาะลดลงด้วยเช่นกัน การเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ก็ต่อเมื่อช่วงระยะเวลาเพียงพอต่อการทำให้สารทำงานแทรกตัวเข้าไปยังเนื้อสารได้อย่างทั่วถึง พลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาก็สามารถถ่ายโอนไปสู่ผนังและน้ำมันถ่ายโอนได้มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังรูป 4.21

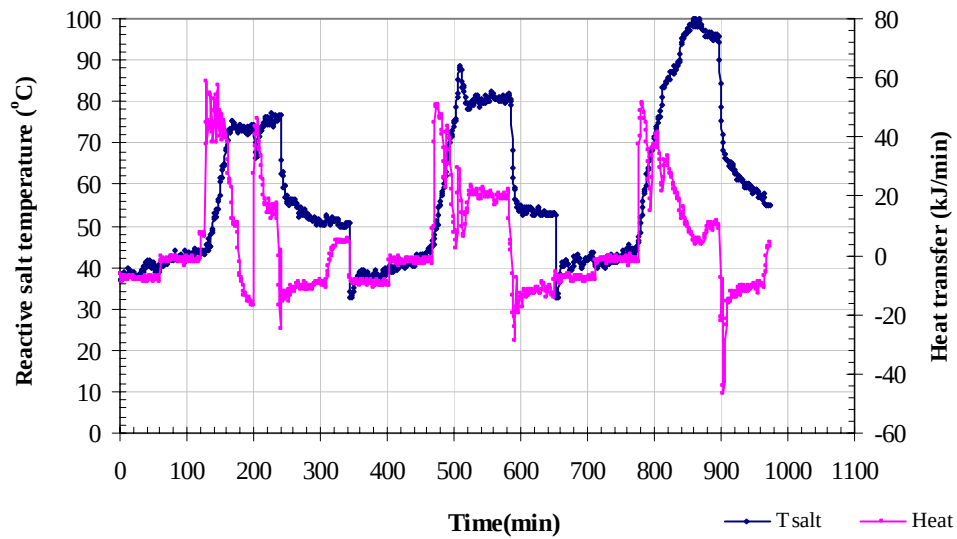


รูปที่ 4.20: การเปลี่ยนแปลงพลังงานตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลา
การทำปฏิกิริยาเคมี

สมรรถนะการทำงานของระบบ คือ 1.66 และ 1.004 และค่าการเก็บพลังงาน
จำเพาะ มีค่าเท่ากับ 816 และ 1,544 W/kg_{adb} สำหรับกรณีใช้เวลา 60 และ 30 นาที
ตามลำดับ



รูปที่ 4.21: ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับและค่าพลังงานความร้อนที่เปลี่ยนแปลง
ตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที
กรณีใช้สารผสมเส้นใยคาร์บอน 30 %



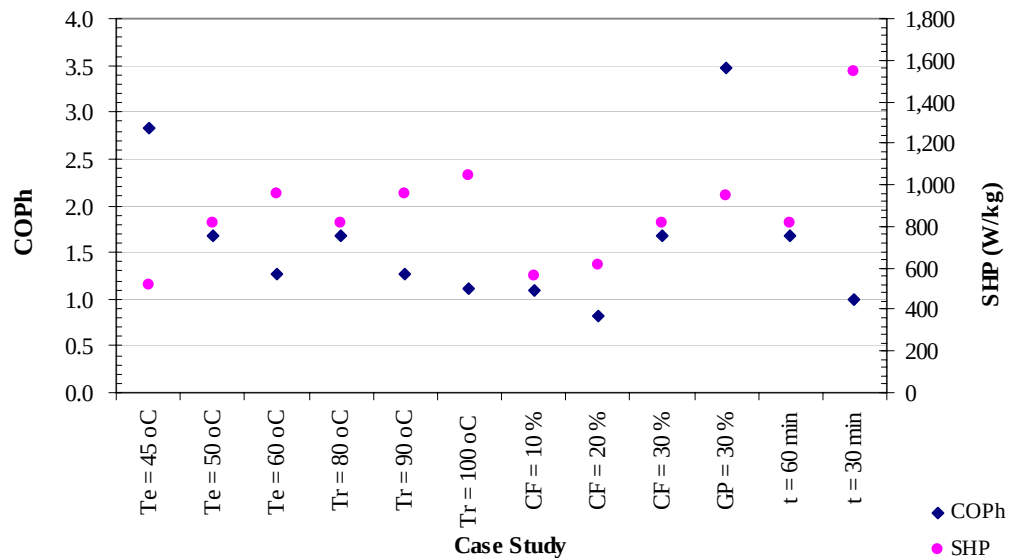
รูปที่ 4.22: ความสัมพันธ์อย่างต่อเนื่องระหว่างอุณหภูมิของสารดูดซับ
และค่าพลังงานความร้อนของระบบดูดซับ

ตารางที่ 4.4: ความสัมพันธ์ของค่าต่าง ๆ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการทำปฏิกิริยาดูดซับเคมี

Reaction time	w_1 (g)	w_2 (g)	Q_{ads} (kJ)	Q_{des} (kJ)	U_{ads} (W/m ² .K)	U_{des} (W/m ² .K)	COP_n (-)	VHP (kWh/m ³)	SHP (W/kg _{adb})
CF 30 %									
60 min	30	25	143.26	490.60	34.7-164.9	17.4-92.4	1.67	3,473	816
30 min	30	25	60.37	563.87	69.2-232.3	15.9-130.9	1.00	732	1,544

กราฟแสดงวัฏจักรการทำงานของระบบ CES ที่ทำงานอย่างต่อเนื่องกัน แสดงดังรูป 4.22 จะเห็นว่าทุกช่วงการทดสอบมีลักษณะคล้ายคลึงกัน กำหนดอุณหภูมิของเครื่องทำระเหยคงที่ 45 °C และอุณหภูมิของสารถ่ายโอนความร้อนเปลี่ยนแปลงในช่วง 80 – 100 °C สรุปผลการคำนวณค่า COP และ SHP ดังรูป 4.23

จากรูป 4.23 พิจารณาได้ว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าสมรรถนะและการเก็บพลังงานจำเพาะของระบบมากที่สุดคือ ชนิดของสารผสม คือ แกรไฟต์ เนื่องจากพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาที่มากขึ้นสามารถเกิดการดูดซับได้มากขึ้น และตัวแปรถัดไปเป็นอุณหภูมิและตัวแปรที่มีอิทธิพลน้อยสุดคือระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา เพราะอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดมีมากสุดในตอนเริ่มแรกของช่วงการทดสอบ



รูปที่ 4.23: ค่า COP_h และ SHP ของทุกชุดการทดสอบ

4.2. ระบบทดสอบ MCES 2

4.2.1 ผลการทดสอบการขึ้นรูปแท่นปฏิกิริยา (Reactive bed consolidation)

ผลการปรับปรุงแท่นปฏิกิริยา (Reactive bed) ของโซเดียมซัลไฟด์พบว่าส่วนผสมที่ดีที่สุดที่ทำให้สารผสมปฏิกิริยา (Reactive mixture) สามารถคงรูปอยู่ได้ดีที่สุด ประกอบด้วย

- 1) เกลือโซเดียมซัลไฟด์ ($Na_2S \cdot xH_2O$) ความหนาแน่นเกลือประมาณ 2500 kg/m^3
- 2) สาร Binder คือ Conductive graphite ความหนาแน่น 800 kg/m^3
- 3) สาร Binder คือ แป้งมัน (Organic Starch) ความหนาแน่นประมาณ 2000 kg/m^3
- 4) สารเสริม หรือ Additive มีองค์ประกอบคล้ายซีเมนต์ ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ความหนาแน่นประมาณ 2000 kg/m^3

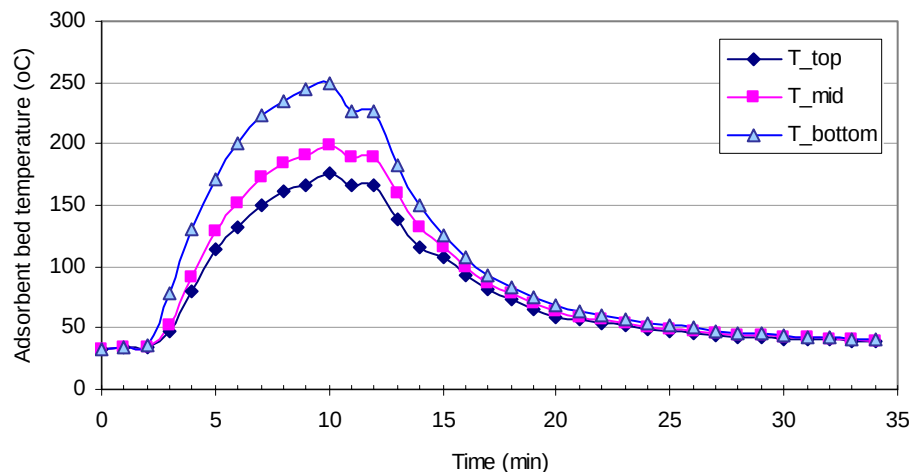
ข้อมูลคุณลักษณะจำเพาะของ Reactive bed ดังนี้

- อัตราส่วน (Salt: Graphite: Binder: Additive ในหน่วยกรัม เป็น 24.3/ 74.9/ 4.1/ 8.1 หรือ 3: 9.25: 0.5: 1 (โดยมวล)
- อัตราส่วนโดยมวล (mass fraction) เป็น 0.22, 0.67, 0.04, 0.07
- สารผสมปฏิกิริยามีความหนาแน่นโดยเฉลี่ย $1,302.3 \text{ kg/m}^3$
- ปริมาตรของท่อทรงกระบอก คือ 18.5 cm^3
- มวลของเกลือโซเดียมซัลไฟด์ 24 g
- มวลของ Reactive bed 111 g

4.2.2 ผลการใช้กราฟิตชนิดค่าการนำความร้อนสูง (SGL Conductive Graphite)

สาร Binder ที่จำเป็นมากตัวหนึ่ง คือ กราไฟต์ วัตถุประสงค์คือ การเพิ่มค่าการนำความร้อนของแท่นสารดูดซับ โดยได้ทดสอบกราฟิต 2 ชนิด ประเภทแรกเป็นกราฟิตแบบธรรมดา และประเภทที่สอง SGL Conductive graphite ซึ่งนำเข้าจากบริษัท SGL Technology ประเทศเยอรมนี

วิธีการทดสอบโดยขึ้นรูปแท่นสารดูดซับจากการผสมเกลือโซเดียมซัลไฟด์กับกราฟิต บรรจุภายในท่อ สเตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm ยาว 1 cm วางอยู่บนถ้วยสเตนเลสที่วางอยู่บนแผ่นแอสเบสตอส จากนั้นให้ความร้อนโดยการนำความร้อนและแผ่รังสีจากแผ่นให้ความร้อน (แอสเบสตอส) ที่ได้รับความร้อนโดยตรงจากตะเกียงน้ำมันอีกต่อหนึ่ง โดยควบคุมอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนไม่ให้เกิน 100°C โดยให้ความร้อนประมาณ 4 นาที จากนั้นดับตะเกียง และวัดอุณหภูมิในเนื้อของแท่นสารดูดซับ (บน กลาง และล่าง) จะได้การกระจายอุณหภูมิตามรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24: การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่นสารดูดซับ (เกลือผสมกับกราฟิตแบบธรรมดา)

จากรูปที่ 4.24 สังเกตได้ว่าบริเวณด้านล่างของแท่นสารดูดซับบริเวณที่ติดกับบีกเกอร์ จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าบริเวณส่วนกลางและด้านบนของแท่นสารดูดซับ (Adsorbent bed) พบว่า

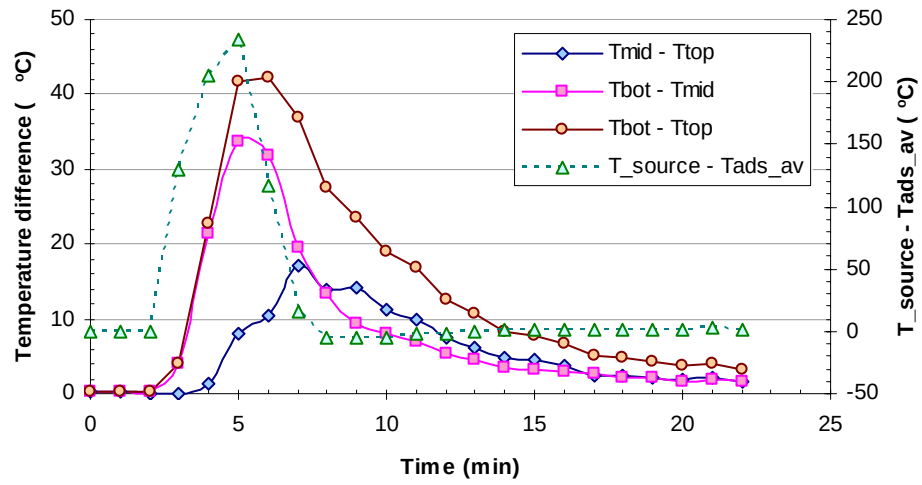
- (1) อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนสูงสุดภายใน 10 นาที จากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วภายในอีก 10 นาทีต่อมา และค่อยๆ ลดลง
- (2) อุณหภูมิบริเวณด้านบน กลาง และล่าง ของแท่นสารดูดซับ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 33.2°C จนสูงสุด 176.7°C , 199.3°C , และ 250.2°C
- (3) โดยเฉลี่ยแล้วอุณหภูมิต่างระหว่างบริเวณด้านบนกับส่วนกลาง และระหว่างส่วนกลางและด้านล่าง คือ 8.0°C และ 15.8°C

รูปที่ 4.25 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของผลต่างของอุณหภูมิต่างระหว่างตำแหน่งตรงกลางและด้านบน และด้านล่างและตรงกลาง ตลอดจนผลต่างระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนกับอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นสารดูดซับ กรณีที่ใช้เกลือโซเดียมซัลไฟด์ผสมกับกราไฟต์แบบธรรมดา และเมื่อผสมกับกราไฟต์แบบนำความร้อนได้ดีของ SGL สังเกตได้ว่า ผลต่างอุณหภูมิระหว่างตรงกลางกับด้านบน ($T_{mid} - T_{top}$) และอุณหภูมิต่างระหว่างด้านล่างกับตรงกลาง ($T_{bot} - T_{mid}$) กรณีใช้กราไฟต์แบบ SGL conductive พบว่าค่าโดยเฉลี่ยของผลต่างต่ำกว่ากรณีของกราไฟต์แบบธรรมดา แสดงการถ่ายโอนความร้อนในเนื้อของ Adsorbent bed เมื่อใช้กราไฟต์แบบนำความร้อนจะสูงกว่า

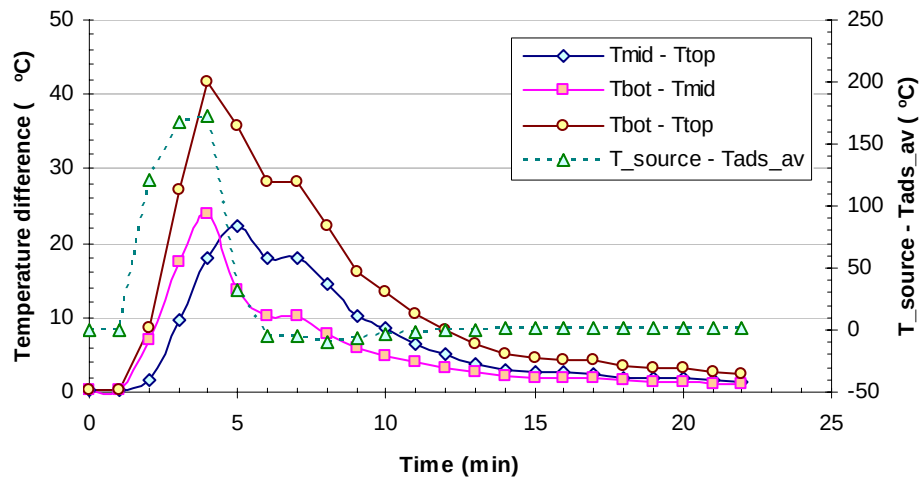
เมื่อพิจารณาผลต่างระหว่างอุณหภูมิแหล่งความร้อนกับอุณหภูมิโดยเฉลี่ย (จาก 3 ตำแหน่ง) ของแท่นสารดูดซับ ($T_{source} - T_{adv_av}$) เปรียบเทียบ 2 กรณี สังเกตได้ว่าผลต่างกรณีใช้กราไฟต์ SGL ต่ำกว่าโดยเฉลี่ยประมาณ 16.8°C แสดงว่ามีการส่งผ่านความร้อนจากแหล่งความร้อนมายังเนื้อของสารดูดซับได้ดีกว่ากราไฟต์แบบธรรมดา

จากการคำนวณค่าการนำความร้อนของแท่นสารดูดซับ หรือ Thermal conductivity (k) ในหน่วย W/m.K สำหรับกรณีผสมเกลือโซเดียมซัลไฟด์กับกราไฟต์ทั้งสองประเภท เมื่อแสดงกราฟความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นสารดูดซับ จะได้ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่า k ของแท่นสารดูดซับที่ผสมกับ SGL conductive graphite จะสูงกว่าโดยเฉลี่ย 61 W/m.K โดยค่า k ของการผสมกับกราไฟต์แบบธรรมดาอยู่ในช่วง $75 - 281 \text{ W/m.K}$ (เฉลี่ย 183 W/m.K) และค่า k กรณีผสมกับ Conductive graphite อยู่ในช่วง $146 - 301 \text{ W/m.K}$ (เฉลี่ย 244 W/m.K)

สรุปได้ว่าการเปลี่ยนชนิดของ binder มีผลให้ค่าการนำความร้อนภายในเนื้อของแท่นสารดูดซับหรือแท่นปฏิกิริยา (Reactive bed) จากกราไฟต์แบบธรรมดาเป็นกราไฟต์แบบนำความร้อนจะทำให้ค่าการนำความร้อน (k) เพิ่มขึ้นได้ถึง 33.5% นอกจากข้อดีการปรับปรุงการนำความร้อนแล้ว การผสมกับ Graphite binder ยังมีส่วนช่วยในการบรรเทาการกัดกร่อนของเกลือโซเดียมซัลไฟด์ และช่วยการขึ้นรูปแท่นปฏิกิริยาให้ง่ายขึ้น

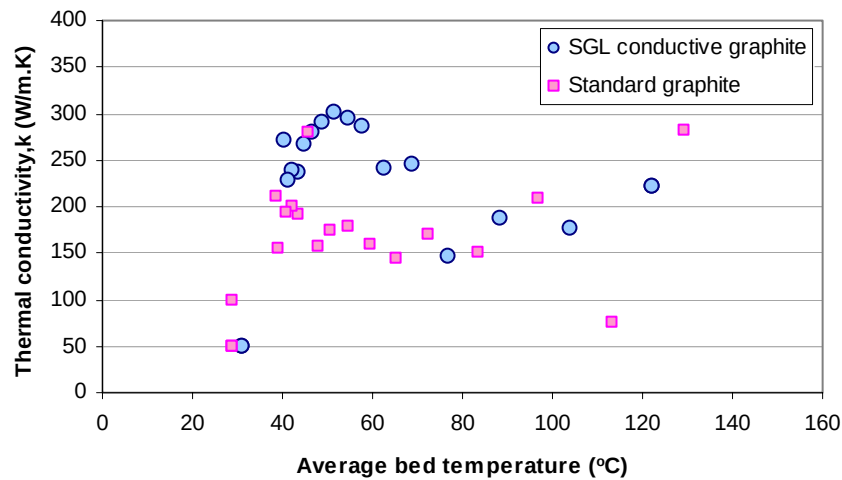


(ก) กราฟไฟต์ธรรมดา



(ข) SGL Conductive Graphite

รูปที่ 4.25: การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่างระหว่างตำแหน่งภายในแท่นดูดซับ
บน-กลาง-ล่าง และระหว่างแหล่งความร้อนกับอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นสารดูดซับ



รูปที่ 4.26: ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและอุณหภูมิเฉลี่ยของ
แท่นสารดูดซับ กรณีผสมกับกราไฟต์ต่างชนิดกัน

4.2.3 การปรับปรุงกรรมวิธีการขึ้นรูปโดย Binder และ Additives

แม้ว่าการผสมเกลือโซเดียมซิลไฟต์กับกราไฟต์จะทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้นก็ตาม หากแต่ว่าแท่นปฏิกิริยายังไม่สามารถคงตัวและเหนียวพอที่จะประจุลงในปฏิกรณ์ได้ จึงได้มีการทดสอบผสมกับ Binder หรือ Additive ตัวอื่น ซึ่งคาดว่าจะให้ผลดีกับการขึ้นรูปได้ โดยได้ทดสอบผสมกับ Binder จากสารอินทรีย์ (Organic material) ซึ่งจะไม่เกิดปฏิกิริยากับเกลือโซเดียมซิลไฟต์และกราไฟต์และไม่กักดอง โดยสารตัวที่ได้รับการเลือกมาทดสอบคือ แปะมัน เนื่องจากคุณสมบัติของการเป็นไฟเบอร์หรือเส้นใยและการดูดซับน้ำที่ปนอยู่กับเกลือโซเดียมซิลไฟต์ได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ยังได้ทดสอบขึ้นรูปกับสารโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate) ซึ่งได้เคยทดสอบกับการขึ้นรูปแท่นสารดูดซับของถ่านกัมมันต์และประสบผลสำเร็จมาแล้ว โดยคาดว่าสารนี้จะสามารถผสมสารอนุลาร์ (Granular) ของสารปฏิกิริยา (เกลือโซเดียมซิลไฟต์) และสาร binder (กราไฟต์และแปะมัน) ให้เชื่อมต่อกันได้ โดยกรรมวิธี 2 แบบ คือ (1) การผสมโดยตรงและ (2) การฉาบที่ผิวหน้าด้านบนและล่างของแท่นปฏิกิริยา ปรากฏว่าโดยรวมแล้วโซเดียมซิลิเกตไม่สามารถปรับปรุงสภาพแท่นปฏิกิริยาหลังการขึ้นรูปได้ จึงไม่เลือกใช้สารตัวนี้ต่อไป

