



การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของระบบปรับอากาศแบบดูดซับโดยใช้ซิลิกาเจล-น้ำ  
เพื่อปรับปรุงค่าการนำความร้อนในวัสดุรูพรุน  
Numerical Modeling of an Adsorption AC System Using Silica gel-Water to  
Improve Thermal Conductivity in Porous Media

ฐานวิทย์ แนมใส

Thanwit Naemsai

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Mechanical Engineering  
Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)



ชื่อวิทยานิพนธ์	การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของระบบปรับอากาศแบบดูดซับโดยใช้ซิลิกาเจล-น้ำ เพื่อปรับปรุงค่าการนำความร้อนในวัสดุพอร์น
ผู้เขียน	นายฐานวิทย์ แนนไส
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2553

### บทคัดย่อ

ระบบปรับอากาศแบบดูดซับเป็นระบบทำความเย็นชนิดหนึ่งที่น่ามาใช้แทนที่ระบบปรับอากาศแบบอัดไอเชิงกล เนื่องจากระบบทำความเย็นชนิดนี้ใช้สารทำความเย็นที่ไม่ทำลายชั้นบรรยากาศ และระบบสามารถใช้ความร้อนจากแหล่งความร้อนทิ้งได้ อย่างไรก็ตามระบบทำความเย็นแบบดูดซับยังมีข้อเสียของระบบ ซึ่งได้แก่ความเย็นที่ผลิตได้จากวัฏจักรจะไม่ต่อเนื่อง อัตราการดูดซับระหว่างคู่สารทำงานไม่สม่ำเสมอ และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบมีค่าต่ำ สาเหตุหลักมาจากการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในแท่นดูดซับนั้นเกิดขึ้นได้ช้า ดังนั้นงานวิจัยนี้จะปรับปรุงปัญหาดังกล่าวโดยการเพิ่มค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับโดยการเติมปริมาณผงทองแดงลงไปผสมในแท่นดูดซับในอัตราส่วน 5-25% ของปริมาณแท่นดูดซับ (สัดส่วนผงทองแดง 0.05-0.25) ในการปรับปรุงจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นตัววิเคราะห์ผลเพื่อติดตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับตลอดทั้งวัฏจักร และใช้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบเป็นตัวชี้วัดผล ผลการวิจัยพบว่า เมื่ออัตราส่วนปริมาณผงทองแดงต่อปริมาณแท่นดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการดูดและคายสารทำความเย็นในช่วงกระบวนการ desorption และกระบวนการ adsorption เร็วขึ้น เวลาของวัฏจักรในทุกกระบวนการเร็วขึ้นเช่นเดียวกัน และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบเพิ่มขึ้น ค่าอัตราส่วนปริมาณผงทองแดงต่อปริมาณแท่นดูดซับที่ 25% เป็นค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงระบบปรับอากาศแบบดูดซับของงานวิจัยนี้ และให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบที่ 0.38 เป็นค่าที่ดีกว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบก่อนปรับปรุงค่าการนำความร้อนซึ่งมีค่า 0.265

**Thesis Title** Numerical Modeling of an Adsorption AC System Using Silica gel–  
Water to Improve Thermal Conductivity in Porous Media

**Author** Mr.Thanwit Naemsai

**Major Program** Mechanical Engineering

**Academic Year** 2010

### **ABSTRACT**

Adsorption Air-Conditioning is a type of refrigeration systems utilized to replace the mechanical vapor compression due to certain advantages for example; this system has benefits of energy saving because it is designed to use free energy such as waste heat or solar energy, besides or also, to the benefits of present global warming problem, non CFC refrigerant is used in the system. However, there are some disadvantages utilizing the adsorption refrigeration system. For example, the system cannot provide continuous cooling, such as, an adsorption capacity of the working pairs is not constant, and last but not least, the coefficient of performance (COP) is particularly low. The main reason is that the heat and mass transfer within the adsorber is slowly occurred. The research is to increase the thermal conductivity within the adsorber by varying the amount of copper powder added into the adsorber for the copper to adsorber volume ratio ranges between 0.05 to 0.25 (5-25%). Numerical modeling and simulation of the coefficient of performance (COP) is used in the research to analyze the behavior occurred inside the adsorber throughout each cycle. The numerical results indicated that the adsorption capacity, cycle time and coefficient of performance are proportional to the copper volume fraction. Resulting in this research when the maximum copper volume fraction is 0.25, follow by its COP is 0.38 which is better than without copper added in the system which is represented by 0.265.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณยิ่งสำหรับ ดร.สมชาย แซ่เอ็ง และ ดร.จิระภา สุขแก้ว ผู้ให้คำปรึกษาและข้อคิดอันเป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งช่วยในการเขียนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้สถานที่ในการค้นคว้าทำวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนเพิ่มเติมในการดำเนินงานวิจัย พร้อมการให้คำแนะนำที่ดีในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ขอมอบคุณความดีทั้งหมดจากการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้แด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้การดูแลเลี้ยงดูเป็นอย่างดี ครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และปลูกฝังคุณธรรม และเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ นักศึกษาปริญญาโท มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

ฐานวิทย์ แนนไส

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(13)
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	8
2 ทฤษฎี	
2.1 หลักการและทฤษฎีการดูดซับ	9
2.2 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ	12
2.3 ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method)	20
3 ระเบียบวิธีวิจัย	
3.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	31
3.2 การจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	39
3.3 การตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำของโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลข	49
4 ผลการวิจัย	
4.1 กรณีศึกษาที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ	52
4.2 กรณีศึกษาที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ	58
4.3 การเปรียบเทียบการจำลองกรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนและกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนของแท่นดูดซับ	70

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5 บทสรุป	
5.1 สรุปผล	74
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม	78
ภาคผนวก	
ก. ตัวอย่างของการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลข	81
ข. การวิเคราะห์สมการการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับ	85
ค. ตัวอย่างของการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบดูดซับ	87
ง. โปรแกรมที่ใช้จำลองระบบสำหรับงานวิจัย	90
จ. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	98
ประวัติผู้เขียน	114

## รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ผลสรุบบระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่มีการใช้คู่สารทำงานต่างชนิดกัน	13
2.2	ค่าคุณสมบัติของคู่สารทำงานแต่ละชนิด	18
3.1	ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของคู่สารทำงานและผงทองแดงที่ใช้ในการจำลอง เชิงตัวเลข	46
4.1	เวลากระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับในแต่ละอัตราส่วน ปริมาณผงทองต่อปริมาณแท่นดูดซับ	63
5.1	ค่าอุณหภูมิสูงสุดของสารภายในแท่นดูดซับตลอดวัฏจักร	75
5.2	ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะและระยะเวลาวัฏจักรในแต่ละอัตราส่วนผง ทองแดง	76



## รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันต่อเวลาของสารซีโอไลต์ในแต่ละแบบ ภาพตัดขวางของการวิเคราะห์พลังงานภายในแท่นดูดซับ	4
1.2	ภาพตัดขวางของแท่นดูดซับ	5
1.3	การเปรียบเทียบอุณหภูมิของชั้นซิลิกาเจลระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีผสมเม็ดทองแดง $1/5$ w/w โฟมสารซิลิกาเจลผสมผงทองแดง	6
1.4	ลักษณะของแท่นดูดซับที่เกิดจากการสังเคราะห์ระหว่างซิลิกาเจลกับผงทองแดง	7
2.1	การแบ่งไอโซเทอร์มของก๊าซ-ของแข็งแบบ IUPAC	10
2.2	เครื่องทำความเย็นแบบดูดซับอย่างง่าย	14
2.3	แผนภาพ P-T-W สำหรับวัฏจักรทำความเย็นแบบดูดซับ	15
2.4	การวางตัวของปริมาตรควบคุมในสองมิติของปัญหาการแพร่กระจาย	21
3.1	แผนภาพขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	30
3.2	ภาพหน้าตัดส่วนประกอบของแท่นดูดซับในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	31
3.3	แผนภาพลักษณะแท่นดูดซับที่ใช้ในสมมติฐาน	32
3.4	แผนภาพลักษณะแท่นดูดซับที่ใช้ในสมมติฐาน	37
3.5	ภาพตัดของแท่นดูดซับที่แสดงค่าขอบเขตตามเงื่อนไข	42
3.6	แผนผังการกระบวนการคำนวณเชิงตัวเลข	48
4.1	การเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างค่าจากการทดลองและค่าจากการบวนการเชิงตัวเลข	52
4.2	ค่าพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละจำนวนกริดที่ใช้คำนวณ	53
4.3	การเปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นดูดซับในแต่ละสถานะ	54

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.4	พฤติกรรมการณ์เปลี่ยนแปลงความดันเฉลี่ยของแท่นดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบ	55
4.5	ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบ	55
4.6	การกระจายอุณหภูมิของซิลิกาเจลในช่วงท้ายกระบวนการ Preheating	57
4.7	การกระจายอุณหภูมิของซิลิกาเจลในช่วงท้ายกระบวนการ Cooling	57
4.8	แผนภาพ P-T-W สำหรับวัฏจักรทำความเย็นแบบดูดซับ	58
4.9	การเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างค่าจากการทดลองและค่าจากกระบวนการเชิงตัวเลขในช่วงกระบวนการ Preheating	59
4.10	ค่าพฤติกรรมการณ์เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละจำนวนกริดที่ใช้คำนวณ	60
4.11	พฤติกรรมการณ์เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยของสาร 3 ชนิดในเวลาต่างๆ ของระบบตามอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับ	61
	(ก) อัตราส่วนเป็น 5%	61
	(ข) อัตราส่วนเป็น 10%	61
	(ค) อัตราส่วนเป็น 15%	61
	(ง) อัตราส่วนเป็น 20%	61
	(จ) อัตราส่วนเป็น 25%	62
4.12	การกระจายตัวอุณหภูมิของสารซิลิกาเจลในช่วงปลายกระบวนการ Preheating เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับ	64
	(ก) อัตราส่วนเป็น 5%	64
	(ข) อัตราส่วนเป็น 10%	64
	(ค) อัตราส่วนเป็น 15%	64
	(ง) อัตราส่วนเป็น 20%	64
	(จ) อัตราส่วนเป็น 25%	64

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.13	การกระจายตัวอุณหภูมิของสารซิลิกาเจลที่ช่วงปลายกระบวนการ Cooling เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับ	65
	(ก) อัตราส่วนเป็น 5%	65
	(ข) อัตราส่วนเป็น 10%	65
	(ค) อัตราส่วนเป็น 15%	65
	(ง) อัตราส่วนเป็น 20%	65
	(จ) อัตราส่วนเป็น 25%	65
4.14	ความดันเฉลี่ยของแท่นดูดซับในแต่ละอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบ	66
4.15	ความสามารถในการดูดซับของแท่นดูดซับในแต่ละอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบ	67
4.16	ความสามารถในการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับช่วงปลายกระบวนการ desorption ในแต่ละอัตราส่วนผงทองแดง	68
	(ก) อัตราส่วนเป็น 5%	68
	(ข) อัตราส่วนเป็น 10%	68
	(ค) อัตราส่วนเป็น 15%	68
	(ง) อัตราส่วนเป็น 20%	68
	(จ) อัตราส่วนเป็น 25%	68
4.17	ความสามารถในการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับช่วงปลายกระบวนการ adsorption ในแต่ละอัตราส่วนผงทองแดง	69
	(ก) อัตราส่วนเป็น 5%	69
	(ข) อัตราส่วนเป็น 10%	69
	(ค) อัตราส่วนเป็น 15%	69
	(ง) อัตราส่วนเป็น 20%	69
	(จ) อัตราส่วนเป็น 25%	69

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.18	การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นดูดซับแต่ละอัตราส่วนปริมาตร ผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบการการ	70
4.19	เปรียบเทียบความดันของแท่นดูดซับแต่ละอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดง ต่อปริมาตรแท่นดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบการเปรียบเทียบ	71
4.20	ความสามารถในการดูดซับของแท่นดูดซับแต่ละอัตราส่วนปริมาตร ผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบ	71
4.21	การเปรียบเทียบ Clapeyron diagram ในแต่ละอัตราส่วนผงทองแดงที่ ผสม	72
4.22	การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับ ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ	73

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

$C_{ps}$	ความจุความร้อนจำเพาะของสารคู่คั้ง
$C_{pw}$	ความจุความร้อนจำเพาะของสารทำความเย็น
$D$	ค่าการกระจายตัวของรูพรุนบนสารคู่คั้ง
$D_p$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
$D_{so}$	ค่าการแพร่กระจายของอนุภาคสารคู่คั้ง
$E_a$	พลังงานในการกระตุ้นของสารคู่คั้ง
$e_k$	ค่าผลต่างของข้อมูลการทำนายกับข้อมูลจริง (residual)
$G$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล
$\Delta H$	ความร้อนสำหรับการคายตัวของสารทำความเย็นออกจากสารคู่คั้ง
$h_{cus}$	ค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างของแข็งและทองแดง
$h_{gs}$	ค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างของแข็งและก๊าซ
$h_{gcu}$	ค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างทองแดงและก๊าซ
$i$	ตำแหน่งของค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณ
$j$	ดัชนีของกริดในแนวแกนรัศมี
$K$	ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของสารคู่คั้ง
$k$	ค่าการนำความร้อนของสาร
$L_{ev}$	ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของสารทำความเย็น
$MSE$	ค่าความคลาดเคลื่อนรวมของชุดข้อมูล (Mean Square Error)
$\dot{m}_g$	อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซระเหย
$\dot{m}_w$	อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น
$N$	จำนวนกริดที่ใช้ในแนวแกนรัศมี
$n$	จำนวนชุดข้อมูล
$P$	ความดันภายในแท่นคู่คั้ง
Pr	ค่าพรนคัมเบอร์สำหรับการกระจายตัวของสาร
$P_s$	ความดันอิ่มตัวของสารคู่คั้งภายในแท่นคู่คั้ง
Re	ค่าเรย์โนลด์คัมเบอร์สำหรับการไหลของสาร

## สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

$R_p$	รัศมีของอนุภาค
$S_{gs}$	ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ
$T$	อุณหภูมิของระบบ
$T_{sat}$	อุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำที่แปรผันตามความดันภายในแท่นดูดซับ
$T_1$	อุณหภูมิเริ่มต้นกระบวนการ isosteric heating
$T_2$	อุณหภูมิสิ้นสุดกระบวนการ isosteric heating
$T_3$	อุณหภูมิสิ้นสุดกระบวนการ desorption
$T_4$	อุณหภูมิสิ้นสุดกระบวนการ cooling
$t$	เวลาของการเกิดกระบวนการ
$V_g$	ปริมาตรของก๊าซที่บรรจุภายในแท่นดูดซับ
$\bar{V}_g$	ความเร็วของก๊าซในแนวแกน
$V_s$	ปริมาตรของแข็งที่บรรจุภายในแท่นดูดซับ
$V_{total}$	ปริมาตรของแท่นดูดซับ
$W_{ads}$	ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับขณะอิ่มตัว
$W_{eq}$	ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ
$W_{des}$	ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับขณะคายสารทำความเย็น
$W_0$	ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสารดูดซับ
$x_m$	ค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดข้อมูล
$\phi$	ปริมาณทางเสกคลาร์หรือเวกเตอร์ขึ้นอยู่กับสมการการไหล
$\Gamma$	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย
$\varepsilon_s$	ค่าสัดส่วนช่องว่างเชิงปริมาตรของสารซิติกาเจล
$\varepsilon_g$	ค่าสัดส่วนช่องว่างเชิงปริมาตรของก๊าซ
$\varepsilon_{cu}$	ค่าสัดส่วนช่องว่างเชิงปริมาตรของผงทองแดง
$\mu$	ค่าความหนืดพลศาสตร์ของสารทำความเย็น
$\sigma$	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำสั้นเรื่อง

