ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดแคลเซียมออกไซด์/แคลเซียมไฮดรอกไซด์

นฤมล พึ่งจาบ
ศิริภรณ์ รุ่งพาณิชย์

วพ.
ท ส 762ป
2550

เลขหมู่ .....
เลขทะเบียน 83192
วัน,เดือน,ปี 6 ส.ค. 2551

ง 11962239
i .....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CALCIUM OXIDE/CALCIUM HYDROXIDE CHEMICAL HEAT PUMP

NARUMON PHUNGCHAP

SIRIPORN ROONGPANIT

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT

FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดแคลเซียมออกไซด์/แคลเซียมไฮดรอกไซด์
จัดทำโดย	นางสาวนฤมล พึ่งจาบ รหัสนักศึกษา 47010368
	นางสาวศิริภรณ์ รุ่งพาณิชย์ รหัสนักศึกษา 47010765
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ดร.สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์)

..... กรรมการ
(ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดแคลเซียมออกไซด์/แคลเซียมไฮดรอกไซด์

โดย นางสาวนฤมล พึ่งจาบ รหัสนักศึกษา 47010368

นางสาวศิริภรณ์ รุ่งพาณิชย์ รหัสนักศึกษา 47010765

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์

ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงงานนี้ได้ทำการสร้างปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดแคลเซียมออกไซด์/แคลเซียมไฮดรอกไซด์ระดับห้องปฏิบัติการ โดยการนำความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำด้วยปฏิกิริยาการดูดความร้อนเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานเคมี และปล่อยความร้อนสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน และศึกษาผลของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ และปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี จากการทดลอง พบว่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำสูงขึ้น ทำให้ปั๊มมีประสิทธิภาพมากขึ้น และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของปั๊ม จึงสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ระดับห้องปฏิบัติการ คือ อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง 85 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน 10 มิลลิลิตร และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม ซึ่งทำให้มีค่าร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาเท่ากับ 56.5 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะและประสิทธิภาพทางความร้อนของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีนี้เท่ากับ 1.43 และ 0.0399 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Calcium oxide/Calcium hydroxide Chemical Heat Pump		
By	Miss Narumon	Phungchap	ID.NO. 47010368
	Miss Siriporn	Roongpanit	ID.NO. 47010765
Advisor	Dr. Sutasinee	Neramittagapong	
Report for	Bachelor Degree of Engineering (Chemical Engineering)		
	Department of Chemical Engineering		
	Faculty of Engineering		
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

Abstract

This project is to set up the calcium oxide/calcium hydroxide chemical heat pump in laboratory scale to recover heat from low-temperature heat source by endothermic reaction converting the heat into chemical energy and liberating heat to high-temperature heat source by hydration reaction of calcium oxide. The effects of low-temperature heat source temperature and the amount of calcium oxide on the performance of chemical heat pump were studied. It has been found that the increasing of low–temperature heat source temperature increased the performance of chemical heat pump. The amount of calcium oxide did not affect the chemical heat pump performance. The suitable conditions of chemical heat pump in laboratory scale were 80 $^{\circ}C$ of low–temperature heat source, 85 $^{\circ}C$ of high–temperature heat source, 10 milliliters of water in endothermic reactor and 10 gram of calcium oxide in exothermic reactor. The percent of conversion of calcium oxide was 56.5. The coefficient of performance and thermal efficiency of this chemical heat pump were 1.43 and 0.0399, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี จากความช่วยเหลือของบุคคลหลายท่าน และผู้ศึกษาขอขอบพระคุณ ดร.สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้สร้างเครื่องปฏิกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของปริญญานิพนธ์ ผู้ศึกษารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. ประกอบ กิจไชยา และอาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์ กรรมการสอบ และตรวจสอบปริญญานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำตลอดจนข้อเสนอแนะ จนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือในการสร้างอุปกรณ์การทดลอง ตลอดการดำเนินโครงงาน

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ศึกษาขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านหากมีสิ่งผิดพลาดประการใด ผู้ศึกษาขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่ด้วย

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II

กิตติกรรมประกาศ..... III

สารบัญ..... IV

สารบัญตาราง..... VI

สารบัญรูป..... VIII

สัญลักษณ์..... IX

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 สมมติฐานของการศึกษา..... 2

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 2

1.4 ขอบเขตการวิจัย..... 2

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย..... 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4

2.1 ปั๊มความร้อน..... 4

2.2 ประเภทของปั๊มความร้อน..... 5

2.3 วิธีการเลือกปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในปั๊มความร้อนพลังงานเคมี..... 10

2.4 แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ..... 14

2.5 การทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี..... 15

2.6 ข้อดีของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี..... 18

2.7 ข้อเสียของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี..... 18

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง..... 21

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 21

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี..... 24

3.3 วิธีการทดลอง..... 24

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 26

4.1 การศึกษาอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ที่มีผลต่อปั๊มความร้อน พลังงาน..... 26

4.2 การศึกษาปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่มีผลต่อปั๊มความร้อนพลังงาน เคมี..... 28

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย..... 31

5.1 สรุปผลการวิจัย..... 31

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 32

เอกสารอ้างอิง.....33

ภาคผนวก.....34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การเปรียบเทียบระหว่างปั๊มความร้อนเชิงกล ปั๊มความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ และปั๊มความร้อนพลังงานเคมี 19

4.1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 28

4.2 ผลการทดลองเมื่อน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ต่างกัน 30

ก.1 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ ที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม 80 องศาเซลเซียส 37

ก.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 38

ข.1 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ 43

ข.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 43

ข.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ ที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม 60 องศาเซลเซียส 44

ข.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ ที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม 70 องศาเซลเซียส 44

ข.5 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ ที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม 80 องศาเซลเซียส 45

ข.6 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ ที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 20 กรัม 80 องศาเซลเซียส 45

ข.7 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ ที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 30 กรัม 80 องศาเซลเซียส 46

ข.8 ผลที่ได้จากการคำนวณ 46

ค.1 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ใน เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปริมาณ 10 กรัม 48

ค.2 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ใน เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปริมาณ 20 กรัม 51

ค.3 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ใน เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปริมาณ 30 กรัม 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ค.4 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน..... 56
ค.5 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 60 องศาเซลเซียส..... 59
ค.6 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 70 องศาเซลเซียส..... 61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ	6
2.2	แผนภาพอุณหภูมิ – เอนโทรปีของวัฏจักรจริงแบบผันกลับไม่ได้ของแรงกิน	6
2.3	ปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืน	8
2.4	แผนภาพปั๊มความร้อนพลังงานเคมี	9
2.5	การทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีในขั้นตอนการกักเก็บ และการปลดปล่อยความร้อน	16
2.6	การทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ใช้แคลเซียมออกไซด์ และน้ำในการทำปฏิกิริยา	17
3.1	แผนภาพอย่างง่ายของชุดอุปกรณ์	22
3.2	เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนและเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน	23
3.3	แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่มีเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนตั้งอยู่ภายในและแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงที่มีเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนตั้งอยู่ภายใน	23
4.1	การลดลงของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงที่อุณหภูมิต่างๆ ของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ	27
4.2	การลดลงของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงที่ปริมาณต่างๆ ของแคลเซียมออกไซด์	29
ก.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงกับเวลาเมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำต่างกัน	36
ข.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงกับเวลาเมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำต่างกัน	42
ข.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงกับเวลาเมื่อปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่างกัน	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

A, B, C	สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการ
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (จูลต่อกรัม เคลวิน)
COP	สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (coefficient of performance)
COP_{ideal}	สัมประสิทธิ์สมรรถนะของวัฏจักรคาร์โนต์
En	เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน
Ex	เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน
G	อัตราการไหลเชิงมวลของสารละลายของเหลว (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)
G_{gas}	อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส (ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที)
$\Delta G°$	พลังงานเสรีของกิบส์ (จูลต่อโมล)
$\Delta H°$	Standard enthalpy change of reaction (จูลต่อโมล)
$\Delta H°_{T_1}$	Standard heat of reaction ที่อุณหภูมิอ้างอิง T_1 (จูลต่อโมล)
K	ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาในเทอมของแอคทิวิตี
N_{A0}	น้ำหนักเริ่มต้นของแคลเซียมออกไซด์ก่อนทำปฏิกิริยา (กรัม)
N_A	น้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา (กรัม)
Q_1	พลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่ให้แก่เครื่องระเหย (วัตต์)
Q_2	พลังงานความร้อนจากเครื่องควบแน่นที่ให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง(วัตต์)
Q_3	พลังงานความร้อนจากเครื่องยนต์ความร้อนที่ให้แก่หอดูดซับ (วัตต์)
Q_4	พลังงานความร้อนจากหอดูดกลืนที่ให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (วัตต์)
Q_L	พลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (วัตต์)
Q_H	พลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิสูง (วัตต์)
$Q_{L,S}$	พลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ถูกนำไปกักเก็บที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง (วัตต์)
$Q_{H,S}$	พลังงานความร้อนแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงที่ถูกกักเก็บโดยปั๊มความร้อนพลังงานเคมี (วัตต์)
$Q_{L,R}$	พลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่ถูกดูดซับโดยปั๊มความร้อนพลังงานเคมี (วัตต์)
$Q_{H,R}$	พลังงานความร้อนจากปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ปลดปล่อยให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง (วัตต์)
Q_{avg}	พลังงานความร้อนเฉลี่ย (วัตต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R	ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมลเคลวิน)
$\Delta S°$	Standard entropy change of reaction (จูลต่อโมล เคลวิน)
$\Delta S°_{T_1}$	Standard entropy change of reaction ที่อุณหภูมิอ้างอิง T_1 (จูลต่อโมล เคลวิน)
T	อุณหภูมิ (เคลวิน)
T_1	อุณหภูมิอ้างอิง (เคลวิน)
T_L	อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนอุณหภูมิต่ำ (เคลวิน)
T_H	อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนอุณหภูมิสูง (เคลวิน)
$T_{L,S}$	อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำในการกักเก็บพลังงานความร้อน (เคลวิน)
$T_{H,S}$	อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงในการกักเก็บพลังงานความร้อน (เคลวิน)
$T_{L,R}$	อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำในการปลดปล่อยพลังงานความร้อน (เคลวิน)
$T_{H,R}$	อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงในการปลดปล่อยพลังงานความร้อน (เคลวิน)
W	พลังงานที่ให้แก่ระบบ (วัตต์)
x	เศษส่วนโมลของของเหลว
y	เศษส่วนโมลของแก๊ส
η	ประสิทธิภาพทางความร้อน (thermal efficiency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตั้งแต่ปลายศตวรรษที่ 18 มีการปฏิวัติอุตสาหกรรม ได้มีการคิดค้นและพัฒนากระบวนการผลิต อุปกรณ์เครื่องจักร เครื่องมือต่าง ๆ จนปัจจุบันอุตสาหกรรมมีเทคโนโลยีในการผลิตอย่างทันสมัย ผลิตได้อย่างรวดเร็วเพียงพอกับปริมาณของมนุษย์โลกที่นับวันจะเพิ่มมากขึ้น และผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อการดำเนินชีวิตในปัจจุบันของมนุษย์โลก แต่อีกด้านหนึ่งของอุตสาหกรรม ในกระบวนการผลิตต้องมีการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ ที่เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ที่เกิดจากการทับถมของซากพืชซากสัตว์เป็นระยะเวลานานหลายล้านปี และเป็นสิ่งที่มนุษย์ไม่สามารถสร้างขึ้นมาได้ ทำได้แต่เพียงการขุดค้นและแปรรูปเป็นพลังงานต่างๆ ในระหว่างขั้นตอนเหล่านี้ยังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ยิ่งอุตสาหกรรมมีการผลิตและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเท่าใด ย่อมมีการใช้เชื้อเพลิงมากขึ้นเท่านั้น ก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อนอย่างเป็นอยู่ในขณะนี้ เราไม่สามารถที่จะลดปริมาณการผลิตลงได้ เพราะความต้องการใช้ประโยชน์จากสิ่งเหล่านี้ในการดำรงชีวิต แต่เราสามารถที่จะหาวิธีที่จะใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด โดยก่อให้เกิดการสูญเสียน้อยที่สุด และหาวิธีที่จะนำพลังงานที่ใช้ไปแล้ว ให้สามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ได้อีก

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ มีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนจำนวนมากสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของพลังงานเหลือทิ้งอุณหภูมิต่ำ จึงมีการหาวิธีต่างๆ ที่จะนำพลังงานเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ และปั๊มความร้อนพลังงานเคมีเป็นอีกวิธีหนึ่ง ในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งสามารถผันกลับได้ ในการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการที่ต้องการพลังงานความร้อนสูง ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ทำการศึกษา ใช้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ซึ่งสามารถกักเก็บพลังงานความร้อนจากความร้อนที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม ความร้อนจากแสงอาทิตย์ หรือความร้อนจากพื้นดิน โดยการดูดความร้อนจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่แหล่งความร้อนเหล่านั้น และปลดปล่อยพลังงานความร้อนโดยการคายความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 สมมติฐานของการศึกษา

ในงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไป การถ่ายเทความร้อนจำเป็นต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิด ซึ่งของไหลที่ต้องการความร้อนจะต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าของไหลที่ถ่ายเทความร้อนให้แก่ของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เพราะในการถ่ายเทความร้อนต้องมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแหล่งความร้อน 2 แหล่ง โดยทั่วไปความร้อนจะถ่ายเทจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