นอกจากนี้ยังได้ทดสอบนำ Additive อีกตัวซึ่งมีคุณสมบัติส่วนหนึ่งคล้ายซีเมนต์ ซึ่งจะช่วยในการแข็งตัวของแท่นปฏิกิริยาหลังการขึ้นรูปได้ คือ สารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาวมาผสมด้วย ซึ่งทำให้สภาพของแท่นปฏิกิริยาหลังการขึ้นรูปคงตัว แข็ง และคงรูปได้ดีกว่าเมื่อได้รับความร้อนและคายความร้อน

กรณีที่ทดสอบทั้งหมด แสดงในตารางที่ 4.5 ดังนี้ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อผสมเกลือโซเดียมซิลไฟต์กับ Binder และ Additives ที่คัดเลือกมาทั้งหมด ได้แก่ กราไฟต์แบบ SGL conductive

แป้งมัน และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะได้ค่าการนำความร้อน (k) ประมาณ 250 W/m.K และแทนสารดูดซับหรือแทนปฏิกิริยาขึ้นรูปได้ดีที่สุดในส่วนผสมของกรณีที่ 9

ตารางที่ 4.5: กรณีทดสอบการผสม Binder และ Additives กับเกลือโซเดียมซัลไฟด์

กรณี	รูปแบบการผสม	ผลการทดสอบ และหมายเหตุ
1	เกลือโซเดียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ (Pure Sodiumsulphide salt)	เกลือละลายเมื่อได้รับความร้อน และกัดกร่อนทองแดงอย่างชัดเจน k โดยเฉลี่ย 250 W/m.K
2	แป้งมันบริสุทธิ์	k โดยเฉลี่ย 217 W/m.K
3	กราไฟต์ SGL conductive + แป้งมัน	- ถ้าประจุแบบแน่นและเติมน้ำ k โดยเฉลี่ย 502 W/m.K - ถ้าประจุแบบไม่แน่น k โดยเฉลี่ย 219 – 289 W/m.K
4	เกลือโซเดียมซัลไฟด์ + กราไฟต์ธรรมดา	k โดยเฉลี่ย 183 W/m.K
5	เกลือโซเดียมซัลไฟด์ + กราไฟต์ SGL conductive	k โดยเฉลี่ย 244 – 369 W/m.K
6	เกลือโซเดียมซัลไฟด์ + กราไฟต์ SGL conductive เคลือบด้านบนและล่างของแท่นปฏิกิริยาด้วย Sodiumsilicate	คงรูปได้ดีขึ้น แต่เกาะกันเป็นกระจุกและก้อน k โดยเฉลี่ย 239 W/m.K
7	เกลือโซเดียมซัลไฟด์ + กราไฟต์ SGL conductive + Sodiumsilicate	เมื่อผสมกันโดยตรงทั้งหมด เมื่อให้ความร้อนมีของเหลวไหลเยิ้มออกมาจากแท่นปฏิกิริยา k โดยเฉลี่ย 150 - 203 W/m.K
8	เกลือโซเดียมซัลไฟด์ + กราไฟต์ SGL conductive + แป้งมัน	สัดส่วนผสม 6:1:1 โดยมวล พบว่าสารผสมมีสีดำและเนื้อผสมเข้ากันได้ดี คงตัวได้ดีแต่กัดกร่อนทองแดงสะสมความร้อนได้ดี - ช่วงให้ความร้อน k โดยเฉลี่ย 182 – 1977 W/m.K - ช่วงคายความร้อน k โดยเฉลี่ย 136 – 262 W/m.K
9	เกลือโซเดียมซัลไฟด์ + กราไฟต์ SGL conductive + แป้งมัน + แคลเซียมไฮดรอกไซด์	ผสมในอัตราส่วน Graphite: Binder (แป้งมัน): Additive (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) เป็น 3: 9.25: 0.5: 1 โดยมวล ขึ้นรูปโดยไม่หยดน้ำ เมื่อให้ความร้อน 3 วัฏจักร พบว่าค่า k โดยเฉลี่ย 170 – 249 W/m.K

4.2.4 ขั้นตอนการขึ้นรูป Reactive bed

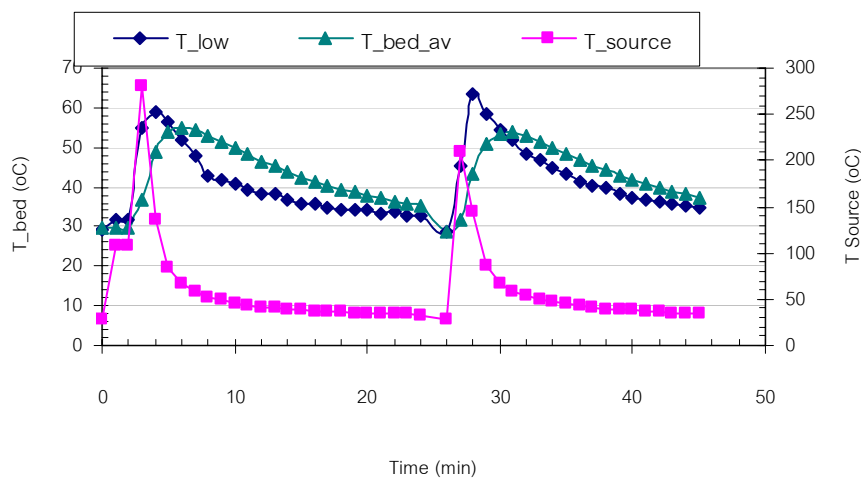
- 1) บดสารเกลือโซเดียมซัลไฟด์ ซึ่งมีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น และเย็บเปือกคล้ายเกลือแกงที่จำหน่ายในครกหิน จนกระทั่งสารละเอียด เมื่อบดแล้วสารจะมีลักษณะคล้ายโคลนสีขาวขุ่น
- 2) ผสมส่วนผสมทั้ง 4 ของแท่นปฏิกริยา ได้แก่ Salt (เกลือโซเดียมซัลไฟด์ไฮเดรต): Graphite: Binder (แป้งมัน): Additive (แคลเซียมไฮดรอกไซด์) ในหน่วยกรัม เป็น 24.3/ 74.9/ 4.1/ 8.1 หรือ 3: 9.25: 0.5: 1 (โดยมวล)
 - (1) ผสมกราไฟต์กับเกลือโซเดียมซัลไฟด์ที่บดแล้วเป็นอันดับแรก จะทำให้ส่วนผสมกลายเป็นสีดำ
 - (2) จากนั้นผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาว ทำให้ดูดซับน้ำในเกลือไปส่วนหนึ่ง ส่วนผสมจะดูแห้งยิ่งขึ้น
 - (3) สุดท้ายผสมแป้งมัน ซึ่งจะทำให้ส่วนผสมเหนียวยิ่งขึ้นเพราะความเป็นเส้นใยของแป้งมันเมื่อได้รับน้ำ และทำให้ส่วนผสมมีลักษณะคล้ายกึ่งดินน้ำมันและแป้งเปียกสามารถขึ้นรูปได้ง่าย
- 3) บดส่วนผสมให้เข้ากันจนกระทั่งเป็นเนื้อเดียว สังเกตได้จากสีและลักษณะของเนื้อสารที่มีความสม่ำเสมอ
- 4) บรรจุส่วนผสมลงในปฏิกรณ์ (Tubular Reactor) ทรงกระบอกจากวัสดุ SS (เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของโซเดียมซัลไฟด์) โดยการบรรจุต้องเจาะรูตรงกลางไว้เพื่อเป็นทางเดินสำหรับสารทำงาน โดยมีแท่งเหล็กเสียบไว้เป็นแกนกลาง จากนั้นดึงแท่งเหล็กออกทำให้เกิดเป็นรูตรงกลางขนาดประมาณ 1-2 mm
- 5) ตรวจสอบความเรียบร้อยว่าไม่มีส่วนผสมไหลเยิ้มออกมา และไม่มีฟองอากาศอยู่ภายในแท่นปฏิกริยา

4.2.5 ผลของการเติม Additive (แคลเซียมไฮดรอกไซด์)

จากการทดสอบหลายส่วนผสมก่อนหน้าการเติม Additive พบว่า Reactive mixture ไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ แต่เมื่อได้ทดสอบใส่สารแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็น Additive พบว่า Reactive mixture มีความแข็งและยืดหยุ่นคล้ายยาง และทดสอบผลของ Additive ตัวนี้ โดยขั้นตอนต่อไปนี้

- (1) ผสมเกลือโซเดียมซัลไฟด์ กราไฟต์ แป้งมัน และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วนโดยปริมาตร 2:1:2:1 ให้เข้ากัน
- (2) ขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง Reactive bed เป็นแท่งทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง ½ นิ้ว และสูงประมาณ 1 cm อัดให้แน่น

- (3) นำชิ้นงานใส่ในบีกเกอร์ และติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อวัดอุณหภูมิทั้งหมด 5 จุด ได้แก่ ภายในเนื้อ Reactive bed 3 จุด, อุณหภูมิกันภาชนะบีกเกอร์ (ซึ่งตั้งอยู่บนแผ่นแอสเบสตอสที่รับความร้อนจากตะเกียงน้ำมัน) 1 จุด, และ อุณหภูมิผิวในบีกเกอร์ 1 จุด
- (4) ให้ความร้อนจากตะเกียงกับ Reactive bed วัดและบันทึกอุณหภูมิ สังเกตอุณหภูมิของแท่นปฏิกิริยาไม่ให้สูงเกินไป
- (5) หยุดการให้ความร้อนและทิ้งไว้ระยะหนึ่ง เป็นการสิ้นสุดหนึ่ง Heating cycle และจากนั้นทำซ้ำตั้งแต่ (3) ถึง (5) อีกหนึ่ง Heating cycle
- (6) ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27: การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่นปฏิกิริยาที่ผสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์

รูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นอุณหภูมิของแท่นสารดูดซับที่ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ อุณหภูมิเฉลี่ยของเนื้อสารแท่นสารดูดซับ (T_{bed_av}), อุณหภูมิแหล่งความร้อนซึ่งวัดจากแผ่นแอสเบสตอสที่ให้ความร้อน (T_{source}) และ อุณหภูมิผิวภายในบีกเกอร์ (T_{low}) ซึ่งแสดงเป็นสองวัฏจักรการให้ความร้อนต่อการหยุดให้ความร้อน จากนั้นให้ความร้อนใหม่ในวัฏจักรต่อไป สังเกตได้ว่า

- (1) แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงกว่า 200°C สามารถจ่ายความร้อนให้แท่นสารดูดซับภายใน 3 นาที (จากนั้นหยุดการให้ความร้อนจากตะเกียงน้ำมัน แต่อาศัยการนำความร้อนและการแผ่รังสีจากแผ่นแอสเบสตอส ดูจาก T_{low})
- (2) ส่งผลให้แท่นสารดูดซับมีอุณหภูมิสูงกว่า 54°C ภายใน 5-6 นาที จากนั้นอุณหภูมิของแท่นสารดูดซับ ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อนแล้วจะค่อยลดลงตามอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน จนเหลือ 35°C ในระยะเวลา 18 นาทีต่อมา

- (3) โดยอุณหภูมิต่างระหว่าง แท่นสารดูดซับกับแผ่นให้ความร้อน (แอสเบสตอส) อยู่ในช่วง $2.5^{\circ}\text{C} - 10.2^{\circ}\text{C}$ สำหรับวัฏจักรให้ความร้อนแรก และอยู่ในช่วง $1.7^{\circ}\text{C} - 5.5^{\circ}\text{C}$ สำหรับวัฏจักรที่สอง

สรุปได้ว่า แท่นสารดูดซับที่เกิดจากการผสมสารดูดซับ (Sodiumsulphide Hydrate) กับ binder และ additive ที่คัดเลือกมาแล้ว ให้รูปแบบ (Pattern) ของการถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งความร้อน โดยกระบวนการนำความร้อนและแผ่รังสีที่คล้ายคลึงกัน และสามารถส่งผ่านความร้อนในแท่นสารดูดซับได้ภายใน 5-6 นาที แสดงว่าแท่นปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนผสมกับเกลือโซเดียมซัลไฟด์ที่ปรับปรุงแล้วจะสามารถสะสมความร้อนได้เป็นอย่างดี และจะเก็บรักษาพลังงานในปฏิกิริยาได้ดียิ่งขึ้น

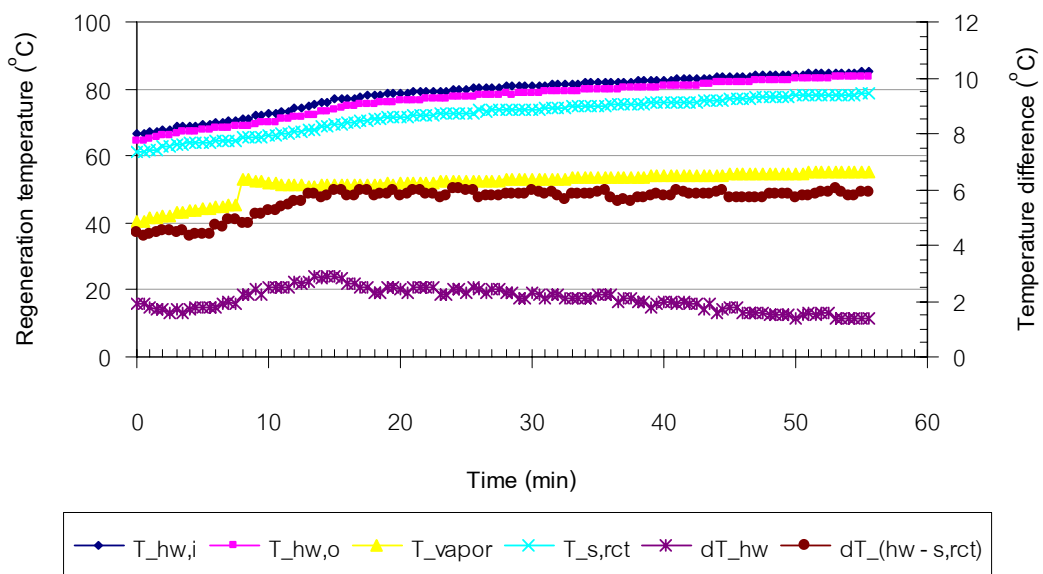
4.2.6 ผลการทดสอบวัฏจักรทำงานของ MCES 2

ผลการทดสอบระบบ MCES 2 ตามที่นำเสนอขั้นตอนไว้ในหัวข้อ 3.2.6 ในบทที่ 3 ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 1: การไล่น้ำและก๊าซอื่นๆ ออกจากปฏิกิริยา เพื่อเตรียมความพร้อมในการทดสอบการทำงานเป็นวัฏจักร การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของปฏิกิริยาแสดงดังกราฟรูปที่ 4.28 ซึ่งแสดงอุณหภูมิความร้อนสำหรับถ่ายโอนความร้อนให้ปฏิกิริยาที่ทางเข้าและออก ($T_{hw,i}$ และ $T_{hw,o}$) อุณหภูมิไอสารทำงานน้ำ (T_{vapor}) ซึ่งวัดที่ผิวของท่อเหนือวาล์ว และอุณหภูมิปฏิกิริยา ($T_{s,rct}$) ซึ่งวัดที่ผิวด้านนอกของ Water jacket (อุณหภูมิปฏิกิริยาจริงจะสูงกว่านี้แต่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง จึงใช้ข้อมูลเดิมในการทดสอบระบบ MCES 1 มากำหนดอุณหภูมิปฏิกิริยาว่าอยู่ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำร้อนเข้าและออกกับอุณหภูมิ $T_{s,rct}$ นอกจากนี้รูปที่ 4.28 ได้แสดงอุณหภูมิต่างระหว่างน้ำร้อนที่ทางเข้าและทางออกของ Water jacket และอุณหภูมิต่างระหว่างอุณหภูมิความร้อนและอุณหภูมิผิวด้านนอกของปฏิกิริยา

กราฟแสดงว่าในเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และผลต่างอุณหภูมิความร้อนเข้าและออกอยู่ระหว่าง $1.4 - 2.9^{\circ}\text{C}$ เฉลี่ย $2.1 \pm 0.40^{\circ}\text{C}$ โดยอุณหภูมิความร้อนในถังเริ่มต้นที่ 95°C ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำร้อนเข้าและออก Water jacket เพิ่มขึ้นจาก 65.5°C เป็น 84.4°C ในขณะที่อุณหภูมิผิวด้านนอกของปฏิกิริยาเพิ่มจาก 61.1°C เป็น 78.5°C โดยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 18 นาทีแรกจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นช้าๆ ดังนั้นอุณหภูมิปฏิกิริยาจึงอยู่ระหว่าง $78.5 - 84.4^{\circ}\text{C}$ ภายใน 60 นาที ซึ่งลักษณะการให้ความร้อนปฏิกิริยาแบบนี้จะสะดวกต่อการประยุกต์ไปรับความร้อนจากแหล่งความร้อนทั้งเปล่าในอุตสาหกรรมจริง

การทดลองที่ 2: ทำการระเหยสารทำงานที่เครื่องทำระเหยที่ระดับอุณหภูมิ 35°C โดยการหมุนเวียนน้ำให้ความร้อนที่อุณหภูมิบรรยากาศ เข้าไปยัง Water jacket ของเครื่องทำระเหย ตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.2.6. พบว่าในระยะเวลาทำการทดลองนาน 4 ชั่วโมง ความร้อนสัมผัสที่ได้จากผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำถ่ายโอนความร้อน คือ 414.2 kJ และสามารถทำระเหยไอน้ำได้ทั้งหมด เนื่องจากความร้อนเพียงพอกับการระเหยปริมาณน้ำทั้งหมด 28 mL ที่ความดันสุญญากาศ ($< 50\text{ kPa}$)



รูปที่ 4.28: กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิปฏิกรณ์ขณะ Regeneration ของ MCES 2

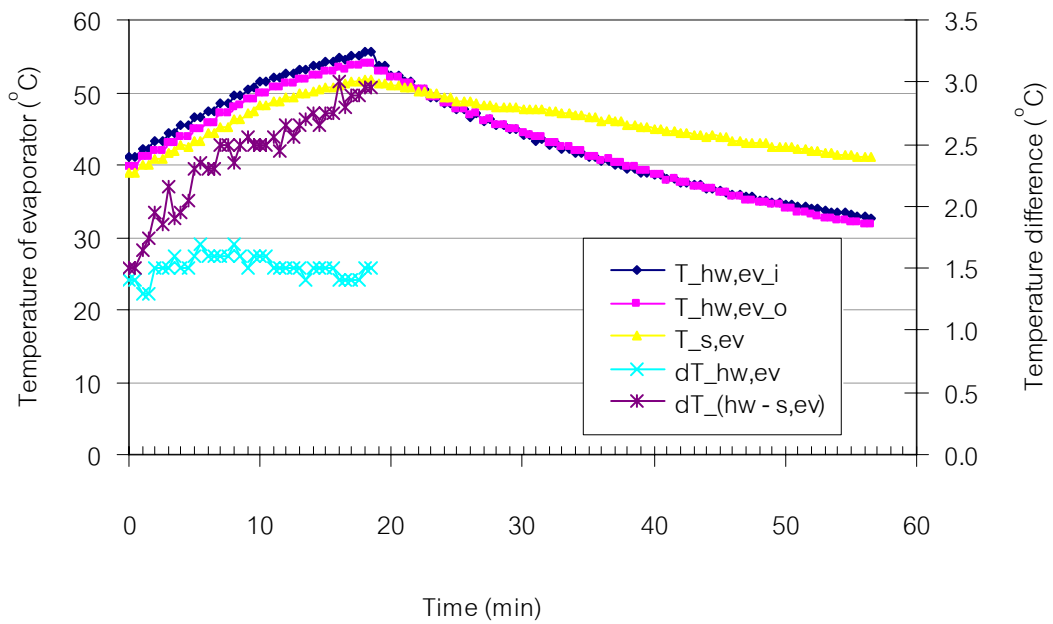
การทดลองที่ 3: ประกอบด้วยการทดสอบวัฏจักรทำงาน 2 วัฏจักร ตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.2.6 วัฏจักรการดูดซับทางเคมีแรกใช้อุณหภูมิการดูดซับประมาณ 50°C และอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ใช้ไล่สารดูดซับเริ่มต้นประมาณ 95°C ผลการทดสอบแสดงดังกราฟรูปที่ 4.29 และ 4.30 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเครื่องทำระเหยและปฏิกรณ์ตามเวลา จะเห็นว่าในรูปที่ 4.29 อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของเครื่องทำระเหย (อนุมานจากค่าเฉลี่ยอุณหภูมิน้ำถ่ายโอนความร้อนเข้าและออก: $T_{hw,ev,i}$ และ $T_{hw,ev,o}$) เพิ่มขึ้นจาก 40.4°C เป็น 54.4°C ในเวลา 18 นาที และผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำถ่ายโอนความร้อนเข้าและออกโดยเฉลี่ย คือ 1.5°C ในขณะที่อุณหภูมิผิวด้านนอก Water jacket ของส่วนทำระเหยก็เพิ่มขึ้นจาก 38.9°C เป็น 51.5°C ซึ่งผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนและอุณหภูมิผิวด้านนอกของส่วนทำระเหยตลอดช่วงการระเหย 2.4°C จากนั้นเมื่อเปิดวาล์วให้ไอสารทำงานไหลจากส่วนทำระเหยไปยังปฏิกรณ์ จะพบว่าอุณหภูมิของส่วนทำระเหยลดลงตามลำดับ จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการดูดซับทางเคมี ความร้อนที่ได้จากน้ำถ่ายโอนความร้อนปริมาณ 2157.7 kJ ใช้ในการระเหยสารทำงานน้ำในเครื่องทำระเหยได้ทั้งหมด

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการดูดซับจึงเริ่มกระบวนการคายสารดูดซับใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง โดยปฏิกรณ์มีอุณหภูมิเพิ่มจาก 50 °C เป็น 90 °C ภายใน 60 นาที