ในปัจจุบันนี้ระบบทำความเย็นได้เข้ามาเป็นสิ่งจำเป็นในชีวิตประจำวัน ตั้งแต่การใช้ความเย็นในการถนอมอาหาร ในระบบปรับอากาศ หรือการนำความเย็นมาใช้ในการเก็บยารักษาโรค เป็นต้น แต่เครื่องทำความเย็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมากนั่นก็คือ ปรากฏการณ์เรือนกระจก สาเหตุของปรากฏการณ์นี้มาจากการทำลายชั้นบรรยากาศของสารจำพวก HFCs HCFCs และ CFCs ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารทำงานหรือสารทำความเย็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ และยังเป็นสาเหตุหนึ่งของการนำไปสู่วิกฤตการณ์ปัญหาสภาวะโลกร้อนอีกด้วย

จากปัญหาสิ่งแวดล้อมข้างต้น เทคโนโลยีทำความเย็นแบบดูดซับจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาข้างต้นได้ โดยมีข้อดีหลายด้าน ได้แก่

- ระบบทำงานได้ด้วยแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ เช่นพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือสามารถใช้ความร้อนจากแหล่งความร้อนทิ้ง (waste heat) ตามแหล่งอุตสาหกรรม
- ระบบนี้ใช้สารทำความเย็นที่ไม่ทำลายชั้นบรรยากาศ เช่น น้ำ เมทานอล หรือ แอมโมเนีย เป็นต้น

- ระบบนี้ส่วนประกอบหลักจะยึดตรึงกับที่ไม่มีเคลื่อนไหว (moving part) จึงทำให้ง่ายต่อการบำรุงรักษา อีกทั้งยังสามารถใช้กับระบบที่มีการเคลื่อนไหวเช่น ยานพาหนะขนส่ง

อย่างไรก็ตามระบบทำความเย็นแบบดูดซับยังมีข้อเสียของระบบ ซึ่งได้แก่ความเย็นที่ผลิตได้จากวัฏจักรจะไม่ต่อเนื่อง (Non-continuous cycle) อัตราการดูดซับระหว่างคู่สารทำงานไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ ในช่วงเริ่มแรกอัตราการดูดซับของคู่สารทำงานเป็นไปอย่างรวดเร็วเนื่องจากพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีช่องว่างมาก เมื่อการดูดซับดำเนินไประยะเวลาหนึ่ง คู่สารทำงานก็จะเข้าสู่สภาวะสมดุล พื้นที่ผิวจะเริ่มอิ่มตัว ส่งผลให้การแพร่กระจายของสารทำงานเข้าสู่ส่วนที่ลึกของสารดูดซับนั้นเกิดได้ไม่ดีจึงส่งผลต่ออัตราการดูดซับที่ช้าลง นอกจากนี้ในกระบวนการให้ความร้อนแก่แท่นดูดซับก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการคายสารทำงานและกระบวนการหล่อเย็นแท่นดูดซับก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการดูดสารทำงานนั้น จะต้องใช้เวลา

เนื่องจากสารดูดซับที่ใช้มีค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ที่ค่อนข้างต่ำ จึงส่งผลต่อเวลาต่อรอบวัฏจักรของระบบทำความเย็นนานขึ้นทำให้สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในระบบ จากสาเหตุทั้งหมดนี้เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ (Coefficient Of Performance, COP) มีค่าต่ำ

ดังนั้นจากปัญหาที่กล่าวมาจึงมีนักวิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมและพัฒนา ระบบทำความเย็นแบบดูดซับในส่วนการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ โดยมีการเสนอเทคนิคต่างๆ เช่น เทคนิคการใช้ Heat and Mass recovery เทคนิคการเพิ่มความสามารถระบายความร้อนของแท่นดูดซับโดยการติดครีบบายในแท่นดูดซับ เทคนิคการปรับปรุงค่าการนำความร้อนของสารดูดซับ มีด้วยกัน 2 วิธีซึ่งได้แก่ การผสมสารที่มีค่าการนำความร้อนสูงในสารดูดซับ และการสังเคราะห์สารดูดซับกับสารที่มีค่าการนำความร้อนสูงเป็นเนื้อเดียวกัน จากเทคนิคการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพการทำความเย็นที่ได้กล่าวไว้ งานวิจัยเรื่องการผสมสารที่มีค่าการนำความร้อนสูงลงในสารดูดซับ พบว่าเป็นงานที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถลดความยุ่งยากในกระบวนการผลิตชิ้นงานและการสังเคราะห์สารให้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับงานด้านการผสมสารที่มีค่าการนำความร้อนสูงนั้น ส่วนใหญ่เป็นการวิจัยด้านการสร้างชุดทดลอง ซึ่งงานด้านนี้เป็นงานที่ใช้ทรัพยากรในการทดลองค่อนข้างจะสิ้นเปลือง เนื่องจากต้องทำการทดลองหลายกรณีศึกษา ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษากระบวนการดูดซับของคู่สารทำงานและการกระจายตัวของอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับ ที่ผสมสารที่มีค่าการนำความร้อนสูง เพื่อให้ได้แนวทางการพัฒนาค่าการนำความร้อนของสารดูดซับโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข



## 1.2 การตรวจเอกสาร

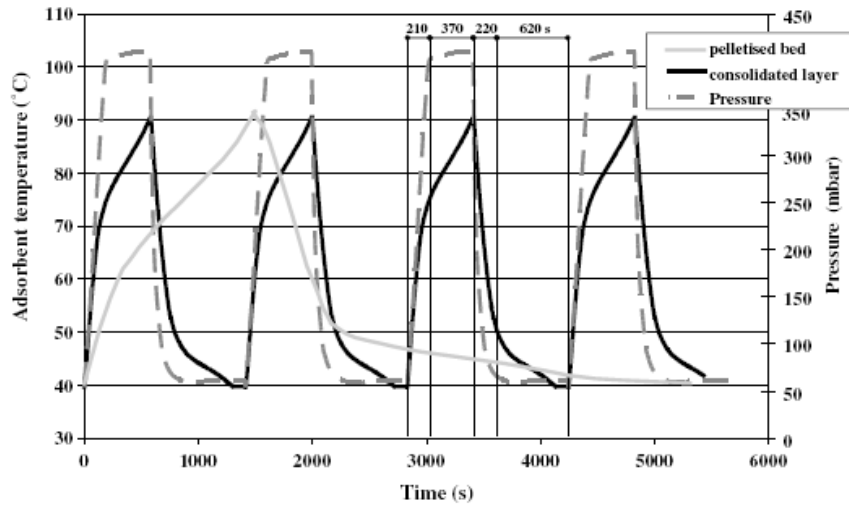
### ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ (Adsorption Refrigeration system) ได้เกิดขึ้นเป็นครั้งแรกราวๆ ในปี ค.ศ. 1909 (Hulse, 1929) และได้ใช้ในเชิงพาณิชย์ในปี ค.ศ.1920 โดยใช้คู่สารทำงานซิลิกาเจลและซัสเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อใช้ในระบบทำความเย็นในรถไฟบรรทุกสินค้าและสามารถทำอุณหภูมิในรถบรรทุกสินค้าได้ถึง  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  แต่ไม่ได้รับความสนใจเนื่องจากประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งในปัจจุบันระบบนี้เริ่มเป็นที่น่าสนใจโดยมีการวิจัยและพัฒนาอย่างจริงจัง โดยเริ่มมีการศึกษาระบบทำความเย็นแบบดูดซับในกรณีที่ใช้คู่สารทำงานหลายชนิดเพื่อให้เหมาะกับระบบที่ใช้งานในขณะนั้นดังนี้

Sridhar (1987) ได้ศึกษาระบบที่ใช้คู่สารทำงานถ่านกัมมันต์-เมทานอลเป็นคู่สารทำงาน โดยศึกษาถึงการดูดซับของถ่านกัมมันต์หลายชนิดกับเมทานอล ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะที่ได้เท่ากับ 0.25 สำหรับการผลิตน้ำแข็ง ซึ่งแสดงถึงอนาคตที่ดีของการพัฒนาระบบทำความเย็นแบบดูดซับ โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นคู่สารทำงาน

Saha. (2000) ได้เสนอระบบทำความเย็นโดยใช้ซิลิกาเจล-น้ำเป็นคู่สารทำงานและใช้แทนดูดซับ 2 แทนที่ลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยทำงานสลับช่วงกระบวนการ desorption และ adsorption มีการแลกเปลี่ยนความร้อนจากภายในแทนดูดซับ ผลที่ได้คือสามารถผลิตน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิ  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ความร้อนจากน้ำร้อน  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  และน้ำที่ใช้หล่อเย็น  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นที่ค่าประมาณ 0.33

Restuccia (2005) ได้เสนอระบบทำความเย็นแบบดูดซับสำหรับประยุกต์ใช้กับห้องเย็น (Chiller) ที่มี ซีโอไลต์-เมทานอลเป็นคู่สารทำงาน ใช้แทนดูดซับที่เป็นท่อทรงกระบอก 2 ชั้นที่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวนอกแทนดูดซับ โดยศึกษาถึงลักษณะทางกายภาพของสารดูดซับที่ใช้แบ่งออกเป็น สารดูดซับมีลักษณะเป็นเม็ดกลม (pellet) และสารดูดซับแบ่งเป็นแบบชั้น (layer) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 1.1 ผลที่ได้สารดูดซับที่ใช้ลักษณะที่เป็นแบบชั้นๆ สามารถเร่งให้เวลาของวัฏจักรเร็วขึ้นได้ถึง 4 เท่าเมื่อเทียบกับแบบเม็ดกลม และให้ค่า COP ระบบอยู่ที่ 0.12



รูปที่ 1.1 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันต่อเวลา ของสารซีโอไลท์ในแต่ละแบบ (Restuccia, 2005)

จากการทบทวนเอกสารเกี่ยวกับระบบทำความเย็นแบบดูดซับ พบว่าปัญหาใหญ่ของระบบการทำความเย็นแบบดูดซับคือ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ของระบบมีค่าต่ำมาก (0.1~0.4) จากการตรวจเอกสารได้พบวิธีดังต่อไปนี้ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ของระบบ

### วิธีการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ

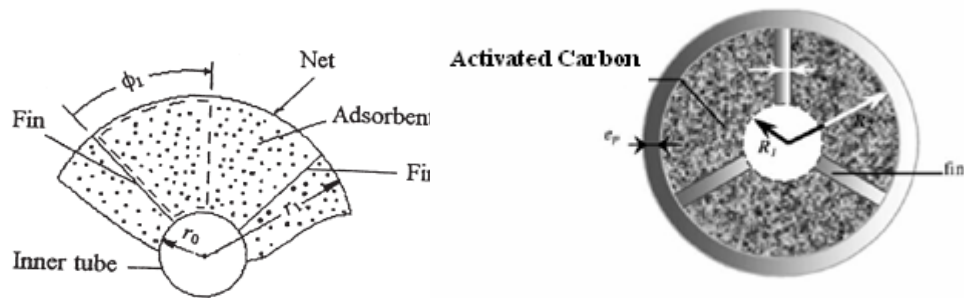
ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ได้มีการวิจัยและพัฒนาเรื่อยมา แต่ระบบยังมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ที่ค่อนข้างต่ำ อัตราการดูดซับช้าและระบบใช้เวลานาน สาเหตุหลักเกิดจากปัญหาการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในตัวแทนดูดซับ จึงมีการทำวิจัยเพื่อศึกษาปัญหากรณีนี้

Khan et al. (2006) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในห้องทำความเย็นแบบดูดซับโดยมีซิลิกาเจล-น้ำเป็นคู่สารทำงาน ใช้แทนดูดซับ 3 ตัวในการทำ mass recovery ซึ่งใช้หลักการเชื่อมต่อแทนดูดซับแต่ละแทนเข้าด้วยกัน และใช้ผลต่างของความดันในแต่ละแทนในการเร่งกระบวนการ desorption พบว่าสามารถลดช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ desorption และ

สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ เทคนิคนี้เป็นการแก้ปัญหาโดยปรับระบบการทำงาน  
ของระบบมากกว่าแก้ปัญหาในส่วนของ การถ่ายเทความร้อนและมวลภายในแท่นดูดซับ

เทคนิคต่อมาที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหาคือ เทคนิคการเพิ่มความสามารถระบายความร้อนของแท่นดูดซับโดยการติดครีบบนในแท่นดูดซับ

Zhang and Wang (1999) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทมวลและความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่มี ซีโอไลต์-น้ำ เป็นคู่สารทำงาน โดยลักษณะแท่นดูดซับเป็นแบบท่อสองชั้นติดครีบบริเวณภายในแท่นแสดงดังรูปที่ 1.2 จากผลการคำนวณพบว่า การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีเกิดขึ้นได้ดีกว่าในแนวความยาวท่อเมื่อลดระยะของครีบบ ( $\phi_1$ ) และเมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิตามแนวรัศมีพบว่าเมื่อระยะครีบบลดลงส่งผลให้อุณหภูมิที่ขอบด้านในแพร่กระจายตัวไปยังขอบด้านนอกได้เร็วขึ้น



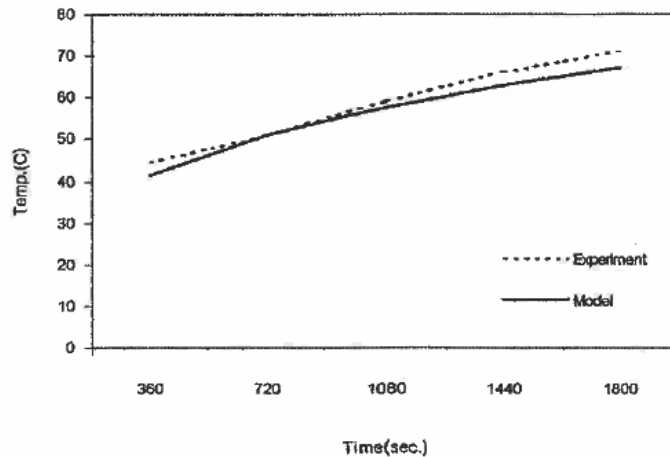
รูปที่ 1.2 ภาพตัดขวางของแท่นดูดซับ (Zhang and Wang, 1999)

Mers (2006) ศึกษาการเพิ่มค่า COP ของระบบโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการหาขนาดของครีบบที่เหมาะสมต่อแท่นดูดซับ ซึ่งพบว่าการเพิ่มจำนวนครีบบมีผลให้ค่า COP ของระบบเพิ่มขึ้นแต่เมื่อจำนวนของครีบบประมาณ 7 ครีบบขึ้นไป จะพบว่าจำนวนครีบบมีผลต่อค่า COP ของระบบน้อยลงเนื่องการระบายความร้อนภายในแท่นเกิดได้ใกล้เคียงกันมากจึงส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ใช้ในระบบมีค่าใกล้เคียงด้วยเช่นกัน

เกสนที น้อยปีน (2546) ใช้คู่สารทำงานซิลิกาเจล-น้ำ โดยทดสอบคู่สารทำงานในแท่นดูดซับที่ระดับความหนาของสารดูดซับต่างกันและทดสอบความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและมวล โดยการผสมเม็ดทองแดงเข้ากับซิลิกาเจลเพื่อเป็นการเพิ่มค่าการนำความร้อน ในการวิเคราะห์จะพิจารณาเฉพาะในช่วงกระบวนการ Preheating พบว่าความสามารถในการดูดซับของสารซิลิกาเจลมีค่าแตกต่างกันน้อยมากเมื่อผสมเม็ดทองแดงเพิ่มขึ้น แต่การคายสารทำความเย็นจะ