มีแหล่งความร้อนเหลือทิ้งที่มีอุณหภูมิไม่สูงมาก เช่น น้ำหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิประมาณ 40 - 50 องศาเซลเซียส หลังผ่านการใช้งานแล้ว แต่ความร้อนที่เหลือทิ้งนี้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากอุณหภูมิต่ำเกินไป จึงมีแนวคิดนำความร้อนเหลือทิ้งนี้กลับมาใช้ใหม่โดยการนำมาเพิ่มอุณหภูมิให้แก่แหล่งที่ต้องการความร้อน แต่อุณหภูมิของความร้อนเหลือทิ้งที่ต่ำเกินไปทำให้ไม่สามารถใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้เนื่องจากแหล่งที่ต้องการความร้อนนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง จึงใช้ปฏิกิริยาเคมีที่เป็นปฏิกิริยาการคายความร้อนช่วยในการถ่ายเทความร้อนระหว่างแหล่งความร้อนทั้ง 2 แหล่ง

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

สร้างปั๊มความร้อนพลังงานเคมี เพื่อนำความร้อนเหลือทิ้งจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำมาเพิ่มอุณหภูมิให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. สร้างปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ใช้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ในการนำพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำมาเพิ่มอุณหภูมิให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง
2. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ใช้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีระดับห้องปฏิบัติการที่ทำงานได้จริง สามารถนำความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำมาเพิ่มอุณหภูมิให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปั๊มความร้อน

ทอมสัน (W. Thomson) เป็นผู้ริเริ่มแนวคิดปั๊มความร้อนขึ้นเป็นครั้งแรกใน ค.ศ. 1852 แต่ยังไม่มีการใช้ในทางปฏิบัติจนกระทั่ง ค.ศ. 1880 เป็นช่วงเริ่มต้นการพัฒนาวัฏจักรทำความเย็นซึ่งมีแอมโมเนียเป็นของไหลทำงาน ฮาเดน (T.G. Hadane) ได้ทำการติดตั้งปั๊มความร้อนขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1928 ซึ่งมีองค์ประกอบเหมือนกับระบบทำความเย็นโดยใช้ทำความร้อนภายในบ้าน หลังจากนั้นได้มีการปรับปรุงเทคโนโลยีจนกระทั่งในปี ค.ศ.1930 ได้มีการติดตั้งปั๊มความร้อนขนาด 1050 กิโลวัตต์ในประเทศสหรัฐอเมริกา ค.ศ. 1940 การแพร่หลายของสารทำงานอินทรีย์ทำให้ปั๊มความร้อนขนาดเล็กสำหรับใช้ภายในบ้านได้รับความนิยมอย่างมาก และมีการใช้งานเป็นครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกาสำหรับทำความร้อนในฤดูหนาว และทำความเย็นในฤดูร้อน และต่อมาได้แพร่หลายเข้าสู่ประเทศแถบยุโรป ได้แก่ นอร์เวย์ สวีเดน เยอรมัน ฝรั่งเศส อิตาลี และโปแลนด์ ช่วง ค.ศ. 1980 ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ (compression heat pump) ได้รับความนิยมอย่างมาก จนกระทั่งสิ้นปี ค.ศ. 1986 ได้มีการติดตั้งปั๊มความร้อนขนาดใหญ่ 600 เมกะวัตต์ถึง 40 เครื่อง ปั๊มความร้อนเหมาะที่จะนำมาใช้ในหลายกรณี ดังนี้

1. นำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่มีการปลดปล่อยความร้อนอุณหภูมิต่ำเป็นจำนวนมาก เช่น จากเครื่องปรับอากาศ เครื่องทำแห้ง เครื่องระเหย หอกลั่น เป็นต้น
2. นำมาใช้ในบริเวณที่ต้องการทำความเย็นและทำความร้อน
3. ใช้ส่งผ่านความร้อนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งไม่มาก
4. ภาคอุตสาหกรรมที่มีระบบผลิตความร้อน (heat generate) การติดตั้งปั๊มความร้อนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพระบบผลิตความร้อน

ปั๊มความร้อน เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนที่ใช้หลักการถ่ายเทความร้อน เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่สิ่งที่เราต้องการอุ่นในขณะที่สิ่งแวดล้อมอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า หน้าที่ของปั๊มความร้อนจึงขับความร้อนให้ไหลจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ไปสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงโดยอาศัยงานเป็นแรงขับ เช่น การใช้ปั๊มความร้อนซึ่งมีของไหลทำงาน (working fluid) นำความร้อนในอากาศที่มีอุณหภูมิสูงเพียง 34 องศาเซลเซียส ถ่ายเทให้กับบริเวณที่ต้องการทำความร้อน เช่น น้ำ ซึ่งสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สะสมความร้อนได้จนอุณหภูมิสูง โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับระบบที่ออกแบบไว้ เช่น กรณีของน้ำร้อนที่ใช้ในโรงแรม สามารถทำให้มีอุณหภูมิสูงถึง 60 องศาเซลเซียส [3]

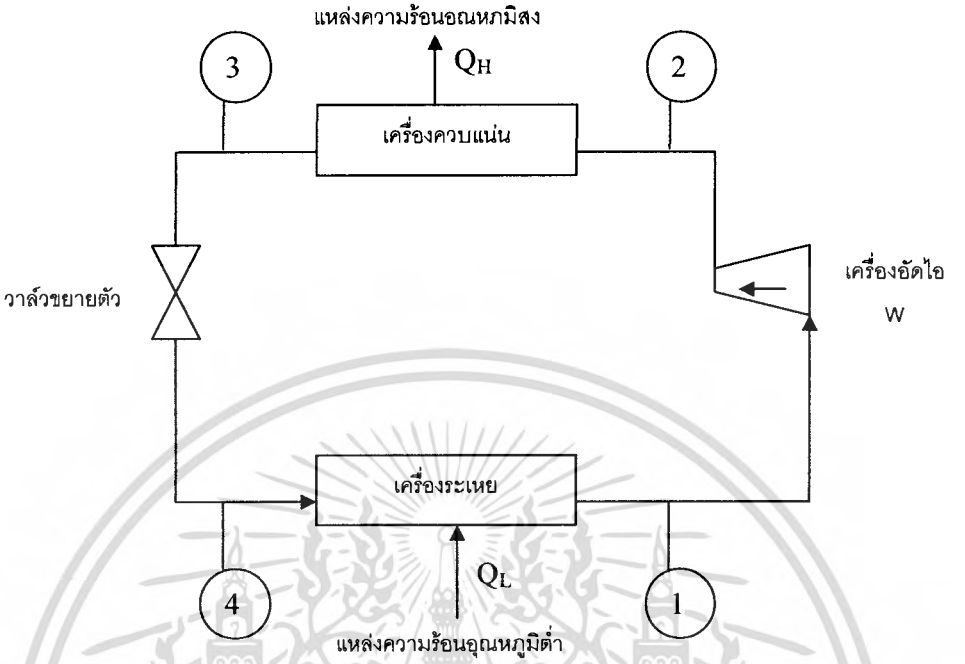
ปั๊มความร้อนมีการทำงานเหมือนกับระบบการทำความเย็นทั่วไปซึ่งเป็นระบบอัดไอ (mechanical vapor compression refrigeration system) แต่จะมีความแตกต่างกันคือ ปั๊มความร้อนถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการทำความร้อนโดยการเพิ่มความร้อนให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงเป็นหลัก แต่สามารถนำไปใช้ในระบบการทำความเย็นได้เช่นกัน

2.2 ประเภทของปั๊มความร้อน [2]

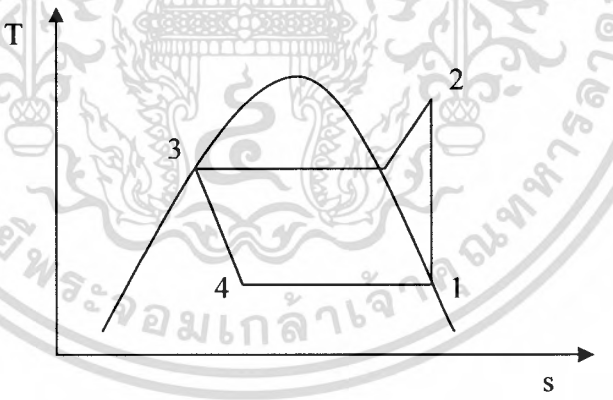
ปั๊มความร้อนแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.2.1 ปั๊มความร้อนชนิดวัฏจักรอัดไอ (vapor compression cycle heat pump) ใช้วิธีการส่งผ่านความร้อนจากการเปลี่ยนวัฏภาคของสารทำงาน ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการพื้นฐาน 4 หน่วย ดังรูปที่ 2.1 โดยสารทำงานภายในเครื่องระเหยได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ Q_L สารทำงานที่เป็นของเหลวจะกลายเป็นไอเข้าสู่เครื่องอัดไอโดยมีการเพิ่มงานให้แก่เครื่องอัดไอเพื่ออัดให้ไอของสารทำงานมีความดันสูงขึ้น ไอของสารทำงานที่มีความดันสูงจะเข้าสู่เครื่องควบแน่นและควบแน่นเป็นของเหลวโดยปลดปล่อยพลังงานออกสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง Q_H สารทำงานที่เป็นของเหลวไหลเข้าสู่วาล์วขยายตัว จากนั้นเข้าสู่เครื่องระเหยเพื่อรับความร้อนและระเหยกลายเป็นไอไหลวนในระบบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ ปรับปรุงจาก [2]



1 ⟶ 2 เครื่องอัดเชิงกลอัดไอแบบเอนโทรปีคงที่ให้มีความดันและอุณหภูมิสูง

2 ⟶ 3 ของเหลวอิ่มตัวออกจากเครื่องควบแน่นหลังจากคายความร้อนที่อุณหภูมิสูงและความดันสูง

3 ⟶ 4 ของเหลวอิ่มตัวขยายตัวผ่านวาล์วแบบเอนทราลปีคงที่กลายเป็นของเหลวผสมไอ

4 ⟶ 1 ของผสมระหว่างของเหลวและไอดูดความร้อนที่อุณหภูมิและความดันต่ำจากเครื่องระเหยกลายเป็นไออิ่มตัว

รูปที่ 2. 2 แผนภาพอุณหภูมิ – เอนโทรปีของวัฏจักรจริงแบบผันกลับไม่ได้ของแรงกิน ปรับปรุงจาก [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปั๊มความร้อนทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนปริมาณที่ต้องการให้กับกระบวนการที่ต้องการความร้อน ประสิทธิภาพของปั๊มความร้อนสามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (coefficient of performance) และประสิทธิภาพความร้อน (thermal efficiency) ดังสมการ

$$COP = \frac{Q_H}{W} \tag{2.1}$$

$$\eta = \frac{Q_H}{Q_L} \tag{2.2}$$

ประสิทธิภาพสูงสุดของวัฏจักรใดๆ คิดได้จาก ประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนต์ ซึ่งมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำและแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงเท่านั้น

$$COP_{ideal} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \tag{2.3}$$

2.2.2 ปั๊มความร้อนชนิดดูดซับ (sorption-type heat pump) ปั๊มความร้อนชนิดอัดไอ ต้องให้งานกับเครื่องอัด เพื่ออัดไอของของไหลทำงานให้มีความดันสูงซึ่งปริมาณงานสามารถลดลงได้โดยเปลี่ยนไปอัดของเหลวแทน ทั้งนี้เพราะของเหลวมีความหนาแน่นสูงกว่าไอมากจึงต้องการงานน้อยกว่า ในทางปฏิบัติหลักการลดงานดังกล่าวสามารถทำได้โดยการแทนเครื่องอัดด้วยหอดูดซับ (absorber หรือ resorber) และหอคายซับ (desorber หรือ generator หรือ strip) กระบวนการใหม่นี้ต้องอาศัยของเหลวเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งชนิด เรียกว่า ของไหลดูดกลืน (absorbent) ของไหลดูดกลืนจะทำหน้าที่ดูดไอสารของไหลทำงานให้อยู่ในวัฏภาคของเหลว ตัวอย่างคู่สาร เช่น แอมโมเนียกับน้ำ ลิเทียมโบรไมด์กับน้ำ เป็นต้น

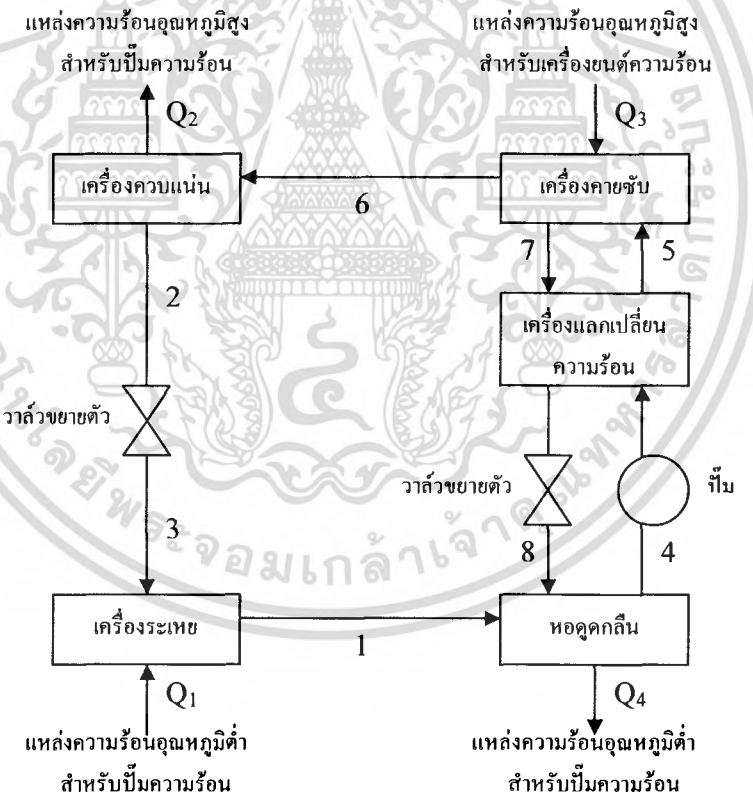
$$solvent_{liq}(xG) \xrightarrow{endothermic} solvent_{liq}(yG) + (x+y)G_{gas} \tag{2.4}$$

$$solvent_{liq}(yG) + (x+y)G_{gas} \xrightarrow{exothermic} solvent_{liq}(xG) \tag{2.5}$$