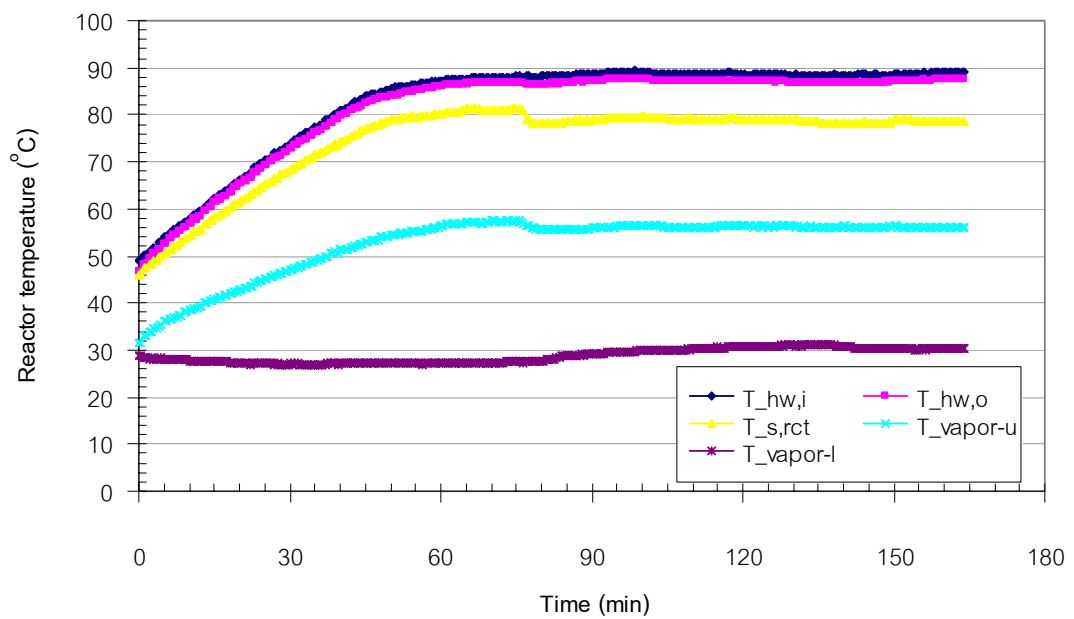
จากนั้นเป็นกระบวนการคายสารดูดซับอีกประมาณ 120 นาที จะเห็นว่าใช้เวลา Desorption นานกว่าการทดลองที่ 1 และอุณหภูมิต่างระหว่างน้ำร้อนกับผิวด้านนอกของปฏิกรณ์สูงกว่าการทดลองที่ 1 เนื่องจากกระบวนการนี้ต้องให้ความร้อนสำหรับการคายสารดูดซับ (Heat of Desorption) กับแท่นปฏิริยาโซเดียมซัลไฟด์ที่มีไอน้ำดูดซับอยู่ เพื่อแยกพันธะระหว่างสารตั้งต้นทั้งสองด้วย

วัฏจักรการดูดซับทางเคมีที่ 2 ของเครื่อง MCES 2 โดยเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจากการกำหนดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ให้ความร้อนกับเครื่องทำระเหยเมื่อเริ่มต้นเป็น 60 °C (โดยไม่ได้ให้ความร้อนระหว่างกระบวนการทำระเหย) และอุณหภูมิคายสารดูดซับเป็น 85 °C ผลการทดสอบแสดงดังกราฟรูปที่ 4.31 และ 4.32 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนอุณหภูมิของเครื่องทำระเหยและปฏิกรณ์ตามลำดับ จะเห็นว่าอุณหภูมิของเครื่องทำระเหยลดลงจาก 63.7 °C เป็น 41.2 °C ภายใน 60 นาที และปริมาณความร้อนจากน้ำถ่ายโอนความร้อน 1446 kJ ถูกใช้ไปในการทำระเหยสารทำงานน้ำทั้งหมด

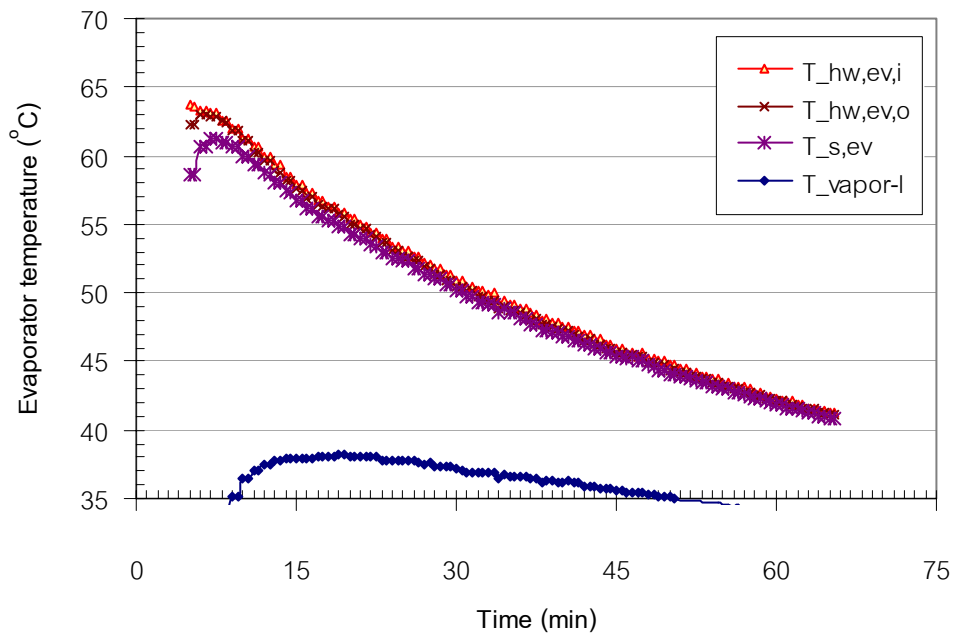
เมื่อสิ้นสุดกระบวนการดูดซับจึงเป็นการคายสารดูดซับ โดยวัฏจักรนี้ได้ลดอุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อนตั้งต้นลงเหลือ 85 °C ทำให้ใช้เวลาในการคายสารดูดซับประมาณ 4 ชั่วโมง และอุณหภูมิปฏิกรณ์เพิ่มจาก 55 °C เป็น 68 °C โดยเฉลี่ย ซึ่งต่ำกว่าวัฏจักรแรกของการทดลองที่ 3 อย่างชัดเจน แสดงว่าอุณหภูมิน้ำร้อนควรจะสูงกว่า 85 °C มิฉะนั้นอุณหภูมิปฏิกรณ์ขึ้นถึงระดับการ Desorption ได้ช้า นอกจากนี้กราฟรูป 4.32 ยังแสดงอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ทางเข้าและทางออกจากเครื่องควบแน่น ซึ่งเมื่อคำนวณความร้อนสัมผัสที่ได้ว่าความร้อน 2353.5 kJ มาจากการควบแน่นสารทำงานน้ำในเครื่องควบแน่น เมื่อสิ้นสุดกระบวนการคายสารดูดซับจึงเป็นการระบายความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งใช้เวลาเพียง 30 นาที จึงสิ้นสุดวัฏจักรทำงาน



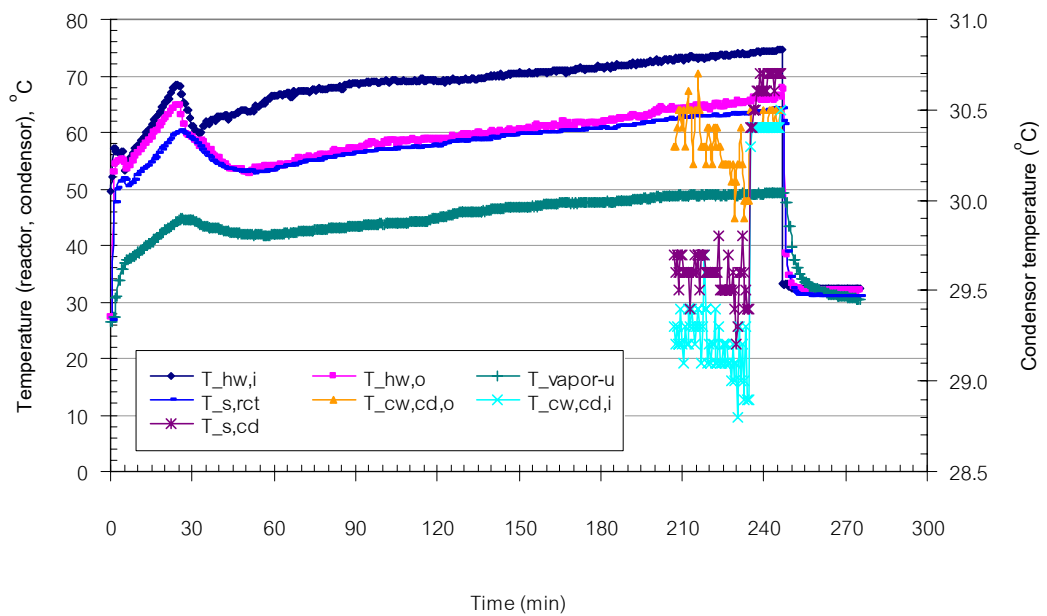
รูปที่ 4.29: กราฟการเปลี่ยนอุณหภูมิเครื่องทำระเหยของ MCES 2 ที่อุณหภูมิทำระเหย 50 °C



รูปที่ 4.30: กราฟการเปลี่ยนอุณหภูมิปฏิกรณ์ของ MCES 2 ที่อุณหภูมิ Desorption 95 °C



รูปที่ 4.31: กราฟการเปลี่ยนอุณหภูมิเครื่องทำระเหยของ MCES 2 ที่อุณหภูมิน้ำร้อนส่วนทำระเหยเริ่มต้น 60 °C



รูปที่ 4.32: กราฟการเปลี่ยนอุณหภูมิปฏิกรณ์ของ MCES 2 ที่อุณหภูมิ Desorption 85 °C

ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของ MCES 2 ในการทำงาน 2 วัฏจักรในการทดลองที่ 3 ปรากฏว่า COP_h ของระบบนี้คือ 1.50 และ 1.30 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่า $COP_{heating}$ ของระบบ MCES 1 อย่างไรก็ดีผลการคำนวณค่า SHP และ VHP พบว่าสูงกว่าของระบบ MCES 1 มาก คือ SHP สำหรับวัฏจักรทั้งสอง คือ 2,254 W/kg และ 1,121 W/kg ตามลำดับ และ VHP สำหรับทั้งสองวัฏจักร คือ 7,896 kWh/m³ และ 5,893 kWh/m³ แสดงว่าการปรับปรุงแทนปฏิกิริยาทำให้มีคุณสมบัติการนำความร้อนเพิ่มขึ้น ประกอบกับการพัฒนารูปแบบของระบบ MCES 2 ส่งผลให้ระบบมีความสามารถในการสะสมพลังงานจำเพาะที่เพิ่มขึ้น

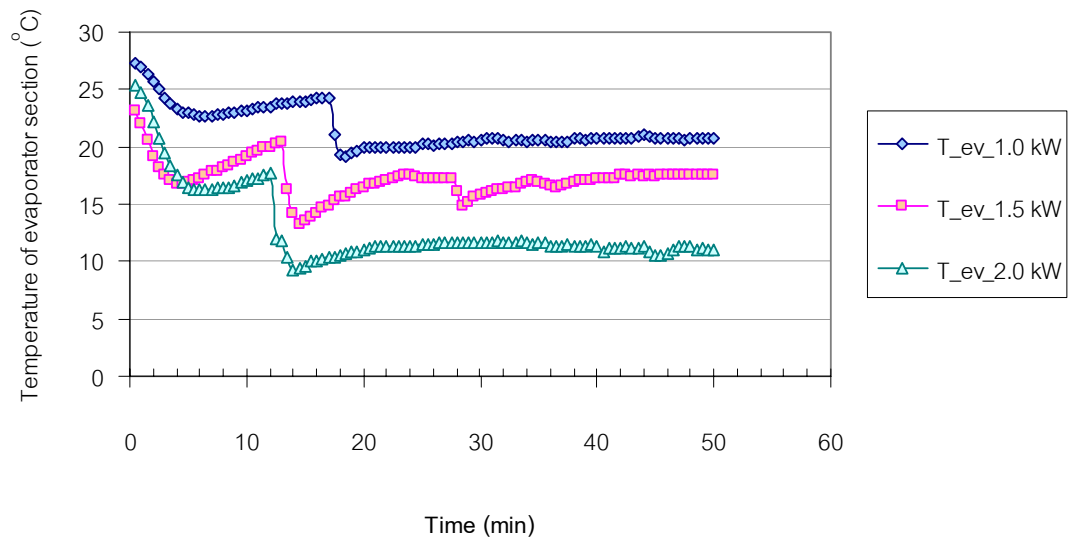
4.3. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของส่วนทำระเหย

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่วนทำระเหย

จากผลการทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อน (ใช้แทนแหล่งความร้อนทิ้งเปล่าในรูปของก๊าซร้อน) มายังส่วนทำระเหยของท่อความร้อน (ใช้แทนเครื่องทำระเหยของเครื่องดูดซับ) พบว่าเมื่อปรับค่าพลังงานความร้อนที่ป้อนให้อากาศ ทำให้อุณหภูมิอากาศก่อนผ่านส่วนทำระเหยเพิ่มสูงขึ้น

รูปที่ 4.33 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่ระดับพลังความร้อนที่จ่ายให้ระบบเปลี่ยนแปลงจาก 1.0 kW เป็น 1.5 kW และ 2.0 kW เมื่อการปรับระดับพัดลมจ่ายอากาศที่ 30% voltage regulator ซึ่งอากาศร้อนที่ใช้สมมติแทนความร้อนจากแหล่งความร้อนทิ้งเปล่าหรือแหล่งความร้อนจากพลังงานหมุนเวียนที่จ่ายให้กับระบบดูดซับ เมื่ออัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 1 kW เป็น 1.5 kW และ 2.0 kW ทำให้เกิดผลกระทบดังนี้

- (1) เวลาที่ใช้จนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวลดลงจาก 16.5 นาที เป็น 12.5 นาที และ 11.5 นาที ตามลำดับ
- (2) อุณหภูมิของส่วนทำระเหยที่เข้าสู่สภาวะคงตัวต่ำลง จาก 21 °C เป็น 18 °C และ 12 °C ตามลำดับ



รูปที่ 4.33: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยกับเวลา
ที่อัตราการจ่ายความร้อนต่างกัน ที่ระดับพัลลวม 30% voltage regulator

4.3.2 อุณหภูมิบรรยากาศ อุณหภูมิส่วนทำระเหย กับอัตราการไหล

อัตราไหลมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงผลต่างระหว่างอุณหภูมิบรรยากาศกับอุณหภูมิส่วนทำระเหย อัตราการไหลของอากาศปรับโดย % Voltage regulator ของพัลลวม จาก 35% เป็น 45% และ 55% ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงผลต่างระหว่างอุณหภูมิบรรยากาศกับอุณหภูมิส่วนทำระเหยคล้ายคลึงกันในแต่ละอัตราการไหล ที่แตกต่างกัน ที่ระยะเวลาที่ใช้และความสามารถในการทำความเย็น พบว่าที่อัตราการไหล เมื่อ % Voltage regulator เป็น 35% จะให้ความสามารถในการทำความเย็นที่ส่วนทำระเหยมากกว่าที่ 45% และ 55%

ในทางกลับกันเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้ท่อความร้อนเข้าสู่ภาวะคงตัวช้าลง เนื่องจากอากาศเคลื่อนตัวผ่านส่วนให้ความร้อน (ที่แทนแหล่งความร้อนทิ้งเปล่า) เร็วขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศที่ป้อนให้ส่วนทำระเหยลดต่ำลง ทำให้ระยะเวลาที่จะทำให้ส่วนทำระเหยของระบบดูดซับเข้าสู่ภาวะคงตัวยากขึ้น

4.3.3 ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่สภาวะคงตัว

4.3.2.1 อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน

จากการกำหนดพลังงานความร้อนที่ให้กับระบบให้คงที่ แล้วปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของอากาศโดยปรับ % Voltage regulator และคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับระบบเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยหาจากค่าความร้อนสัมผัสที่คำนวณจากค่าความจุความร้อนจำเพาะ และเปรียบเทียบกับความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ในการระเหยสารทำงานในส่วนทำระเหย เมื่ออุณหภูมิอากาศก่อนผ่านส่วนทำระเหยต่อความร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนในการแลกเปลี่ยนมีค่าสูงขึ้น

4.3.2.2 อุณหภูมิอากาศจากแหล่งความร้อนกับอัตราการไหลของอากาศ

ขณะระบบอยู่ในสภาวะคงตัวความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของอากาศแปรผกผันกับอุณหภูมิอากาศก่อนผ่านส่วนทำระเหยของท่อความร้อน (ที่ใช้แทนส่วนทำระเหยของระบบดูดซับ) โดยมีความสัมพันธ์ของกราฟเป็นเส้นตรง ความชันเป็นลบ แสดงว่าการเพิ่มความเร็วน้ำของอากาศขนาดผ่านส่วนทำระเหยจะทำให้อุณหภูมิอากาศที่ผ่านส่วนทำระเหยลดลง

4.3.2.3 อุณหภูมิอากาศหลังผ่านส่วนทำระเหยกับอัตราการไหลของอากาศ

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวอุณหภูมิอากาศหลังผ่านส่วนทำระเหยของท่อความร้อนจะแปรผกผันกับอัตราการไหลของอากาศเช่นเดียวกัน

4.3.2.4 อุณหภูมิอากาศก่อนและหลังผ่านส่วนทำระเหย

อุณหภูมิอากาศหลังและก่อนผ่านส่วนทำระเหยของท่อความร้อนที่สภาวะคงตัวจะแปรผกผันตามกัน ทำให้สามารถทำนายอุณหภูมิอากาศหลังผ่านส่วนทำระเหยได้จากอุณหภูมิอากาศก่อนผ่านส่วนทำระเหย

4.3.4 สรุปผลการวิเคราะห์ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน

จากการทดสอบทั้งหมด 21 การทดลอง ข้อมูลตัวแปรจากการวัด และจากการคำนวณ ได้สรุปไว้ดังตารางที่ 4.6 ได้แก่ อุณหภูมิส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นของท่อความร้อน อุณหภูมิอากาศก่อนและหลังผ่านส่วนทำระเหยของท่อความร้อน อุณหภูมิบรรยากาศ และ อัตราการไหลที่คำนวณจากความเร็วมวลที่วัด รวมถึง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (h) ค่าตัวเลขไร้มิติ Reynold number และค่าปริมาณความร้อนที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหย (Q_h)

การทดลองที่ 1-7:

- การทดสอบเมื่อป้อนพลังความร้อนให้กับอากาศเป็น 1.0 kW และ
- แปรผันความเร็วรอบพัดลม (% Voltage regulator) เท่ากับ 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60

การทดลองที่ 8 – 15:

- การทดสอบเมื่อปรับเปลี่ยนพลังความร้อนที่ป้อนให้กับอากาศเป็น 1.5 kW และ 2.0 kW
- โดยทดสอบความเร็วรอบพัดลม (% Voltage regulator) เท่ากับ 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

ข้อมูลที่น่าสนใจในตารางที่ 4.6 สรุปได้ดังนี้

- (1) อัตราการไหลของอากาศหรือกระแสแหล่งความร้อนของระบบอยู่ในช่วง 0.01 – 0.09 kg/s (36 – 324 kg/h) และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.05 kg/s (180 kg/h)
- (2) อุณหภูมิบรรยากาศในขณะทำการทดลองอยู่ในช่วง 24.1 – 31.7 °C (เฉลี่ย 27.6 °C)
- (3) อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนอยู่ในช่วง 10 – 30 °C (เฉลี่ย 23.4 °C)
- (4) อุณหภูมิส่วนควบแน่นอยู่ในช่วง 27.5 – 50.4 °C (เฉลี่ย 37.1 °C)
- (5) การออกแบบให้ส่วนทำความเย็นตรงผิวส่วนทำระเหยของท่อความร้อนมีลักษณะเป็นท่อและครีป สามารถลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศได้ 4 – 14 °C
- (6) ชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้สามารถทำงานได้ดี เมื่ออุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านชุดอุปกรณ์มีค่าสูงกว่า 40°C ซึ่งขึ้นกับรูปแบบของท่อความร้อนที่นำมาติดตั้งด้วย
- (7) ค่า Reynold Number (Re) มีค่าอยู่ในช่วง 911 – 5440 แสดงว่าอากาศมีการไหลอยู่ในช่วงราบเรียบจนถึงช่วง Transition โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 3245 ซึ่งเป็นการไหลแบบ Transition
- (8) ค่า Nusselt Number (Nu) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติและคำนวณได้จากค่า Reynold Number (Re) ใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศภายในชุดอุปกรณ์ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 22.2 – 52.4 W/m².K จะพบว่าค่าทั้งสามแปรผันตรงกัน
- (9) เมื่อป้อนอุณหภูมิอากาศร้อนที่ค่าประมาณ 34.0 – 71.5 °C พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทบริเวณส่วนทำระเหยซึ่งคำนวณจากค่าความจุความร้อนจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.04 – 16.28 kJ

- (10) ชุดท่อความร้อนที่ใช้แทนชุดเครื่องดูดซับทางเคมีนั้น ได้รับการออกแบบให้เป็นท่อแบบทรงกระบอก ควรจะมีการจัดเรียงให้เป็นกลุ่มท่อโดยอนุญาตให้มีกระแสอากาศไหลผ่านอย่างสม่ำเสมอผ่านกลุ่มท่อ จึงจะมีการดึงความร้อนจากกระแสอากาศร้อนที่ใช้แทนแหล่งความร้อนทิ้งเปล่าได้ดี