เร็วขึ้น และเมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของอุณหภูมิชั้นสารซิลิกาเจลพบว่าการเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้เร็วขึ้นเมื่อค่าสัดส่วนผงทองแดงเพิ่มขึ้นและมีค่าคี่ที่สุดอยู่ที่  $0.2 \text{ kg}_{\text{Copper}}/\text{kg}_{\text{Silica}}$  แสดงดังรูปที่ 1.3 ซึ่งสามารถลดเวลาของวัฏจักรลดได้ประมาณ 77 วินาที

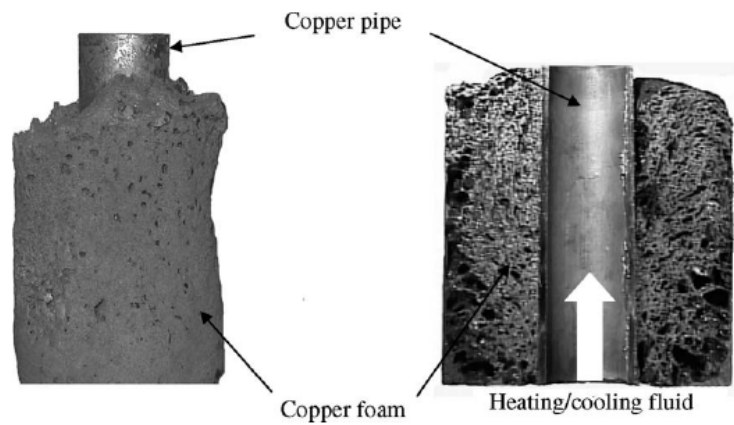
กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของชั้นซิลิกาเจลระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กรณีผสมเม็ดทองแดง 1/5 w/w



รูปที่ 1.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของชั้นซิลิกาเจลระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีผสมเม็ดทองแดง 1/5 w/w (เกสนที่ น้อยปิ่น, 2546)

Eun (2000) ใช้สารแกรไฟต์ผสมลงไปนชั้นสารซิลิกาเจลตามอัตราส่วนต่างๆ 20 30 และ 40% ของน้ำหนักสารซิลิกาเจล แล้วใช้กระบวนการอัดเป็นท่อน ผลที่ได้อัตราการดูดซับของซิลิกาเจลมีค่าที่ดีขึ้นและการกระจายตัวของอุณหภูมิเร็วขึ้นเล็กน้อยตามอัตราส่วนของแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสามารถเพิ่มค่าการนำความร้อนได้แค่ 5 8 และ 10% ตามลำดับอัตราส่วนแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้น

อีกวิธีที่นำมาใช้คือการสังเคราะห์สารทั้งสองชนิดให้มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน Freni et al. (2009) ได้ทำการสังเคราะห์สารซีโอไลท์กับผงทองแดงเป็นเนื้อเดียวกันตามความหนาของแท่นดูดซับแสดงดังรูปที่ 1.4 ผลที่ได้เมื่อชั้นความหนาของสารสังเคราะห์มีค่าเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแท่นดูดซับดีขึ้น และค่า COP ของระบบเพิ่มขึ้นจากเดิม 60 % ในปีเดียวกัน Hu et al. (2009) ได้นำเสนอวิธีที่คล้ายกัน แต่เปลี่ยนสารที่ผสมเป็นผงลูมิเนียม ผลที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบเพิ่มขึ้นและเวลาต่อรอบวัฏจักรเร็วขึ้น



รูปที่ 1.4 ลักษณะของแท่นดูดซับที่เกิดจากการสังเคราะห์ระหว่างซิลิกาเจลกับผงทองแดง  
(Freni et al., 2009)

จากบททวนเอกสารการวิจัยที่ผ่านมา พบว่าวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนในแท่นดูดซับสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบได้ แต่การเพิ่มครีปในแท่นดูดซับ มีความยุ่งยากในกระบวนการผลิตและประกอบแท่นดูดซับ ซึ่งวิธีการผสมสารที่มีค่าการนำความร้อนสูงลงในสารดูดซับสามารถทำได้สะดวกกว่า

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของการเติมผงทองแดงที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ โดยการสร้างสมการแบบจำลองคณิตศาสตร์ ของการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในแท่นดูดซับ

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาการกระจายอุณหภูมิและกระบวนการดูดซับภายในแท่นสารดูดซับ โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของการเติมผงทองแดงลงในแท่นดูดซับที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนตลอดจนสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้สัดส่วนที่เหมาะสมของผงทองแดงต่อปริมาณสารดูดซับ สำหรับพัฒนาค่าการนำความร้อนของแท่นดูดซับเพื่อให้มีการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น

1.4.2 ทราบผลกระทบจากการเติมผงทองแดงต่อระบบการทำความเย็นแบบดูดซับ

1.4.3 โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในแท่นสารดูดซับได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาระบบทำความเย็นแบบดูดซับได้

## 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าการนำความร้อนและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแท่นดูดซับทรงกระบอก

1.5.2 คู่มือการทำงานที่ใช้ในระบบคือ ซิลิกาเจล (Type A Silica Gel) และน้ำ

1.5.3 ปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนภายในแท่นดูดซับ โดยการเติมผงทองแดงผสมซิลิกาเจลในอัตราส่วนต่างๆ

1.5.4 เปรียบเทียบพฤติกรรมการดูดซับที่เกิดขึ้นในแท่นดูดซับ กรณีที่ไม่มีการเติมผงทองแดงและมีการเติมผงทองแดงผสมกับซิลิกาเจล

1.5.5 ระบบทำความเย็นเป็นแบบไม่ต่อเนื่องมีสภาวะการทำงานที่กำหนดและใช้ในการจำลองมีดังนี้

แหล่งให้ความร้อนช่วงอุณหภูมิ 90-100 °C

เครื่องควบแน่นช่วงอุณหภูมิ 25-35 °C

เครื่องทำระเหยช่วงอุณหภูมิ 8-15 °C

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาวิธีการเพิ่มสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ที่ใช้ซิลิกาเจล-น้ำ เป็นคู่สารทำงาน โดยทำการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับเพื่อให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ ประเภทและทฤษฎีการดูดซับ วัฏจักรของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ คุณสมบัติของคู่สารทำงานที่ใช้ในระบบดูดซับ เทอร์โมไดนามิกส์ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องได้ถูกประมวลไว้และนำเสนอโดยสรุปในบทนี้

#### 2.1 หลักการและทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารดูดซับ โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูง จะดูดซับสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวดำ โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารดูดซับ (adsorbent) กับสารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) ปริมาณสารที่จะถูกดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ความดันและพลังงานศักย์ของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับซึ่งอาจเป็นก๊าซหรือของเหลวกับสารดูดซับซึ่งเป็นของแข็ง (Suzuki, 1990)

##### 2.1.1 ประเภทของกระบวนการดูดซับ

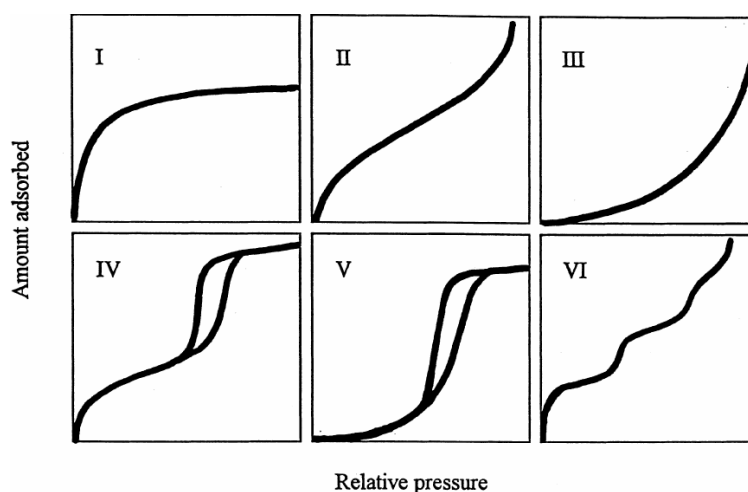
การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นระหว่างสารสองชนิด คือ สารดูดซับ (Adsorbent) และสารถูกดูดซับ (Adsorbate) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นกระบวนการที่โมเลกุลของสารในสถานะก๊าซถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของของแข็งที่เป็นสารดูดซับ ซึ่งแรงที่ทำให้เกิดการดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารนี้เรียกว่าแรงแวนเดอวาลส์ (Van der waals force) การดูดซับทางกายภาพไม่ทำให้คุณสมบัติของสารดูดซับเปลี่ยนแปลง และกระบวนการนี้เป็นกระบวนการย้อนกลับได้

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ แรงดึงดูดในกรณีนี้จะแข็งแรงกว่าแรงดึงดูดทางกายภาพ ในทำนองเดียวกันปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นก็มีค่ามากด้วย การเกิดปฏิกิริยาเคมีส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงไปจึงเป็นกระบวนการแบบผันกลับไม่ได้

### 2.1.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Isotherm of Adsorption)

ในสภาวะสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ณ อุณหภูมิคงที่ ค่าของอัตราการดูดซับจะขึ้นกับความดันสัมพัทธ์ รูปแบบของความสัมพันธ์นี้ จะเรียกว่า ไอโซเทอร์มของการดูดซับ ซึ่งสามารถใช้ในการแบ่งลักษณะของการดูดซับที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการจำแนกของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ได้แบ่งออกเป็น 6 ประเภทแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การแบ่งไอโซเทอร์มของก๊าซ-ของแข็งแบบ IUPAC (Donohue and Aranov, 1998)

จากรูปที่ 2.1 อธิบายได้ว่า ชนิดที่ 1 จะเป็นไอโซเทอร์มที่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากลักษณะของกราฟจะเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง และใช้ในการอธิบายการดูดซับในแบบที่สารดูดซับมีช่องว่างรูพรุนขนาดเล็ก ชนิดที่ 2 และ 3 ใช้ในการอธิบายการดูดซับในแบบที่สารดูดซับมีช่องว่างรูพรุนขนาดใหญ่ ชนิดที่ 4 และ 5 นั้นใช้ในการอธิบายการดูดซับวัสดุดูดซับแบบหลายชั้น และชนิดที่ 6 เป็นชนิดที่สามารถแบ่งชั้น ซึ่งในระบบการทำความเย็นแบบดูดซับทั่วไปจะเป็นแบบชนิดที่ 1



### 2.1.3 ทฤษฎีการดูดซับ

Dubinin (1967) ได้เสนอทฤษฎีการดูดซับประจุของสารถูกดูดซับในรูพรุนของสารดูดซับโดยวิเคราะห์เป็นเชิงปริมาตร เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ดูดซับของสารที่มีรูพรุนซึ่งประยุกต์มาจากทฤษฎีของ Polanyi ที่เสนอการดูดซับออกมาในรูปแบบของค่าพลังงานศักย์ของ Polanyi ( $\varepsilon$ ) ดังสมการที่ 2.1

$$\varepsilon = RT \ln \frac{P_s}{P} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$P$	ความดันของระบบ (kPa)
	$P_s$	ความดันอิ่มตัวของสารถูกดูดซับที่อุณหภูมิระบบ (kPa)
	$T$	อุณหภูมิของระบบ (K)
	$R$	ค่าคงที่ของก๊าซในอุดมคติ (J/kg.K)

หลังจากนั้น Dubinin เสนอแบบทฤษฎีการเติมเต็มปริมาตรช่องว่างในรูพรุนขนาดเล็ก (The theory of volume filling of micropores) เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ดูดซับของสารมีรูพรุน โดยมีหลักการสำคัญ คือ ความสามารถในการดูดซับได้ของสารดูดซับ ( $W_{eq}$ ) มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับค่าพลังงานศักย์ของ Polanyi ( $\varepsilon$ ) ดังสมการที่ 2.2

$$W_{eq} = W_0 \exp \left[ \frac{-K\varepsilon^2}{\beta^2} \right] \quad (2.2)$$

แทนค่าสมการ (2.1) ใน (2.2) จะได้

$$W_{eq} = W_0 \exp \left[ \frac{-K \left( RT \ln \frac{P_s}{P} \right)^2}{\beta^2} \right] \quad (2.3)$$

หรือ

$$W_{eq} = W_0 \exp \left[ -D \left( T \ln \left( \frac{P_s}{P} \right) \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

โดยที่  $D = \frac{KR^2}{\beta^2}$

เมื่อ	$W_{eq}$	ความสามารถในการดูดซับได้ของสารดูดซับ ( $\text{kg}_{\text{adsorbate}}/\text{kg}_{\text{adsorbent}}$ )
	$W_0$	ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสารดูดซับ ( $\text{kg}_{\text{adsorbate}}/\text{kg}_{\text{adsorbent}}$ )
	$\beta$	ค่าสัมประสิทธิ์ของพันธะแวนเดอวาลส์ของคู่สารทำงาน ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )
	$K$	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของรูพรุนของสารดูดซับ ( $1/\text{K}^2$ )
	$D$	ค่าการกระจายตัวของรูพรุนของสารดูดซับ ( $1/\text{K}^2$ )

เรียกสมการ (2.4) ว่าสมการ Dubinin-Radushkevich equation (D-R)

ต่อมา Dubinin และ Astakhov (Dubinin and Astakhov, 1970) เสนอสมการ Dubinin-Astakhov Equation (D-A) ได้จากการปรับปรุงสมการ D-R ให้ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง และถูกต้องสอดคล้องกับการทดลองมากยิ่งขึ้น ดังสมการที่ (2.5)

$$W_{eq} = W_0 \exp \left[ -k \left( \frac{T}{T_{sat}} - 1 \right)^n \right] \quad (2.5)$$

เมื่อ	$k, n$	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคู่สารทำงาน
	$T_{sat}$	อุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำที่แปรผันตามความดันภายในแท่นดูดซับ (K)

## 2.2 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

ระบบทำความเย็นแบบดูดซับมีการวิจัยและพัฒนาอย่างจริงจัง โดยเริ่มมีการศึกษาในกรณีที่ใช้คู่สารทำงานหลายชนิด เพื่อให้เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบดังตารางที่ 2.1

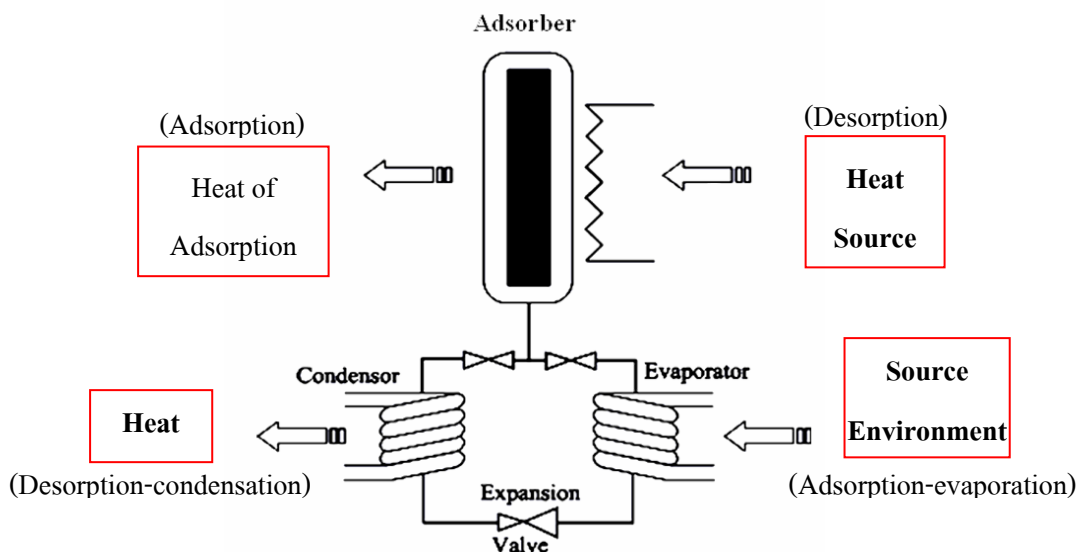
ตารางที่ 2.1 ผลสรุประบบทำความเย็นแบบดูดซับที่มีการใช้คู่สารทำงานต่างชนิดกัน (Hasan, 2007)