ไอของของไหลทำงานออกจากเครื่องระเหย (ภาวะ1) เข้าสู่หอดูดกลืนเพื่อเปลี่ยนสภาพเป็นสารละลายของเหลวเข้มข้น (rich/strong solution) ดังนั้นน้ำหล่อเย็นต้องหมุนเวียนผ่านหอดูดกลืนเพื่อรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

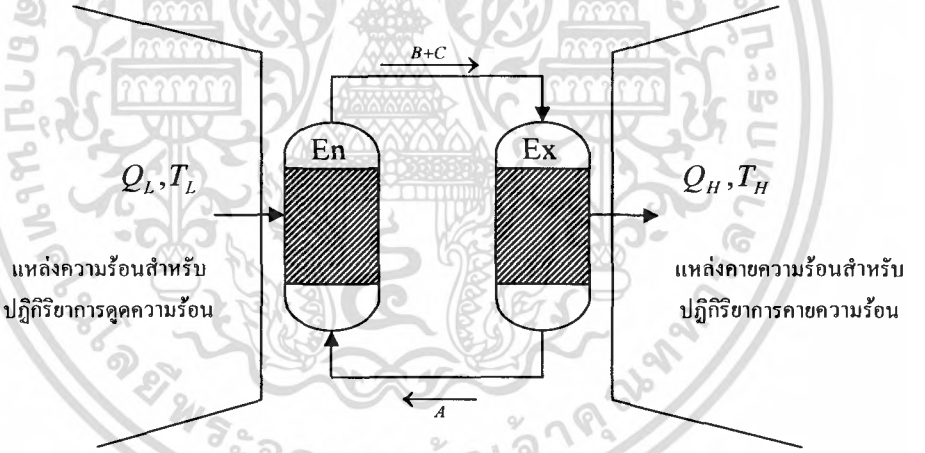
อุณหภูมิให้คงที่ อุณหภูมิของไหลดูดกลืนต้องรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำเท่าที่จะเป็นไปได้ เนื่องจากปริมาณของไหลดูดกลืนจะลดลงขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น สารละลาย (ภาวะ 4) ถูกอัดโดยเครื่องสูบไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิของสารละลายเจือจาง (weak solution) ที่จะไหลกลับ (ภาวะ 7) เข้าหอดูดกลืน และในขณะเดียวกันจะเพิ่มอุณหภูมิของเหลวที่ไหลเข้าหอดูดซับ (ภาวะ 5) เพื่อดูดความร้อนไล่ไอของของไหลทำงานออกจากสารละลาย สารละลายเจือจางจะไหลผ่านวาล์วกลับเข้าหอดูดกลืน (ภาวะ 8) ไอบริสุทธิ์ของของไหลทำงานไหล (ภาวะ 6) เข้าสู่เครื่องควบแน่นคายความร้อนกลายเป็นของเหลวอิ่มตัว (ภาวะ 2) และไหลผ่านวาล์วลดความดัน (ภาวะ 3) ได้ไอผสมของเหลวไหลเข้าเครื่องระเหยเพื่อดูดความร้อนต่อไปเป็นอันครบวัฏจักร สรุปได้ว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นคือการควบแน่นที่ความดันคงที่ การขยายตัวแบบเอนโทรปีคงที่ การระเหยที่ความดันคงที่เป็นของไหลทำงานความร้อนยวดยิ่ง การคายซับ (desorption) ที่ความดันคงที่ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2. 3 ปั๊มความร้อนชนิดดูดกลืน ปรับปรุงจาก [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ปั๊มความร้อนพลังงานเคมี (chemical heat pump หรือ chemical heat transformer) เป็นปั๊มความร้อนชนิดหนึ่งซึ่งใช้ความร้อนจากปฏิกิริยาผันกลับได้ โดยใช้สารเคมีหรือสารทำงาน (working fluid) ที่เหมาะสมไหลวนอยู่ในกระบวนการระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน และเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน โดยปั๊มความร้อนชนิดนี้อาศัยหลักการทำงานของปฏิกิริยาเคมีเป็นสำคัญโดยจะดูดซับพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ และปล่อยพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิสูงโดยใช้งานเพียงเล็กน้อยในการขับเคลื่อน รูปที่ 2.4 แสดงถึงแผนภาพการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ซึ่งประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน และเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน โดยความร้อนเหลือทิ้งอุณหภูมิต่ำจะถูกดูดซับที่เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนในการสลายตั้งต้น A เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ B และ C โดยดูดซับความร้อนปริมาณ Q_L ที่อุณหภูมิ T_L จากนั้นผลิตภัณฑ์ B และ C จะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนที่อุณหภูมิ T_H โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นที่เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนจะกลายเป็นสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ขณะเกิดปฏิกิริยาจะปล่อยความร้อนปริมาณ Q_H ออกมาแล้วไหลวนอยู่ในกระบวนการอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา



รูปที่ 2.4 แผนภาพปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ปรับปรุงจาก [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีสามารถแบ่งได้ ดังนี้

1. กระบวนการของแข็ง/แก๊ส (solid/gas combination) โดยเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีผันกลับได้ในรูปของของแข็งและแก๊ส ในกระบวนการประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ของแข็ง-แก๊สที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องควบแน่นหรือเครื่องระเหย ในเครื่องปฏิกรณ์จะบรรจุของแข็งที่ใช้ในการดูดซับ (dry adsorbent) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับแก๊สหรือไอกลายเป็นของเหลวแล้วปล่อยความร้อนออกมา ดังสมการปฏิกิริยาเคมีที่ 2.6

$$\text{dry adsorbent} + \text{vapor} \Leftrightarrow \text{wet adsorbent} + \text{heat} \qquad (2.6)$$

เช่น ระบบเกลืออนินทรีย์/แอมโมเนีย แคลเซียมคลอไรด์/เมทานอล คิวปริกออกไซด์/คิวปรัสออกไซด์ เป็นต้น

2. กระบวนการของเหลว/แก๊ส (liquid/gas combination) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในรูปของของเหลวและแก๊สบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมไหลวนในกระบวนการวัฏจักรปิด เช่น ระบบไอโซโพรพานอล/อะซีโตน/ไฮโดรเจน ไอโซบิวทีน/น้ำ/เตตระบิวทานอล ไซโคลเฮกเซน/เบนซีน/ไฮโดรเจน เป็นต้น

2.3 วิธีการเลือกปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

ในระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ปฏิกิริยาเคมีแบบผันกลับได้เป็นส่วนสำคัญในการกำหนดขอบเขตของคู่สารทำงาน (working pair) ซึ่งอาจเป็นระบบของแข็ง/แก๊ส หรือระบบของเหลว/แก๊ส ซึ่งการเลือกสารทำงานของทั้งสองระบบนี้แตกต่างกัน เนื่องจากมีธรรมชาติของปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

โดยวิธีการพื้นฐานในการเลือกสารทำงานไม่แตกต่างกันมากนัก ได้ให้ข้อสังเกตในการเลือกสารทำงานให้เหมาะสมได้ดังนี้

1. สำรวจความเป็นไปได้ของสารทำงานที่จะใช้
2. เลือกสารทำงานให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการใช้
3. คำนวณสมบัติทางกายภาพทางอุณหพลศาสตร์ของสารเคมีที่จะใช้
4. วิเคราะห์ความเหมาะสมของสารที่จะใช้กับอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการและความปลอดภัย

ข้อสำคัญพื้นฐานที่เป็นข้อควรพิจารณาในการเลือกสารทำงาน ได้แก่ สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา สมบัติทางกายภาพของสาร ฯลฯ และปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาในระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ได้แก่ ความร้อนของปฏิกิริยา แหล่งเก็บพลังงาน อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนและเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่สนใจ ธรรมชาติของปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยา เสถียรภาพของสาร ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น เมื่อได้สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ หลังจากนั้นควรคำนึงถึงสารทำงานที่จะใช้ในปั๊มความร้อนพลังงานเคมีในการที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการเพิ่มคุณภาพของพลังงาน ดังนี้

1. ปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ โดยปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในระบบจะต้องเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ และไม่มีปฏิกิริยาข้างเคียงที่จะใช้ได้ในระยะเวลานาน โดยผลิตภัณฑ์ของเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนจะต้องใช้เป็นสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน และในทางกลับกันผลิตภัณฑ์ของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน จะต้องเป็นสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน โดยปฏิกิริยาชนิดผันกลับได้เกิดขึ้นต้องมีค่าใช้จ่ายไม่มากจนเกินไป แต่ถ้าปฏิกิริยาที่ใช้มีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นที่จะไปรบกวนปฏิกิริยาหลักของระบบต้องมีวิธีการกำจัดผลพลอยได้นั้นออกไป นอกจากนั้นถ้าปฏิกิยาไม่สามารถผันกลับได้ ก็จะไม่สามารถดำเนินการปั๊มความร้อนพลังงานเคมีได้ด้วยเช่นกัน

2. อุณหภูมิเทิร์นนิง (turning temperature) และทิศทางของปฏิกิริยา อุณหภูมิเทิร์นนิง เป็นอุณหภูมิของปฏิกิริยา ซึ่งทำนายได้จากพลังงานเสรีของกิบส์ (Gibbs free energy) ที่อุณหภูมิใดๆ

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \tag{2.7}$$

K= ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาในเทอมของแอคทิวิตี

ซึ่งจะบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยามีค่าเป็นบวก ลบ หรือศูนย์ โดยพลังงานเสรีของกิบส์จะบอกถึงทิศทางของปฏิกิริยา เช่น ที่อุณหภูมิเทิร์นนิงพลังงานเสรีของกิบส์มีค่าเป็นศูนย์ หมายความว่าปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเทิร์นนิงพลังงานเสรีของกิบส์มีค่าเป็นบวก หมายความว่า ปฏิกิริยาไม่สามารถดำเนินไปได้ถ้าปราศจากพลังงานที่ใส่เข้ามาในระบบ และที่ช่วงอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเทิร์นนิงพลังงานเสรีของกิบส์มีค่าเป็นลบ หมายความว่า ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้เอง กรณีพิจารณาที่ความดันต่ำ แก๊สเป็นอุดมคติ สามารถพิจารณาค่าคงที่สมดุลในรูปของความดันย่อย แสดงได้ดังสมการ

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.7 และ 2.8

$$-RT\ln K = \Delta H° - T\Delta S° \tag{2.9}$$

$$T = \frac{\Delta H°}{\Delta S° - R\ln K} \tag{2.10}$$

$$\Delta H° = \Delta H°_{T_1} + \int_{T_1}^{T} C_p dT \tag{2.11}$$

$$\Delta S° = \Delta S°_{T_1} + \int_{T_1}^{T} C_p dT \tag{2.12}$$

T_1 = อุณหภูมิอ้างอิง

แทนสมการที่ 2.11 และ 2.12 ในสมการที่ 2.10

$$T = \frac{\Delta H°_{T_1} + \int_{T_1}^{T} C_p dT}{\Delta S°_{T_1} + \int_{T_1}^{T} \frac{C_p dT}{T} - R\ln K} \tag{2.13}$$

สมมติให้ C_p เปลี่ยนแปลงไม่มาก

$$T = \frac{\Delta H°}{\Delta S° - R\ln K} \tag{2.14}$$

เมื่อ $K = 1$ ได้

$$T = \frac{\Delta H°}{\Delta S°} \tag{2.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนจำเป็นต้องใส่พลังงานความร้อนเข้าไปเพื่อให้เกิดการดูดซับพลังงาน ในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน พลังงานความร้อนจะถูกปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งปฏิกิริยาดูดความร้อนจะต้องมีอุณหภูมิของปฏิกิริยาน้อยกว่าอุณหภูมิเทิร์นนิง และปฏิกิริยาคายความร้อนจะต้องมีอุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงกว่าอุณหภูมิเทิร์นนิง

3. ความร้อนโมลาร์ของปฏิกิริยา และปริมาตรโมลาร์ (molar heat of reaction and molar volume) ระบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมี เป็นระบบที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงทางพลังงานของปฏิกิริยาเคมี ซึ่งถ้าให้ปฏิกิริยาเคมีเป็นระบบที่มีความคุมค่าทางเศรษฐศาสตร์แล้วนั้น ค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมีต่อหน่วยปริมาตรควรมีค่ามาก ซึ่งค่าปริมาตรโมลาร์น้อยๆ นั้นแสดงถึงขนาดที่น้อยที่สุดของระบบที่ควรจะเป็น

4. อัตราการเกิดปฏิกิริยา ลักษณะของปฏิกิริยาเคมีควรจะเกิดได้เร็ว เมื่อมีพลังงานที่ดูดซับจากระดับอุณหภูมิต่ำมากพอ และปล่อยพลังงานในระดับอุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจำเป็นต้องมีพลังงานกระตุ้นในระดับต่ำ หรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยา

ตามทฤษฎีการชน (collision theory) โมเลกุลของสารจะเกิดการชนกันอย่างเหมาะสมเพื่อเกิดปฏิกิริยาเคมี ถ้าพลังงานของโมเลกุลขณะชนน้อยกว่าค่าพลังงานกระตุ้นปฏิกิริยาปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดได้ แต่ถ้าพลังงานของโมเลกุลขณะชนมากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานกระตุ้นปฏิกิริยาปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ เพื่อให้ได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงๆจึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาโดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นเท่านั้น แต่ไม่ทำให้สมดุลเปลี่ยนไป ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรมีความว่องไวสูง และค่าการเกิดที่ดี