ตารางที่ 4.6: ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว

No.	m (kg/s)	T _{amb} (°C)	T _{ev} (°C)	T _{cd} (°C)	T _{h,i} (°C)	T _{h,o} (°C)	$\frac{T_{amb}-T_{ev}}{T_{ev}}$ (°C)	Nu (-)	h (w/m ² .K)	Q _h (kJ)
1	0.01	27.37	20.65	39.86	48.95	39.52	6.72	14.55	22.23	2.87
2	0.02	24.12	18.30	34.70	43.97	34.55	5.82	18.09	27.63	4.39
3	0.04	27.79	27.35	27.47	35.19	27.45	0.44	24.18	36.94	0.19
4	0.06	28.31	24.82	33.69	40.40	33.10	3.49	26.97	41.19	4.13
5	0.07	29.41	26.50	33.20	38.72	33.20	2.91	29.52	45.08	4.20
6	0.08	24.87	24.60	29.01	34.07	28.62	0.27	31.74	48.48	0.08
7	0.09	27.72	26.55	28.92	35.85	28.90	1.16	34.97	53.41	0.04
8	0.01	24.95	17.35	42.15	52.01	42.42	7.60	14.55	22.23	0.33
9	0.02	26.87	22.04	37.16	47.37	37.16	4.83	18.09	27.63	1.12
10	0.04	29.57	25.08	36.60	43.93	36.33	4.50	24.18	36.94	1.85
11	0.06	26.15	22.65	33.60	41.70	33.61	3.50	26.97	41.19	1.86
12	0.07	25.35	22.10	33.36	41.52	33.65	3.25	29.52	45.08	1.18
13	0.08	27.83	23.65	35.31	42.38	35.84	4.18	31.74	48.48	2.24
14	0.09	28.72	11.31	34.60	42.62	34.60	17.40	34.97	53.41	1.13
15	0.01	26.66	10.08	50.36	71.54	50.33	16.58	14.55	22.23	11.22
16	0.02	27.84	28.59	48.82	70.29	49.05	0.75	18.09	27.63	16.28
17	0.04	29.04	25.73	46.84	62.78	46.65	3.31	24.18	36.94	12.74
18	0.06	25.97	27.68	34.21	41.68	34.42	1.71	26.97	41.19	4.55
19	0.07	28.75	27.68	33.29	40.17	33.75	1.07	29.52	45.08	2.63
20	0.08	30.76	28.74	42.21	51.36	42.64	2.03	31.74	48.48	8.47
21	0.09	31.68	29.39	43.19	52.46	44.52	2.28	34.97	53.41	11.75
Min	0.01	24.12	10.08	27.47	34.07	27.45	0.44	14.55	22.23	0.04
Max	0.09	31.68	29.39	50.36	71.54	50.33	17.40	34.97	53.41	16.28
Avg	0.05	27.61	23.37	37.07	46.62	37.16	4.23	25.72	39.28	4.44

4.4. กรณีศึกษาการใช้ MCES กับระบบโรงงานอุตสาหกรรม

ระบบ MCES ได้รับการออกแบบและทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อนำผลสมรรถนะของระบบไปใช้ในการทำนายผลการเก็บรักษาพลังงานในระดับใหญ่ขึ้น ดังเช่น กรณีศึกษาจากการนำพลังงานความร้อนทิ้งเปล่าจากโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กถึงขนาดกลาง ที่มีแหล่งความร้อนทิ้งเปล่าในอุณหภูมิระดับปานกลาง $100 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (หรือ $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยเฉลี่ย) กำหนดมีพลังงานเข้าสู่ระบบโรงงานอุตสาหกรรมระหว่าง $2,000 - 12,000\text{ MJ/day}$ และมีประสิทธิภาพระบบโดยรวมประมาณ 40% พลังงานสูญเสียเกือบทั้งหมดอยู่ในรูปพลังงานความร้อน ซึ่งกำหนดว่าประมาณครึ่งหนึ่งของความร้อนสูญเสียอยู่ในรูปความร้อนทิ้งเปล่ากับของเหลวร้อนหรือก๊าซร้อน ซึ่งใช้เป็นแหล่งความร้อนให้กับระบบดูดซับทางเคมีเพื่อการเก็บรักษาพลังงานได้ โดยจ่ายให้กับส่วนปฏิกรณ์ในช่วงการคายสารดูดซับ และจ่ายให้กับส่วนทำระเหยในช่วงการดูดซับ

ระบบ MCES ประกอบด้วยหลายโมดูลที่มีลักษณะเหมือนกัน ได้รับการออกแบบให้รับความร้อนจากอากาศร้อนสำหรับการทำระเหย (อาศัยข้อมูลการออกแบบจากผลการทดสอบชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 4.3) และรับความร้อนของของเหลวร้อนสำหรับการคายสารดูดซับที่ปฏิกรณ์ (อาศัยข้อมูลจากผลการทดสอบระบบ MCES 1 และ MCES 2 ในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ)

กำหนดมวลและปริมาตรของทุกโมดูลเท่ากัน คุณสมบัติเชิงความร้อนและเคมีเหมือนกันทุกโมดูล อุณหภูมิการคายสารดูดซับ (Desorption) ประมาณ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิการดูดซับ (Adsorption) ประมาณ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้สามารถจ่ายพลังงานความร้อนกลับเข้าสู่ระบบของโรงงาน (Discharge) ได้ที่อุณหภูมิประมาณ $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสามารถนำไปใช้กับกระบวนการบางประเภท อาทิ การอุ่น การล้าง การนึ่ง ที่จำเป็นในระบบอุตสาหกรรมที่ต้องการอุณหภูมิระดับปานกลางนี้

ผลการคำนวณเบื้องต้นในการประยุกต์ใช้ระบบ MCES แบบที่ 1 และ 2 ในการเก็บรักษาพลังงาน โดยมีเวลาของวัฏจักร (Cycle time) อยู่ระหว่าง 30 – 120 นาที พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอุตสาหกรรมนี้จาก 40% เป็น 63.4% - 77.4% โดยข้อมูลจำเป็นสำหรับการนำไปใช้ในระบบอุตสาหกรรม อาทิ จำนวนโมดูลที่จำเป็นต้องใช้เพื่อการเก็บรักษาพลังงานตามเงื่อนไขข้างต้น ค่าพลังงานที่จะได้จากการเก็บรักษาของระบบ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ ค่าความจุพลังงานจำเพาะที่ระบุโดย SHP และ VHP แสดงดังตารางที่ 4.7 โดยกำหนดให้

- 1) MCES 1 (มวล 750 g, ปริมาตร 600 cm^3) มีค่า COP_h อยู่ระหว่าง 1.0 – 3.47
- 2) MCES 2 (มวล 333 g, ปริมาตร 190 cm^3) มีค่า COP_h ประมาณ 1.50

สรุปได้ว่าระบบ MCES จะช่วยในการเก็บรักษาพลังงานความร้อนทิ้งเปลาที่โดยปกติไม่สามารถเก็บรักษาไว้ได้ในช่วงเวลาที่มีการปล่อยความร้อนทิ้งเปลา่นั้น ระบบ MCES ช่วยให้การสะสมพลังงานไว้ได้ในสภาพของพลังงานเคมีในปฏิกิริยาของระบบดูดซับทางเคมี ซึ่งพลังงานจะถูกปล่อยออกมาใช้ในระยะเวลาอื่นที่ระดับอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม โดยการกระตุ้นจากแหล่งพลังงานสูงในปริมาณไม่มาก ระบบ MCES ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งน้อย เนื่องจากระบบนี้มี SHP และ VHP ค่อนข้างสูง ซึ่งจำนวนโมดูลสูงสุดที่ต้องการหากประยุกต์ใช้กับระบบอุตสาหกรรมขนาดกลาง (พลังงานเข้าสู่ระบบประมาณ 12,000 MJ/day) สำหรับ MCES 1 คือ 74 โมดูล และสำหรับ MCES 2 เพียง 62 โมดูลเท่านั้น

หากต้องการใช้พลังงานความร้อนจึงปล่อย (Discharge) ไปยังระบบอื่นในช่วงเวลาเดียวกันหรือช่วงเวลาอื่นตามต้องการ ซึ่งผลการคำนวณแสดงว่าประสิทธิภาพของระบบโรงงานอุตสาหกรรมโดยรวมจะเพิ่มขึ้นประมาณ 23.4% - 37.4%

ตารางที่ 4.7: ผลการประยุกต์ระบบ MCES เพื่อเก็บรักษาพลังงานในกรณีศึกษา
ระบบโรงงานอุตสาหกรรม

Description	Unit	System performance						
Energy input to plant	MJ/day	2,000	2,000	2,000	2,000	4,000	8,000	12,000
Useful energy	MJ/day	1,200	1,200	1,200	1,200	2,400	4,800	6,600
Operation time	hr/day	24	24	24	24	24	12	24
System efficiency	%	40	40	40	40	40	40	45
Energy loss	MJ/day	800	800	800	800	1,600	3,200	5,400
Energy input to MCES								
High Temperature source	°C	120	120	120	120	120	120	120
Percent of loss to waste heat	%	50	50	50	50	50	50	50
Waste heat rate	MJ/hr	17	17	17	17	33	133	113
Storage time required	hr/day	6	6	6	6	6	6	6
Charged energy	kW	4.6	4.6	4.6	4.6	9.3	37.0	31.3

ตารางที่ 4.7: ผลการประยุกต์ระบบ MCES เพื่อเก็บรักษาพลังงานในกรณีศึกษา
ระบบโรงงานอุตสาหกรรม (ต่อ)

Description	Unit	System performance						
MCES specification								
No. of module	(-)	9	4	5	5	19	74	62
Total Volume	cm ³	1,759	2,226	3,162	2,883	3,518	14,072	11,873
Total Mass	kg	3.08	9.47	3.00	16.95	6.16	24.65	20.80
Volume per module	cm ³	190	600	600	600	190	190	190
Mass per module	g	333	750	750	750	333	333	333
Evaporation temperature	°C	50	50	50	50	50	50	50
Adsorption temperature	°C	70	70	70	70	70	70	70
Desorption temperature	°C	90	90	90	90	90	90	90
Desorption energy	kJ/cycle	33,333	16,667	8,333	16,667	66,667	266,667	225,000
COP _h	(-)	1.5	1.67	1.0	3.47	1.5	1.5	1.5
SHP	W/kg	2,254	816	1,544	948	2,254	2,254	2,254
VHP	kWh/m ³	7,896	3,473	732	5,573	7,896	7,896	7,896
No. of cycle	(-)	3	6	12	6	3	3	3
Cycle time	min	120	60	30	60	120	120	120
Energy storage capacity								
Discharged energy	kJ/cycle	50,000	27,833	8,333	57,833	100,000	400,000	337,500
Discharged Temperature	°C	65	65	65	65	65	65	65
Improved overall efficiency	%	67.5	68.4	65.0	77.4	67.5	75.0	63.4

บทที่ 5

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

5.1. แนวคิด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้เพื่อทำนายพฤติกรรมของระบบดูดซับทางเคมีที่เกิดขึ้นตลอดช่วงการทดสอบ โดยการแก้ปัญหาแบบจำลองอาศัยเทคนิคกรรมวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) แบบ Finite Difference

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นอาศัยสมการพื้นฐาน คือ สมการสมดุลพลังงาน สมดุลมวลสาร และสภาวะสมดุลระบบดูดซับทางเคมี (จลนศาสตร์) สามารถใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและพลังงานของระบบตลอดช่วงการทดสอบ และยังแสดงถึงสัดส่วนการดูดซับไอน้ำของสารโซเดียมซัลไฟด์ (Degree of Advancement) ทำให้สามารถนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงและการกระจายของอุณหภูมิปฏิกรณ์ และการเปลี่ยนแปลงพลังงานตลอดช่วงการทดสอบระบบเก็บสะสมพลังงานทางเคมีได้

แบบจำลองจะได้รับการทดสอบความถูกต้องแม่นยำกับข้อมูลที่บันทึกได้จากการทดสอบจริง ได้แก่ ความดันของระบบ, อุณหภูมิ, ปริมาณไอน้ำที่ถูกดูดซับและปล่อย, ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์, ปริมาณสารผสม, อัตราการไหลของน้ำมันถ่ายโอนความร้อน ซึ่งหากแบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมระบบได้แม่นยำในสภาวะการทดสอบจริงได้ ก็จะสามารถนำไปทำนายสมรรถนะระบบในสภาวะอื่นที่มีได้ทดสอบจริงและมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุมได้ต่อไป

5.2. สมมติฐาน

สมมติฐานจำเป็นสำหรับการทำให้การแก้สมการที่ซับซ้อนงายยิ่งขึ้น ทำให้สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบระบบเก็บสะสมพลังงานทางเคมีได้ สมมติฐานที่ใช้ ได้แก่

- (1) คุณสมบัติทางฟิสิกส์ ความร้อนและเคมี ของสารดูดซับเกลือโซเดียมซัลไฟด์ (Adsorbent) สารผสม (Binder) สารเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ (Additive) และสารทำงานน้ำ มีความสม่ำเสมอและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา
- (2) สารทำงานน้ำในสถานะไอน้ำมีคุณสมบัติเป็นก๊าซอุดมคติ
- (3) การถ่ายโอนความร้อนในปฏิกรณ์ เกิดขึ้นใน 1 มิติ
- (4) ขั้นตอนการคายสารดูดซับ กำหนดให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนมีค่าคงที่ตลอดช่วงการทดสอบ
- (5) การระเหยของสารทำงานน้ำในเครื่องดูดซับและการควบแน่นของสารทำงานน้ำในเครื่องควบแน่นเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์
- (6) ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเครื่องระเหยเกิดการดูดซับทั้งหมด

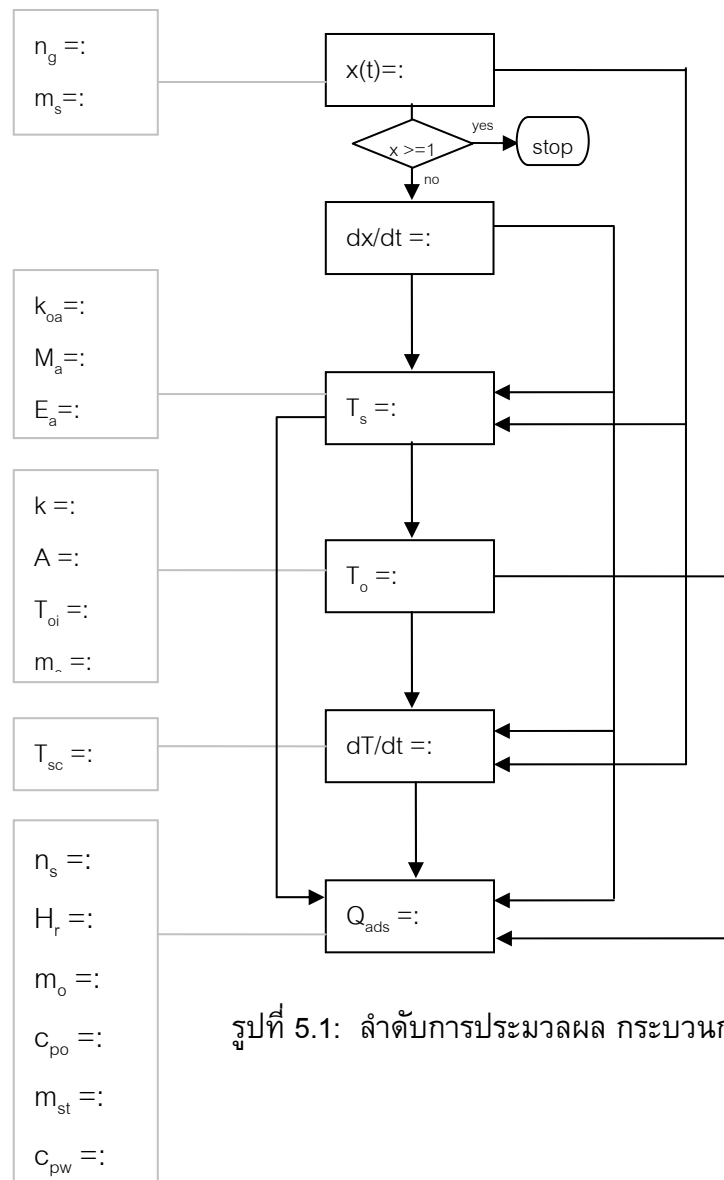
- (7) ไอน้ำที่คายออกจากปฏิกิริยาควบแน่นทั้งหมดในเครื่องควบแน่น
- (8) การดูดซับเริ่มต้นจากไม่มีโมเลกุลสารดูดซับไม่ปฏิกิริยาเลย
- (9) การคายสารดูดซับสิ้นสุดเมื่อไม่เหลือโมเลกุลของสารดูดซับอยู่ในปฏิกิริยา
- (10) ไอน้ำที่ถูกดูดซับที่ช่วงเวลาต่าง ๆ กันมีค่าเท่ากัน
- (11) ความดันก๊าซที่ผ่านตลอดชั้นสารดูดซับมีลักษณะเดียวกัน
- (12) ความจุความร้อนและการนำความร้อนของสารดูดซับไม่เป็นฟังก์ชันกับปริมาณสารผลิตภัณฑ์
- (13) ไม่มีการถ่ายโอนความร้อนจากการพา เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซต่ำมาก
- (14) ผิวนอกของอ่างน้ำมันไม่มีการถ่ายโอนความร้อน เนื่องจากมีฉนวนหุ้มโดยรอบ
- (15) ไม่มีแรงเสียดทานเกิดขึ้นเมื่อไอและของเหลวของสารทำงานน้ำไหลระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ
- (16) สารถ่ายโอนความร้อนมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ขั้นตอนการประมวลผลโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงดังแผนผังในรูปที่ 5.1 โดยสังเขปคือ

- (1) กำหนดค่าเริ่มต้นของปริมาณการดูดซับของสารทำงานน้ำในแท่นปฏิริยาในปฏิกิริยา หรือ Degree of Advancement (x) ซึ่งค่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ($x(t)$) เมื่อเกิดกระบวนการดูดซับและคายสารดูดซับภายในปฏิกิริยา ซึ่งค่า x จะมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่า 1 หมายถึงกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์
- (2) ตรวจสอบว่าหาก $x > 1$ โปรแกรมจะหยุดทำงาน เนื่องจากกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์แล้ว
- (3) หาก x น้อยกว่า 1 แสดงว่ายังเกิดกระบวนการดูดซับอยู่และค่า x มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จากสมการในรูปดิฟเฟอเรนเชียล
- (4) คำนวณอุณหภูมิของแท่นปฏิริยา โดยมีการอ่านค่าคงที่ของแท่นสารปฏิริยาและปฏิกิริยา และจำเป็นต้องรับค่า x ที่เวลาใดใด และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า x (dx/dt) ด้วย
- (5) คำนวณอุณหภูมิของสารถ่ายโอนความร้อน โดยอ่านค่าคงที่ของสารถ่ายโอนความร้อนและปฏิกิริยา
- (6) คำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาจากสมการดิฟเฟอเรนเชียล และจำเป็นต้องรับค่า x ที่เวลาใดใด และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า x (dx/dt) ด้วย
- (7) คำนวณหาค่าความร้อนที่ได้จากการดูดซับ โดยป้อนค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ และค่าคงที่ของปฏิกิริยาและคุณสมบัติของสารทำงานน้ำและแท่นปฏิริยา ตลอดจนค่าคงที่ของสารถ่ายโอนความร้อน ซึ่งจำเป็นต้องรับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลง Degree of advancement (dx/dt) อุณหภูมิของปฏิกิริยา และอุณหภูมิของสารถ่ายโอนความร้อน

รูปที่ 5.1 แสดงลำดับการประมวลผลของกระบวนการดูดซับสาร ขั้นตอนการแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการโปรแกรมลงในคอมพิวเตอร์ มีดังนี้

- (1) จัดรูปของสมการกำหนดให้ตัวแปรที่ต้องการทราบค่าอยู่ทางซ้ายมือของสมการเสมอ
- (2) เขียน Source Code ของแบบจำลองเป็นตัวแปร ค่าคงที่ พารามิเตอร์แบบ Finite difference
- (3) กำหนดตัวแปรต้นและตัวแปรตามในโปรแกรม
- (4) ป้อนค่าคงที่ต่าง ๆ ลงในโปรแกรม
- (5) โปรแกรมโมเดลทั้งหมดลงในซอฟต์แวร์
- (6) ประมวลผลโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาค่าสัดส่วนของสารทำงานต่อสารดูดซับ
- (7) กำหนดขั้นตอนการประมวลผลตาม Algorithm ที่ออกแบบไว้
- (8) คำนวณค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับสาร
- (9) คำนวณ loop ตั้งแต่เวลา 0 นาที จนกระทั่งครบ 60 นาที จึงเสร็จสิ้นการประมวลผลของกระบวนการดูดซับ
- (10) จากนั้นจึงประมวลผลของกระบวนการคายสารและการหล่อเย็นระบบ



รูปที่ 5.1: ลำดับการประมวลผล กระบวนการดูดซับสาร

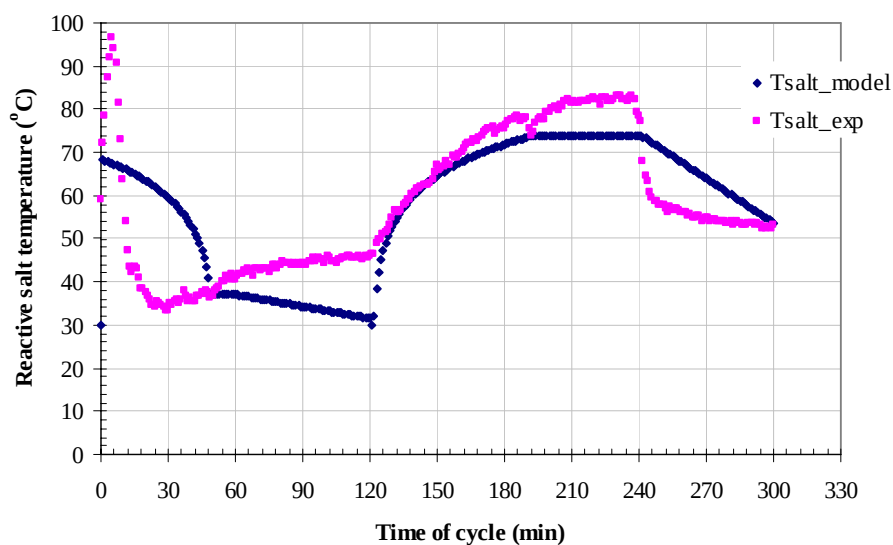
5.3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารดูดซับระหว่างผลจากการทดสอบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เปรียบเทียบกันดังรูปที่ 5.2 พบความแตกต่างกันในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาดูดซับสาร ซึ่งผลอุณหภูมิจากการทดลองของสารดูดซับต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากแบบจำลอง เกิดจากความเปื่อยเบนจากทฤษฎีในการทำปฏิกิริยาระหว่างคู่สารทำงาน ซึ่งบางครั้งหากสภาวะการทำงานไม่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาเคมี ทำให้ปฏิกิริยาไม่เกิดขึ้นในบางส่วนของสารดูดซับหรือเกิดขึ้นช้าลง และในช่วงหล่อเย็นอุณหภูมิสารถ่ายโอนความร้อนเริ่มต้นมีอุณหภูมิสูงเกินไป (40°C) ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิของปฏิกิริยา ทำให้อุณหภูมิของสารดูดซับจากการทดลองลดลงได้น้อย และควรทำการปรับปรุงการออกแบบระบบดึงความร้อนจากปฏิกิริยาในช่วงการดูดซับ