อ้างอิง	คู่สารทำงาน	อุณหภูมิเย็นที่ผลิตได้(°C)	อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในระบบ(°C)	COP
Ulku	ซีโอไลต์ธรรมชาติ-น้ำ	27	123	0.34
Poyelle et al.	ซีโอไลต์-น้ำ	2 - 4	120 - 360	แทนเดียว 0.3 - 0.38 สองแทน 0.5 - 0.73
Hamamoto et al.	ซิลิกา เจล-น้ำ	14	55	0.25
Khan et al.	ซิลิกา เจล-น้ำ	14	60	0.3 - 0.65
Hamamoto et al.	ถ่านกัมมันต์-เมทานอล	-20 - 15	40 - 100	0.38
Lambert	ถ่านกัมมันต์-	-15	160	1.2
Critoph	ถ่านคาร์บอน-น้ำ	0	250	0.95
Oertel et al.	ซิลิกา เจล-เอทานอล	0	85	0.3
Wang et al.	ซิลิกา เจล-น้ำ	15.1	55 - 67	0.32 - 0.4

### 2.2.1 วัฏจักรการทำงานของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

วัฏจักรของระบบทำความเย็นนี้แสดงดังรูปที่ 2.2 อุปกรณ์หลักประกอบด้วย

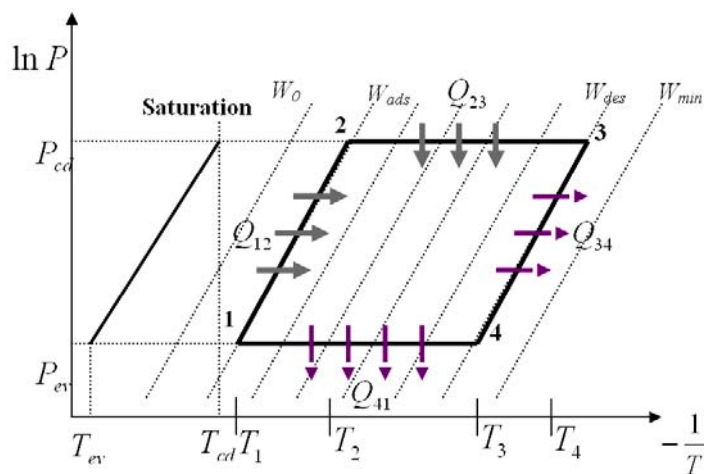
- เครื่องควบแน่น (Condenser)
- เครื่องทำระเหย (Evaporator)
- แท่นดูดซับ (Adsorber)



รูปที่ 2.2 เครื่องทำความเย็นแบบดูดซับอย่างง่าย

จากรูปที่ 2.2 กระบวนการทำงานของระบบเริ่มจากสารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องทำระเหยโดยจะดูดความร้อนจากสิ่งแวดล้อม (Source Environment) มาใช้ในการระเหยและให้ความเย็นออกมา หลังจากนั้นไอของสารทำความเย็นจะผ่านไปยังแท่นดูดซับ (Adsorber) และถูกดูดซับ ในช่วงนี้จากกระบวนการดูดซับ (adsorption) จะมีความร้อนซึ่งเกิดจากการดูดซับ (Heat of adsorption) ออกมา ซึ่งการหล่อเย็นแท่นดูดซับจะใช้ความเย็นจากสิ่งแวดล้อม (Cooling system) จนกระทั่งแท่นดูดซับอิ่มตัว หลังจากนั้นจะให้ความร้อนแก่แท่นดูดซับ เพื่อให้สารทำความเย็นที่เกาะอยู่กับผิวของสารดูดซับนั้นแยกตัว เรียกกระบวนการนี้ว่ากระบวนการคายสารถูกดูดซับ (Desorption) ช่วงกระบวนการนี้ความดันภายในแท่นดูดซับจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิจนเกินค่าความดันของเครื่องควบแน่น ทำให้ไอของสารทำความเย็นนั้นไหลผ่านเข้าเครื่องควบแน่น (condenser) โดยไอของสารทำความเย็นจะถูกควบแน่นและปล่อยค่าความร้อนออกมา จากนั้นก็จะไหลผ่าน expansion valve เพื่อลดความดัน และผ่านไปยังเครื่องระเหย (evaporator) เป็นวัฏจักรต่อไป

พบว่าในระบบนี้จะมีสามตัวแปรหลัก คือ ความดัน ( $P$ ) อุณหภูมิ ( $T$ ) และความสามารถในการดูดซับ ( $W$ ) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันในรูปแบบ ( $\ln P$ ) กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์  $-1/T$  และที่ค่า  $W$  คงที่ต่างๆ จะได้แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสาม เรียกว่า Clapeyron diagram ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพ P-T-W สำหรับจักรทำความเย็นแบบดูดซับ (Boubakri, 2000)

กระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการด้วยกันดังนี้

1. กระบวนการ 1-2 กระบวนการรับความร้อนขณะที่ความสามารถในการดูดซับคงที่ (isosteric heating) เป็นกระบวนการที่เริ่มจากการให้ความร้อนแก่ชั้นสารดูดซับ ทำให้ความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (1-2) จนค่าความดันมีค่ามากกว่าความดันของเครื่องควบแน่น ( $P_{cd}$ ) โดยปริมาณสารทำความเย็นในชั้นสารดูดซับยังมีค่าคงที่  $W_{ads}$

2. กระบวนการ 2-3 กระบวนการคายสารทำความเย็นขณะที่ความดันคงที่ (isobaric desorption) เป็นกระบวนการที่รับความร้อนจากภายนอกต่อจากกระบวนการ isosteric heating ทำให้สารทำความเย็นระเหยออกจากชั้นสารดูดซับ โดยความดันมีค่าคงที่  $P_{cd}$  และปริมาณสารทำความเย็นจะลดลงจาก  $W_{ads}$  เป็น  $W_{des}$

3. กระบวนการ 3-4 กระบวนการคายความร้อนขณะที่ความสามารถในการดูดซับคงที่ (isosteric cooling) เป็นกระบวนการลดอุณหภูมิและความดันในแท่นดูดซับโดยใช้ของไหลเย็น ซึ่งความดันจะลดลงจนมีค่าต่ำกว่า  $P_{ev}$  ขณะที่สารทำความเย็นมีปริมาณคงที่  $W_{des}$

4. กระบวนการ 4-1 กระบวนการดูดซับสารทำความเย็นแบบความดันคงที่ (isobaric adsorption) กระบวนการที่เกิดขึ้นในขณะที่ความดันแท่นดูดซับลดลงจนมาถึงค่าคงที่  $P_{ev}$  ต่อจากนั้นจึงปล่อยสารทำความเย็นจากเครื่องทำระเหยให้เข้าไปดูดซับภายในแท่นดูดซับ ในกระบวนการนี้ระบบจะปล่อยความร้อนส่วนหนึ่งออกไป (heat of adsorption) และจะต้องระบาย

ความร้อนนอกจากแทนดูดซับอย่างต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิชั้นสารดูดซับลดลงเรื่อยๆ ส่งผลให้สารทำความเย็นมีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก  $W_{des}$  เป็น  $W_{ads}$  ถือเป็น การสิ้นสุดกระบวนการดูดซับ

จากรูปที่ 2.3 สามารถนำค่าตัวแปรที่ศึกษาซึ่งได้แก่ อุณหภูมิของแทนดูดซับ ความดันของแทนดูดซับและค่าความสามารถในการดูดซับ ไปวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับโดยใช้การสมดุลพลังงานในวัฏจักรได้ดังนี้ (Zhang and Wang, 1999)

กระบวนการ 1-2 ความร้อนจากภายนอกที่ให้แก่แทนดูดซับสามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$Q_{12} = \dot{m}_w (C_{ps} + C_{pw} W_{ads})(T_2 - T_1)(t_{1 \rightarrow 2}) \quad (2.6)$$

เมื่อ	$\dot{m}_w$	อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น (kg/s)
	$C_{ps}$	ความจุความร้อนจำเพาะของสารดูดซับ (kJ/kg.K)
	$C_{pw}$	ความจุความร้อนจำเพาะของสารทำความเย็น (kJ/kg.K)
	$T_1$	อุณหภูมิเริ่มต้นกระบวนการ isosteric heating (K)
	$T_2$	อุณหภูมิสิ้นสุดกระบวนการ isosteric heating (K)
	$t$	เวลาของการเกิดกระบวนการ (s)
	$W_{ads}$	ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับขณะอิ่มตัว ( $\text{kg}_{\text{adsorbate}}/\text{kg}_{\text{adsorbent}}$ )

กระบวนการ 2-3 ความร้อนจากภายนอกที่ให้แก่แทนดูดซับซึ่งประกอบด้วยความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก  $T_2$  ถึง  $T_3$  และความร้อนสำหรับการคายตัวของสารทำความเย็นออกจากสารดูดซับ

$$Q_{23} = \dot{m}_w [C_{ps} + C_{pw} ((W_{ads} + W_{des})/2)] (T_3 - T_2)(t_{2 \rightarrow 3}) + (W_{ads} - W_{des})(\Delta H) \quad (2.7)$$

เมื่อ	$T_3$	อุณหภูมิสิ้นสุดกระบวนการ desorption (K)
	$\Delta H$	ความร้อนสำหรับการคายตัวของสารทำความเย็นออกจากสารดูดซับ (kJ/kg)
	$W_{des}$	ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับขณะคายสารทำความเย็น ( $\text{kg}_{\text{adsorbate}}/\text{kg}_{\text{adsorbent}}$ )

กระบวนการ 3-4 ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากสารดูดซับจากการหล่อเย็นสามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$Q_{34} = \dot{m}_w (C_{ps} + C_{pw} W_{des})(T_4 - T_3)(t_{3 \rightarrow 4}) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $T_4$  อุณหภูมิสิ้นสุดกระบวนการ cooling (K)

กระบวนการ 4-1 เป็นการถ่ายเทความร้อนออกจากกระบวนการในทำนองเดียวกับกระบวนการ 2-3 ความร้อนที่คายออกในการดูดซับสารทำความเย็นสู่สารดูดซับ เรียกว่า ความร้อนในการดูดซับ (Heat of Adsorption) มีค่าเท่ากับความร้อนที่ใส่เข้าในการคายตัวที่คำนวณได้จากกระบวนการ 2-3

$$Q_{41} = \dot{m}_w [C_{ps} + C_{pw} ((W_{ads} + W_{des})/2)](T_4 - T_1)(t_{1 \rightarrow 4}) + (W_{ads} - W_{des})(\Delta H) \quad (2.9)$$

การทำความเย็นของระบบเกิดขึ้นเมื่อสารทำความเย็นถูกแยกออกจากสารดูดซับจากกระบวนการ 2-3 สารทำความเย็นจะไหลเข้าสู่เครื่องควบแน่น และออกจากเครื่องควบแน่นที่อุณหภูมิสูงกว่า  $T_1$  ดังนั้นสารทำความเย็นจะเริ่มดูดความร้อนที่เครื่องทำระเหยที่อุณหภูมิ  $T_3$  จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ  $T_1$  ถ้าสมมุติให้ค่าความร้อนแฝง (Latent heat) ในการกลายเป็นไอมีค่าคงที่ตลอดกระบวนการทำความเย็น ความสามารถในการทำความเย็นของระบบสามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$Q_{ev} = \dot{m}_w (L_{ev} - c_{pw}(T_1 - T_{ev}))(t_{4 \rightarrow 1}) \quad (2.10)$$

เมื่อ  $L_{ev}$  ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของสารทำความเย็น (kJ/kg)

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ (COP) สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$COP = \frac{Q_{ev}}{Q_{12} + Q_{23}} \quad (2.11)$$

### 2.2.2 คู่สารทำงาน

การเลือกคู่สารทำงาน (Working pair) เป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะคู่สารทำงานแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะการใช้งาน คู่สารทำงานประกอบด้วย

1. สารดูดซับ (Adsorbent) ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันได้แก่ Calcium Chloride , Silica gel, Activated carbon , Activated gel และ Activated alumina
2. สารถูกดูดซับหรือสารทำความเย็น (Adsorbate) ที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ water , ethanol , methanol ammonia และ สารกลุ่ม Freon

ในการเลือกคู่สารทำงานจะพิจารณา ค่าความร้อนแฝงในการดูดซับของคู่สารทำงาน ค่าความหนาแน่นของสารถูกดูดซับและลักษณะงานที่ใช้คู่สารชนิดนั้น ซึ่งค่าต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าคุณสมบัติของคู่สารทำงานแต่ละชนิด (Dieng, 2001)

Adsorbent	Adsorbate	Heat of adsorption (kJ/kg)	Density of the adsorbate(kg/m <sup>3</sup> )	Application area
Activated alumina	Water	2800	1000	Used mostly for desiccant cooling
Zeolite (various grades)	Water	3300-4200	1000	Natural zeolites have lower values than synthetic zeolites
Silica gel	Water	2800	1000	Not suitable above 200°C
Charcoal	Ammonia	2000-2700	681	Reacts at ca 100 °C Ammonia and methanol are not compatible with copper at high
	Methane	1800-2000	789	
Calcium choride	Methanol		791	Used for cooling



จากการศึกษา (Anyanwu, 2004) ได้สรุปแนวทางในการเลือกคู่สารทำงานซึ่งมีหลักการดังนี้

#### วิธีการเลือกสารดูดซับ

- สารที่สามารถทำให้อุณหภูมิเครื่องระเหยต่ำกว่า  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอควรมีค่าสูงและค่าปริมาตรจำเพาะต่ำ
- สารที่มีคุณสมบัติไม่ไวไฟ ไม่เป็นพิษ และไม่กัดกร่อน
- ค่าความดันอิ่มตัวต่ำ (มีค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย) ที่สภาวะการทำงานปกติ

#### วิธีการเลือกสารดูดซับ

- สารที่สามารถคายสารดูดซับได้ทั้งหมดเมื่อได้รับพลังงานความร้อนและสามารถดูดสารทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ
- คุณสมบัติของสารไม่เสื่อมสภาพตามเวลาหรือการใช้งาน
- สารที่มีคุณสมบัติไม่เป็นพิษและไม่กัดกร่อนต่อสิ่งแวดล้อม
- ราคาถูกและหาได้ง่าย

ดังนั้นในการวิจัยนี้ได้เลือกคู่สารทำงานคือ ซิลิกาเจล-น้ำ เนื่องจากสารทั้ง 2 ชนิดสามารถหาได้ง่าย เป็นสารที่มีคุณสมบัติไม่เป็นพิษ ไม่ไวไฟและไม่กัดกร่อนต่อสิ่งแวดล้อม ค่า Heat of adsorption ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับคู่สารชนิดอื่น (จากตารางที่ 2.2) อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในระบบอยู่ที่  $80\text{-}95\text{ }^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิเย็นที่ได้ประมาณ  $8\text{-}15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบปรับอากาศได้ (จากตารางที่ 2.1)

### 2.3 ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method)

ในการแก้ปัญหาลักษณะการไหลทั่วไปของระบบโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข มีอยู่ 3 วิธีหลักๆ คือ ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method, FDM) ระเบียบวิธีอีลิเมนต์สี่เหลี่ยม (Finite Element Method, FEM) และระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method, FVM) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขแบบระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยจะทำการจัดรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิตบนจุดต่างๆ เป็นปริมาตรควบคุม (control volume) แล้วทำการกำหนดค่าขอบเขตเพื่อให้สามารถแก้ระบบสมการได้ ในการแก้ระบบสมการจะใช้วิธีการทำซ้ำเพื่อหาคำตอบ (iteration) เป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (numerical analysis) สมการควบคุมของการไหลสามารถเขียนได้ในรูปแบบทั่วไปดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\mathbf{V}) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (2.12)$$