5. ปัจจัยอื่นๆ ได้แก่

- สมบัติการส่งถ่ายความร้อน ค่าการนำความร้อน และค่าความหนืด การส่งถ่ายความร้อนเป็นสมบัติที่สำคัญซึ่งค่าการนำความร้อนและค่าความจุความร้อนควรมีค่ามาก ขณะที่ความหนืดของสารควรมีค่าน้อย
- ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม และความปลอดภัย ทั้งทางด้านความเป็นพิษและระดับความไวไฟ
- การกัดกร่อน สารเคมีที่ใช้ไม่ควรเกิดการกัดกร่อน
- เสถียรภาพ สารที่ใช้ควรมีค่าความร้อนคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ
- สารที่ใช้ควรหาได้ง่าย และราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (low temperature heat sources) [2]

ความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ มีความสำคัญเปรียบได้กับแหล่งวัตถุดิบสำหรับปั๊มความร้อน แบ่งได้ 2 ประเภท คือ แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำตามธรรมชาติ และที่ไม่ได้มาจากธรรมชาติ

2.4.1 แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำตามธรรมชาติ (the natural temperature heat sources)

1. อากาศ (atmospheric air) นิยมใช้กับปั๊มความร้อนความร้อนขนาดเล็ก ข้อดี คือ หาง่าย ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุณหภูมิต่ำ แต่มีข้อเสีย คือ ความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิ

2. น้ำผิวดิน (surface water) ดูดซับพลังงานความร้อนจากอากาศ และดิน ได้แก่ แม่น้ำ ทะเลสาบ ใช้กับปั๊มความร้อนขนาดใหญ่จึงจะคุ้มค่า เพราะค่าใช้จ่ายในการนำน้ำมาใช้สูง และน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามฤดูกาล

3. น้ำใต้ดิน (underground water) ดูดซับพลังงานความร้อนโดยตรงจากดิน เหมาะกับปั๊มความร้อนขนาดเล็ก มีอุณหภูมิและปริมาณความร้อนสม่ำเสมอ นำมาใช้ได้ง่าย

4. ดิน (soil) สะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ และอากาศที่อยู่ชั้นบนของผิวดินที่ความลึกประมาณ 10 เมตร มีค่าใช้จ่ายสูง นิยมขุดลงไปที่ความลึกประมาณ 10 - 15เมตร

5. พลังงานแสงอาทิตย์ (solar energy) พลังงานแสงอาทิตย์ที่มาถึงบรรยากาศของโลกมีฟลักซ์ความหนาแน่นของพลังงานที่พื้นผิว (the surface density energy flux) ประมาณ 1.38 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามสภาพภูมิอากาศ ฟลักซ์ความหนาแน่นของพลังงานที่ได้จากแผงรับแสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 0.12 – 0.50 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งถ้าปั๊มความร้อนที่ต้องการความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 15 กิโลวัตต์ จะต้องใช้แผงรับแสงอาทิตย์ขนาดหลายตารางเมตร

2.4.2 แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่ไม่ได้มาจากธรรมชาติ (artificial low temperature heat sources) เป็นแหล่งความร้อนจากกระบวนการอุตสาหกรรม ซึ่งพลังงานที่เหลือจากการใช้งานแล้ว หรือความร้อนเหลือทิ้ง (waste heat) เป็นพลังงานความร้อนที่มีอยู่ในอากาศ แก๊ส และน้ำ หรือของเหลวอื่นที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง ซึ่งมีภาวะและสมบัติแตกต่างกันตามชนิดของกระบวนการ มักจำแนกตามระดับอุณหภูมิออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

- กลุ่มอุณหภูมิสูง มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 600 – 1,000 องศาเซลเซียส
- กลุ่มอุณหภูมิปานกลาง มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 200 – 600 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กลุ่มอุณหภูมิต่ำ มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 35 – 200 องศาเซลเซียส

เนื่องด้วยอุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่สูงกว่าความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำตามธรรมชาติจึงเหมาะที่จะเป็นแหล่งความร้อนให้กับปั๊มความร้อน โดยแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงพอแล้วอาจนำมาใช้ได้เลยโดยไม่ต้องผ่านปั๊มความร้อน

2.4.3 การเลือกชนิดของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ต้องคำถึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ตำแหน่งของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำควรอยู่ใกล้เคียงกับจุดที่จะนำความร้อนอุณหภูมิสูงที่ได้จากปั๊มความร้อนมาใช้ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ และการขนส่ง

2. สมบัติการกัดกร่อนของสาร เช่น น้ำทะเล น้ำบาดาล ไอที่มีส่วนผสมของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ควรนำมาพิจารณาเพื่อเลือกวัสดุอุปกรณ์ที่ทนทานต่อการกัดกร่อน

3. ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ และปริมาณความร้อนของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำซึ่งจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน โดยแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำจากธรรมชาติส่วนมากอุณหภูมิ และปริมาณเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เช่น อากาศ ในขณะที่แหล่งความร้อนจากน้ำบาดาล ดิน และแม่น้ำ จะเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าแหล่งความร้อนคุณภาพต่ำจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งอุณหภูมิและปริมาณความร้อนจะขึ้นอยู่กับกระบวนการใช้

4. ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ และค่าดำเนินกระบวนการนำความร้อนเข้าสู่ปั๊มความร้อน ส่วนสำคัญเป็นราคาของพลังงานที่ใช้ขับปั๊ม และพัดลม โดยค่าใช้จ่ายสูงสุดมาจากน้ำบาดาล (deep drilling) รองลงมา คือ พลังงานแสงอาทิตย์ ดิน น้ำจากบ่อน้ำ และอากาศ ตามลำดับ

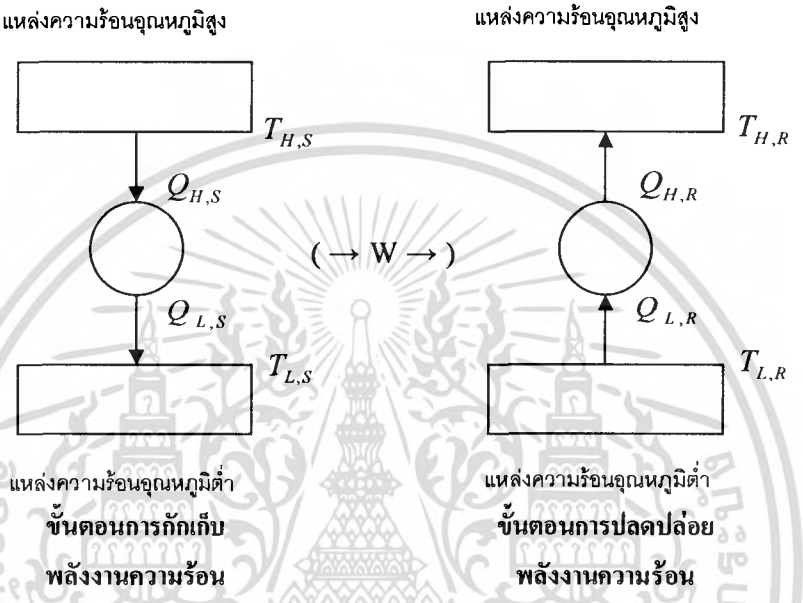
2.5 การทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

รูปที่ 2.5 แสดงการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี โดยเปรียบเทียบระหว่างการทำงานในขั้นตอนการกักเก็บและการปลดปล่อยพลังงานความร้อน ปั๊มความร้อนโดยทั่วไปจะปลดปล่อยพลังงานความร้อนอุณหภูมิสูง $Q_{H,R}$ ที่อุณหภูมิ $T_{H,R}$ โดยมีการให้งานแก่ระบบเพื่อทำให้สารทำงานควบแน่นและปลดปล่อยความร้อนออกมา แต่ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีใช้งาน เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ขั้นตอนการกักเก็บพลังงานความร้อน ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีจะดูดซับพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน และกักเก็บพลังงานความร้อนที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการปลดปล่อยพลังงานความร้อน ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีจะดูดซับพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน และปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง ซึ่งการปลดปล่อยพลังงานความร้อนนี้เกิดจากการคายความร้อนของการทำปฏิกิริยาผันกลับของสารเคมีในระบบ [1]



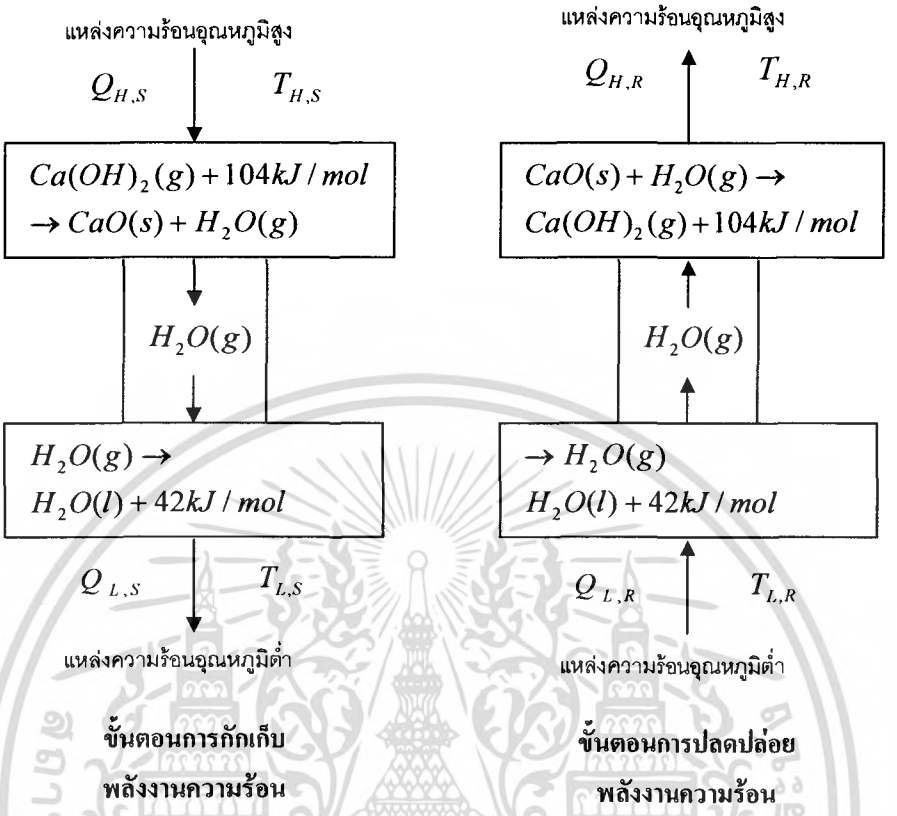
รูปที่ 2.5 การทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีในขั้นตอนการกักเก็บและการปลดปล่อยความร้อน ปรับปรุงจาก [1]

2.5.1 การทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์และปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [1]

รูปที่ 2.6 แสดงการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ใช้การเกิดปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ระหว่างแคลเซียมออกไซด์และไอน้ำ ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีเป็นระบบปิดประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนและเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนที่เชื่อมต่อกัน โดยเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนซึ่งตั้งอยู่ในแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์และปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนซึ่งตั้งอยู่ในแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ใช้สำหรับการระเหยและการควบแน่นของน้ำ โดยปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์และปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้ สามารถทำงานได้ทั้งการกักเก็บและการปลดปล่อยพลังงานความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.6 การทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ใช้แคลเซียมออกไซด์ และน้ำในการทำปฏิกิริยา ปรับปรุงจาก [1]

ในขั้นตอนการกักเก็บความร้อน พลังงานความร้อน $Q_{H,S}$ จะถูกดูดซับและทำให้เกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีสถานะเป็นของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนที่อุณหภูมิ $T_{H,S}$ ได้เป็นแคลเซียมออกไซด์และไอน้ำ พลังงานความร้อนที่ถูกดูดซับจะถูกเก็บในรูปของความร้อนพลังงานเคมีโดยแคลเซียมออกไซด์ ไอน้ำที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ภายในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนจะไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน เนื่องจากความแตกต่างของความดันระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองเครื่อง ไอน้ำจะควบแน่นและปลดปล่อยความร้อน $Q_{L,S}$ ที่อุณหภูมิ $T_{L,S}$ และเมื่อใดก็ตามที่แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ยังไม่ทำปฏิกิริยากับไอน้ำ พลังงานความร้อนที่ถูกดูดซับก็สามารถเก็บไว้ได้เป็นระยะเวลานานในรูปของพลังงานความร้อนทางเคมี

ในขั้นตอนการปลดปล่อยพลังงานความร้อน ไอน้ำจะไหลจากเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน เนื่องจากความแตกต่างของความดันระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
83192

และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อนและปลดปล่อยพลังงานความร้อน $Q_{H,R}$ ที่อุณหภูมิสูง $T_{H,R}$

2.6 ข้อดีของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี [2]

1. ความร้อนจากปฏิกิริยามีค่ามากกว่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและการควบแน่น ทำให้ความร้อนที่ได้มีอุณหภูมิสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปั๊มความร้อนชนิดอัดไอซึ่งความร้อนที่ได้มีอุณหภูมิต่ำเกินไปสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่
2. สามารถเลือกอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้ตามต้องการด้วยการเลือกปฏิกิริยาที่เหมาะสม
3. สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้อยู่ในรูปพลังงานเคมี มีความเป็นไปได้ในการเก็บพลังงานโดยปราศจากความร้อนสูญเสียเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ
4. ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีสามารถทำงานได้โดยใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าปั๊มความร้อนชนิดอื่น

2.7 ข้อเสียของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

1. ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ถ้าสารเคมีที่ใช้มีความเป็นพิษ
2. เกิดปฏิกิริยาผันกลับที่ไม่สมบูรณ์ ถ้าสารเคมีที่ใช้ไม่มีความบริสุทธิ์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาผันกลับไม่สูงพอ