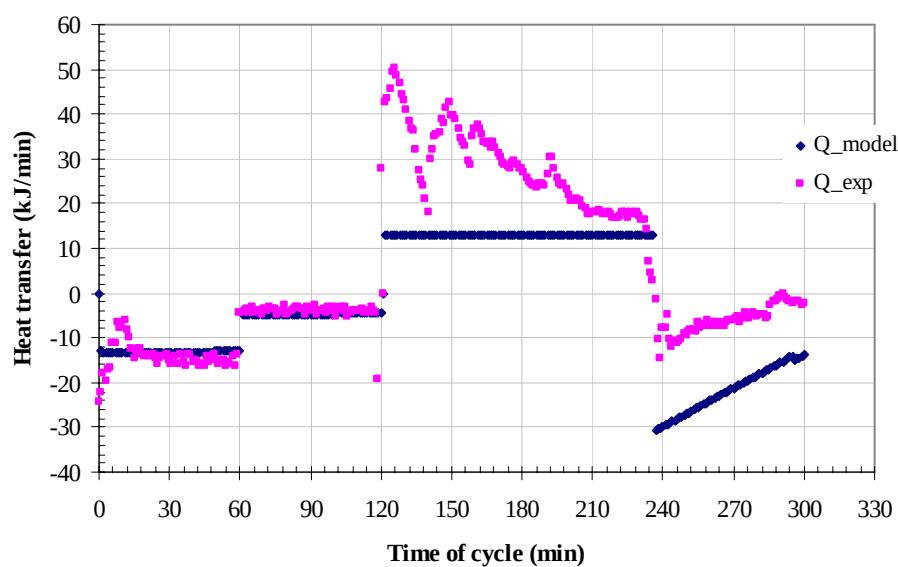
5.4. การเปลี่ยนแปลงพลังงาน

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบเก็บสะสมพลังงานทางเคมีระหว่างผลจากการทดสอบและจากการแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงดังรูป 5.3 พบว่าลักษณะของการเปลี่ยนแปลงพลังงานระหว่างการทดสอบและแบบจำลองมีความคล้ายคลึงกัน

ผลจากการทดสอบในช่วงคายสารอุณหภูมิไม่คงที่ เนื่องจากความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า และอุณหภูมิของปฏิกิริยาไม่สม่ำเสมอ ทำให้อุปกรณ์ตัดไฟทำงานไม่คงที่ และพลังงานที่ได้จึงไม่สม่ำเสมอ เมื่อสารทำปฏิกิริยาเคมีจะมีความร้อนถูกปล่อยออกมา ในขณะที่ดึงความร้อนออกด้วยสารถ่ายโอนความร้อนอย่างต่อเนื่อง และความร้อนที่จ่ายให้กับปฏิกิริยาเพื่อไล่สารทำงานออก ต้องใช้พลังงานปริมาณมาก ผลการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิและพลังงานระหว่างการทดสอบกับแบบจำลอง สามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.4



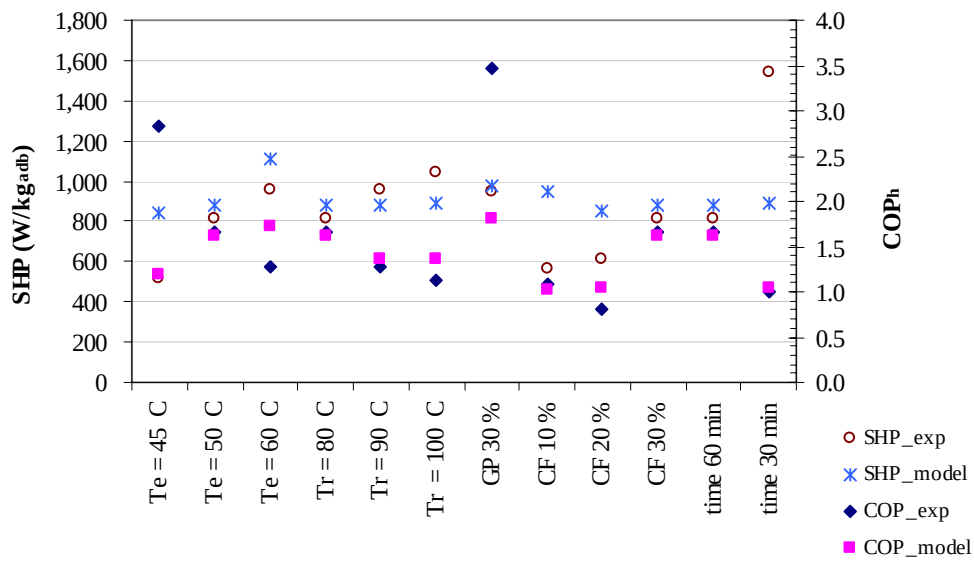
รูปที่ 5.2: การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารดูดซับจากการทดสอบเปรียบเทียบกับแบบจำลอง



รูปที่ 5.3: การเปลี่ยนแปลงพลังงานจากการทดสอบเปรียบเทียบกับแบบจำลอง

ตารางที่ 5.1: เปรียบเทียบ ค่า COP_h และ SHP จากการทดสอบและแบบจำลอง

การทดสอบ		ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP_h)		ค่าการเก็บพลังงานจำเพาะ (W/kg_{adb})	
		การทดลอง	แบบจำลอง	การทดลอง	แบบจำลอง
1	Te = 45 °C	2.83	1.183	518	839.64
	Te = 50 °C	1.67	1.617	816	883.37
	Te = 60 °C	1.27	1.734	958	1,109.53
2	Tr = 80 °C	1.67	1.617	816	883.37
	Tr = 90 °C	1.27	1.362	957	884.48
	Tr = 100 °C	1.12	1.358	1,041	886.83
3	GP 30 %	3.47	1.809	948	972.00
	CF 10 %	1.09	1.015	561	943.13
	CF 20 %	0.81	1.038	615	848.39
	CF 30 %	1.67	1.617	816	883.37
4	t _{cycle} 60 min	1.67	1.617	816	883.37
	t _{cycle} 30 min	1.00	1.042	1,544	892.625



รูปที่ 5.4: การเปรียบเทียบ COP และ SHP จากการทดสอบและแบบจำลอง

จากตารางที่ 5.1 และ รูปที่ 5.4 พบว่าค่าของ COP ของระบบระหว่างจากผลการทดสอบจริงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มมีค่าใกล้เคียงกันส่วนใหญ่ COP มีค่าระหว่าง 1.0-1.8 และร้อยละแตกต่างกันอยู่ในช่วง $\pm 20\%$ และค่าการเก็บพลังงานจำเพาะ มีค่าอยู่ในช่วง 800 – 1,000 W/kg_{adb} เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณจากงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่น สรุปได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2: สรุปเปรียบเทียบค่า COP และ ค่าการเก็บพลังงานของงานวิจัยต่าง ๆ

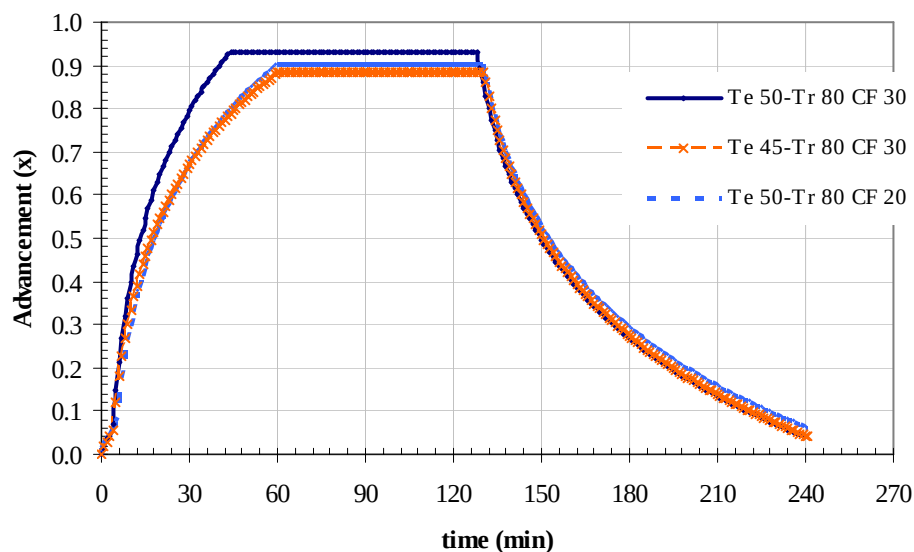
งานวิจัย	ระบบ	คู่สารทำงาน	COP (-)	SHP (kW/kg)	VHP (kWh/m ³)
Bach, 2002	ความเย็น	Na ₂ S-H ₂ O	-	0.6	-
Huang, 2004	ความร้อน	SrCl ₂ -NH ₃	-	-	-
Telto-Critop, 2004	ความเย็น	C-NH ₃	0.5	1.4	-
Wongsuwan, 2004	ความร้อน	ZnCl ₂ (6/4).NH ₃	2.04-2.51	94.6	-
Wongsuwan, 2004	ความร้อน	Na ₂ S-H ₂ O	1.334	-	2,714
ระบบ MCES 1	ความร้อน	Na ₂ S-H ₂ O	1.67	0.816	3,472

5.5. การเปลี่ยนแปลง Degree of Advancement, (x)

สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหรือสัดส่วนของไอน้ำที่สารโซเดียมซัลไฟด์ดูดซับไว้ได้แสดงในรูปที่ 5.5 พบว่าในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมี จะมีสัดส่วนเริ่มต้นของไอน้ำอยู่น้อยมาก (เป็นไอน้ำที่ค้างอยู่ในโมเลกุลของเกลือ) จะกำหนดเป็นศูนย์ เมื่อเริ่มปล่อยไอน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาในปฏิกิริยา ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะเกิดอย่างรวดเร็วสังเกตจากกราฟมีความชันมาก แสดงให้เห็นว่าอัตราเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจากนั้นจะเริ่มคงที่ และในขั้นตอนการคายสารในระยะเริ่มต้นไอน้ำจะหลุดออกจากสารดูดซับได้ง่ายกว่า ทำให้กราฟของ Degree of Advancement ลดลงอย่างมาก และความชันของกราฟก็จะลดลงตามปริมาณของไอน้ำที่ปล่อยได้

พิจารณาอุณหภูมิของเครื่องทำระเหย พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วเมื่อเครื่องทำระเหยมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของกฎอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยที่อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา

พิจารณาปริมาณสารผสม พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามีส่วนสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีเช่นเดียวกัน เมื่อปริมาณของสารผสมเพิ่มขึ้น ทำให้ Degree of Advancement มีค่ามากขึ้น ทำให้พลังงานจากการระบายความร้อนเพิ่มมากขึ้นด้วย



รูปที่ 5.5: การเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนคู่สารทำงาน (Degree of Advancement) ที่เกิดขึ้น

5.6. การวิเคราะห์ความไวของตัวแปร

เพื่อจัดลำดับการวิเคราะห์ ปัจจัยหรือตัวแปรที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่ตัวแปรอื่นๆ มีค่าคงที่ ผลกระทบต่อการทำงานของระบบดูดซับ ตัวแปรที่พิจารณาคือ อุณหภูมิของเครื่องทำระเหย อุณหภูมิของสารถ่ายโอนความร้อน ชนิดและอัตราส่วนสารผสม และระยะเวลาการ

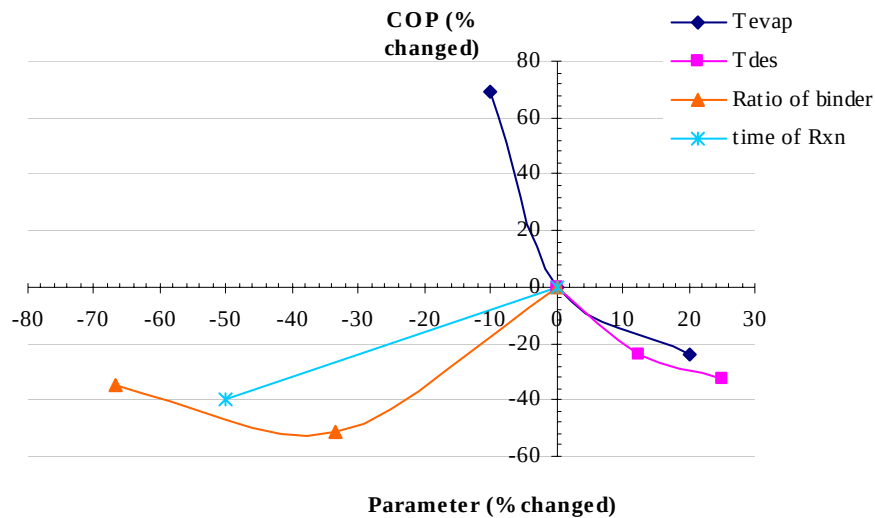
เกิดปฏิกิริยาภายในปฏิกรณ์ เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรทั้ง 4 ต่อสมรรถนะของระบบ และค่าการเก็บพลังงานจำเพาะ จึงได้ทำการวิเคราะห์ความไวของตัวแปร (Sensitivity Analysis) ซึ่งจะเห็นค่าการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงของ COP และ SHP ของระบบ เมื่อตัวแปรดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป แสดงดังรูปที่ 5.6 และ 5.7

ปัจจัยที่มีความสำคัญมากต่อการปรับปรุงสมรรถนะของระบบได้แก่ ชนิดของสารผสม ซึ่งเป็นการยืนยันผลงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง และสำหรับชุดสำเร็จนี้ว่าแกรไฟต์เป็นสารผสมที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามก็ดีเพื่ออายุการใช้งานและความสม่ำเสมอของเนื้อสารที่บรรจุลงในปฏิกรณ์ ควรเน้นการพัฒนาเทคนิคการผสมสารผสมกับเกลือโซเดียมซัลไฟด์ และกรรมวิธีการบรรจุสารผสมลงในปฏิกรณ์ต่อไป

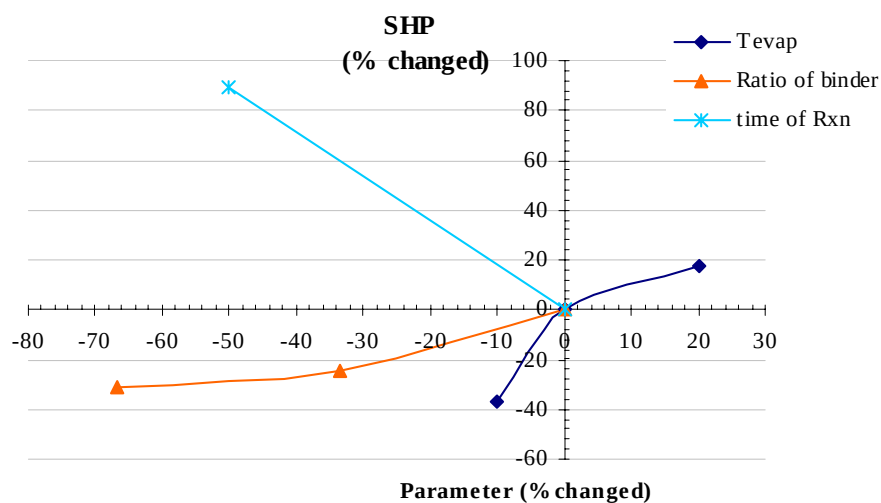
จากรูปที่ 5.6 พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลลำดับต่อมาได้แก่ อุณหภูมิเครื่องทำระเหย ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนอุณหภูมิปานกลาง ($50-60^{\circ}\text{C}$) ที่สามารถป้อนจากแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำ (Low Grade Heat) ได้ ซึ่งหากสามารถทำให้ระบบทำงานที่ความดันสุญญากาศต่ำกว่านี้ อุณหภูมิทำระเหยสามารถลดลงได้ต่ำ ทำให้ได้มาซึ่ง Temperature Upgrading ที่สูงขึ้น

ถัดมาเป็นอุณหภูมิช่วง Desorption หากอุณหภูมิไล่สารสูงเกินความจำเป็น จะเป็นการใช้พลังงานอย่างไม่คุ้มค่าและเปล่าประโยชน์ ดังนั้นระดับอุณหภูมิเพียง $80-90^{\circ}\text{C}$ ก็เพียงพอแล้ว ในการคัดเลือกแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง จึงต้องพิจารณาการจับคู่ที่มีความเหมาะสม (Matching) ด้วย อัตราส่วนผสมของสารผสม และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ซึ่งสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ต้องการให้ระบบจ่ายพลังงาน อัตราการจ่ายความร้อน (kW) หรือค่าความร้อนสะสมที่ได้ (kJ) ต้องเหมาะสมระหว่างสมรรถนะของระบบสะสมพลังงานกับความต้องการของโหลด

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการเก็บพลังงานจำเพาะมากที่สุดคือ ชนิดของสารผสม และจากรูปที่ 5.7 ตัวแปรที่มีอิทธิพลลำดับต่อมาได้แก่ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิเครื่องทำระเหย และอัตราส่วนผสมของสารผสม ตามลำดับ



รูปที่ 5.6: ผลวิเคราะห์ร้อยละที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเครื่องทำความเย็น
อุณหภูมิช่วง Desorption สัดส่วนสารผสม และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา
ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะของระบบ (COP)



รูปที่ 5.7: ผลวิเคราะห์ร้อยละที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเครื่องทำความเย็น
อุณหภูมิช่วง Desorption สัดส่วนสารผสม และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา
ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าการเก็บพลังงานจำเพาะ (SHP)

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยการพัฒนาต้นแบบระบบดูดซับทางเคมี เพื่อการเก็บรักษาพลังงานความร้อน โดยการออกแบบ สร้าง ติดตั้ง และทดสอบระบบ Modular Chemical Energy Storage (MCES) ในระดับห้องปฏิบัติการ จำนวน 2 รูปแบบ ได้แก่ MCES 1 และ MCES 2 ตลอดจนการออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อจ่ายความร้อนกับส่วนทำระเหยของระบบดูดซับ และการทำซิมูชันในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ประกอบด้วย สมการสมดุลมวล พลังงาน และจลนศาสตร์ ในการทำนายพฤติกรรมและสมรรถนะของระบบดูดซับทางเคมี สรุปได้ดังนี้

6.1.1 ระบบ MCES 1

ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบเคมีแบบแรก ใช้สารดูดซับเกลือโซเดียมซัลไฟด์และน้ำเป็นคู่สารทำงาน ออกแบบโดยเปลี่ยนการจัดเรียงปฏิกรณ์ เครื่องควบแน่น และเครื่องทำระเหย ให้อยู่ในแนวตั้งตามลำดับ ซึ่งปกติอุปกรณ์หลักทั้งสามมักจะได้รับการออกแบบให้วางตัวในแนวต่างกัน การจัดตัวในแนวเดียวกันนี้จะให้ระบบมีลักษณะคล้ายหน่วยอุปกรณ์หรือโมดูลยิ่งขึ้น และง่ายต่อการขยายกำลังการผลิตให้มากขึ้น

ตัวแปรที่ทดสอบ ได้แก่ อุณหภูมิส่วนทำระเหยช่วงกระบวนการดูดซับ อุณหภูมิน้ำมันถ่ายโอนความร้อนช่วงการคายสารดูดซับ ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาหรือเวลาของวัฏจักรทำงาน และผลการปรับปรุงสภาพการดูดซับทางเคมีในปฏิกรณ์ โดยการผสมสารตั้งต้นเกลือโซเดียมซัลไฟด์กับตัวประสาน (Binder) จากกราไฟต์และเส้นใยคาร์บอน (Carbon fibre) โดยรวมพบว่า สมรรถนะและค่าการสะสมพลังงานจำเพาะดีขึ้น สรุปได้ 4 ประเด็น ดังนี้

1) อุณหภูมิและพลังงาน

- การเกิดปฏิกิริยาดูดซับสาร (Adsorption)

- (1) อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา หากเพิ่มอุณหภูมิของสารดูดซับช่วงการเกิดปฏิกิริยาดูดซับ (Adsorption) ให้สูงขึ้น ในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดูดซับไปข้างหน้า ความร้อนหรือพลังงานที่จะนำไปใช้งาน (Discharged energy) จะมีมากขึ้น
- (2) หากอุณหภูมิของไอสารทำงานน้ำสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ผลผลิตจากการทำปฏิกิริยามีมากขึ้นหรือความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

- การเกิดปฏิกิริยาคายสารดูดซับ (Desorption)
 - (1) การเพิ่มอุณหภูมิแหล่งความร้อนจากภายนอกหรือแหล่งความร้อนทิ้งเปล่าที่จ่ายให้กับระบบ สารทำงานจะถูกแยกออกได้เร็วขึ้นและมากขึ้น ประมาณ 30% - 40% โดยมวล
 - (2) เมื่อให้อุณหภูมิของน้ำมันถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้น พลังงานที่ต้องการจ่ายให้กับระบบสูงขึ้น และค่า COP_h จะลดลงได้
 - (3) เพื่อการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าควรใช้อุณหภูมิแหล่งความร้อนในระดับที่เพียงพอต่อการแยกสารทำงานออกเท่านั้น โดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเสริม

2) สารผสม

การเกิดปฏิกิริยาดูดซับจะเกิดขึ้นที่ผิวของของแข็งคือที่ผิวของสารดูดซับ หากมีพื้นที่ผิวมากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็ว ดังนั้นต้องทำให้อนุภาคเกลือโซเดียมซัลไฟด์มีการกระจายมากขึ้น โดยการผสมกับสารผสม (Binder) ซึ่งสารผสม 2 ชนิด ที่ได้รับการทดสอบผสมกับสารดูดซับเกลือโซเดียมซัลไฟด์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติสภาพการดูดซับ ได้แก่ กราไฟต์ (Graphite) ในสัดส่วน 30% โดยมวล และเส้นใยคาร์บอน (Carbon fibre) ในสัดส่วน 10%, 20% และ 30% โดยมวล สรุปได้ว่า

กราไฟต์

- การผสมกราไฟต์ช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น โดยช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา และเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น
- การผสมกราไฟต์ทำให้การไล่สารทำงานออกต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้น จึงจะทำให้สารทำงานหลุดออกจากสารดูดซับ
- อัตราส่วนที่เหมาะสมของสัดส่วนผสมกราไฟต์ คือ 30 % และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาประมาณ 60 นาที

เส้นใยคาร์บอน

- การผสมเส้นใยคาร์บอนทำให้การไล่สารทำงานไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงนัก และมีความสามารถในการทำซ้ำได้ดีกว่าโดยไม่เสื่อมสภาพ
- เส้นใยคาร์บอนไม่น้อยกว่า 30 % ให้ค่าสมรรถนะของระบบ และค่าการเก็บพลังงานที่สูง
- เส้นใยคาร์บอนมีความพรุนน้อย จึงทำให้พื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยามีไม่มาก

3) ระยะเวลาการปฏิบัติงาน

ระยะเวลาปฏิบัติงาน หรือ เวลาของวัฏจักรการดูดซับทางเคมี (Cycle time) มีผลต่อสารตั้งต้นบางชนิดเท่านั้น สำหรับคู่สารทำงานโซเดียมซัลไฟด์และน้ำ ผลการทดสอบแสดงว่าระยะเวลาของวัฏจักรมีผลไม่ชัดเจน เพราะปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเริ่มต้น จากนั้นจึงลดลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล

4) สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของระบบ

ระบบสามารถทำงานโดยการไหลของสารทำงานน้ำระหว่างปฏิกรณ์ เครื่องควบแน่น และเครื่องทำระเหย โดยอาศัยแรงขับเคลื่อนเนื่องจากความดันแตกต่างระหว่างอุปกรณ์หลักทั้งสาม สภาวะการทำงานกำหนดโดยความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ

- ระบบจึงจะทำงานได้เมื่อความดันของระบบดูดซับประมาณ 2-4 kPa และอุณหภูมิของเครื่องระเหยควรสูงกว่า 50°C ขึ้นไป
- ระดับอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่สูงมีผลอย่างมากต่อสมรรถนะการทำงานของระบบ โดย อุณหภูมิของสารถ่ายโอนความร้อนในช่วงแยกสารทำงานที่เหมาะสม คือ $80-90^{\circ}\text{C}$ หากใช้อุณหภูมิที่สูงกว่านี้จะช่วยลดระยะเวลาในการแยกสารลงได้ แต่อาจทำให้เกลือโซเดียมซัลไฟด์เสื่อมสภาพ และสิ้นเปลืองพลังงานโดยใช้เหตุ

5) การทำนายพฤติกรรมของระบบ

ชุดสมการทางคณิตศาสตร์ใช้เพื่อจำลองระบบดูดซับทางเคมี ซึ่งแบบจำลองที่ใช้เป็นแบบโมเดลพารามิเตอร์รวมของระบบ (Lumped Parameter Model) เพื่อทำนายพฤติกรรมของระบบโดยการแก้ปัญหาแบบจำลองด้วยการเขียนสมการสมดุลพลังงานมวล และจลนศาสตร์ ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และใช้กรรมวิธีเชิงตัวเลข Finite Difference ในการแก้ปัญหา จากนั้นแปรผันตัวแปรต้นที่มีผลกระทบกับระบบ และคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงตัวแปรตามกับเวลา ได้แก่ อุณหภูมิ พลังงาน และ Degree of Advancement ตลอดจนค่าดัชนีวัดสมรรถนะของระบบ ได้แก่ Coefficient of Performance of Heating (COP_h), Specific Heating Power (SHP) และ Volumetric Heat Production (VHP) ของระบบ

- ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดสอบจริง พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและพลังงานของระบบตามเวลา มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยมีค่า R-square มากกว่า 0.9
- ผลการเปรียบเทียบค่า COP_h และ SHP พบว่าค่าจากการคำนวณและการทดสอบแตกต่างกันในช่วงที่ยอมรับค่าได้

- สรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ Lumped Parameter Model โดยมีสมมติฐานว่ามีการถ่ายโอนความร้อนและมวลใน 1 มิติ สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมของระบบได้ดีในระดับหนึ่ง
- ผลจากการทำ Sensitivity Analysis พบว่าปัจจัยที่มีความสำคัญมากต่อการปรับปรุงสมรรถนะของระบบ คือ ชนิดของสารผสม โดยกราฟไฟต์เป็นสารผสมที่เหมาะสมยิ่ง ตัวแปรที่มีอิทธิพลลำดับต่อมาได้แก่ อุณหภูมิเครื่องทำระเหย ซึ่งเป็นแหล่งความร้อน อุณหภูมิปานกลาง (50-60 °C) ที่สามารถป้องกันจากแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำ (Low Grade Heat) ได้
- ค่า COP_h , SHP และ VHP สามารถเทียบเคียงได้กับค่าจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

6.1.2 ระบบ MCES 2

ระบบ MCES 2 ได้รับการปรับปรุงการออกแบบจากแบบ MCES 1 เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยคงแนวคิดการออกแบบในลักษณะเดียวกัน คือระบบ MCES 2 ประกอบด้วย ปฏิกรณ์ (Reactor) ที่ต่อเชื่อมในแนวตั้งกับเครื่องควบแน่น ซึ่งควบรวมกับเครื่องทำระเหย (Condensor/Evaporator: CD/EV) ในลักษณะเป็นชุดเดี่ยวหรือโมดูลเพื่อความสะดวกต่อการออกแบบ จัดวางและติดตั้ง และความสะดวกต่อการขยายกำลังการผลิตพลังงานมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ระบบนี้ยังมีการปรับปรุงส่วนผสมของแท่นปฏิกิริยาในปฏิกรณ์ การปรับปรุงสารดูดซับให้มีเสถียรภาพที่ดี ใช้งานง่ายและสะดวกมากขึ้น โดยทดสอบหลากหลายสารผสมและส่วนผสม จนกระทั่งพบว่าส่วนผสมที่ดีที่สุดที่ทำให้สารผสมปฏิกรณ์ (Reactive mixture) สามารถคงรูปอยู่ได้ดีที่สุด ประกอบด้วย เกลือโซเดียมซัลไฟด์ที่บดละเอียด, สารผสมหรือตัวประสาน (Binder) จากกราฟไฟต์แบบนำความร้อนได้ดี (SGL Conductive Graphite), Binder จากวัสดุอินทรีย์ คือ แป้งมัน (Organic Starch), และสารปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมี (Additive) คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในอัตราส่วนโดยมวล Salt: Graphite: Binder: Additive เป็น 0.22, 0.67, 0.04, 0.07 ตามลำดับ

การเปลี่ยนชนิดของ Binder จากกราฟไฟต์แบบธรรมดา (ของระบบ MCES 1) เป็นกราฟไฟต์แบบนำความร้อน (ของระบบ MCES 2) มีผลให้ค่าการนำความร้อนภายในเนื้อสารของแท่นปฏิกิริยา (k) เพิ่มขึ้นได้ถึง 33.5% นอกจากข้อดีการปรับปรุงสภาพการนำความร้อนแล้ว การผสมกับ Graphite binder ยังมีส่วนช่วยในการบรรเทาการกัดกร่อนของเกลือโซเดียมซัลไฟด์ และช่วยการขึ้นรูปแท่นปฏิกิริยาให้ง่ายขึ้น

ผลการทดสอบระบบ MCES 2 แสดงว่าในช่วงปฏิบัติการคายสารดูดซับระบบมีอัตราการรับความร้อนจากสารถ่ายโอนความร้อนที่ระดับอุณหภูมิประมาณ 90°C ได้ดี และในช่วงปฏิบัติการดูดซับระบบระบายความร้อนจากปฏิกรณ์สู่สารถ่ายโอนความร้อนได้อย่างรวดเร็วกว่าระบบ MCES 1

ผลการประเมินสมรรถนะของระบบ MCES 2 แสดงให้เห็นแม้ว่า COP_h จะไม่ได้สูงไปกว่าค่าของระบบ MCES 1 แต่ค่า SHP และ VHP สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากระบบมีขนาดเล็กกว่า และมีค่าความจุพลังงานสูงกว่าระบบ MCES 1 โดยส่วนเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่นได้มีการควบรวมกัน มีการลดระยะทางระหว่างวาล์วกับปฏิกรณ์ และระหว่างปฏิกรณ์กับเครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่น ตลอดจนปรับปรุงส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนของปฏิกรณ์ให้เหมาะสมกับการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนทิ้งเปล่ายิ่งขึ้น สรุปได้ว่าแนวทางการปรับปรุงการออกแบบระบบดูดซับและการปรับส่วนผสมของแท่นปฏิริยาในระบบ MCES 2 บรรลุผลตามเป้าหมายที่ตั้งไว้

จากการศึกษาผลการประยุกต์ใช้ระบบ MCES ในทางอุตสาหกรรม พบว่าระบบเก็บรักษาพลังงานนี้จะช่วยในการสะสมพลังงานความร้อนทิ้งเปล่าที่ไม่สามารถเก็บไว้ได้ในช่วงเวลาที่ต้องการใช้ โดยเก็บรักษาในรูปของพลังงานเคมีในปฏิกรณ์ของระบบดูดซับทางเคมี ซึ่งต้องการพื้นที่ติดตั้งน้อย ขยายกำลังการสะสมพลังงานได้ง่าย โดยระบบนี้มี SHP และ VHP ก่อนข้างสูง ผลการวิเคราะห์แสดงว่าจำนวนโมดูลสูงสุดที่ต้องการ หากประยุกต์ใช้กับระบบอุตสาหกรรมขนาดกลาง (พลังงานเข้าสู่ระบบ $12,000 \text{ MJ/day}$) คือ 62 โมดูลของ MCES 2 โดยเมื่อต้องการใช้พลังงานความร้อนจึงปล่อย (Discharge) ไปยังระบบอื่นในช่วงเวลาเดียวกันหรือช่วงเวลาอื่นตามต้องการ ซึ่งผลการคำนวณแสดงว่าประสิทธิภาพของระบบโรงงานอุตสาหกรรมโดยรวมจะเพิ่มขึ้นประมาณ 23.4% - 37.4%

6.1.3 ชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับส่วนทำระเหยของระบบดูดซับทางเคมี

ชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อใช้แทนระบบอากาศร้อนที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยในช่วงกระบวนการดูดซับทางเคมีเพื่อการเก็บรักษาพลังงาน ได้รับการจัดสร้างและทดสอบโดยใช้ท่อความร้อนแบบมีครีบทวนเครื่องดูดซับทางเคมี (MCES) ตัวแปรที่พิจารณา ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ และพลังงานความร้อนที่จ่ายให้กับระบบ สรุปได้ว่า

- (1) อัตราการไหล: การเพิ่มอัตราการไหลโดยการปรับความเร็วรอบของพัดลม (Percent voltage regulator, 10% - 60%) ทำให้อุณหภูมิอากาศก่อนผ่านส่วนทำระเหยต่ำลง ระบบจะใช้เวลามากขึ้นในการเข้าสู่สภาวะคงตัว และทำให้อุณหภูมิส่วนทำระเหยเพิ่มสูงขึ้น ระบบจึงดึงความร้อนที่ส่วนทำระเหยได้น้อยลง

- (2) พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ: ใช้แทนแหล่งความร้อนจากความร้อนทิ้งเปล่าจากอุตสาหกรรม หรือพลังงานหมุนเวียน อาทิ ก๊าซชีวภาพ ก๊าซจากการเผาไหม้ขยะหรือชีวมวล และพลังงานรังสีอาทิตย์ ที่สามารถนำมาเก็บรักษาหรือป้อนให้กับระบบ MCES ได้ การปรับพลังความร้อนใช้การเพิ่มจำนวนวัตต์ของเครื่องอุ่นอากาศร้อน (1.0 kW, 1.5 kW, 2.0 kW) พบว่าการเพิ่มพลังความร้อนที่ป้อนให้ระบบ ทำให้ส่วนทำระเหยมีอัตราการดึงความร้อนเพื่อไปเก็บรักษาในระบบได้สูงขึ้น และใช้เวลาน้อยลงในการเข้าสู่สภาวะคงตัว
- (3) อุณหภูมิอากาศก่อนผ่านส่วนทำระเหย: อุณหภูมิอากาศที่เหมาะสมสำหรับชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องสูงกว่า 40°C จะทำให้ระบบใช้เวลาน้อยลงในการเข้าสู่สภาวะคงตัว และดึงความร้อนจากอากาศได้ในอัตราที่เพิ่มขึ้น
- (4) พลังงานความร้อนของระบบที่สภาวะคงตัว: คำนวณจากความร้อนสัมผัสที่คำนวณจากค่าความจุความร้อนจำเพาะ เมื่อป้อนอุณหภูมิในช่วง $34.0 - 71.5^{\circ}\text{C}$ จะได้ค่าพลังงานความร้อนที่สภาวะคงตัว $0.04 - 16.28\text{ kJ}$ และเมื่ออุณหภูมิอากาศที่ให้แก่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับท่อความร้อนจนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจะเพิ่มขึ้น

6.2 แนวทางการทำวิจัยต่อไป

ชุดทดสอบระบบ MCES ที่ออกแบบและดำเนินการทดสอบดังนำเสนอในบทที่ 3 ซึ่งได้แสดงผลวิเคราะห์จากการทดสอบระบบให้ห้องปฏิบัติการในบทที่ 4 และนำเสนอผลการวิเคราะห์ทางด้านทฤษฎีโดยการแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 5 ล้วนเป็นข้อมูลและแนวทางที่มีประโยชน์ในการนำไปพัฒนาชุดทดสอบระบบเก็บสะสมพลังงานทางเคมี ให้มีประสิทธิภาพที่ดี เหมาะสมต่อการเก็บรักษาพลังงานในระบบอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามยังมีข้อเสนอนะแนวทางในการทำวิจัยต่อเนื่อง ดังนี้

- 1) การศึกษาทางด้านวัสดุศาสตร์ของสารผสม อาทิ นาโนโหมาผสมกับเกลือโซเดียมซัลไฟด์ เพราะโหมาีค่าการนำความร้อนที่ดี สามารถรับและถ่ายโอนความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาไปสู่สารถ่ายโอนความร้อนได้เร็วขึ้น นำความร้อนไปใช้ได้มากขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องศึกษาสมบัติของวัสดุที่จะนำมาผสม ต้องพิจารณาผลข้างเคียง เช่น การกัดกร่อน ความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยากับคู่สารทำงานของระบบดูดซับ

- 2) การออกแบบส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องทำระเหย เครื่องควบแน่น และปฏิกรณ์เป็นแบบท่อและครีป ซึ่งจะเพิ่มความเร็วและประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระหว่างการเก็บรักษาพลังงาน (Energy Charge) และการจ่ายพลังงาน (Energy Discharge) ซึ่งระบบ MCES ต้องแลกเปลี่ยนกับแหล่งความร้อนที่เป็นก๊าซร้อนหรือคอนเดนเสทจากแหล่งความร้อนทิ้งเปล่าในอุตสาหกรรม
- 3) การนำเทคโนโลยีระบบแบบสุญญากาศและระบบควบคุมวาล์ว มาใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบดูดซับทางเคมี
- 4) ศึกษารูปแบบการไหลของของไหลร้อนและเย็น ทั้งแบบสถานะเดียวและสองสถานะ (Two-phase) ผ่านกลุ่มท่อโมดูลของระบบเก็บสะสมพลังงานทางเคมี โดยการใช้การแก้ปัญหาแบบจำลองโดยกรรมวิธีเชิงตัวเลขแบบ Computational Fluid Dynamics

เอกสารอ้างอิง

- Abhat, A., Aboul-Enein, S., Malatidis, N., 1981. Heat of fusion storage systems for solar heating application, in: C. Den Quden (Ed.), Thermal Storage of Solar Energy, Martinus Nijhoff.
- Azpiazua, M.N., Morquillas, J.M., and Vazquez, A. 2003. Heat recovery from a thermal energy storage based on the $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaO}$ cycle, Applied Thermal Engineering. 23: 733-741.
- Bach, P.W. and Haije, W.G. 2001. Heat storage and transformation, Paper presented at the ZAE- Symposium 2001, Heat and Cold Storage', Munich.
- Bakenhus, B.H., 2000. Ice storage project, ASHRAE Journal, May, 64-66.
- Bellecci, C., Conti, M., 1993. Transfer behavior analysis of a latent heat storage module, International Journal of Heat and Mass Transfer. 30, 3851-3857.
- Bird, R.B., Stewart, W.E., and Lightfoot E.N. 2002. Transport Phenomena second edition, Chemical Engineering Department University of Wisconsin-Madison, John Wiley & Sons, Inc.
- Cho Soon-haeng and Kim Jong-nam. 1992. Modeling of silica gel/water adsorption cooling system, Energy. 17 (9):829-839.
- Costa, M., Buddhi, D., Oliva, A., 1998. Numerical simulaiton of a latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction, Energy Conversion and Management. 39 (3/4): 319-330.
- De Beijer, H.A., Horsman, J.W.K., 1993. SWEAT Thermochemical heat pump storage system, International Absorption Heat Pump Conference, ASME-AES. 31:457-462.
- de Boer, R., Haije, W.G., and Veldhuis, J.B.J. 2002. Determination of structural, thermodynamic and phase properties in the $\text{Na}_2\text{S-H}_2\text{O}$ system for application in a chemical heat pump, Thermochemica Acta. 395: 3-19.
- Dincer, I, Rosen, M.A., 2002. Thermal energy storage, Systems and Applications, John Wiley & sons, Chichester(England).

Fiskman, R., Adcock, P.W., Devault, R.C., 1996. United States Department of Energy Thermally Activated Heat Pump Program. In: Towards Sustainable Technologies. Proceedings of the 1996 Ab-Sorption Heat Pump Conference, Montreal, Canada, 17-20 September 1996, 109-8.

Fraunhofer ISE, 2003. Market area Ventilation and air-conditioning technology, Concept for a Multi-stage adsorption heat pump, www.ise.fhg.de/english/field1/mb3/index.html. [Download Dec 5, 2003]

Haije, W.G., Veldhuis, B.J., Brandwagt, K., and Dijkstra, J.W. 2002. Solid sorption based heat transformers for application in industrial processes, Accepted for publication in the 'Proceedings of the International Sorption Heat Pump, Conference' Shanghai.

Hoogendoorn, C.J., Bart, G.C.J., 1992. Performance and modelling of latent heat stores, Solar Energy. 48: 53-58.

[http:// www.factegat.com/words08.php](http://www.factegat.com/words08.php) [27 Mar. 2004]

Huang, H.J., Wu, G.B., Yang, J., Dai,Y.C., Yuan, W.K., and Lub, H.B. 2004. Modeling of gas–solid chemisorption in chemical heat pumps, Separation and Purification Technology. 34:191–200.

Iammak, K., Wongsuwan, W., and Kiatsiriroat, T. 2004. Investigation of modular chemical energy storage performance, the Joint International Conference on Sustainable Energy Environment (SEE), Hua Hin, Thailand.

Isamail, K.A.R., Alves, C.L.F., Modesto, M.S., 2001. Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder, Applied Thermal Engineering. 21: 53-77.

Johnson, G.W. 1998. Labview Power Programming, McGraw-Hill, 95-111.

Kato Yukitaka, Yoshizawa Yoshio, 2001. Application of a chemical heat pump to a cogeneration system, International Journal of Energy Research. 25: 129-140.

Khan, M.A., Rohatgi, P.K., 1994. Numerical solution to a moving boundary problem in a composite medium, Numerical Heat Transfer. 25: 209-221.

- Kiatsiriroat, T., Vorayos, N., Nuntaphan, A., 2001. Feasibility of using ice thermal energy storage with direct contact evaporator in an office building, *Asian J. Energy & Environment*. 2(3-4): 199-231.
- Kiatwiriroat, T., Vithayasai, S., Vorayos, N., Nuntaphan, A., and Vorayos, N., 2003. Heat transfer prediction for a direct contact ice thermal energy storage, *Energy Conversion and Management*. 44: 497-508.
- Kowata, H., Sase, S., Ishii, M., Moriyama, H., 2002. Cold water thermal storage with phase change materials using nocturnal radiative cooling for vegetable cooling, *Proceedings of the World Renewable Energy Congress WII*, Cologne (Germany).
- Lane, G.A., 1986. *Solar Heat Storage: Latent heat material*, Vol.II, Technology, CRC Press, Florida.
- Mehling, H., Cabeza, L.F., Hippeli, S., Hiebler, S., 2003. PCM-module to improve hot water heat stores with stratification, *Renewable Energy*. 28: 699-711.
- Mehling, H., Hieler, S., Ziegler, R., 1999. Latent heat storage using a PCM-graphite composite material: advantages and potential applications, *Proceedings of the 4th Workshop of IEA ECES IA Annex 10*, Bendiktbeuern (Germany).
- Mehling, H., Hieler, S., Ziegler, R., 2000. Latent heat storage using a PCM-graphite composite material, *Proceedings of Terrastock 2000-8th International Conference on Thermal Energy Storage*, Stuttgart (Germany), 375-380.
- Morcos, V.H., 1990. Investigation of a latent heat thermal energy storage system, *Solar Wind Technol.*, 7 (2/3): 197-202.
- NYGAS, 1999. Cycle and component development and testing for a GAS Heat Pump/Chiller in a Residential Size, *NYGAS Technology Brief*, Issue 99-653-1, January.
- Phillips B. A., 1999. Advanced on ammonia water heat pumps for residential use, *ISHPC'99*, 37.
- Py, X., Olives, R., Mauran, S., 2001. Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 44: 1141-1151.