เมื่อ	$\phi$	ฟลักซ์การไหลขึ้นอยู่กับสมการการไหล
	$\Gamma$	สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย
	$S$	พลังงานภายในของฟลักซ์การไหล
	$\rho$	ความหนาแน่นของฟลักซ์การไหล

จากสมการที่ 2.12 สามารถอธิบายได้ดังนี้ เทอมแรกทางด้านซ้ายมือคืออัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ภายในอีลิเมนต์ของของไหล เทอมที่สองคืออัตราการไหลสุทธิของฟลักซ์ที่ไหลเข้าหรือออกอีลิเมนต์ของของไหลเนื่องจากการพา (convective term) ด้านขวาของสมการ เทอมแรกคืออัตราการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์ เนื่องจากการแพร่ (diffusive term) ส่วนเทอมสุดท้ายคืออัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานภายในของฟลักซ์การไหล (source term)

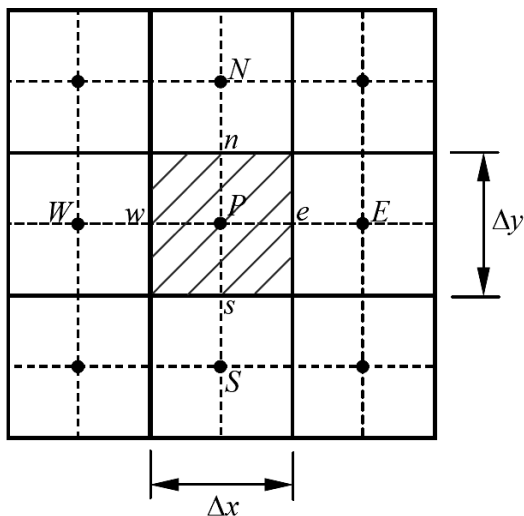
### 2.3.1 ปัญหาการแพร่ (Diffusion)

ในการแก้ไขปัญหาการแพร่กระจาย (Diffusion problem) เราจะทำการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้สมการรูปทั่วไปที่สภาวะคงตัว เมื่อพิจารณาเทอมการแพร่กระจายเพียงเทอมเดียว จากสมการที่ (2.12) จะได้สมการของการแพร่กระจาย ดังนี้

$$\nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi = 0 \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.13 เมื่อพิจารณาในระบบพิกัดฉากแบบ 2 มิติ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi = 0 \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.4 การวางตัวของปริมาตรควบคุมในสองมิติของปัญหาการแพร่กระจาย

จากสมการที่ (2.14) ทำการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมในสองมิติ (รูปที่ 2.4) ได้เป็น

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy + \int_{\Delta V} S_{\phi} dx dy = 0 \quad (2.15)$$

กำหนดให้  $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$  และ  $A_n = A_s = 1 \times \Delta x$

$$\left[ \Gamma_e A_e \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \Gamma_w A_w \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] + \left[ \Gamma_n A_n \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_n - \Gamma_s A_s \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_s \right] = 0 \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) สามารถแสดงฟลักซ์ที่ไหลผ่านปริมาตรควบคุมได้ดังนี้

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันตก

$$\Gamma_w A_w \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_w = \Gamma_w A_w \frac{(\phi_P - \phi_w)}{\delta x_{wp}} \quad (2.17a)$$

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันออก

$$\Gamma_e A_e \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_e = \Gamma_e A_e \frac{(\phi_E - \phi_P)}{\delta x_{ep}} \quad (2.17b)$$

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศใต้

$$\Gamma_s A_s \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_s = \Gamma_s A_s \frac{(\phi_P - \phi_S)}{\delta y_{sp}} \quad (2.17c)$$

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศเหนือ

$$\Gamma_n A_n \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_n = \Gamma_n A_n \frac{(\phi_N - \phi_P)}{\delta y_{np}} \quad (2.17d)$$

นำค่าจากสมการที่ (2.17a-d) ไปแทนลงในสมการ ที่ (2.16) จะได้ว่า

$$\Gamma_e A_e \frac{(\phi_E - \phi_P)}{\delta x_{ep}} - \Gamma_w A_w \frac{(\phi_P - \phi_W)}{\delta x_{wp}} + \Gamma_n A_n \frac{(\phi_N - \phi_P)}{\delta y_{np}} - \Gamma_s A_s \frac{(\phi_P - \phi_S)}{\delta y_{sp}} + \bar{S} \Delta V = 0 \quad (2.18)$$

ถ้าสมมติว่าการกระจายของ Source term ในปริมาตรควบคุมเป็นแบบเชิงเส้นจะได้ว่า  $\bar{S} \Delta V = S_u + S_P \phi_P$  เพราะฉะนั้นสมการ (2.18) สามารถเขียนได้เป็น

$$\left( \frac{\Gamma_w A_w}{\delta x_{wp}} + \frac{\Gamma_e A_e}{\delta x_{ep}} + \frac{\Gamma_s A_s}{\delta y_{sp}} + \frac{\Gamma_n A_n}{\delta y_{np}} - S_P \right) \phi_P = \left( \frac{\Gamma_w A_w}{\delta x_{wp}} \right) \phi_W + \left( \frac{\Gamma_e A_e}{\delta x_{ep}} \right) \phi_E + \left( \frac{\Gamma_s A_s}{\delta y_{sp}} \right) \phi_S + \left( \frac{\Gamma_n A_n}{\delta y_{np}} \right) \phi_N + S_u \quad (2.19)$$

ดังนั้น จะได้สมการพีชคณิตของสมการทั่วไปคือ

$$a_P \phi_P = a_w \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S_u \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$a_W = \frac{\Gamma_w A_w}{\delta x_{WP}}$$

$$a_E = \frac{\Gamma_e A_e}{\delta x_{EP}}$$

$$a_S = \frac{\Gamma_s A_s}{\delta y_{SP}}$$

$$a_N = \frac{\Gamma_n A_n}{\delta y_{NP}}$$

และ

$$a_P = a_W + a_E + a_S + a_N - S_P$$

### 2.3.2 ปัญหาการแพร่และการพา (Diffusion and Convection)

ในปัญหานี้ นอกจากปัญหาที่เกิดจากเทอมการแพร่กระจายแล้ว จะนำเทอมของการพามาพิจารณาด้วย ซึ่งโดยปกติเทอมการพานี้จะเกิดจากการไหลของของไหลในปัญหานั้น ซึ่งจำเป็นจะต้องทราบฟลักซ์การไหลที่เกิดขึ้น เพื่อให้ทราบถึงตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการไหลดังกล่าว จากสมการในรูปทั่วไป

$$\nabla \cdot (\rho \phi \mathbf{V}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (2.21)$$

เทอมทางด้านซ้ายมือแสดงถึงปริมาณฟลักซ์การไหลผ่านพื้นผิวปริมาตรควบคุม เทอมแรกทางด้านขวามือแสดงถึงปริมาณฟลักซ์การไหลที่แพร่ผ่านปริมาตรควบคุม เทอมสุดท้ายแสดงถึงการเกิดขึ้นหรือการสูญเสียของฟลักซ์การไหลภายในปริมาตรควบคุม จากสมการ (2.21) ทำการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมจะได้

$$\int_A \mathbf{n} \cdot (\rho \phi \mathbf{V}) dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \nabla \phi) dA + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.22)$$

เมื่ออินทิเกรตแล้วสามารถเขียนได้ดังนี้สำหรับพิกัดฉาก (Cartesian coordinates)

$$\begin{aligned}
 (\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w + (\rho v A \phi)_n - (\rho v A \phi)_s = & \left( \Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left( \Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w + \left( \Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n \\
 & - \left( \Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s + (S_u + S_p \phi_p)
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

กำหนดให้

$$F = \rho u = \rho v, \quad D = \frac{\Gamma}{\Delta x} = \frac{\Gamma}{\Delta y}$$

โดยที่ตัวแปรที่กำหนดให้แต่ละด้านของปริมาตรควบคุมสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 F_w = (\rho u)_w, \quad F_e = (\rho u)_e, \quad F_n = (\rho u)_n, \quad F_s = (\rho u)_s \\
 D_w = \frac{\Gamma_w}{\Delta x_{WP}}, \quad D_e = \frac{\Gamma_e}{\Delta x_{PE}}, \quad D_n = \frac{\Gamma_n}{\Delta y_{NP}}, \quad D_s = \frac{\Gamma_s}{\Delta y_{PS}}
 \end{aligned}$$

และสมมติให้กริดมีทุกด้านเท่ากัน  $A_w = A_e = A_n = A_s = A$  นำค่าตัวแปรที่กำหนดแทนสมการที่ (2.23) ได้ดังนี้

$$F_e \phi_e - F_w \phi_w + F_n \phi_n - F_s \phi_s = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) + D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S)
 \tag{2.24}$$

ค่าของฟลักซ์บนผิวปริมาตรควบคุมในเทอมการพาที่อยู่ในสมการ (2.21) สามารถหาได้จากการประมาณค่าด้วย Scheme ต่างๆ เช่น Central differencing scheme Upwind scheme Hybrid scheme และ Power-Law scheme โดยรายละเอียดของวิธีต่าง ๆ มีดังนี้

**1) Central differencing scheme** เป็นการประมาณเชิงเส้นของค่าฟลักซ์โดยการหาค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่ Interface ของปริมาตรควบคุม ดังนี้

$$\begin{aligned}\phi_e &= \frac{(\phi_P + \phi_E)}{2} \\ \phi_n &= \frac{(\phi_P + \phi_N)}{2} \\ \phi_w &= \frac{(\phi_W + \phi_P)}{2} \\ \phi_s &= \frac{(\phi_S + \phi_P)}{2}\end{aligned}$$

เมื่อนำค่า  $\phi_e$   $\phi_n$   $\phi_w$  และ  $\phi_s$  แทนในสมการ (2.24) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{F_e}{2}(\phi_P + \phi_E) - \frac{F_w}{2}(\phi_W + \phi_P) + \frac{F_n}{2}(\phi_P + \phi_N) - \frac{F_s}{2}(\phi_S + \phi_P) = \\ D_e(\phi_E - \phi_P) - D_w(\phi_P - \phi_W) + D_n(\phi_N - \phi_P) - D_s(\phi_P - \phi_S)\end{aligned}\quad (2.25)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\left[ \left( D_w - \frac{F_w}{2} \right) + \left( D_e - \frac{F_e}{2} \right) + \left( D_n - \frac{F_n}{2} \right) + \left( D_s - \frac{F_s}{2} \right) \right] \phi_P = \\ \left( D_w - \frac{F_w}{2} \right) \phi_W + \left( D_e - \frac{F_e}{2} \right) \phi_E + \left( D_n - \frac{F_n}{2} \right) \phi_N + \left( D_s - \frac{F_s}{2} \right) \phi_S\end{aligned}\quad (2.26)$$

หรือ

$$\begin{aligned}\left[ \left( D_w - \frac{F_w}{2} \right) + \left( D_e - \frac{F_e}{2} \right) + \left( D_n - \frac{F_n}{2} \right) + \left( D_s - \frac{F_s}{2} \right) + (F_e - F_w) + (F_n - F_s) \right] \phi_P = \\ \left( D_w - \frac{F_w}{2} \right) \phi_W + \left( D_e - \frac{F_e}{2} \right) \phi_E + \left( D_n - \frac{F_n}{2} \right) \phi_N + \left( D_s - \frac{F_s}{2} \right) \phi_S\end{aligned}\quad (2.27)$$

จัดให้อยู่ในรูปแบบสมการพีชคณิตทั่วไป

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_N \phi_N + a_S \phi_S\quad (2.28)$$

เมื่อ

$$a_w = D_w + \frac{F_w}{2}$$

$$a_e = D_e + \frac{F_e}{2}$$

$$a_n = D_n + \frac{F_n}{2}$$

$$a_s = D_s + \frac{F_s}{2}$$

และ

$$a_p = a_w + a_e + a_n + a_s + (F_e - F_w) + (F_n - F_s)$$

จากสมการที่ (2.28) จะเห็นได้ว่าการใช้ Central-differencing scheme นี้อาจทำให้ค่าสัมประสิทธิ์  $a_n$   $a_s$   $a_e$  หรือ  $a_w$  มีค่าเป็นลบ ซึ่งไม่เป็นไปตามกฎพื้นฐาน ที่ว่าเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ติดลบจะทำให้  $a_p \neq \sum |a_{nb}|$  ซึ่งไม่เป็นไปตาม Scarborough criterion ดังนั้นจะทำให้ผลเฉลยของปัญหาไม่ลู่เข้าสู่ค่าใดๆ ซึ่งเหล่านี้คือเหตุผลที่วิธี Central-difference ไม่เป็นที่นิยมเมื่อใช้ในการแก้ปัญหาคาร์พาและการแพร่กระจายที่มีค่าเพกเลตน์เบอร์ (Peclet number, Pe) สูง (Patankar, 1980)

**2) Upwind differencing scheme** เป็นวิธีที่คิดค้นเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการสมมติว่าค่าของการพาที่ผิวปริมาตรควบคุมเกิดจากค่าเฉลี่ยระหว่างฟลักซ์ด้านตะวันออก ( $\phi_e$ ) และฟลักซ์ด้านตะวันตก ( $\phi_w$ ) โดยเสนอแนวคิดใหม่คือเทอมการแพร่กระจายไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ในเทอมการพาสามารถคำนวณโดยสมมติฐานที่กล่าวว่า ค่าฟลักซ์ที่ผิวปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากับค่าฟลักซ์ที่ตำแหน่งของผิวปริมาตรควบคุมด้านต้นกระแสน้ำไหล (Upstream) นั่นคือ

$$\phi_e = \phi_p \quad \text{เมื่อ } F_e > 0 \quad \phi_e = \phi_E \quad \text{เมื่อ } F_e < 0$$

และ

$$\phi_w = \phi_w \quad \text{เมื่อ } F_w > 0 \quad \phi_w = \phi_p \quad \text{เมื่อ } F_w < 0$$



จัดรูปสมการพีชคณิตของสมการทั่วไปตามสมการที่ (2.28) ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ} \quad a_n &= \max[-F_n, 0] \\
 a_s &= \max[F_s, 0] \\
 a_e &= \max[-F_e, 0] \\
 a_w &= \max[F_w, 0] \\
 a_p &= a_w + a_E + a_N + a_S + (F_e - F_w) + (F_n - F_s)
 \end{aligned}$$

จากสมการข้างต้นจะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ จะไม่สามารถมีค่าเป็นลบได้ ทำให้ผลเฉลยที่ได้มีค่าเป็นไปตามลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นจริง และทำให้สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ได้โดยที่ผลเฉลยลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง

**3) Hybrid differencing scheme** เป็น Scheme ที่รวมข้อดีของวิธี Central differencing scheme และ Upwind differencing scheme ไว้ด้วยกัน โดยเลือกใช้จากค่า Peclet number  $Pe = \frac{F}{D}$  เราจะเห็นว่าวิธี Central differencing scheme มีความถูกต้องแม่นยำในระดับหนึ่ง แต่วิธีนี้จะมีผลต่อการสั้นของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ เมื่อ  $Pe$  มีค่ามากกว่า 2 หรือน้อยกว่า -2 ดังนั้นวิธี Hybrid differencing scheme จึงใช้วิธีนี้ในช่วงค่า  $Pe$  ระหว่าง -2 ถึง 2 เท่านั้น ส่วนค่า  $Pe$  ที่อยู่นอกช่วง -2 ถึง 2 จะใช้วิธี Upwind differencing scheme ซึ่งการคำนวณจะมีเสถียรภาพที่ดีกว่า Central differencing scheme ตัวอย่างของการประมาณค่าที่ตำแหน่งด้านทิศตะวันออก (East face) โดย Hybrid scheme

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P & Pe > 2 \\ \frac{\phi_E + \phi_P}{2} & -2 \leq Pe \leq 2 \\ \phi_E & Pe < -2 \end{cases}$$