2.8 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปั๊มความร้อนพลังงานเคมี เป็นปั๊มความร้อนชนิดหนึ่งซึ่งใช้ความร้อนจากปฏิกิริยาผันกลับได้ของสารเคมีหรือสารทำงานที่เหมาะสมไหลวนอยู่ในกระบวนการระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนและเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปั๊มความร้อนชนิดนี้สามารถทำงานได้ 2 ระบบ ทั้งระบบทำความเย็นและระบบทำความร้อน โดยอาศัยการหลักการทำงานของปฏิกิริยาเคมีเป็นสำคัญ ซึ่งระบบทำความเย็นจะใช้หลักการดูดซับพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำ และการคายซับพลังงานความร้อนที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงโดยใช้งานเพียงเล็กน้อยในการขับเคลื่อน มีงานวิจัยที่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำความร้อนจากความร้อนเหลือทิ้ง หรือจากแสงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิระหว่าง 40 - 95องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทำความเย็นห้องขนาดเล็กได้ [4] ซึ่งระบบนี้ถูกออกแบบให้ใช้สารเคมีที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ ปั๊มความร้อนพลังงานเคมียังมีหน้าที่ผลิตพลังงานความร้อน เพื่อส่งให้กับแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง โดยอาศัยพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีผันกลับได้ ด้วยการดูดซับพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีผันกลับเพื่อคายความร้อนให้กับแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้ [1]

Ajah และคณะ [5] เปรียบเทียบปั๊มความร้อนเชิงกล ปั๊มความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ และปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งพบว่าปั๊มความร้อนพลังงานเคมีมีความเหมาะสมที่สุดในการทำมาใช้งาน เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (coefficient of performance) สูงที่สุด มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำและบำรุงรักษาง่าย แต่ปั๊มความร้อนพลังงานเคมีอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการนำสารเคมีที่เป็นพิษมาใช้ในการทำปฏิกิริยา ในขณะที่ปั๊มความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในประเทศเนเธอร์แลนด์ ซึ่งมีปริมาณแสงอาทิตย์ต่ำ นอกจากนี้ปั๊มความร้อนพลังงานเคมียังสามารถทำงานได้ในกรณีที่แหล่งพลังงานความร้อนมีอุณหภูมิต่ำมาก เช่น ความร้อนที่เหลือทิ้งที่อุณหภูมิ 25 – 30 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระหว่างปั๊มความร้อนเชิงกล ปั๊มความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์และปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ปรับปรุงจาก [5]

	Mechanical Heat Pump	Solar Heat Pump	Chemical Heat Pump
Performance	0.90	0.70	1.40
Operating costs	0.15 €/kWh	0.054 €/kWh	0.028 €/kWh
Reliability/maintainability	++	++	++
Operability	+	+	++
Durability	+	++	++
Safety	+	++	++
Sustainability	_	_	+
Technical status	++	++	+
Environmental impact	_	++	+

++ = ดีมาก + = ดี - = แย่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kato และคณะ [6] ได้ทำการทดสอบสมรรถนะทางความร้อน (thermal performance) ของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ใช้ปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์และน้ำ ภายใต้สภาวะการทำงานของปั๊มความร้อนที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บและนำความร้อนที่เหลือทิ้งจากไอเสียที่มีอุณหภูมิ 424 องศาเซลเซียส ของเครื่องยนต์ดีเซลกลับมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้แก่หม้อต้มไอน้ำ ซึ่งปั๊มความร้อนสามารถผลิตความร้อนได้ 627 กิโลวัตต์

Morquillas และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ จากการกักเก็บความร้อน โดยใช้วงจรการเกิดปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ของแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าความร้อนที่สามารถนำกลับมาได้ร้อยละ 69 จากเครื่องปฏิกรณ์ต้นแบบที่มีการหุ้มฉนวนและมีครีบเพื่อทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น สามารถทำให้น้ำที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส สูงขึ้นเป็น 55 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่า ความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาผันกลับ

Klinsoda และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาและพัฒนาหน่วยปฏิบัติการของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ใช้ระบบไอโซโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ภายในระบบ ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนและหอกลั่น หลังจากทำการศึกษาแล้ว ปัจจัยบางค่าได้ถูกเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของหน่วยปฏิบัติการ ทำให้อุณหภูมิของของเหลวสูงขึ้นจาก 95 องศาเซลเซียส เป็น 136 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบเป็นร้อยละ 27 และค่าการแปลงผัน (conversion) ร้อยละ 38

Ogura และคณะ [1] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีที่ใช้เกิดปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ของแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการกักเก็บความร้อน การทำความร้อนและการทำความเย็น พบว่าปั๊มความร้อนพลังงานชนิดนี้มีประสิทธิภาพมากกว่าปั๊มความร้อนชนิดอื่นในสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำและแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงต่างกันมากๆ และมีประสิทธิภาพสูงกว่าปั๊มความร้อนแบบดูดซับ ในระบบการทำความร้อนและการทำความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

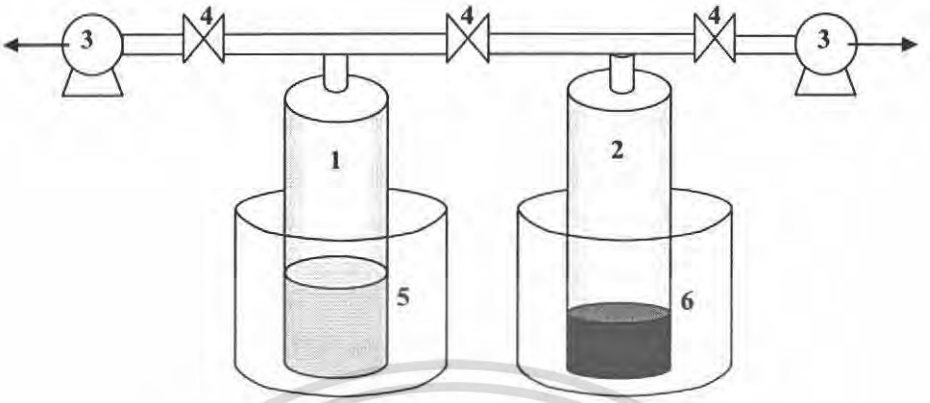
บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ชุดเครื่องปฏิกรณ์

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำไปยังแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีคือปฏิกิริยาการคายความร้อนของแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งแคลเซียมออกไซด์ที่นำมาใช้ต้องนำไปเผาที่อุณหภูมิ 519 องศาเซลเซียส [7] เพื่อเป็นการไล่น้ำที่อาจหลงเหลืออยู่ภายในแคลเซียมออกไซด์ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาเมื่อมีการนำมาใช้ ชุดเครื่องปฏิกรณ์มีอุปกรณ์หลักดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนจะถูกทำให้มีความดันลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศจนความดันคงที่ จากนั้นเปิดเครื่องทำความร้อนบริเวณแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำจนอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนดไว้เพื่อให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนทำให้เกิดไอน้ำขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ และเปิดเครื่องทำความร้อนบริเวณแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงเพื่อให้ความร้อนแก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงจนอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนดไว้ ลดความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนเพื่อให้ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ต่ำกว่าความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนจนความดันคงที่ จากนั้นเปิดวาล์วเพื่อให้ไอน้ำจากเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อนและคายความร้อนออกมา ทำให้แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน 2. เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน
3. ปั๊มสุญญากาศ 4. วาล์ว 5. แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ
6. แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง

รูปที่ 3.1 แผนภาพอย่างง่ายของชุดอุปกรณ์

3.1.2 ส่วนประกอบหลักของชุดเครื่องปฏิกรณ์

1. เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนใช้สำหรับการเกิดไอน้ำเพื่อนำไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้านอุณหภูมิสูง โดยเครื่องปฏิกรณ์นี้จะตั้งอยู่ในแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ภายในเครื่องปฏิกรณ์บรรจุน้ำที่ใช้ผลิตไอน้ำ เมื่อมีการลดความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศทำให้น้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์สามารถกลายเป็นไอได้โดยใช้ความร้อนที่ไม่สูงมากจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ

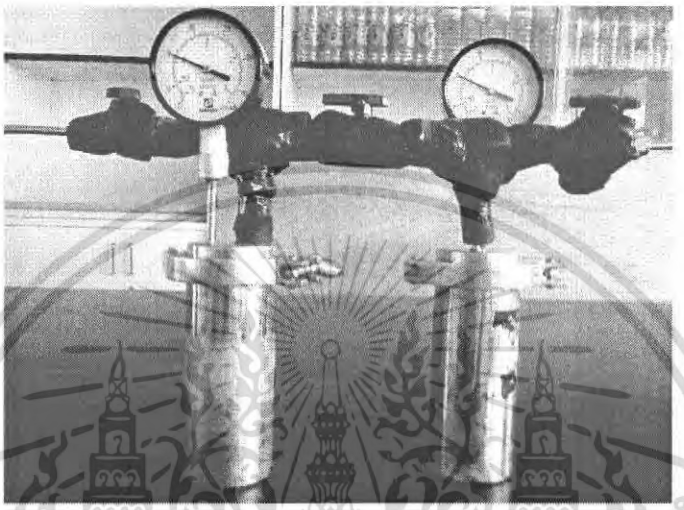
2. เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน เครื่องปฏิกรณ์จะตั้งอยู่ในแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง ภายในบรรจุแคลเซียมออกไซด์เพื่อใช้ทำปฏิกิริยากับน้ำและปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง

3. แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ทำหน้าที่ให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน โดยพลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนนี้ใช้ในการให้ความร้อนแก่น้ำในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนเพื่อผลิตไอน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน

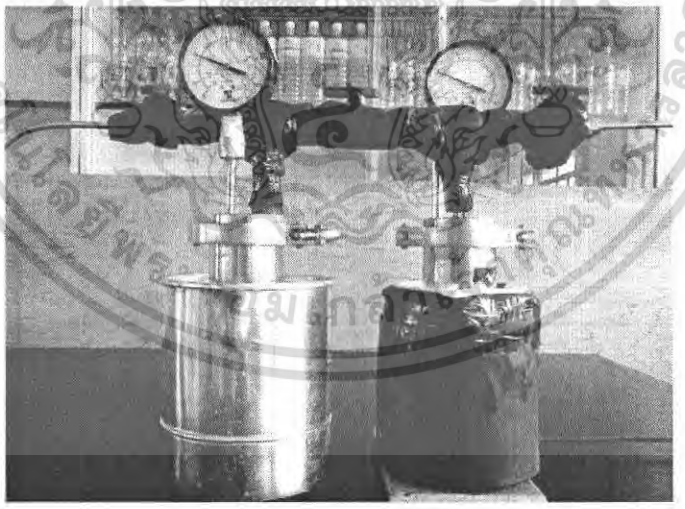
4. แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง ทำหน้าที่เป็นแหล่งความร้อนที่ใช้สำหรับรับพลังงานความร้อนที่ได้จากการปลดปล่อยความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ทำให้น้ำภายในแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงนี้มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ปั๊มสุญญากาศ เป็นอุปกรณ์ลดความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อให้มีความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ทำให้น้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนสามารถกลายเป็นไอได้เมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน (ซ้าย) และเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน (ขวา)



รูปที่ 3.3 แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่มีเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนตั้งอยู่ภายใน (ซ้าย) และแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงที่มีเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนตั้งอยู่ภายใน (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

3.2.1 แคลเซียมออกไซด์ (ศึกษาภัณฑ์พาณิชย์)

3.2.2 น้ำ

3.3 วิธีการทดลอง

ในการออกแบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมีระดับห้องปฏิบัติการ ได้ทำการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.3.1 การศึกษาอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ที่มีผลต่อปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ซึ่งมีการดำเนินการทดลองดังนี้

ก. การเตรียมแคลเซียมออกไซด์

แคลเซียมออกไซด์ที่นำใช้ในการทดลองอาจมีความบริสุทธิ์ไม่เพียงพอ เนื่องจากอาจทำปฏิกิริยากับน้ำในอากาศเกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยากับไอน้ำจากเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน ดังนั้นก่อนทำการทดลองต้องนำแคลเซียมออกไซด์ไปเผาที่อุณหภูมิ 519 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการกำจัดน้ำออกทำให้แคลเซียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้

ข. การทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์

1. บรรจุน้ำลงในแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง 50 มิลลิลิตร แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 1250 มิลลิลิตร และเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน 10 มิลลิลิตร

2. บรรจุแคลเซียมออกไซด์ที่เผาแล้วลงในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน 10 กรัม

3. ลดความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน และเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศโดยใช้ปั๊มสุญญากาศเป็นเวลา 2 นาที

4. ตั้งอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง 85 องศาเซลเซียส และแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 80 องศาเซลเซียส ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำและกลายเป็นไอน้ำ

5. ให้ความร้อนแก่แหล่งความร้อนทั้งสองต่อไป รอจนความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนทั้งสองคงที่ ณ อุณหภูมิที่ต้องการ โดยอ่านอุณหภูมิจากตัวควบคุม ปิดเครื่องทำความร้อนของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เปิดวาล์วให้ไอน้ำจากเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนเพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ที่บรรจุอยู่ภายใน

7. การวิเคราะห์ผลการทดลองนำผลที่ได้จากการทดลองมาทำการคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

8. ทำการทดลอง 1-7 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่ทำการทดลองเป็น 70 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.3.2 การศึกษาปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ ที่มีผลต่อปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ซึ่งมีการดำเนินการทดลองดังนี้

ก. เตรียมแคลเซียมออกไซด์

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.1 ตอน ก

ข. การทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 3.3.1 ตอน ข ข้อ 1-7 แต่เปลี่ยนปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่ทำการทดลองเป็น 10, 20 และ 30 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำต่อการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