Rainer Lang, Manfred Roth, Marc Stricker, 1999. Development of a modular zeolite-water heat pump, ISPC'99 Proceeding of the International Sorption Heat Pump Conference, Munich, Germany, March 24-26, 611-618.

Riffat, S.B., and Shankland, N. 1992. A storage heat pump using an 'Ozone-Friendly' Refrigeration. International Journal of Energy Research. 16: 21-30.

Riffat, S.B., Shankland, N., 1992. A storage heat pump using an 'ozone-friendly' refrigerant, International Journal of Energy Research. 16: 21-30.

Sadasuke, I., Naokatsu, M., 1991. Heat transfer enhancement by fins in latent heat thermal energy storage devices, Solar Eng., ASME, 223-228.

Sakoda, A., and Suzuki, M. 1984. Fundamental study on solar powered adsorption cooling system, Journal of Chemical Engineering of Japan. 17 (1):52-57.

Tamainot-Telto, Z., Critoph, R.E. 2003. Applied advanced solid sorption air conditioning modules using monolithic carbon-ammonia pair, Thermal Engineering. 23: 659-674.

Tamainot-Telto, Z., Critoph, R.E., 2003. Advanced solid sorption air conditioning modules using monolithic carbon-ammonia pair, Applied Thermal Engineering. 23: 659-674.

Tather, M., Erdem-Senatalar, A., 2000. Effect of metal mass on the performance of adsorption heat pumps utilizing zeolite 4A coatings synthesized on heat exchanger tubes., International Journal of Refrigeration. 23(4): 260-268.

Tather, M., Tantekin-Ersolmaz, B., and Erdem-Senatalar, A., 1999. A novel approach to enhance heat and mass transfer in adsorption heat pump using the zeolite-water pair, Microporous and Mesoporous Materials. 27(1): 1-10.

Ter-Gazarian, A. 1984. Energy storage for power system, Peter Peregrinu Ltd, [Online]. http://www.fortunecity.com/meltingpot/kamimura/278/energy_storage.htm.

Tiansuwan, J., Kiatsiririj, T., and Hirunlabh, J., 1997. Mathematical model of an activated carbon-ethanol refrigerator, Thammasat International Journal of Scientific and Technology. 1(3).

Tiansuwan, J., Kiatsiriroj, T., Hirunlabh, J., 1995. Activated carbon-ethanol: An alternative working substance for adsorption cooling system, *Journal of Energy Heat and Mass Transfer*. 17: 65-73.

Tong, X., Khan, J., Amin, M.R., 1996. Enhancement of heat transfer by inserting a metal matrix into a phase change material, *Numerical Heat transfer, Part A*. 30:125-141.

Velraj, R., Seeniraj, R.V., Hafner, B., Faber, C., Schwarzer, K., 1999. Heat transfer enhancement in a latent heat storage system, *Solar Energy*. 65: 171-180.

Verkaik, J. 2003. Deated Krylov-Schwarz Domain Decomposition Methods for the CFD package X-stream. [Online]. http://www.cd-adapco.com/news/releases/STAR-CD_CPI.pdf.

Wongsuwan, W., Kumar, S., Neveu, P., Meunier, F., 2001. A review of chemical heat pump technology and applications, *Applied Thermal Engineering*. 2: 1489-1519.

Wongsuwan, W., Roongpiboonsopit, T., Kiatsiriroat, T., and Chaichana, C. 2004. A performance study on a chemical energy storage system using sodiumsulfide-water as the working pair. 6th IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference, Glasgow, UK.

Wongsuwan, W., Rungpiboonsopitch, T., Kiatsiriroat, T., 2546. Performance of sodium-sulfide-water heat pump system, การประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน, ศูนย์ฝึกอบรมโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มีนาคม 2546.

Wongsuwan, W., Chaichana, C., and Kumar, S. 2004. Performance study of the coupled solar thermal- chemical heat pump system, 6th IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference, Glasgow, UK.

Yazaki corporation, 2003. "Freon-Free" Aroace Double-Effect Chiller-Heaters, www.yazaki-group.com/e/what02.html, [download Dec 12, 2003].

Zalba B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H., 2003. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*. 23: 251-283.

Zhang, L.Z., 2000. A three-dimensional non-equilibrium model for an intermittent adsorption cooling system, *Solar Energy*. 69(1): 27-35.

Zhang, L.Z., Wang, L, 1999. Momentum and heat transfer in the adsorbent of a waste heat adsorption cooling system, *Energy*. 24(7).

เกศนที น้อยปิ่น. 2545. การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและมวลในการดูดซับของคู่สารซิลิกาเจล-น้ำ วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ไพบุลย์ หังสพฤกษ์. 2521. การทำความเย็นแบบดูดซึมโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, สัมมนาวิชาการ เรื่อง Solar Energy and Applications จัดโดยสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) ร่วมกับ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตธนบุรี ระหว่างวันที่ 12 – 16 ธันวาคม 2521.

ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ ประพันธ์ ศิริพลปลพลา และกิตติชัย ณ ถลาง. 2541. การถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสโดยตรงในสารเก็บสะสมพลังงานที่มีการเปลี่ยนเฟส, รายงานเสนอสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สัญญาเลขที่ BR/20/2539, ธันวาคม 2541.

ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ อติพงศ์ นันทพันธุ์ พิสุทธิ์ กลิ่นขจร และวันรบ กิตินาน. 2545. การประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศและปั๊มความร้อนโดยใช้สารดูดความชื้นแบบของแข็ง, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ มีนาคม 2545.

ปรีชา พหลเทพ. 2536. เคมีฟิสิกส์ 2 (Physical Chemistry 2), ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

วิทยา เพทไพฑูรย์ และทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2539. การพัฒนาด้านแบบเครื่องแปลงความร้อนแบบดูดกลืนเพื่อใช้ในการเพิ่มคุณภาพของความร้อนทิ้ง, รายงานเสนอสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ 2539.

สุนทร สิงหารุ อติพงศ์ นันทพันธุ์ และ ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2546. การออกแบบเครื่องอุ่นอากาศสำหรับลดอุณหภูมิก๊าซไอเสียของโรงไฟฟ้าแม่เมาะขนาด 150 MW, การประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน, ศูนย์ฝึกอบรมโรงไฟฟ้าแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มีนาคม 2546.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ: รวบรวมฉบับ
Wongsuwan Wipawadee and Kiatsiriroj Tanongkiat,
“Performance Test of Sodiumsulphide-water Chemical Energy Storage System”
2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์
 - เชิงวิชาการ
 - ก. การพัฒนาการเรียนการสอนในระดับบัณฑิตศึกษา อาทิ วิชา Waste heat recovery
 - ข. พัฒนาการเรียนการสอนในระดับปริญญาตรี อาทิ วิชาโครงการงานด้านวิศวกรรมเครื่องกล
 - ค. สร้างนักวิจัย โดยพัฒนาทักษะการทำวิจัยของนักศึกษาระดับปริญญาโทและระดับปริญญาเอกเอก
3. อื่นๆ ได้แก่
 - ก. การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ:
 - Kantima Iammak, Wipawadee Wongsuwan, and Tanongkiat Kiatsiriroat (2004). “Investigation of modular chemical energy storage performance”, The Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE), 1-3 December 2004, Hua Hin, Thailand.
 - Wongsuwan, W., Rungpiboonsopit, T., Chaichana, C., Kiatsiriroat, T. (2004). “A performance study on a chemical energy storage system using sodiumsulfide-water as the working pair”, 6th IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference, Glasgow, UK, 29 August - 1 September, 2004.

Performance Test of Sodiumsulphide-water Chemical Energy Storage System

Wongsuwan Wipawadee and Kiatsiriroat Tanongkiat

Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University,

239 Huaykaew Rd., Suthep, Muang, Chiang Mai, Thailand, 50200.

Email. Vibhavadee@yahoo.com, Tel. +66 53 94 41 46, Fax. +66 53 94 41 45

Abstract

The paper presents the experimental work on a Chemical Energy Storage (CES) package based on chemisorption of sodiumsulphide-water ($\text{Na}_2\text{S-H}_2\text{O}$). The prototype was assembled by three major components vertically; reactor, condenser and evaporator. A cylindrical reactor was placed in the topmost, and the lower part was a condenser and an evaporator. Parametric studies were done on four variables: evaporation temperature ($45\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$), desorption temperature (80°C to $100\text{ }^{\circ}\text{C}$), type and mass fraction of adsorptive binder; graphite powder and carbon fiber (10% to 30%), and reaction time (30 minutes and 60 minutes). Evaporation temperature of $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ gave highest reaction rate. The appropriate desorption temperature was $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Carbon fiber mixing ratio of 30% and graphite mixing ratio of 30% provided coefficient of performance for heating (COP_h) of 1.67 and 3.47, and specific heating power (SHP) of 816 W.kg^{-1} and 948 W.kg^{-1} , respectively. The CES package had higher performance as compared to the typical design. To predict CES performance, the lumped parameter models consisting mass balance, energy balance and kinetics of adsorption, were applicable with R-square approximately 0.9.

Keyword: Chemical Energy Storage, Sodiumsulphide-water, Adsorption System

Experimental Study, Waste Heat Recovery.

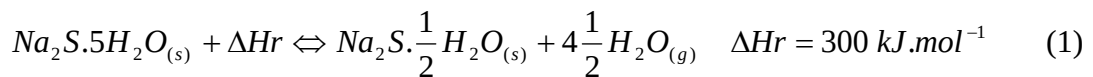
Corresponding Author: Wipawadee Wongsuwan
Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,
239 Huaykaew road, Suthep, Muang, Chaing Mai, Thailand, 50200.
Vibhavadee@yahoo.com

1. Introduction

Interest in the energy conservation by waste heat recovery and energy storage has increased steadily. Because of energy price rising, it requires to use energy resources efficiently. The waste heat from power plant, industrial process, diesel engines, and commercial buildings can be stored in thermal energy storage system. If waste energy is stored in chemical form, the storage system called Chemical Energy Storage (CES). Energy recovery and storage using CES helps to reduce fuel consumption and to increase overall thermal efficiency of industries.

CES, a class of solid chemisorption system, requires a reversible chemical reaction between working pair (adsorbent and adsorbate/working fluid). Despite chemisorption advantages, it still shows some drawbacks such as low specific heating power (SHP) or specific cooling power (SCP) and coefficient of performance (COP_h for heating and COP_c for cooling). CES contains two phases, solid and gas, which adsorbs or desorbs each other. The CES does not need liquid pump or rectifier for the refrigerant and it is less sensitive to shocks and to the installation position [1].

Among various chemisorption processes of CES, reversible hydration of $Na_2S.xH_2O$ and H_2O showed high potential of energy storage capacity. The structural, thermodynamic and phase properties of Na_2S-H_2O for waste heat driven adsorption heat pump for cooling was investigated by Boer et al. [2] The heat pump operation is based on the equilibrium reaction in Eq.(1).



The SWEAT (Salt-Water Energy Accumulation and Transformation) system [3] was based on the reversible hydration of Na_2S having heat of reaction 3.9 kJ.g^{-1} . A typical SWEAT consisted of two vessels connected with a pipe, an accumulator

containing the sodiumsulphide-hydrate, and the evaporator/condenser of water. If waste heat was supplied in the range of 80 °C to 100 °C, the sodiumsulphide-hydrate salt decomposed to lower salt-hydrate composition and water vapor. Water vapor condensed in the condenser and released heat of condensation to environment. Heat of adsorption between sodiumsulphide-pentahydrate and water ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) per kilogram of adsorbent was approximately $3,120 \text{ kJ.kg}^{-1}$ giving energy density about 673 kWh.kg^{-1} [4]. Kieng and Wang [5] mentioned that well bounding between the reactive salt and the good thermal conductivity binders; e.g. graphite, carbon fiber [6], activated carbon fiber (ACF) and expanded graphite (EG)[7] was proved to be the efficient approach to improve thermo-physical property of the reactive bed. The existence of a second phase ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) resulted in H_2 production and blocking of the condenser [3]. Bach and Haije [3] conducted research on corrosion prevention by coating an appropriated combination of epoxy resin with hardener on the heat exchanger. Prior to build up 10-kW prototype, the experimental system was tested under long-term conditions to verify its endurance [3].

Reactor design and heat and mass transfer properties of adsorbent bed plays important roles on chemisorption performance. The compact adsorbent bed of zeolite-methanol pair with enhanced heat transfer properties gave quick dynamic cycles [8]. Appropriated design of a compact package CES rather than typical design would give practical integration to the existing waste heat recovery system. Therefore, this paper presents the experimental results of the CES package in vertical design and its technical feasibility of heat pumps based on reversible chemical reactions. The development of CES system was directed to thermal energy storage application in industry. The package was improved its heat transfer intensification within the reactor by mixing reactive salt with binders.

2. Material and Methods

2.1. Description of the reactive bed

Sodiumsulphide pentahydrate salt ($\text{Na}_2\text{S}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) of lab-grade and distilled and degassed water were reactants. Sodiumsulphide had high latent heat of adsorption as compared to sensible heat. It was considerably non-toxic, low cost and widely available. The water adsorbate was thermally stable in the presence of appropriate adsorbent, e.g., NaX (zeolite) and $\text{Na}_2\text{S}\cdot x\text{H}_2\text{O}$. The corresponding temperature lift required by $\text{Na}_2\text{S}\cdot \text{H}_2\text{O}$ pair was upto 50°C , or even more, with generating (desorption) temperature lower than 100°C . The working pair was limited to a maximum generating temperature about 100°C due to sodiumsulphide instability at higher temperatures. Boer et al. [2] determined the vapor pressure temperature equilibrium and found that this working pair is suitable for low grade or waste heat source. Waste heat sources could be stored in the operation of CES heat pump cycle, and discharged to the target systems when needed.

The adsorbent bed of solid-gas reaction should have good porosity and high thermal conductivity of porous media to ensure a fast kinetics and efficient heat and mass transfer [9]. Appropriate binders was inserted to or mixed with the reactive bed. The expanded graphite (EG) was normally used with CaCl_2 salt ($\text{CaCl}_2\text{-NH}_3$, $\text{CaCl}_2\text{-CH}_3\text{OH}$, $\text{CaCl}_2\text{-CH}_3\text{NH}_2$) by various techniques. For example, $\text{CaCl}_2\text{-NH}_3$ pair used simple mixing technique [10]. Impregnation of aqueous solution of salt into EG, dehydration and calcination was successfully done with $\text{CaCl}_2\text{-CH}_3\text{OH}$ and $\text{CaCl}_2\text{-CH}_3\text{NH}_2$ pair [11-12]. Impregnation of aqueous solution of salt into compressed EG, dehydration and calcination, was applied with a group of working pairs based on alkaline earth-chloride salt and ammonia or methyl-amine; $\text{CaCl}_2\text{-CH}_3\text{NH}_2$ [13], $\text{MnCl}_2\text{-NH}_3$ [13-14], $\text{CaCl}_2\text{-NH}_3$ and $\text{BaCl}_2\text{-NH}_3$ [14]. Goetz and Guillot [15] mixed activated

carbon with compressed EG using resin as a binder. Research on effect of graphite and carbon fiber binder to $\text{Na}_2\text{S-H}_2\text{O}$ pair, has been never reported. Therefore, our work used these two binders to enhance heat transfer in the working pair by simple mixing technique.

The sodiumsulphide salt of 35% by weight from MERCK was mixed with binders, to improve heat transfer characteristics. Higher thermal conductivity increased system COP_h and rate of heat charging and discharging. The reactive salt was grinded and mixed uniformly with binder before directly packed into the reactor. Two types of binders were tested, conventional graphite powder having 800 kg.m^{-3} density and carbon fiber. The carbon fiber was found applicable to three working pairs of chemical heat pump system. In case of $\text{CoCl}_2\text{-NH}_3$ pair, it was done by impregnation aqueous solution into fiber and dehydration [16]. Nakaso et al. [17] inserted of carbon fiber brush into bed of $\text{MgO-H}_2\text{O}$ pair. The carbon fiber was used by formation of an intercalation compound with $\text{MnCl}_2\text{-NH}_3$ pair [18]. In this work, long cord carbon fiber was chopped to 5 mm length, and then was simply mixed uniformly with the salt.

2.2. Description of the Experiments

The experiment unit of CES consisted of three major components; a reactor, a condenser and an evaporator, fabricated by stainless steel type 304. The reactor was placed inside a jacket of thermal oil transfer fluid as shown in Fig. 1. The reactor was designed as tube-in-shell, which heat transfer fluid was circulated outside of reactor. It was design to reduce drawback of the extended surface of heat exchange area that increased thermal capacity.

The reactor had inside diameter of 50 mm and 350 mm length. Total mass of reactive mixture, sodiumsulphide salt and binder, was 250 g. The evaporator inside diameter was 50 mm, and its length was 200 mm. The condenser had 25 mm diameter and 300 mm height. These three components were assembled together by thread connector, and sealed by epoxy to prevent leakage. In Fig. 2, the CES package, heat source and heat sink components are shown. The reactor was located topmost, then the condenser, and the evaporator at bottommost. The experimental unit was aligned to straight line, facilitating further integration and application to waste heat recovery system. An external heat transfer fluid circuit allows heating and cooling of these three components. Periphery components included two heating and cooling oil tanks, a water pump, an oil pump, a cooling water tank, and two electric heaters for reactor and evaporator.

In preliminary test, CES package was vacuumed to the suitable saturation pressure of water about 2 kPa to 4 kPa. Distilled water about 100 g was filled into the evaporator. Each cycle maintained same control conditions; i.e. flow rate of heat transfer fluid during adsorption about 20 kg.hr⁻¹ to 30 kg.hr⁻¹ and during desorption about 30 kg.hr⁻¹ to 50 kg.hr⁻¹. The reactor was regenerated by supplying heat to the reactive bed at 90 °C for 3 hours to prepare adsorbent bed for series experiment on energy storage and discharge cycle.

A cycle consisted of two periods, desorption and adsorption. During desorption or charging period, the desorbed water vapor was decomposed from the reactor. Water was then liquefied in the condenser, and condensate consequently transferred into the evaporator. During adsorption or discharging period, water vapor evaporated from the evaporator to be adsorbed with salt in the reactor. Heat of adsorption released by chemisorption process was extracted from the reactive bed by heat transfer fluid.

Temperature measurements were done on reactor, condenser, and evaporator by thermocouple type K, which connected to the data logger for monitoring and recording using a real-time data acquisition system connected to PC. Inlet and outlet temperature of cooling and heating oil was also measured. The accuracy of temperature measurement was within 0.1 °C. The CES pressure during each cycle was observed by using vacuum pressure gauge. All measured parameters were analyzed to compute amount of energy exchange during each step of cycle, and COP_h defined by a ratio of stored to discharged energy. The other two performance indicators were SHP (a ratio of useful heat over the cycle time), and volumetric heat production (VHP), a ratio of discharged heat to the reactor volume.

3. Results and discussion

The experiments were conducted in various chemisorption cycles with the working conditions ($45\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{ev} < 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $80\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{reg} < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ min} < \text{reaction time} < 60\text{ min}$, $10\% < \text{carbon fiber mass fraction} < 30\%$, and graphite mass fraction 30%). CES performances were defined and compared by COP_h , SHP and VHP. Temperature evolutions of the reactor in a cycle were shown in Fig. 3. A cycle time consisted of four time intervals; chemisorption or reaction, cooling, heating and desorption, and cooling again. Temperature variations at measured locations in the reactor had similar trends except the topmost part of the reactor. Hence, heat transfer in axial direction of reactor should be improved.

Type and mass fraction of binder influenced reactor temperature and consequently its heat evolution. The operating condition was maintained at desorption temperature and evaporation temperature about $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. Temperature variations in four time intervals, as well as amount of adsorbed water,

were small different. During adsorption period, graphite binder led to highest temperature magnitude, followed by 30%, 20% and 10% of carbon fiber mass ratio. Graphite contained larger porosity and reactive surface than carbon fiber. More water molecule could be adsorbed with salt, and resulted in more heat of adsorption discharged. However, longer desorption time was required in case of graphite binder as compared to carbon fiber. Rate of heat desorbed/stored and adsorbed/discharged during a cycle was depicted in Fig. 4. The heat generated during adsorption period and heat required for desorption were not in the same magnitude. Larger energy released from the CES in case of graphite binder, followed by carbon fiber having mass ratio 30%, 20% and 10%, respectively. Graphite had higher specific heat than carbon fiber, which enhanced larger sensible and reaction heat of CES. Carbon fiber had advantage of high temperature resistance, especially during discharging period. Reactive mixture having carbon fiber binder would withstand to higher temperature of waste heat source, and also better prevent deformation of reactive salt. System performance determined by COP_h was about 3.47, 1.67, 0.81 and 1.08 for graphite mixing ratio 30%, carbon fiber mixing ratio 30%, 20% and 10%, respectively. The achieved SHP was $948 \text{ W.kg}_{\text{ads}}^{-1}$, $816 \text{ W.kg}_{\text{ads}}^{-1}$, $615 \text{ W.kg}_{\text{ads}}^{-1}$, and $561 \text{ W.kg}_{\text{ads}}^{-1}$, respectively. The sodiumsulphide-water CES performance depended on type and mass ratio of binder significantly.

The temperature profile and heat evolution of three consecutive chemisorption cycles are depicted in Fig. 5. Desorption temperature varied by 80 °C, 90 °C and 100 °C. The reactor temperature during desorption period obviously responded to higher heat source temperature. Even though higher decomposition temperature was supplied, the same magnitude of desorption heat was required. During adsorption period, reactive bed temperature varied in the narrow range from 40 °C to 45 °C. The rate of heat discharged during adsorption period was similar for three consecutive cycles showing reliability of

heat production by CES. However, large fluctuation of heat rate has seen during desorption period because of mismatched between heat source and reactor temperature. Unnecessary too high temperature source supplied to the CES meant degrading of energy storage efficiency. Therefore, waste heat source about 80 °C was sufficient for the CES based on Na₂S-H₂O pair.