จัดรูปสมการพีชคณิตของสมการทั่วไปตามสมการที่ (2.28) ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ} \quad a_N &= \max\left[-F_n, D_n - \frac{F_n}{2}, 0\right] \\
 a_S &= \max\left[F_s, D_s + \frac{F_s}{2}, 0\right] \\
 a_E &= \max\left[-F_e, D_e - \frac{F_e}{2}, 0\right] \\
 a_W &= \max\left[F_w, D_w + \frac{F_w}{2}, 0\right] \\
 a_P &= a_W + a_E + a_N + a_S + (F_e - F_w) + (F_n - F_s)
 \end{aligned}$$

**4) Power-Law scheme** ถูกเสนอโดย Patankar (1980) โดยวิธีนี้เป็นวิธีที่ให้ค่าผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรง (สำหรับปัญหาในหนึ่งมิติ) มากกว่าวิธี Hybrid scheme จากการกำหนดค่าในเทอมการแพร่กระจายให้มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อค่า Pe มีค่ามากกว่า 10 โดยการประมาณเป็นโพลิโนเมียลสามารถเขียนสมการพีชคณิตได้เป็น

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ} \quad a_N &= D_n \max\left[0, (1 - 0.1|Pe_n|)^5\right] + \max[-F_n, 0] \\
 a_S &= D_s \max\left[0, (1 - 0.1|Pe_s|)^5\right] + \max[F_s, 0] \\
 a_E &= D_e \max\left[0, (1 - 0.1|Pe_e|)^5\right] + \max[-F_e, 0] \\
 a_W &= D_w \max\left[0, (1 - 0.1|Pe_w|)^5\right] + \max[F_w, 0] \\
 a_P &= a_W + a_E + a_N + a_S + (F_e - F_w) + (F_n - F_s)
 \end{aligned}$$

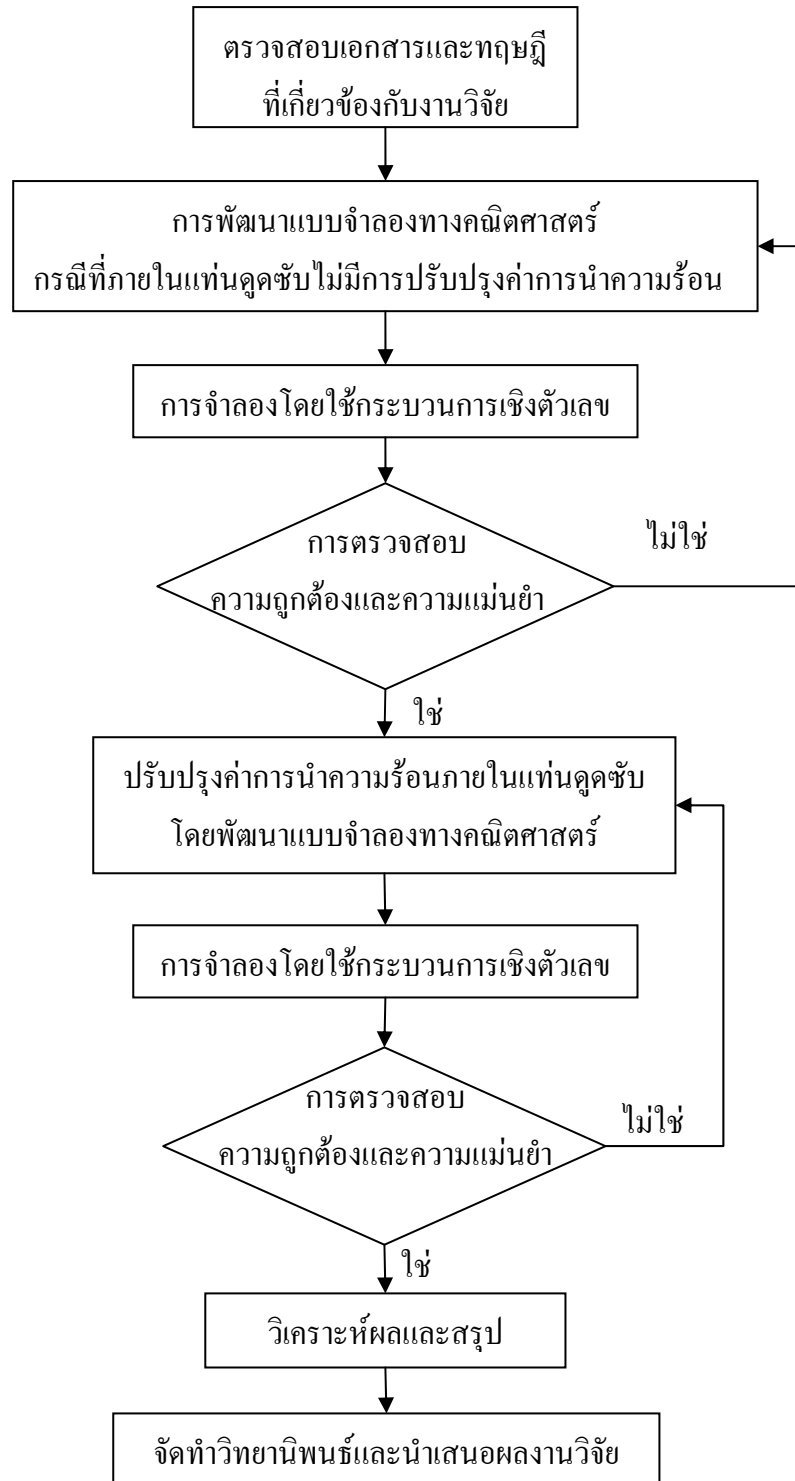
นอกเหนือจากวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้น ยังมีวิธี Second order upwind differencing scheme ที่มีความแม่นยำสูงกว่าวิธี upwind differencing scheme

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในแท่นคูดซับของระบบทำความเย็นแบบคูดซับที่ใช้ซิลิกาเจล และนำเป็นคู่มือการทำงาน โดยจะจำลองแนวทางการปรับปรุงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนซึ่งส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ ผลของแบบจำลองจะแสดงในรูปของ การกระจายตัวของอุณหภูมิ การกระจายตัวของความดันภายในแท่นคูดซับ และความสามารถในการคูดซับของสารคูดซับหรือมวลสารที่ถูกคูดซับ

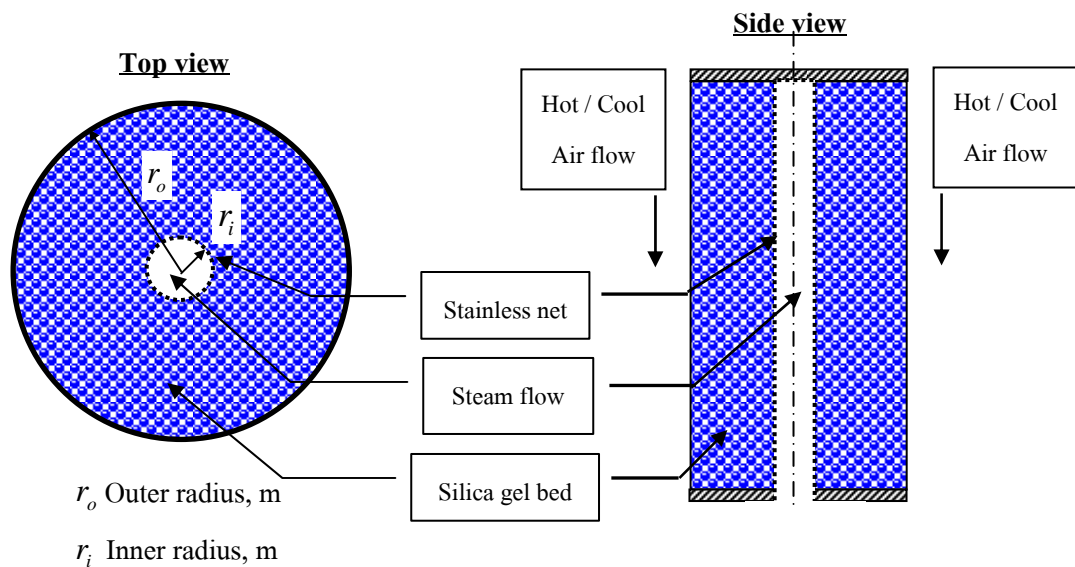
รายละเอียดของขั้นตอนในการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยในส่วนของ การตรวจสอบเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ผู้ทำวิจัยได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 1 และ 2 ดังนั้นในบทที่ 3 นี้ผู้วิจัยจะอธิบายในส่วนของ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความเหมาะสม การจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำของโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

### 3.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะมุ่งเน้นศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวลผ่านชั้นสารดูดซับภายในแท่นดูดซับ โดยแท่นดูดซับที่ใช้มีลักษณะเป็นแบบท่อทรงกระบอกกลวง ภายในบรรจุซิลิกาเจลชนิด A โดยผนังด้านในจะถูกกั้นไว้ด้วยตาข่ายสแตนเลส สำหรับบรรจุซิลิกาเจล 1 kg ทรงกระบอกที่ใช้เป็นแท่นดูดซับจะมีความยาว 26 cm มีรัศมีภายนอก ( $r_o$ ) 4.5 cm รัศมีภายใน ( $r_i$ ) 1 cm ซึ่งแสดงการคำนวณไว้ในภาคผนวก จ การถ่ายเทความร้อนทำได้โดยใช้ระบบลมร้อน/เย็น (Hot/Cool Air flow) ไหลผ่านด้านนอกของผิวท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพหน้าตัดส่วนประกอบของแท่นดูดซับในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนั้นเป็นแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient Model) เพื่อจะศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในชั้นสารดูดซับ (ซิลิกาเจล) ค่าตัวแปรต่างๆ ที่จะต้องศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิภายในแท่นดูดซับ ความสามารถในการดูดซับ และความดันภายในแท่นดูดซับ

ในการสร้างแบบจำลอง เราจะแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี

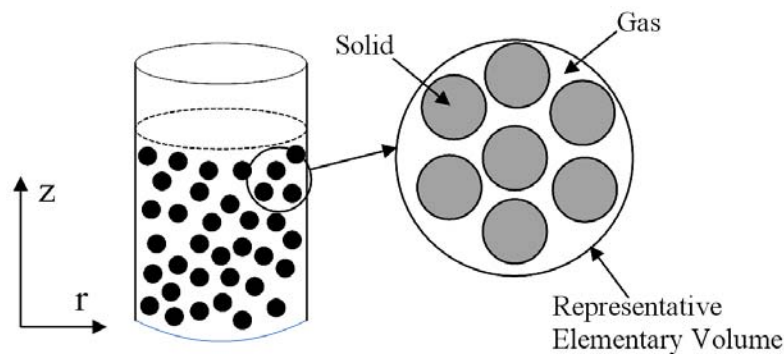
1. กรณีที่ภายในแท่นดูดซับไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดซับเพียงอย่างเดียว

2. กรณีที่ภายในแท่นดูดซับมีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนโดยใช้ซิลิกาเจลผสมผงทองแดงในอัตราส่วนต่างๆ เป็นสารดูดซับ

### 3.1.1 กรณีศึกษาไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ

ในการสร้างแบบจำลองสมมติฐานที่ใช้ประกอบด้วย

1. ลักษณะแท่นดูดซับเป็นทรงกระบอก ชั้นสารดูดซับประกอบด้วยขนาดอนุภาคสม่ำเสมอและมีสมบัติแบบไอโซโทรปิก (Isotropic- properties)
2. คุณสมบัติทางกายภาพของคู่สารทำงานมีค่าคงที่ ยกเว้นก๊าซที่เกิดขึ้น ความหนาแน่นจะไม่คงที่ โดยจะพิจารณาเป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal gas)
3. ไม่มีการถ่ายเทความร้อนปลายต่อทรงกระบอกทั้งสองด้าน
4. ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในชั้นสารดูดซับเป็นแบบ 2 มิติ แปรผันตามแนวรัศมี ( $r$ ) และความยาวของแท่นดูดซับ ( $z$ ) เท่านั้น



รูปที่ 3.3 แผนภาพลักษณะแท่นดูดซับที่ใช้ในสมมติฐาน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกรณีที่อยู่ในแท่นดูดซับไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อน สร้างจากสมการสมดุลทางความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับ (Liu and Leong, 2008 ; Nield and Bejan, 2006) ในการวิเคราะห์การสมดุลทางความร้อนของสมการอนุพันธ์พลังงานจะไม่คิดส่วนของเทอมการพาความร้อน (convective term) เนื่องจากค่า Peclet number (ค่าอัตราส่วนของค่าการพาความร้อนต่อค่าการนำความร้อน) มีค่าน้อยกว่า 1 ( $Pe < 1$ ) และค่าความเร็วของก๊าซที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับมีค่าน้อยประมาณ 0.07-0.1 m/s (Li et al., 2001) ซึ่งพิจารณาได้จากสมการที่ (3.1)-(3.12)

สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์พลังงานในส่วนของก๊าซ

$$\varepsilon_g C_{pg} \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \varepsilon_g \nabla \cdot (k_g \nabla T_g) + h_{gs} S_{gs} (T_s - T_g) \quad (3.1)$$

สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์พลังงานในส่วนของสารซีลิกาเจล

$$\rho_s (1 - \varepsilon_g) [C_{ps} + WC_{pl}] \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \varepsilon_g) \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + (1 - \varepsilon_g) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t} \Delta H + h_{gs} S_{gs} (T_g - T_s) \quad (3.2)$$

- เมื่อ  $\Delta H$  ความร้อนในช่วงการดูดซับของคู่สารทำงาน (Heat of Adsorption) (kJ/kg)  
 $k$  ค่าการนำความร้อนของสาร (W/m.K)  
 $h_{gs}$  ค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างซีลิกาเจลและก๊าซ (W/m<sup>2</sup>K)  
 $S_{gs}$  ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)

ค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างซีลิกาเจลและก๊าซที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับนั้นสามารถหาค่าได้จาก Dixon and Cresswell (1979) ซึ่งได้ทำการทดลองการไหลผ่านชั้นวัสดุพรุนในขณะที่ความเร็วต่ำ

$$\frac{1}{h} = \frac{d_p}{Nu_{gs} k_g} + \frac{d_p}{\beta k_s} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\beta = 10$  ถ้าชั้นวัสดุพรุนมีลักษณะเป็นทรงกลม และค่า Nusselt number สามารถหาค่าได้จาก

$$Nu_{fs} = (0.255 / \varepsilon_t) Pr^{1/3} Re_p^{2/3} \quad (3.4)$$

- เมื่อ Re ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์สำหรับการไหลของสาร  
 Pr ค่าแพรนด์นัมเบอร์สำหรับการกระจายตัวของสาร

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface per volume)  $S_{fs}$  หาค่าได้จาก (Dixon and Cresswell, 1979)

$$S_{fs} = 6(1 - \varepsilon_t) / d_p \quad (3.5)$$

เมื่อ  $d_p$  เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)

ค่าสัดส่วนช่องว่างเชิงปริมาตร  $\varepsilon$  (Volume fraction) คือ อัตราส่วนของ ปริมาตรช่องว่างต่อปริมาตรทั้งหมด เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.3 ภายในแท่นดูดซับประกอบด้วย สาร 2 สถานะ คือ สถานะของแข็ง (ซิลิกาเจล) และ สถานะก๊าซ (สารทำความเย็น) ค่าสัดส่วน ช่องว่างเชิงปริมาตรสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$\varepsilon_g = \frac{V_{total} - V_s}{V_{total}} = \frac{V_g}{V_{total}} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $V_s$  ปริมาตรของซิลิกาเจลที่บรรจุภายในแท่นดูดซับ ( $m^3$ )

$V_g$  ปริมาตรของก๊าซที่บรรจุภายในแท่นดูดซับ ( $m^3$ )

$V_{total}$  ปริมาตรของแท่นดูดซับ ( $m^3$ )