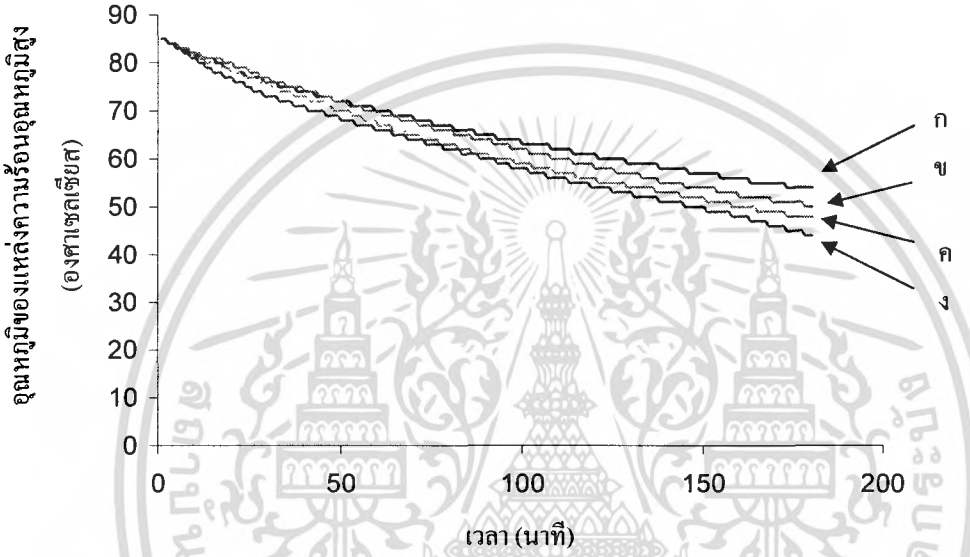
จากการดำเนินการทดลองที่ 3.3.1 เมื่อทำการปิดเครื่องทำความร้อนของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง และเปิดวาล์วให้ไอน้ำจากเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนเพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ที่บรรจุอยู่ภายใน อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงจาก 85 องศาเซลเซียส จะเกิดการถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมทำให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงจะค่อยลดลงมาเรื่อย ซึ่งเป็นไปดังรูปที่ 4.1 เป็นอุณหภูมิที่เวลาต่างๆของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง

จากรูปที่ 4.1 เมื่อไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน พบว่า อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเกิดจากการสูญเสียความร้อนแก่สิ่งแวดล้อม แต่เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนและทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำต่างๆ คือ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงจะลดลงน้อยกว่าการทดลองที่ไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ลงไปที่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ณ เวลาเดียวกัน เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ได้บรรจุแคลเซียมออกไซด์ลงไปไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น จึงไม่มีพลังงานความร้อนถ่ายเทให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง และเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น มีพลังงานความร้อนถ่ายเทให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง ทำให้น้ำภายในแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงมีการลดลงของอุณหภูมิต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์

แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะมีการลดลงของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่อุณหภูมิ 70 และ 60 องศาเซลเซียส ณ เวลาเดียวกัน เนื่องจากอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำมีผลต่อการเกิดไอน้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน ถ้ามีไอน้ำมากจะเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำกับแคลเซียมออกไซด์ได้มากขึ้นคายพลังงานความร้อนให้แก่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงมากขึ้น ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสมีไอน้ำเกิดมากที่สุด และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสมีไอน้ำเกิดน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ และประสิทธิ์ภาพทางความร้อน จะได้ผลของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำต่อการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ดังตารางที่ 4.1 โดยคำนวณตั้งแต่นาทีที่ 0 ถึงนาทีที่ 12 เนื่องจากเวลาในช่วงนี้เป็นเวลาที่น้อยที่สุดที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงสูงกว่าแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.1 การลดลงของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงที่มีเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม
ก – 80 องศาเซลเซียส ข -70 องศาเซลเซียส ค - 60 องศาเซลเซียส
ง -ไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 80 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 4.1 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำสูงขึ้น เนื่องจากมีไอน้ำในการทำปฏิกิริยามาก ทำให้แคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์มาก

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะและประสิทธิภาพทางความร้อนมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำสูงขึ้น ทำให้มีพลังงานความร้อนที่ได้รับจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำและแคลเซียมออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนสูงขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำต่อการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ (กรัม)	ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ที่บรรจุ 10 กรัม	ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)	ประสิทธิภาพทางความร้อน (η)
60	85	10	12.6	0.32	0.0089
70	85	10	35.2	0.89	0.0248
80	85	10	56.5	1.43	0.0399

4.2 ผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่อการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

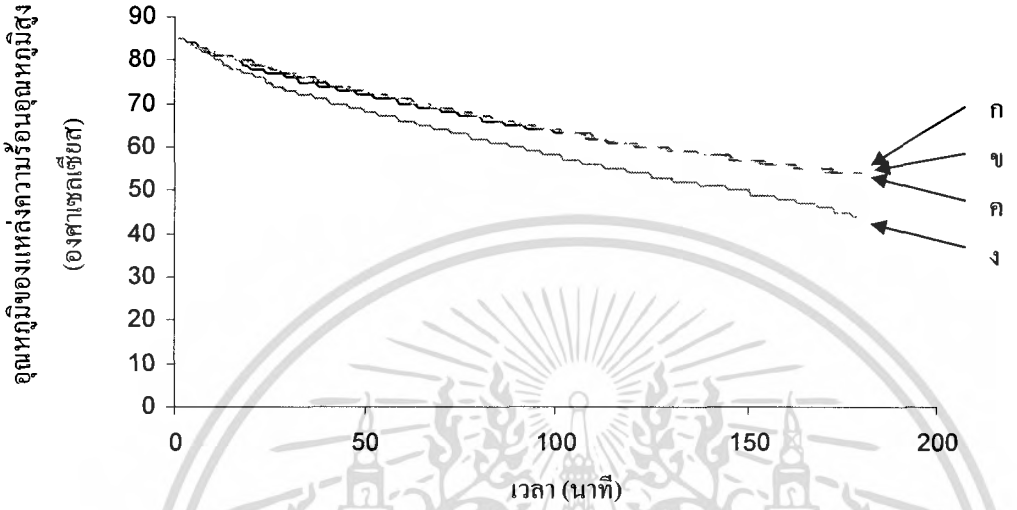
จากการดำเนินการทดลองที่ 3.3.2 เมื่อทำการปิดเครื่องทำความร้อนของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง และเปิดวาล์วให้ไอน้ำจากเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนเพื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์ที่บรรจุอยู่ภายใน อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงจาก 85 องศาเซลเซียส จะเกิดการถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมทำให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงจะค่อยลดลงมาเรื่อย ซึ่งเป็นไปดังรูปที่ 4.2 เป็นอุณหภูมิที่เวลาต่างๆของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าเมื่อทำการทดลองที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ตามปริมาณที่กำหนดไว้ คือ 10, 20 และ 30 กรัม อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงจะลดลงน้อยกว่าการทดลองที่ไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ลงไปที่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ณ เวลาเดียวกัน เนื่องจากมีพลังงานความร้อนที่ได้รับจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำและแคลเซียมออกไซด์ และมีการลดลงของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงใกล้เคียงกัน แม้ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์จะต่างกัน เนื่องจากปริมาณไอน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีปริมาณคงที่ เมื่อปริมาณของแคลเซียมออกไซด์สูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาคำนวณการเปลี่ยนแปลงโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ และประสิทธิภาพทางความร้อน จะได้ผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่อการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ดังตารางที่ 4.2 โดยคำนวณตั้งแต่นาทีที่ 0 ถึงนาทีที่ 12 เนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาในช่วงนี้เป็นเวลาที่น้อยที่สุดที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงสูงกว่าแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.2 การลดลงของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงที่มีเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนที่ปริมาณต่างๆของแคลเซียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง 80 และ 85 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ก - 10 กรัม ข - 20 กรัม ค - 30 กรัม ง - ไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์

จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูงขึ้น น้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยามีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับไอน้ำในปริมาณที่เท่ากัน เมื่อปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่มากขึ้นจึงไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เพราะปริมาณไอน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีปริมาณเท่าเดิม

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะและประสิทธิภาพทางความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณของแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากพลังงานความร้อนที่น้ำภายในแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้รับจากเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนมีค่าเท่ากัน

จากการทดลองของ Ajah [5] พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีซึ่งไม่ได้ระบุสารทำงานที่ใช้ในการทดลองมีค่า 1.40 และจากการทดลองของ Ogura [1] พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดแคลเซียมออกไซด์/แคลเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 1.69 - 2.51 จากการทดลองของโครงงานนี้ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะประมาณ 1.43 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองของ Ajah และOgura

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่อการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง (องศาเซลเซียส)	น้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ (กรัม)	น้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยา (กรัม)	ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP)	ประสิทธิภาพทางความร้อน (η)
80	85	10	5.7	1.43	0.0399
80	85	20	5.8	1.46	0.0408
80	85	30	5.6	1.38	0.0386

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองปั๊มความร้อนพลังงานเคมีระดับห้องปฏิบัติการ สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

5.1.1 ผลของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำต่อการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำมีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อทำการทดลองโดยให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำสูงขึ้น จะทำให้เกิดไอน้ำที่เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนได้มากขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยากันระหว่างไอน้ำและแคลเซียมออกไซด์ได้มากขึ้น คายพลังงานความร้อนออกสู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้มากขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงลดลงน้อยกว่า ณ เวลาเดียวกัน

5.1.2 ผลของปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่อการทำงานของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี

ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ไม่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง 85 องศาเซลเซียส และปริมาณน้ำในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน 10 มิลลิลิตร ดังนั้น บรรจุปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน 10 กรัม

ดังนั้น จากการศึกษาและทดลอง เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง 85 องศาเซลเซียส และปริมาณน้ำในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน 10 มิลลิลิตร สภาวะทดลองที่เหมาะสมสำหรับปั๊มความร้อนพลังงานเคมีชนิดแคลเซียมออกไซด์/แคลเซียมไฮดรอกไซด์ระดับห้องปฏิบัติการ คือ อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 80 องศาเซลเซียส และปริมาณแคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม ซึ่งทำให้มีค่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์เท่ากับ 56.5 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะและประสิทธิภาพทางความร้อนของปั๊มความร้อนพลังงานเคมีระดับห้องปฏิบัติการในสภาวะดังกล่าว เท่ากับ 1.43 และ 0.0399 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการหุ้มฉนวนปั๊มความร้อนพลังงานเคมีระดับห้องปฏิบัติการ ให้มีการสูญเสียความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด

2. ควรเพิ่มการวัดอุณหภูมิของปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ระดับห้องปฏิบัติการ ควรวัดอุณหภูมิของแคลเซียมออกไซด์ที่บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน และอุณหภูมิของน้ำภายในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน

3. ควรออกแบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ระดับห้องปฏิบัติการ ที่สามารถลดความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนได้ตลอดเวลาที่ทำการทดลอง เพื่อที่ไอน้ำจากเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อนสามารถไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนได้มากขึ้น เพราะมีความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนน้อยกว่าความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน

4. ควรออกแบบให้ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนมีความสูงไม่มากเกินไป เพื่อที่ไอน้ำเข้ามาภายในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน จะได้ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมออกไซด์

5. ขนาดของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อนมากที่สุด

6. ออกแบบปั๊มความร้อนพลังงานเคมี ระดับห้องปฏิบัติการ ให้มีจำนวนข้อต่อ วาล์ว และความยาวของท่อ น้อยที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ เพราะล้วนแต่มีผลต่อปริมาณไอน้ำที่จะไหลจากเครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน ไปยังเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] H. Ogura, T. Yamamoto, H. Kage, "Efficiencies of $CaO/H_2O/Ca(OH)_2$ chemical heat pump for heat storing and heating/cooling", Energy 28 (2003) 1479-1493.

[2] อิทธิกร กลิ่นโซดา ,ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ,"หน่วยสาธิตความร้อนพลังงานเคมี โดยใช้ระบบโพรพานอล/อะซิโตน/ไฮโดรเจน", 2547.

[3] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, "การใช้ปั๊มความร้อนในการนำความร้อนทิ้งกลับคืนมาใช้ประโยชน์", Available: http://www.cmu.ac.th.

[4] M.A. Tahat, "Heat-pump/energy-store using silica gel and water as a working pair", Applied Energy 69 (2001) 19-27.

[5] A.N. Ajah, A.C. Patil, P.M. Herder, J. Grievink, "Integrated conceptual design of a robust and reliable waste-heat district heating system", Applied Thermal Engineering 27 (2007) 1158-1164.

[6] Y. Kato, F. Takahashi, A. Wataabe, Y. Yoshizawa, "Thermal analysis of a magnesium oxide/water chemical heat pump for cogeneration", Applied Thermal Engineering 21 (2001) 1067-1081.

[7] M.N. Azpiazu, J.M. Morquillas, A. Vazquez, "Heat recovery from a thermal energy storage based on the $Ca(OH)_2/CaO$ cycle", Applied Thermal Engineering 23 (2003) 733-741.

[8] I. KlinSoda, P. Piumsomboon, "Isopropanol-acetone-hydrogen chemical heat pump: A demonstration unit", Energy Conversion and Management 48 (2007) 1200-1207.