COP_h and SHP from twelve experimental cases are summarized in Table 1. There were four variables; evaporator temperature, regeneration/desorption temperature, mass ratio of carbon fiber or graphite, and reaction time. Increasing evaporation temperature (T_{ev}) resulted in lower COP_h but higher SHP. The influence of regeneration temperature (T_r) was also corresponding. Short reaction time gave lower COP_h but higher SHP.

4. Performance prediction by simulation

A mathematical model of CES was developed as a lumped parameter model. The model was based on three conservation equations; mass balances, energy balances and kinetics of adsorption. Energy balance equation during adsorption and desorption processes are given in Eq. (2) – (3), respectively [19].

$$\begin{aligned} & \left[(mCp)_m + (mCp)_s + (mCp)_b + (m_s C_{p,w}) \right] \frac{dT}{dt} = \\ & -n_s \Delta H_r \frac{dx(t)}{dt} + (\dot{m}Cp)_o (T_o - T_i) + m_s C_{p,w} (T_e - T_s) \frac{dx(t)}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\left[(mCp)_m + (mCp)_s + (mCp)_b + (m_s C_{p,w}) \right] \frac{dT}{dt} = n_s \Delta H_r \frac{dx(t)}{dt} + (\dot{m}Cp)_o (T_o - T_i) \quad (3)$$

Kinetics equations for the gas-solid reversible reaction were applied to calculate the amount of reaction product on radius direction of reactor or degree of advancement. The principle was based on Arrhenius law. Eq.(4) and (5) are the expressions for adsorption

and desorption processes, respectively[20]. Expression for heat transfer fluid is given by Eq. (6)

$$\frac{dx(t)}{dt} = k_{0a} \exp\left[\frac{E_a}{RT_s(t)}\right] [1 - x(t)]^{Ma} \quad (4)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = k_{0d} \exp\left[\frac{E_d}{RT_s(t)}\right] [1 - x(t)]^{Md} \quad (5)$$

$$(\dot{m}Cp)_o(T_o - T_i) = \frac{kA(T_s - T_o)}{s} \quad (6)$$

The mass balance equation is expressed by (7)[21]. The first term is generation rate of reaction products and the second term is the consumption rate of reactants. The temperature gradient and kinetics equation is given in (8).

$$m_p \frac{dx(t)}{dt} + \frac{dm_r}{dt} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{dT}{dt} = -\left(\frac{T_s - T_c}{1 - x(t)}\right) \frac{dx(t)}{dt} \quad (8)$$

The model was solved numerically using finite difference method. The calculated results were temperature distribution and energy variation during energy storage and discharge periods. The predicted degree of advancement, temperature and power variations, were used to compute the cycle's COP_h and SHP. The model was validated by experimental results; i.e. pressure, temperature, amount of adsorbed and desorbed water vapor. The temperature profiles of the reactor from simulation and experiment were illustrated in Fig. 6. Both of profiles were analogous during heating and desorption period, although during adsorption and cooling period, a bit difference was observed. COP_h and SHP calculated from simulated and experimental results of four experimental sets were summarized in Table 1. The consistency of influences from evaporation temperature, regeneration temperature, binder type and mixing ratio as well

as reaction time, on the COP_h and SHP was recognized. The statistical R-square of COP_h and SHP was approximately 0.9 that was in acceptable level. Therefore, expressions in Eq. (2)-(8) were applicable to predict performance of Na_2S-H_2O CES. The CES could achieve COP_h from 0.81 to 3.47, SHP from 518 W.kg^{-1} to $1,544 \text{ W.kg}^{-1}$, and VHP from 605 kWh.m^{-3} to $5,573 \text{ kWh.m}^{-3}$. It has implied that the CES could provide well energy storage density, and comparable to the other energy storage system. CES based on Na_2S-H_2O pair from the literature [3] provided SHP about 600 W.kg^{-1} .

Sensitivity analysis was carried out to compare the influences of four parameters on COP_h and SHP of system, i.e., evaporation temperature, regeneration temperature, type and mixing ratio of binder, and time span of chemical reaction. The type of binder and its mixing ratio was mostly affected the system performance, because rate of heterogeneous reaction depended on the reaction surface. The reaction bed using simple mixing between salt and binder could increase contact area between salt and water vapor. Graphite binder resulted in better performance than carbon fiber. The effective thermal conductivity of activated carbon fiber composite bed was lower than the untreated bed [7]. The evaporation and desorption temperature effected CES in second and third priorities. The reaction time played insignificant role on the system performance.

5. Conclusion

A chemical energy storage package, using sodiumsulphide-water pair, was fabricated and experimented. Three major components; a reactor containing reactive mixture, a condenser and an evaporator, were assembled in the same vertical direction. Waste energy could be stored during desorption period, and discharged during adsorption period. The binder of reactive mixture helped to improve COP_h and SHP.

The graphite powder and carbon fiber were simply mixed with salt to enhance heat transfer intensification in a packed bed reactor. Graphite ratio of 30% led to maximum COP_h . The carbon fiber had advantage on higher temperature resistance of bed during charging period, but did not significantly improve performance. Increasing of evaporation and desorption temperatures would increase SHP but reduce COP_h . The CES had potential to store waste heat at 80 °C to 90 °C, while the discharging period required appropriate evaporation temperature about 50 °C. The CES was modeled based on lumped parameter approach and solved by finite difference method. The model was applicable to simulate the system performance within acceptable accuracy.

6. Acknowledgements

This work is support by the Thailand Research Fund (TRF) and the Commission on Higher Education of Thailand; under the contract number MRG4780154, “Young Lecturer Research Scholar year 2004”.

7. Nomenclature

C_p	specific heat ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
E	activation energy (J.mol^{-1})
ΔH_r	the enthalpy change during chemisorption reaction (kJ.mol^{-1})
k	thermal conductivity ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
k_0	constant for adsorption/desorption processes
m	mass of substance or material (g)
$\dot{m}$	mass flow rate of heat transfer fluid (g.s^{-1})
n_s	mole of reactive salt (mole)
R	the universal gas constant ($8.31434 \text{ kJ.kmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
s	reactor wall thickness (m)
T	Temperature (K)
x	degree of advancement ($\text{g}_w.\text{g}_{\text{ads}}^{-1}$)

Subscripts

a	adsorption
b	binder
c	Initial bed temperature
d	desorption
e	evaporator
i	Initial heat transfer oil
m	metal case
o	heat transfer oil
p	product
r	reactant
s	reactive salt, adsorbent bed
w	water

8. References

- [1] R.Z. Wang and R.G. Oliveira, Adsorption refrigeration-an efficient way to make good use of waste heat and solar energy, *Progress in Energy and Combustion Science*, **32**, 424-458 (2006).
- [2] R. de Boer, W.G. Haije, and J.B.J. Veldhuis, Determination of structural, thermodynamic and phase properties in the $\text{Na}_2\text{S-H}_2\text{O}$ system for application in a chemical heat pump, *Thermochemica Acta*. **395**, 3–19 (2002).
- [3] P.W. Bach, and W.G. Haije, Heat storage and transformation, Proc. of ZAE-Symposium 2001, ‘Heat and Cold Storage’, Munich, Germany. (2001).
- [4] S.B., Riffat, and N. Shankland, A storage heat pump using ‘Ozone-Friendly’ Refrigeration, *International Journal of Energy Research*, **16**, 21-30 (1992).
- [5] A.O. Kieng and R.Z. Wang, Literature review on solar adsorption technologies for ice-making and air-conditioning purposes and recent developments in solar technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **5**, 313-342 (2001).
- [6] T. Dellerio, T.D. Sarneo, Ph. Touzain, A chemical heat pump using carbon fibers as additive. Part I: enhancements of thermal conduction, *Appl. Thermal Engineering*, **19**, 991–1000 (1999).
- [7] Fujioka Keiko, Hatanaka Kensuke, Hirata Yushi, Composite reactants of calcium chloride combined with functional carbon materials for chemical heat pumps, *Applied Thermal Engineering*, **28**, 304 – 310 (2008).
- [8] G. Restuccia G., A. Freni, F. Russo, S. Vasta, Experimental investigation of a solid adsorption chiller based on a heat exchanger coated with hydrophobic zeolite, *Applied Thermal Engineering*, **25**, 1419–1428 (2005).

- [9] L.L. Vasiliev, D.A. Mishkinis, A.A. Antukh, A.G. Kulakov, L.L. Vasiliev, Resorption heat pump, *Applied Thermal Engineering*, **24**, 893–1903 (2004).
- [10] V. Valkov, J.P. Dodelet, T. Dllero, D. Nikanpour, J.-Fr. Roy, L.C. Rondequ, A new thermochemical material and reactor for space systems, Proc. Int. Sorption Heat Pump Conf, Shanghai, 438–443 (2002).
- [11] Y. Hirata, K. Fujioka, S. Fujiki, Preparation of fine particles of calcium chloride with expanded graphite for enhancement of driving reaction for chemical heat pumps, *J. Chem. Eng. Jpn*, **37**, 827–832 (2003).
- [12] K. Fujioka, K. Sasaki, K. Oido, Y. Hirata, Enhancement of heat transfer in calcium chloride reactor bed for chemical heat pumps by use of graphite composite particles, Proc. 5th Minsk Int. Seminar ‘‘Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators’’, Minsk, Belarus (2003).
- [13] S. Maurant, P. Parades, F. L’Haridon, Heat and mass transfer in consolidated reacting beds for thermochemical systems, *Heat Recovery Syst. CHP* **13** (1993) 315–319.
- [14] J.H. Han, K.H. Lee, Effective thermal conductivity of graphite–metallic salt complex for chemical heat pumps, *J. Thermophys. Heat Transfer* **13** (1999) 481–488.
- [15] V. Goetz and A. Guillot, An open activated carbon/CO₂ sorption cooling system, *Ind. Eng. Chem. Res* **40** (2001) 2904–2913.
- [16] Z. Aidom and M. Ternan, Salt impregnated carbon fibers as the reactive medium in a chemical heat pump: the NH₃-CoCl₂ system, *Appl. Thermal Eng.* **22** (2002) 1163–1173.

- [17] K. Nakaso, M. Anai, Y. Sasaki, Y. Hamada, J. Fukai, Improvement of heat transfer characteristics in a solid–gas thermochemical reactor, 10th APCChE Congress, Kitakyushu, Japan (2004) 2G-07.
- [18] J.J. Guilleminot, A. Choisier, J.B. Chalefen, S. Nicolas, J.L.Reymoney, Heat transfer intensification in fixed bed adsorbers, Heat Recovery Syst. CHP 13 (1993) 297–300.
- [19] Cho Soon-haeng and Kim Jong-nam, Modelling of silica gel/water adsorption cooling system, Energy 17 (9)(1992) 829-839.
- [20] M.N. Azpiazu, J. M. Morquillas, A. Vazquez. Heat recovery from a thermal energy storage based on the $\text{Ca(OH)}_2/\text{CaO}$ cycle, Applied Thermal Engineering 23 (2003) 733-741.
- [21] A. Sakoda, and M. Suzuki, Fundamental study on solar powered adsorption cooling system, Journal of Chemical Engineering of Japan 17 (1)(1984) 52-57.

Table 1: Comparison of COP for heating and SHP

Figure 1: The schematic diagram of the reactor

Figure 2: The experimental set up of CES (a) Schematic diagram (b) Photo of experimental set up

Figure 3: Temperature evolution in different part of the reactor of CES during its heating/cooling processes

Figure 4: Heat exchange profile of reactor having different binder mass ratios

Figure 5: Temperature and heat profile of three chemisorption cycles

Figure 6: Temperature profile of reactor from simulation and experiment

Table 1: Comparison of COP for heating and SHP

Test no.	Experimental Condition	Coefficient of Performance for heating purpose (COP _h)		Specific heating power (SHP in W.kg ⁻¹)	
		Experimental results	Simulated results	Experimental results	Simulated results
1	Te = 45 °C	2.83	1.183	518	839.64
	Te = 50 °C	1.67	1.617	816	883.37
	Te = 60 °C	1.27	1.734	958	1,109.53
2	Tr = 80 °C	1.67	1.617	816	883.37
	Tr = 90 °C	1.27	1.362	957	884.48
	Tr = 100 °C	1.12	1.358	1,041	886.83
3	GP 30 %	3.47	1.809	948	972.00
	CF 10 %	1.09	1.015	561	943.13
	CF 20 %	0.81	1.038	615	848.39
	CF 30 %	1.67	1.617	816	883.37
4	Reaction time 60 min	1.67	1.617	816	883.37
	Reaction time 30 min	1.00	1.042	1,544	892.625

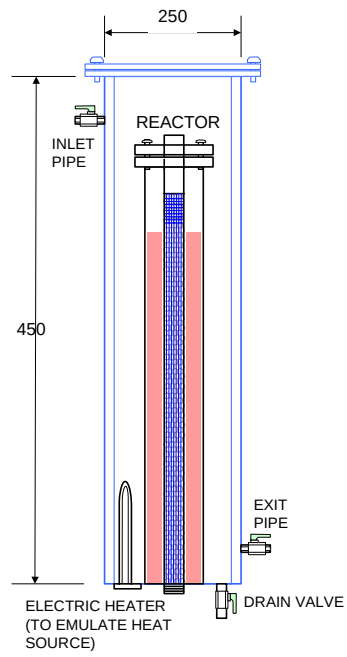
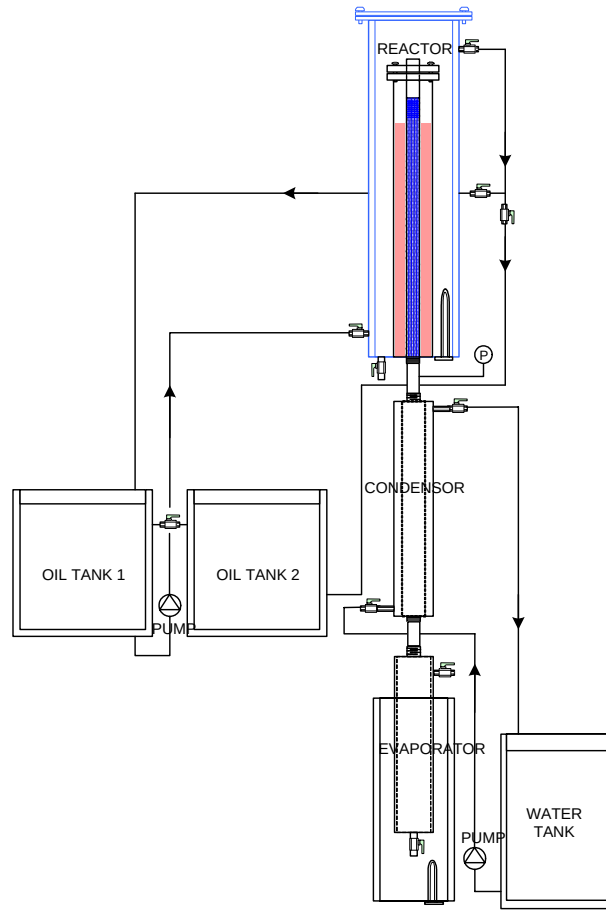


Figure 1: The schematic diagram of the reactor



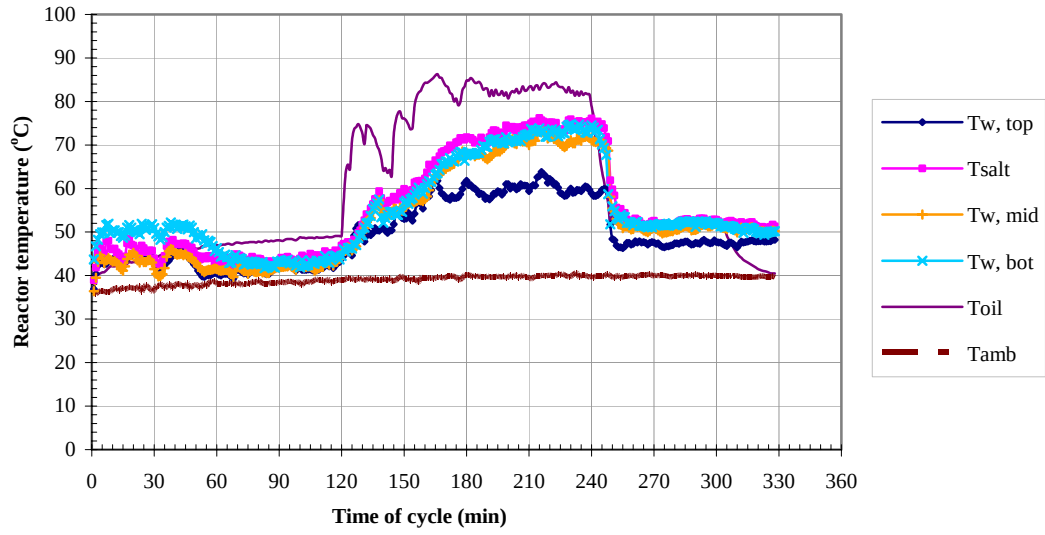
(a)



(b)

Figure 2: The experimental set up of CES (a) Schematic diagram

(b) Photo of experimental set up



$T_{w, top}$ = reactor wall temperature at topmost

T_{salt} = reactive salt temperature

$T_{w, mid}$ = reactor wall temperature at middle

$T_{w, bot}$ = reactor wall temperature at bottommost

T_{oil} = heat transfer oil temperature (in the external shell)

T_{amb} = ambient temperature

Figure 3: Temperature evolution in different part of the reactor of CES during its heating/cooling processes

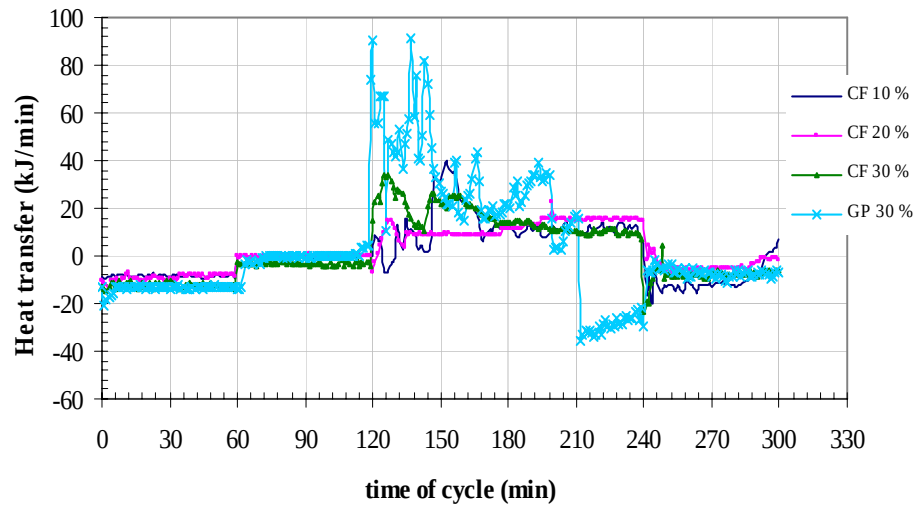


Figure 4: Heat exchange profile of reactor having different binder mass ratios

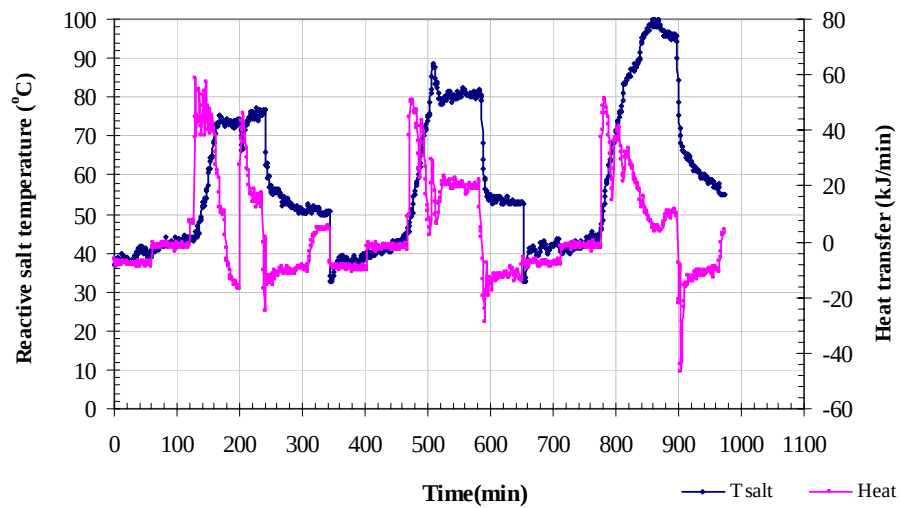


Figure 5: Temperature and heat profile of three chemisorption cycles

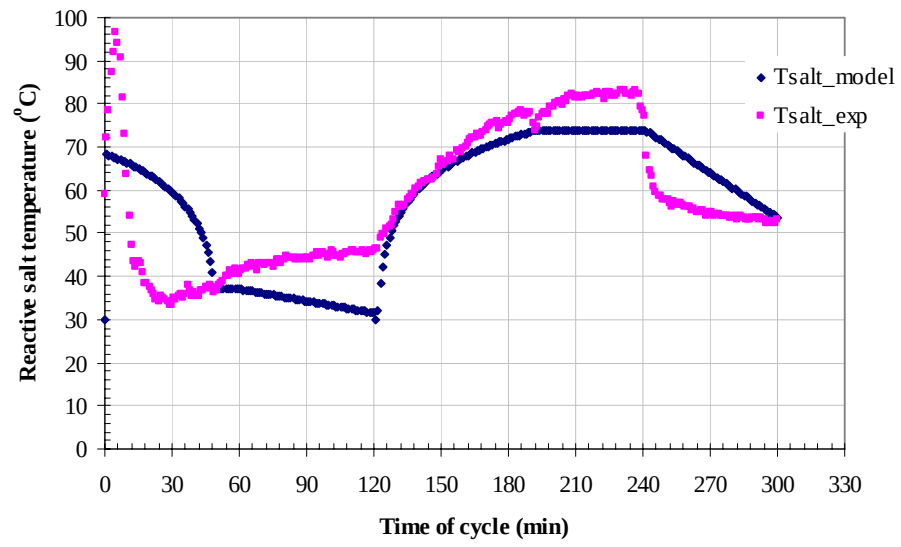


Figure 6: Temperature profile of reactor from simulation and experiment