โดยธรรมชาติของวัสดุที่มีรูพรุนจะมีค่า  $\varepsilon$  ไม่เกิน 0.6 สำหรับแท่นที่บรรจุ ของแข็งรูปทรงกลมขนาดสม่ำเสมอมีค่า  $\varepsilon$  อยู่ระหว่าง 0.2595 (Rhombohedral packing) และ 0.4764 (Cubic packing)

#### สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์มวลในส่วนของก๊าซ

สมการสมดุลมวลในชั้นสารดูดซับหรือภายในแท่นดูดซับเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon_g \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \vec{V}_g) - \dot{m}_g = 0 \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\dot{m}_g$  อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซระเหย (kg/s)

$\vec{V}_g$  ความเร็วของก๊าซในแนวแกน (m/s)



### สมการเชิงอนุพันธ์ของการอนุรักษ์โมเมนตัม

การวิเคราะห์สมการอนุรักษ์โมเมนตัมสามารถเขียนในรูปของ Darcy's law เนื่องจากเป็นกฎที่ใช้อธิบายความเร็วของไหลในที่มีผ่านวัสดุที่มีรูพรุนในกรณีที่มีการไหลเป็นแบบไม่แปรผันต่อเวลา (steady-state flow) ขนาดอนุภาคมีความสม่ำเสมอ (uniform sized particles) และมีความเร็วค่อนข้างต่ำ โดยค่าความเร็วของไหลในแนวแกนสามารถหาค่าได้จาก

$$\vec{V}_g = -\frac{K}{\mu} \nabla P_g \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\mu$  ค่าความหนืดพลศาสตร์ของสารทำความเย็น (kg/m.s)  
 $K$  ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของซิลิกาเจล ( $m^2$ )  
 $D_p$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)

ค่าความสามารถในการซึมผ่านได้ของสารดูดซับจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของสารดูดซับ เช่น ในกรณีของแท่งดูดซับที่บรรจุอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน สามารถแสดงค่า  $K$  ในรูปความสัมพันธ์กับ  $\varepsilon$  ได้ (Dullien, 1992)

$$K = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{180(1 - \varepsilon)^2} \quad (3.9)$$

### สมการอัตราการดูดซับของกระบวนการดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับของสารซิลิกาเจลที่เกิดขึ้นภายในแท่งดูดซับสามารถหาค่าโดยใช้แบบจำลอง Linear driving force (Di, 2007) เมื่อภายในแท่งดูดซับมีการแพร่กระจายเป็นแบบ macroscopic

$$\frac{\partial W}{\partial t} = G(W_{eq} - W) \quad (3.10)$$

เมื่อ  $G$  สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (1/s) และ  $W_{eq}$  หาคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของกระบวนการดูดซับ (Adsorption) และกระบวนการคายสารถูกดูดซับ (Desorption) สามารถคำนวณค่าได้จาก

$$G = (15D_{so} / R_p^2) \exp[-E_a / (R(T_b))] \quad (3.11)$$

เมื่อ	$D_{so}$	ค่าการแพร่กระจายของอนุภาคซิลิกาเจล ( $m^2/s$ )
	$R_p$	รัศมีของอนุภาค (m)
	$E_a$	พลังงานในการกระตุ้นของซิลิกาเจล (kJ/K)
	$T_b$	อุณหภูมิของแท่นดูดซับ (K)

#### การประยุกต์ใช้สมมติฐานการสมดุลทางความร้อน (Local Thermal Equilibrium)

เป็นสมมติฐานสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนของสาร 2 สถานะ (Mhimid, 1998) เพื่อประหยัดเวลาในการคำนวณ โดยสมมติฐานดังกล่าวนี้จะถือว่าความแตกต่างของสารดูดซับและสารถูกดูดซับในสถานะต่างๆที่อยู่ในแท่นดูดซับมีค่าน้อยมาก โดยจะให้ค่าอุณหภูมิของสารทั้ง 2 สถานะภายในแท่นดูดซับนั้นมีค่าเท่ากัน ( $T_g = T_s = T$ ) สามารถนำไปใช้ได้ในการกรณีที่สมบัติของสารเป็น isotropic และลักษณะการนำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในปริมาตรควบคุมเป็นแบบขนานกันเพื่อจะได้ไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนจากสถานะหนึ่งไปสถานะอื่น ดังนั้นสมการสมดุลพลังงานภายในแท่นดูดซับสามารถวิเคราะห์ได้จากการนำสมการที่ (3.1) และ(3.2) มาเขียนได้ดังนี้

$$[(1 - \varepsilon_g)\rho_s(C_{ps} + WC_{pl}) + \varepsilon_g\rho_g C_{pg}] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rk_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}) + (1 - \varepsilon_g)\rho_s \frac{\partial W}{\partial t} \Delta H \quad (3.12)$$

เมื่อ  $k_{eff} = (1 - \varepsilon_g)k_s + \varepsilon_g k_g$

ในการนำสมการที่ (3.12) ไปใช้งานต้องทำการทดสอบสมมติฐานการสมดุลทางความร้อน (Local Thermal Equilibrium, LTE) โดยเปรียบเทียบกับกรณีปัญหาการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในแท่นดูดซับแบบใช้สมมติฐานการไม่สมดุลทางความร้อน (Local Thermal Non-Equilibrium, LTNE) ซึ่งใช้กันในงานวิจัยที่ผ่านมา (Khan et al., 2006 ; Liu and Leong, 2008 ; Wei-Dong et al., 2009 ; Freni et al., 2009) และสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก จ บททความวิจัยที่เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์

### 3.1.2 กรณีศึกษาที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ

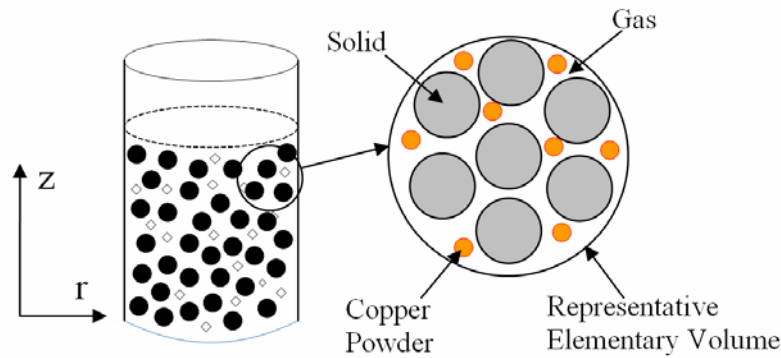
ในการสร้างแบบจำลองสมมติฐานที่ใช้ประกอบด้วย

1.1 ลักษณะแท่นดูดซับเป็นทรงกระบอก ชั้นสารดูดซับประกอบด้วยขนาดอนุภาคสม่ำเสมอและมีสมบัติแบบไอโซโทรปิก (Isotropic- properties)

1.2 คุณสมบัติทางกายภาพของกลุ่มสารทำงานและปริมาณผงทองแดงมีค่าคงที่ ยกเว้นก๊าซที่เกิดขึ้น ความหนาแน่นจะไม่คงที่ โดยจะพิจารณาเป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal gas)

1.3 ไม่มีการถ่ายเทความร้อนบริเวณตาข่ายสแตนเลส (Stainless steel net)

1.4 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในชั้นสารดูดซับเป็นแบบ 2 มิติ แปรผันตามแนวรัศมี (r) และความยาวของแท่นดูดซับ (z) เท่านั้น



รูปที่ 3.4 แผนภาพลักษณะแท่นดูดซับที่ใช้ในสมมติฐาน

ในกรณีนี้เราไม่สามารถใช้สมมติฐานการสมดุลทางความร้อน (LTE) ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ เนื่องจากค่าการนำความร้อนของผงทองแดงมีค่าที่แตกต่างจากค่าการนำความร้อนของซิลิกาเจลและสารทำความเย็นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์แบบแยกสถานะของสารภายในแท่นดูดซับออกเป็น 2 สถานะ คือ สถานะของแข็ง (ชั้นซิลิกาเจลและผงทองแดง) สถานะก๊าซ (สารทำความเย็น) แสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งสามารถใช้ค่าสัดส่วนช่องว่างเชิงปริมาตร (volume fraction) เป็นตัวแบ่งแยกได้ดังนี้

$$\varepsilon_{cu} + \varepsilon_g = \frac{V_{cu} + V_g}{V_{total}} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_s = 1 - \varepsilon_g - \varepsilon_{cu} \quad (3.14)$$

เมื่อ	$\varepsilon_s$	ค่าสัดส่วนช่องว่างเชิงปริมาตรของสารซิลิกาเจล
	$\varepsilon_g$	ค่าสัดส่วนช่องว่างเชิงปริมาตรของก๊าซ
	$\varepsilon_{cu}$	ค่าสัดส่วนช่องว่างเชิงปริมาตรของผงทองแดง

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ประกอบไปด้วย 4 สมการหลักที่ใช้ ได้แก่ สมการอนุรักษ์พลังงานของคู่สารทำงานและปริมาณผงทองแดง สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนมวลน้ำในชั้นสารดูดซับ ซึ่งสมการ 3 สมการหลังสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (3.7)-(3.11) ส่วนสมการอนุรักษ์พลังงานของคู่สารทำงานและปริมาณผงทองแดงแสดงดังต่อไปนี้

สมการเชิงอนุพันธ์การอนุรักษ์พลังงานในส่วนก๊าซ

$$\varepsilon_g C_{pg} \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \varepsilon_g \nabla \cdot (k_g \nabla T_g) + h_{gs} S_{gs} (T_s - T_g) + h_{gcu} S_{gcu} (T_{cu} - T_g) \quad (3.15)$$

สมการเชิงอนุพันธ์การอนุรักษ์พลังงานในส่วนสารซิลิกาเจล

$$\rho_s (1 - \varepsilon_g - \varepsilon_{cu}) [C_{ps} + WC_{pl}] \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \varepsilon_g - \varepsilon_{cu}) \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + (1 - \varepsilon_g - \varepsilon_{cu}) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t} \Delta H + h_{gs} S_{gs} (T_g - T_s) + h_{cus} S_{cus} (T_{cu} - T_s) \quad (3.16)$$

สมการเชิงอนุพันธ์การอนุรักษ์พลังงานในส่วนปริมาณผงทองแดง

$$\varepsilon_{cu} C_{pcu} \rho_{cu} \frac{\partial T_{cu}}{\partial t} = \varepsilon_{cu} \nabla \cdot (k_{cu} \nabla T_{cu}) + h_{cus} S_{cus} (T_s - T_{cu}) + h_{gcu} S_{gcu} (T_g - T_{cu}) \quad (3.17)$$

เมื่อ	$k_s$	ค่าการนำความร้อนของสารซิลิกาเจล (W/m.K)
	$k_g$	ค่าการนำความร้อนของก๊าซ (W/m.K)
	$k_{cu}$	ค่าการนำความร้อนของผงทองแดง (W/m.K)
	$h_{gcu}$	ค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างทองแดงและก๊าซ (W/m <sup>2</sup> K)
	$h_{cus}$	ค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างซิลิกาเจลและทองแดง (W/m <sup>2</sup> K)

ค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างซิลิกาเจลและผงทองแดง ( $h_{cus}$ ) ที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับนั้นสามารถประมาณค่าได้จากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างสถานะ ( $h_{gs}$  และ  $h_{gs}$ ) โดยใช้ Thermal contact resistance ช่วยในการวิเคราะห์ดังนี้

$$h_{cus} = \frac{h_{gs} h_{gs}}{h_{gs} + h_{gs}} \quad (3.18)$$

### 3.2 การจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ในการจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะกล่าวถึงการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์มาเป็นสมการพีชคณิต เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตในแต่ละกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับ และการคำนวณตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

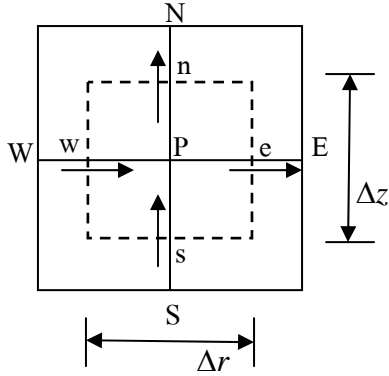
#### 3.2.1 การแปลงสมการเชิงอนุพันธ์เป็นสมการพีชคณิต

ในขั้นตอนการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์เป็นสมการพีชคณิตจะใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (FVM) การ Discretization สมการเชิงอนุพันธ์ของกรณีศึกษาทั้ง 2 กรณี คือ

กรณีศึกษาไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ

จากสมการต่างๆที่ต้องใช้ในแบบจำลอง การ Discretization ทำได้โดยใช้ Central difference scheme แก้ปัญหาในเทอมของการแพร่ (diffusive term) และใช้ Forward difference scheme ในเทอมของการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient term)

**ตัวอย่างที่ 1** การ Discretization สมการเชิงอนุพันธ์การอนุรักษ์พลังงาน (พิจารณาสมการที่ 3.1 3.2 และ 3.12 ประกอบ) โดยวิเคราะห์ที่ปริมาตรควบคุมภายใน (Interior control volume) และกริดที่ใช้เป็นแบบสม่ำเสมอ



$$a_E = (D_e)A_e$$

$$a_W = (D_w)A_w$$

$$a_S = (D_s)A_s$$

$$a_N = (D_n)A_n$$

$$a_p = \frac{\rho c_p V}{\Delta t}$$

$$S_p = \text{Internal heat transfer} \quad , \quad S_U = \text{Adsorption term}$$

เมื่อ  $D = \frac{k}{\Delta r}$  , Adsorption term =  $(1 - \varepsilon_t)\rho_s \Delta H \frac{dw}{dt}$

Internal heat transfer =  $hS(T_g^0 - T_s^0)$  (สารซีลิกาเจล)

Internal heat transfer =  $hS(T_s^0 - T_g^0)$  (สารทำความเย็น)

$\rho c_p = (1 - \varepsilon_t)\rho_s(C_{ps} + WC_{pw})$  (สารซีลิกาเจล)

$\rho c_p = \varepsilon_t \rho_g C_{pg}$  (สารทำความเย็น)

$A_e = 2\pi r_e \Delta z$  ,  $A_w = 2\pi r_w \Delta z$  ,  $A_s = \pi r_e^2 - \pi r_w^2 = A_n$  ,  $V = (\pi r_e^2 - \pi r_w^2) \Delta z$

สำหรับกริดที่ใช้สมมุติฐาน LTE ถ้า  $\rho c_p = (1 - \varepsilon_t)\rho_s(C_{ps} + WC_{pw}) + \varepsilon_t \rho_g C_{pg}$

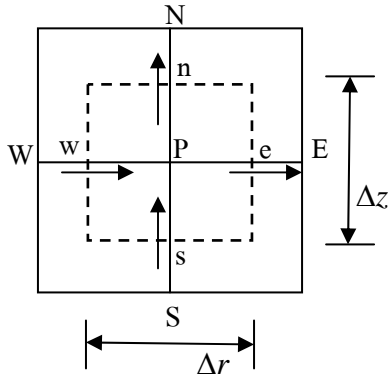
หลังจากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดแทนให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิตในรูปแบบ Explicit ของแต่ละปริมาตรควบคุมแสดงดังสมการที่ 3.19

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E^0 + a_W \phi_W^0 + a_N \phi_N^0 + a_S \phi_S^0 + [a_p^0 - (a_E + a_W + a_N + a_S) - S_p] \phi_p^0 + S_u \quad (3.19)$$

กรณีศึกษาที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ

ในกรณีศึกษานี้ผู้วิจัยทำการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์การอนุรักษ์พลังงาน สมการเชิงอนุพันธ์การอนุรักษ์มวล และสมการเชิงอนุพันธ์การอนุรักษ์โมเมนตัมเป็นสมการพีชคณิต โดยใช้วิธีการเดียวกับกรณีศึกษาที่ผ่านมา