[9] W. Wongsuwan, S. Kumar, P. Neveu, F. Meunier, "A review of chemical heat pump technology and applications", Applied Thermal Engineering 21 (2001) 1489-1519.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 ตัวอย่างการคำนวณพลังงานความร้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมออกไซด์กับไอน้ำ

พลังงานความร้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยา = พลังงานความร้อนที่น้ำในแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้รับ + พลังงานความร้อนสูญเสีย

อุณหภูมิอ้างอิง 30 องศาเซลเซียส

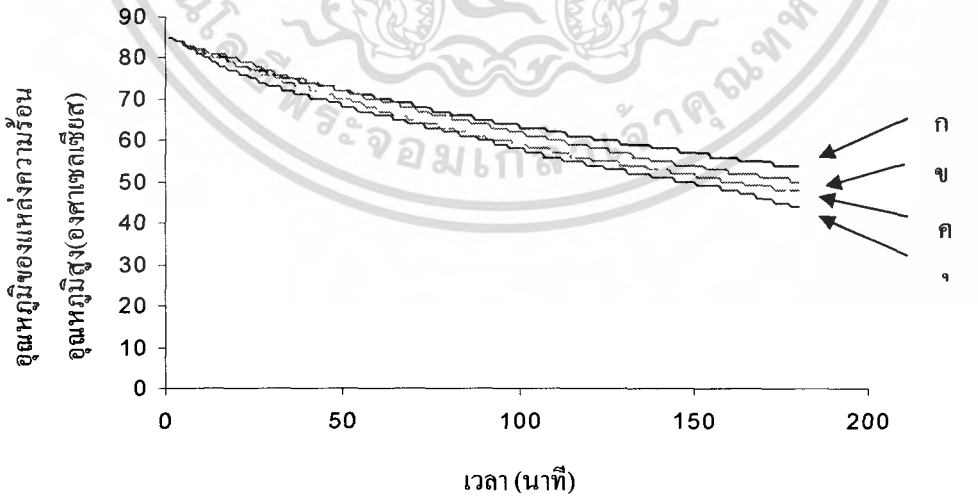
จากข้อมูลการทดลอง การคำนวณพลังงานความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาจะคำนวณตั้งแต่นาทีที่ 0 ถึงนาทีที่ 12 เนื่องจากเวลาในช่วงนี้เป็นเวลาที่น้อนที่สุดที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงสูงกว่าแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ

ก.1.1 การคำนวณพลังงานความร้อนที่น้ำในแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้รับ เมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม และอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

จากสมการ $$\frac{dQ}{dt} = mc_p \frac{dT}{dt} \qquad (ค.1)$$

ดังนั้น $$\frac{dT}{dt} = \frac{dQ}{dt} \cdot \frac{1}{mc_p} \qquad (ค.2)$$

เมื่อ $\frac{dQ}{dt}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงกับเวลาเมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำต่างกัน
ก-80 องศาเซลเซียส ข-70 องศาเซลเซียส ค-60 องศาเซลเซียส ง-ไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำในแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงกับเวลา โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ไมโครซอฟท์เอ็กซ์เซล (Microsoft Office Excel)

จะได้สมการ

$$T = 0.0005t^2 - 0.2548t + 83.734$$

$$\frac{dT}{dt} = 0.001t - 0.2548$$

แทนค่า t ต่างๆ ลงในสมการ จะได้ค่า $\frac{dT}{dt}$ แล้วนำไปแทนค่าในสมการ ค.2 เพื่อหาค่า $\frac{dQ}{dt}$

ที่ $t =$ 6 นาที (360 วินาที)

$$\frac{dT}{dt} = (0.001\times 360) - 0.2548$$

$$= 0.105 \quad K/s$$

$$\frac{dQ}{dt} = (50ml)\times(0.997g/ml)\times(4.231J/g\cdot K)\times(0.105K/s)$$

$$= 22.19 \quad J/s$$

$$= 22.19 \quad W$$

จากนั้นนำค่า $\frac{dQ}{dt}$ ที่หาได้ทั้งหมดของ t หาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ก.1 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์

ที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม 80 องศาเซลเซียส

t (s)	$\frac{dT}{dt}$	$\frac{dQ}{dt}$
60	-0.1948	-41.09
120	-0.1348	-28.43
180	-0.0748	-15.78
240	-0.0148	-3.12
300	0.0452	9.53
360	0.1052	22.19
420	0.1652	34.84
480	0.2252	47.50
540	0.2852	60.15
600	0.3452	72.81
660	0.4052	85.46
720	0.4652	98.12
	$Q_{avg}(W)$	28.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{avg} = 28.52\ W$$

ก.1.2 ตัวอย่างการคำนวณพลังงานความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้น

ในการทดลอง การหาค่าพลังงานความร้อนสูญเสียทำได้โดยไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ลงในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน แล้วทำการทดลองในภาวะเดียวกับการทดลองที่ใส่แคลเซียมออกไซด์ลงในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของน้ำภายในแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง

การคำนวณพลังงานความร้อนสูญเสียคำนวณเช่นเดียวกับการคำนวณพลังงานความร้อนที่น้ำในแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้รับ

จากการคำนวณจะได้ค่าตามตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์

t (s)	$\frac{dT}{dt}$	$\frac{dQ}{dt}$
60	-0.264	-55.6816524
120	-0.204	-43.0267314
180	-0.144	-30.3718104
240	-0.084	-17.7168894
300	-0.024	-5.0619684
360	0.036	7.5929526
420	0.096	20.2478736
480	0.156	32.9027946
540	0.216	45.5577156
600	0.276	58.2126366
660	0.336	70.8675576
720	0.396	83.5224786
	$Q_{avg}(W)$	13.9204131

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{avg} = 13.92\ W$$

ดังนั้น พลังงานความร้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม และอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

$$= 28.52\ W - 13.92\ W$$

$$= 14.60\ W$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (coefficient of performance)

จากสมการ

$$COP = \frac{Q_H}{W}$$

เมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม และอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

Q_H = พลังงานความร้อนที่น้ำในแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงได้รับ=14.60 W

W = กำลังของปั๊มสุญญากาศ ซึ่งหาได้จาก

กำลังของปั๊มสุญญากาศ = $(P_2 - P_1)Q$

$$= \frac{(-11-0cmHg)\times(10^5 N/m^2)\times(1.5 ft^3/\min)\times(0.3048^3 m^3)\times(1\min)}{(76cmHg)\times(1^3 ft^3)\times(60s)}$$

$$= -10.25\ (N\cdot m)/s$$

$$= -10.25\ W$$

ดังนั้น $COP = \frac{14.60\ W}{10.25\ W}$

$= 1.43$

ก.3 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพทางความร้อน (thermal efficiency)

จากสมการ

$$\eta = \frac{Q_H}{Q_L}$$

โดย Q_H คือพลังงานความร้อนที่น้ำในแหล่งความร้อนพลังงานสูงได้รับ (วัตต์)

Q_L คือพลังงานความร้อนของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่ให้แก่เครื่องปฏิกรณ์ดูดความร้อน (วัตต์) ซึ่งหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานความร้อนของน้ำที่ 80 องศาเซลเซียส

$$= \frac{(4.231J/g\cdot K)\times(1250ml)\times(0.997g/ml)\times(80-30K)}{(12\,\text{min})\times(60\,\text{min}/s)}$$

$$= 366.17\ W$$

อุณหภูมิอ้างอิง 30 องศาเซลเซียส

ดังนั้น $$\eta = \frac{14.60\ W}{366.17\ W}$$

$$= 0.0399$$

ก.4 ตัวอย่างการคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์

จากสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมี

$$CaO_{(s)} + H_2O_{(g)} \leftrightarrow Ca(OH)_{2(s)}$$

$$\%conversion = \left[\frac{N_{A0} - N_A}{N_{A0}}\right]\times 100$$

เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม และอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

แคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ N_{A0} = $10\ g$

แคลเซียมออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยา = $\frac{(14.60J/s)\times(56g/mol)\times(12\,\text{min})\times(60s/\text{min})}{(104.2kJ/mol)\times(1,000J/kJ)}$

$$= 5.7\ g$$

$$\%conversion = \left[\frac{5.65}{10}\right]\times 100$$

$$= 56.5\%$$

ดังนั้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนโดยน้ำหนักของแคลเซียมออกไซด์ เท่ากับ 56.5

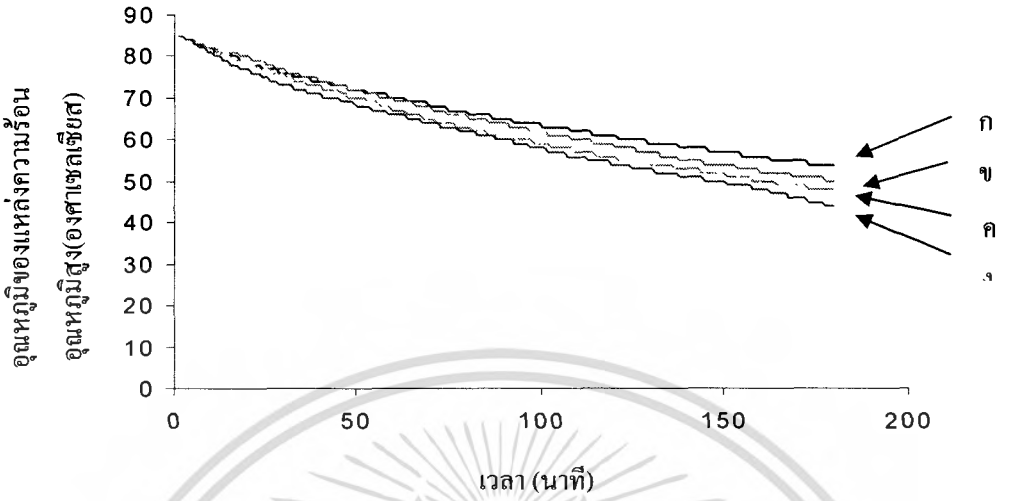
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

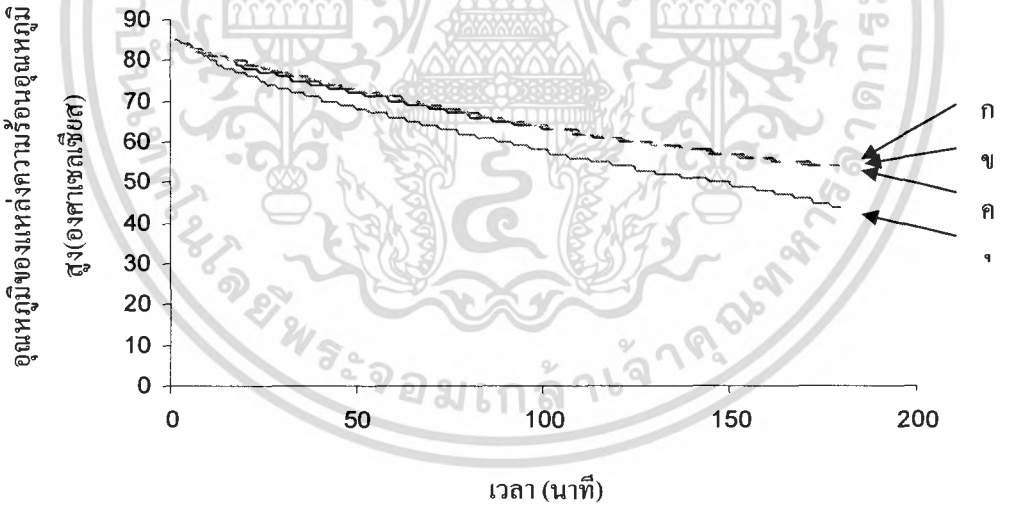
ข้อมูลการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ และสมการแสดงความสัมพันธ์



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงกับเวลา
เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำต่างกัน
ก-80 องศาเซลเซียส ข-70 องศาเซลเซียส ค-60 องศาเซลเซียส ง-ไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงกับเวลา
เมื่อปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่างกัน
ก-10 กรัม ข-20 กรัม ค-30 กรัม ง-ไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ

แคลเซียมออกไซด์ (กรัม)	อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)	สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิ	ค่าความคลาดเคลื่อน (R^2)
0	80	$T = 0.0007t^2 - 0.324t + 84.539$	0.9986
10	60	$T = 0.0006t^2 - 0.3086t + 82.971$	0.9901
10	70	$T = 0.0005t^2 - 0.2809t + 84.879$	0.9989
10	80	$T = 0.0005t^2 - 0.2548t + 83.734$	0.9972
20	80	$T = 0.0005t^2 - 0.2531t + 84.385$	0.9985
30	80	$T = 0.0005t^2 - 0.2533t + 84.436$	0.9985

ข.2 ตารางผลการคำนวณ

ตารางที่ ข.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์

t (s)	$\frac{dT}{dt}$	$\frac{dQ}{dt}$
60	-0.264	-55.68
120	-0.204	-43.03
180	-0.144	-30.37
240	-0.084	-17.72
300	-0.024	-5.06
360	0.036	7.59
420	0.096	20.25
480	0.156	32.90
540	0.216	45.56
600	0.276	58.21
660	0.336	70.87
720	0.396	83.52
	$Q_{avg}(W)$	13.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม 60 องศาเซลเซียส

t (s)	$\frac{dT}{dt}$	$\frac{dQ}{dt}$
60	-0.2486	-52.43
120	-0.1886	-39.78
180	-0.1286	-27.12
240	-0.0686	-14.47
300	-0.0086	-1.81
360	0.0514	10.84
420	0.1114	23.50
480	0.1714	36.15
540	0.2314	48.81
600	0.2914	61.46
660	0.3514	74.12
720	0.4114	86.77
	$Q_{avg}(W)$	17.17

ตารางที่ ข.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม 70 องศาเซลเซียส

t (s)	$\frac{dT}{dt}$	$\frac{dQ}{dt}$
60	-0.2209	-46.59
120	-0.1609	-33.94
180	-0.1009	-21.28
240	-0.0409	-8.63
300	0.0191	4.03
360	0.0791	16.68
420	0.1391	29.34
480	0.1991	41.99
540	0.2591	54.65
600	0.3191	67.30
660	0.3791	79.96
720	0.4391	92.61
	$Q_{avg}(W)$	23.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 10 กรัม 80 องศาเซลเซียส

t (s)	$\frac{dT}{dt}$	$\frac{dQ}{dt}$
60	-0.1948	-41.09
120	-0.1348	-28.43
180	-0.0748	-15.78
240	-0.0148	-3.12
300	0.0452	9.53
360	0.1052	22.19
420	0.1652	34.84
480	0.2252	47.50
540	0.2852	60.15
600	0.3452	72.81
660	0.4052	85.46
720	0.4652	98.12
	$Q_{avg}(W)$	28.52

ตารางที่ ข.6 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 20 กรัม 80 องศาเซลเซียส

t (s)	$\frac{dT}{dt}$	$\frac{dQ}{dt}$
60	-0.1931	-40.73
120	-0.1331	-28.07
180	-0.0731	-15.42
240	-0.0131	-2.76
300	0.0469	9.89
360	0.1069	22.55
420	0.1669	35.20
480	0.2269	47.86
540	0.2869	60.51
600	0.3469	73.17
660	0.4069	85.82
720	0.4669	98.48
	$Q_{avg}(W)$	28.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ 30 กรัม 80 องศาเซลเซียส

t (s)	$\frac{dT}{dt}$	$\frac{dQ}{dt}$
60	-0.1933	-39.67
120	-0.1333	-27.35
180	-0.0733	-15.04
240	-0.0133	-2.73
300	0.0467	9.58
360	0.1067	21.90
420	0.1667	34.21
480	0.2267	46.52
540	0.2867	58.83
600	0.3467	71.14
660	0.4067	83.46
720	0.4667	95.77
	$Q_{avg}(W)$	28.05

ตารางที่ ข.8 ผลที่ได้จากการคำนวณ

$m_{CaO}(g)$	$T_L(°C)$	$T_H(°C)$	$x(\%wt)$	$m_{CaO,rxn}(g)$	$Q_H(W)$	COP	η
10	60	85	12.6	-	3.25	0.32	0.0089
10	70	85	35.2	-	9.09	0.89	0.0248
10	80	85	56.5	5.7	14.60	1.43	0.0399
20	80	85	-	5.8	14.95	1.46	0.0408
30	80	85	-	5.6	14.13	1.38	0.0386

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
ข้อมูลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.1 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงกับเวลา เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ปริมาณต่างกันในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน และอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปริมาณ 10 กรัม

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	85	20	78	39	74
2	85	21	78	40	74
3	84	22	78	41	74
4	84	23	78	42	74
5	84	24	77	43	73
6	83	25	77	44	73
7	83	26	77	45	73
8	82	27	77	46	73
9	82	28	77	47	73
10	82	29	76	48	72
11	81	30	76	49	72
12	81	31	76	50	72
13	80	32	76	51	72
14	80	33	75	52	72
15	80	34	75	53	71
16	80	35	75	54	71
17	79	36	75	55	71
18	79	37	75	56	71
19	79	38	74	57	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ใน เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปริมาณ 10 กรัม (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
58	71	82	66	106	63
59	70	83	66	107	63
60	70	84	66	108	62
61	70	85	66	109	62
62	70	86	66	110	62
63	70	87	65	111	62
64	69	88	65	112	62
65	69	89	65	113	62
66	69	90	65	114	61
67	69	91	65	115	61
68	69	92	65	116	61
69	69	93	64	117	61
70	68	94	64	118	61
71	68	95	64	119	61
72	68	96	64	120	61
73	68	97	64	121	60
74	68	98	64	122	60
75	67	99	64	123	60
76	67	100	63	124	60
77	67	101	63	125	60
78	67	102	63	126	60
79	67	103	63	127	60
80	67	104	63	128	60
81	66	105	63	129	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ใน เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปริมาณ 10 กรัม (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
130	59	147	57	164	55
131	59	148	57	165	55
132	59	149	57	166	55
133	59	150	57	167	55
134	59	151	57	168	55
135	59	152	57	169	55
136	59	153	57	170	55
137	59	154	57	171	55
138	58	155	56	172	55
139	58	156	56	173	54
140	58	157	56	174	54
141	58	158	56	175	54
142	58	159	56	176	54
143	58	160	56	177	54
144	58	161	56	178	54
145	58	162	56	179	54
146	57	163	55	180	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ใน เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปริมาณ 20 กรัม

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	85	25	78	49	73
2	85	26	78	50	73
3	84	27	78	51	73
4	84	28	77	52	72
5	84	29	77	53	72
6	83	30	77	54	72
7	83	31	77	55	72
8	83	32	76	56	72
9	82	33	76	57	71
10	82	34	76	58	71
11	82	35	76	59	71
12	81	36	76	60	71
13	81	37	75	61	71
14	81	38	75	62	70
15	81	39	75	63	70
16	80	40	75	64	70
17	80	41	74	65	70
18	80	42	74	66	70
19	80	43	74	67	69
20	79	44	74	68	69
21	79	45	74	69	69
22	79	46	73	70	69
23	79	47	73	71	69
24	79	48	73	72	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ใน เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปริมาณ 20 กรัม (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
73	69	97	64	121	61
74	68	98	64	122	60
75	68	99	64	123	60
76	68	100	64	124	60
77	68	101	64	125	60
78	68	102	63	126	60
79	67	103	63	127	60
80	67	104	63	128	60
81	67	105	63	129	60
82	67	106	63	130	59
83	67	107	63	131	59
84	66	108	63	132	59
85	66	109	63	133	59
86	66	110	62	134	59
87	66	111	62	135	59
88	66	112	62	136	59
89	66	113	62	137	59
90	65	114	62	138	58
91	65	115	61	139	58
92	65	116	61	140	58
93	65	117	61	141	58
94	65	118	61	142	58
95	64	119	61	143	58
96	64	120	61	144	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ใน เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปริมาณ 20 กรัม (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
145	57	157	56	169	55
146	57	158	56	170	54
147	57	159	56	171	54
148	57	160	56	172	54
149	57	161	56	173	54
150	57	162	55	174	54
151	57	163	55	175	54
152	57	164	55	176	54
153	56	165	55	177	54
154	56	166	55	178	54
155	56	167	55	179	54
156	56	168	55	180	54

ตารางที่ ค.3 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ใน เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปริมาณ 30 กรัม

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	85	8	83	15	81
2	85	9	82	16	80
3	84	10	82	17	80
4	84	11	81	18	80
5	84	12	81	19	80
6	83	13	81	20	80
7	83	14	81	21	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ใน เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปริมาณ 30 กรัม (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
22	79	46	74	70	69
23	79	47	73	71	69
24	79	48	73	72	69
25	78	49	73	73	69
26	78	50	73	74	68
27	78	51	73	75	68
28	77	52	72	76	68
29	77	53	72	77	68
30	77	54	72	78	68
31	77	55	72	79	67
32	77	56	72	80	67
33	76	57	71	81	67
34	76	58	71	82	67
35	76	59	71	83	67
36	76	60	71	84	66
37	76	61	71	85	66
38	75	62	71	86	66
39	75	63	70	87	66
40	75	64	70	88	66
41	74	65	70	89	66
42	74	66	70	90	65
43	74	67	70	91	65
44	74	68	69	92	65
45	74	69	69	93	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ใน เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปริมาณ 30 กรัม (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
94	65	118	61	142	58
95	64	119	61	143	58
96	64	120	61	144	58
97	64	121	61	145	57
98	64	122	60	146	57
99	64	123	60	147	57
100	64	124	60	148	57
101	64	125	60	149	57
102	63	126	60	150	57
103	63	127	60	151	57
104	63	128	60	152	57
105	63	129	60	153	57
106	63	130	59	154	57
107	63	131	59	155	56
108	63	132	59	156	56
109	63	133	59	157	56
110	62	134	59	158	56
111	62	135	59	159	56
112	62	136	59	160	56
113	62	137	59	161	56
114	62	138	58	162	55
115	61	139	58	163	55
116	61	140	58	164	55
117	61	141	58	165	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ใน เครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ปริมาณ 30 กรัม (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
166	55	171	55	176	54
167	55	172	54	177	54
168	55	173	54	178	54
169	55	174	54	179	54
170	55	175	54	180	54

ตารางที่ ค.4 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ ในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	85	14	79	27	74
2	85	15	78	28	74
3	84	16	78	29	73
4	84	17	78	30	73
5	83	18	77	31	73
6	83	19	77	32	73
7	82	20	77	33	72
8	82	21	76	34	72
9	81	22	76	35	72
10	81	23	76	36	72
11	80	24	75	37	71
12	80	25	75	38	71
13	79	26	74	39	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
40	71	64	65	88	60
41	70	65	65	89	60
42	70	66	65	90	60
43	70	67	65	91	60
44	70	68	64	92	60
45	70	69	64	93	59
46	69	70	64	94	59
47	69	71	64	95	59
48	69	72	64	96	59
49	69	73	63	97	58
50	68	74	63	98	58
51	68	75	63	99	58
52	68	76	63	100	58
53	68	77	63	101	58
54	67	78	62	102	57
55	67	79	62	103	57
56	67	80	62	104	57
57	67	81	62	105	57
58	67	82	62	106	57
59	66	83	61	107	56
60	66	84	61	108	56
61	66	85	61	109	56
62	66	86	61	110	56
63	66	87	61	111	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่อไม่บรรจุแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
112	56	135	52	158	48
113	55	136	52	159	48
114	55	137	52	160	48
115	55	138	51	161	48
116	55	139	51	162	48
117	55	140	51	163	47
118	55	141	51	164	47
119	54	142	51	165	47
120	54	143	51	166	47
121	54	144	51	167	47
122	54	145	50	168	46
123	54	146	50	169	46
124	54	147	50	170	46
125	53	148	50	171	46
126	53	149	50	172	46
127	53	150	50	173	45
128	53	151	49	174	45
129	53	152	49	175	45
130	53	153	49	176	45
131	52	154	49	177	45
132	52	155	49	178	44
133	52	156	49	179	44
134	52	157	49	180	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงกับเวลา เมื่อบรรจุแคลเซียมออกไซด์ ปริมาณ 10 กรัม ในเครื่องปฏิกรณ์คายความร้อน ที่อุณหภูมิต่างๆของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ ค.5 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 60 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	85	23	77	45	72
2	85	24	77	46	71
3	84	25	77	47	71
4	84	26	77	48	70
5	83	27	76	49	70
6	83	28	76	50	70
7	82	29	76	51	70
8	82	30	76	52	70
9	82	31	75	53	69
10	81	32	75	54	69
11	81	33	74	55	69
12	81	34	74	56	68
13	80	35	74	57	68
14	80	36	74	58	68
15	80	37	73	59	68
16	79	38	73	60	67
17	79	39	73	61	67
18	79	40	73	62	67
19	79	41	72	63	67
20	78	42	72	64	66
21	78	43	72	65	66
22	78	44	72	66	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 60 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
67	66	91	60	115	56
68	65	92	60	116	56
69	65	93	60	117	56
70	65	94	60	118	56
71	65	95	60	119	56
72	64	96	60	120	56
73	64	97	60	121	55
74	64	98	59	122	55
75	64	99	59	123	55
76	64	100	59	124	55
77	63	101	59	125	55
78	63	102	59	126	55
79	63	103	58	127	55
80	63	104	58	128	55
81	63	105	58	129	54
82	62	106	58	130	54
83	62	107	58	131	54
84	62	108	58	132	54
85	62	109	57	133	54
86	61	110	57	134	54
87	61	111	57	135	54
88	61	112	57	136	54
89	61	113	57	137	53
90	61	114	57	138	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 60 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
139	53	153	51	167	49
140	53	154	51	168	49
141	53	155	51	169	49
142	53	156	51	170	49
143	53	157	51	171	49
144	52	158	50	172	49
145	52	159	50	173	48
146	52	160	50	174	48
147	52	161	50	175	48
148	52	162	50	176	48
149	52	163	50	177	48
150	52	164	50	178	48
151	51	165	49	179	48
152	51	166	49	180	48

ตารางที่ ค.6 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 70 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	85	7	83	13	81
2	85	8	83	14	81
3	84	9	82	15	81
4	84	10	82	16	81
5	84	11	82	17	81
6	83	12	81	18	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 70 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
19	80	43	74	67	68
20	80	44	73	68	68
21	79	45	73	69	68
22	79	46	73	70	68
23	79	47	73	71	67
24	79	48	72	72	67
25	78	49	72	73	67
26	78	50	72	74	67
27	78	51	72	75	66
28	77	52	71	76	66
29	77	53	71	77	66
30	77	54	71	78	66
31	76	55	71	79	66
32	76	56	70	80	66
33	76	57	70	81	65
34	76	58	70	82	65
35	75	59	70	83	65
36	75	60	70	84	65
37	75	61	69	85	65
38	75	62	69	86	64
39	75	63	69	87	64
40	74	64	69	88	64
41	74	65	69	89	64
42	74	66	68	90	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 70 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
91	64	115	59	139	55
92	63	116	59	140	55
93	63	117	59	141	55
94	63	118	59	142	55
95	63	119	59	143	55
96	63	120	58	144	55
97	62	121	58	145	54
98	62	122	58	146	54
99	62	123	58	147	54
100	62	124	58	148	54
101	62	125	58	149	54
102	61	126	57	150	54
103	61	127	57	151	54
104	61	128	57	152	54
105	61	129	57	153	54
106	61	130	57	154	53
107	61	131	57	155	53
108	60	132	57	156	53
109	60	133	56	157	53
110	60	134	56	158	53
111	60	135	56	159	53
112	60	136	56	160	52
113	60	137	56	161	52
114	59	138	55	162	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.6 อุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 70 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
163	52	169	51	175	51
164	52	170	51	176	51
165	52	171	51	177	51
166	52	172	51	178	50
167	52	173	51	179	50
168	52	174	51	180	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้