**ตัวอย่างที่ 2** การ Discretization สมการเชิงอนุพันธ์การอนุรักษ์พลังงาน (พิจารณาสมการที่ 3.15, 3.16 และ 3.17 ประกอบ) โดยวิเคราะห์ที่ปริมาตรควบคุมภายใน (Interior control volume) และกริดที่ใช้เป็นแบบสม่ำเสมอ



$$a_E = (D_e)A_e$$

$$a_W = (D_w)A_w$$

$$a_S = (D_s)A_s$$

$$a_N = (D_n)A_n$$

$$a_p = \frac{\rho c_p V}{\Delta t}$$

$S_p$  = Internal heat transfer ,  $S_U$  = Adsorption term

เมื่อ  $D = \frac{k}{\Delta r}$  , Adsorption term =  $(1 - \varepsilon_t)\rho_s \Delta H \frac{dw}{dt}$

Internal heat transfer =  $hS(T_{cu}^0 - T_s^0)$  (สารซิลิกาเจล)

Internal heat transfer =  $hS(T_{cu}^0 - T_g^0)$  (สารทำความเย็น)

$\rho c_p = (1 - \varepsilon_t)\rho_s (C_{ps} + WC_{pw})$  (สารซิลิกาเจล)

$\rho c_p = \varepsilon_g \rho_g C_{pg}$  (สารทำความเย็น)

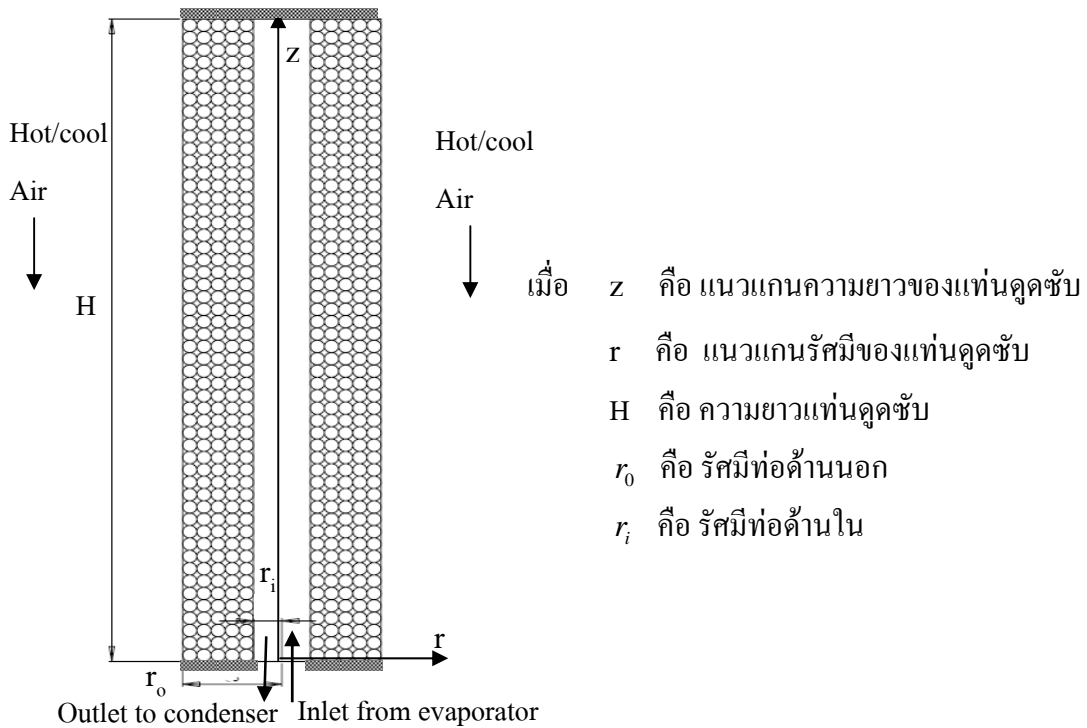
$\rho c_p = \varepsilon_{cu} \rho_{gcu} C_{pcu}$  (ผงทองแดง)

$A_e = 2\pi r_e \Delta z$  ,  $A_w = 2\pi r_w \Delta z$  ,  $A_s = \pi r_e^2 - \pi r_w^2 = A_n$  ,  $V = (\pi r_e^2 - \pi r_w^2) \Delta z$

หลังจากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดแทนให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิตในรูปแบบ Explicit ของแต่ละปริมาตรควบคุมแสดงดังสมการที่ 3.19

### 3.2.2 เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต

ในการศึกษาขั้นตอนนี้เพื่อกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตให้มีความสอดคล้องไปตามสถานะและขั้นตอนการทำงานของระบบ พิจารณาได้จากรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ภาพตัดของแท่นดูดซับที่แสดงค่าขอบเขตตามเงื่อนไข

เงื่อนไขเริ่มต้น ประกอบด้วยค่าอุณหภูมิ ความดันและความสามารถในการดูดซับหรือมวลสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งจะเป็นค่าคงที่ที่มาจากช่วงปลายกระบวนการตามรอบวัฏจักรแสดงได้ดังนี้

1. กระบวนการ Preheating เป็นกระบวนการเริ่มต้นของระบบ ( $t = 0$  s)

- อุณหภูมิภายในแท่นดูดซับมีค่าเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศ

$$T_g(z, r, 0) = T_s(z, r, 0) = T_{cu}(z, r, 0) = T_i = 25^\circ\text{C}$$

- ความดันภายในแท่นดูดซับวิเคราะห์ได้จาก คุณสมบัติ Ideal gas ( $P = mRT/V$ )

$$P(z, r, 0) = P_0 = 3.38 \text{ kPa}$$

- ความสามารถในการดูดซับมีค่าเท่ากับสถานะอิ่มตัวในการดูดซับของซิลิกาเจล

$$W = W_{ads}$$



2. กระบวนการ Desorption เริ่มเวลาระบบในช่วงปลายกระบวนการ preheating ( $t = t_{preheating}$ )

- อุณหภูมิภายในแท่นดูดซับมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ความดันภายในแท่นดูดซับมีค่าเกินความดันของเครื่องควบแน่น

$$T_g(z, r, t) = T_s(z, r, t) = T_{cu}(z, r, t) = T_i(P > P_{cd})$$

- ความดันภายในแท่นดูดซับมีค่าประมาณความดันของเครื่องควบแน่น

$$P(z, r, t) \approx P_{cd}$$

3. กระบวนการ Cooling เริ่มเวลาระบบในช่วงปลายกระบวนการ desorption ( $t = t_{desorption}$ )

- อุณหภูมิภายในแท่นดูดซับมีค่าเท่ากับอุณหภูมิในขณะที่แท่นดูดซับแทบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดซับ

$$T_g(z, r, t) = T_s(z, r, t) = T_{cu}(z, r, t) = T_i\left(\frac{dW}{dt} = 0.001\right)$$

- ความดันภายในแท่นดูดซับมีค่าประมาณความดันของเครื่องควบแน่น

$$P(z, r, t) \approx P_{cd}$$

- ความสามารถในการดูดซับมีค่าเท่ากับสภาวะที่แท่นดูดซับแทบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดซับ

$$W = W_i\left(\frac{dW}{dt} = 0.001\right)$$

4. กระบวนการ Adsorption เริ่มเวลาระบบในช่วงปลายกระบวนการ Cooling ( $t = t_{cooling}$ )

- อุณหภูมิภายในแท่นดูดซับมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ความดันภายในแท่นดูดซับมีค่าน้อยกว่าความดันของเครื่องทำระเหย

$$T_g(z, r, t) = T_s(z, r, t) = T_{cu}(z, r, t) = T_i(P < P_{ev})$$

- ความดันภายในแท่นดูดซับมีค่าประมาณความดันของเครื่องทำระเหย

$$P(z, r, 0) \approx P_{ev}$$

เงื่อนไขค่าขอบเขต ประกอบด้วย 2 เงื่อนไขที่ใช้งาน

1. เงื่อนไขที่ใช้ทุกกระบวนการ ได้แก่

บริเวณขอบบนของแท่นดูดซับ ( $z = H$ ) และขอบล่างของแท่นดูดซับ ( $z = 0$ ) วิเคราะห์เป็นแบบ

Thermal Insulation และไม่คิดการเปลี่ยนแปลงของ Pressure gradient

$$\frac{\partial T_{s,g,cu}}{\partial z}(H, r, t) = 0, \quad \frac{\partial T_{s,g,cu}}{\partial z}(0, r, t) = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial z}(H, r, t) = 0 \quad \text{และ} \quad \frac{\partial P}{\partial z}(0, r, t) = 0$$

2. เงื่อนไขที่ใช้ตามกระบวนการแบ่งได้ดังนี้

1. กระบวนการ Preheating เป็นกระบวนการที่แทนจุดซั้บรับความร้อนจากลมร้อนอุณหภูมิ ( $T_h$ ) มีค่าประมาณ 80 -90 °C

บริเวณขอบรัศมีภายนอกของชั้นสารซิลิกาเจล ( $r = r_o$ ) วิเคราะห์เป็นแบบ Convection

$$-k_{s,g,cu} \frac{\partial T_{s,g,cu}}{\partial r}(z, r_o, t) = h_{air}(T_{s,g,cu} - T_h)$$

บริเวณขอบรัศมีภายในของชั้นสารซิลิกาเจล ( $r = r_i$ ) วิเคราะห์เป็นแบบ Symmetry

$$\frac{\partial T_{s,g,cu}}{\partial z}(z, r_i, t) = 0$$

2. กระบวนการ Desorption เป็นกระบวนการที่รับความร้อนต่อเนื่องจากกระบวนการ Preheating

บริเวณขอบรัศมีภายนอกของชั้นสารซิลิกาเจล ( $r = r_o$ ) วิเคราะห์เป็นแบบ Convection

$$-k_{s,g,cu} \frac{\partial T_{s,g,cu}}{\partial r}(z, r_o, t) = h_{air}(T_{s,g,cu} - T_h)$$

บริเวณขอบรัศมีภายในของชั้นสารซิลิกาเจล ( $r = r_i$ ) วิเคราะห์เป็นแบบ Convection

$$-k_{s,g,cu} \frac{\partial T_{s,g,cu}}{\partial r}(z, r_i, t) = h_{air}(T_{s,g,cu} - T_{cd})$$

3. กระบวนการ Cooling เป็นกระบวนการที่ระบายความร้อนแทนจุดซั้บด้วยอุณหภูมิลมเย็น ( $T_c$ ) มีค่าประมาณ 25 -28 °C

บริเวณขอบรัศมีภายนอกของชั้นสารซิลิกาเจล ( $r = r_o$ ) วิเคราะห์เป็นแบบ Convection

$$-k_{s,g,cu} \frac{\partial T_{s,g,cu}}{\partial r}(z, r_o, t) = h_{air}(T_{s,g,cu} - T_c)$$

บริเวณขอบรัศมีภายในของชั้นสารซิลิกาเจล ( $r = r_i$ ) วิเคราะห์เป็นแบบ Symmetry

$$\frac{\partial T_{s,g,cu}}{\partial z}(z, r_i, t) = 0$$

4. กระบวนการ Adsorption เป็นกระบวนการที่ระบายความร้อนต่อเนื่องจากกระบวนการ Cooling

บริเวณขอบรัศมีภายนอกของชั้นสารซิลิกาเจล ( $r = r_o$ ) วิเคราะห์เป็นแบบ Convection

$$-k_{s,g,cu} \frac{\partial T_{s,g,cu}}{\partial r}(z, r_o, t) = h_{air}(T_{s,g,cu} - T_c)$$

บริเวณขอบรัศมีภายในของชั้นสารซิลิกาเจล ( $r = r_i$ ) วิเคราะห์เป็นแบบ Convection

$$-k_{s,g,cu} \frac{\partial T_{s,g,cu}}{\partial r}(z, r_i, t) = h_{air}(T_{s,g,cu} - T_{ev})$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ ( $h_{air}$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำภายในแท่นดูดซับ ( $h_w$ ) สามารถคำนวณได้จาก Dittus และ Boulter (1930 อ้าง โดย Yunus, 2004) กรณีการไหลเป็นแบบปั่นป่วนและไหลภายในท่อผิวเรียบ

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (3.20)$$

เมื่อ  $n=0.4$  สำหรับการทำความร้อน และ  $n=0.3$  สำหรับการทำความเย็น สามารถหาค่า  $h$  ได้จาก

$$h = \frac{k}{D} Nu \quad (3.21)$$

เมื่อ  $D$  ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อถ่ายเทความร้อน (m)

### 3.2.3 การคำนวณตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ตัวแปรด้วยกันดังนี้ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นดูดซับ ค่าความดันเฉลี่ยของแท่นดูดซับ และค่าความสามารถในการดูดซับของแท่นดูดซับ ซึ่งตัวแปรทั้ง 3 เป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบกันในการศึกษาทั้งกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนของแท่นดูดซับและมีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนของแท่นดูดซับ รายละเอียดการคำนวณตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังนี้

1. กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลข ได้แก่ ค่าคุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพของกลุ่มสารทำงาน และค่าคุณสมบัติทางกายภาพของผงทองแดง แสดงดังตารางที่ 3.1 (Wang et al. 2009 ; Di, 2007 ; Freni et al., 2009)

ตารางที่ 3.1 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของคู่สารทำงานและผงทองแดงที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลข

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า
ขนาดซิลิกาเจล	$D_p$	2.5 mm
ความร้อนในการดูดซับ	$\Delta H$	2700 kJ/kg
ความหนาแน่นของซิลิกาเจล	$\rho_s$	2100 kg/m <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของน้ำ (ก๊าซ)	$\rho_g$	0.0512 kg/m <sup>3</sup>
ความจุความร้อนจำเพาะของซิลิกาเจล	$C_{ps}$	924 J/kg.K
ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (ก๊าซ)	$C_{pg}$	1840 J/kg.K
ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (ของเหลว)	$C_{pl}$	4180 J/kg.K
ค่าการนำความร้อนของซิลิกาเจล	$k_s$	0.196 W/m.K
ค่าการนำความร้อนของน้ำ (ก๊าซ)	$k_g$	0.015 W/m.K
ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของซิลิกาเจล	$W_0$	0.35
ค่าการนำความร้อนของทองแดง	$k_s$	385 W/m.K
ความจุความร้อนจำเพาะของทองแดง	$C_{pcu}$	383 J/kg.K
ความหนาแน่นของทองแดง	$\rho_{cu}$	8950 kg/m <sup>3</sup>
ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ	$L_{ev}$	2800 kJ/kg
ค่าการแพร่กระจายของอนุภาคซิลิกาเจล	$D_{so}$	$2.54 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s
ค่าพลังงานในการกระตุ้นของสารดูดซับ	$E_a$	2330 J/kg

2. คำนวณค่าตัวแปรทั้งสามจากสมการพีชคณิตที่ได้จากการใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (สมการที่ 3.19) โดยใช้วิธีการทำซ้ำเพื่อหาคำตอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ ระเบียบวิธีการทำซ้ำแบบยาโคบี (Jacobi iteration method) (ปราโมทย์ เคะชะอำไพ, 2549) ในการคำนวณผู้วิจัยจะใช้ time step 0.1 วินาที และใช้ค่าความเสถียรของการลู่เข้าของคำตอบ อยู่ที่ 0.1% ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.24

$$\left| \frac{X_i^{k+1} - X_i^k}{X_i^{k+1}} \right| \times 100\% < 0.1\% \quad (3.22)$$

เมื่อ  $k$  รอบการคำนวณซ้ำครั้งที่  
 $i$  ตำแหน่งของค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณ

3. ค่าตัวแปรอุณหภูมิและความดันนั้นใช้ค่าเฉลี่ยของทั้งแท่งคู่ซับโดยวิเคราะห์ตามปริมาตรย่อยของแท่ง ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3.23) และ (3.24)

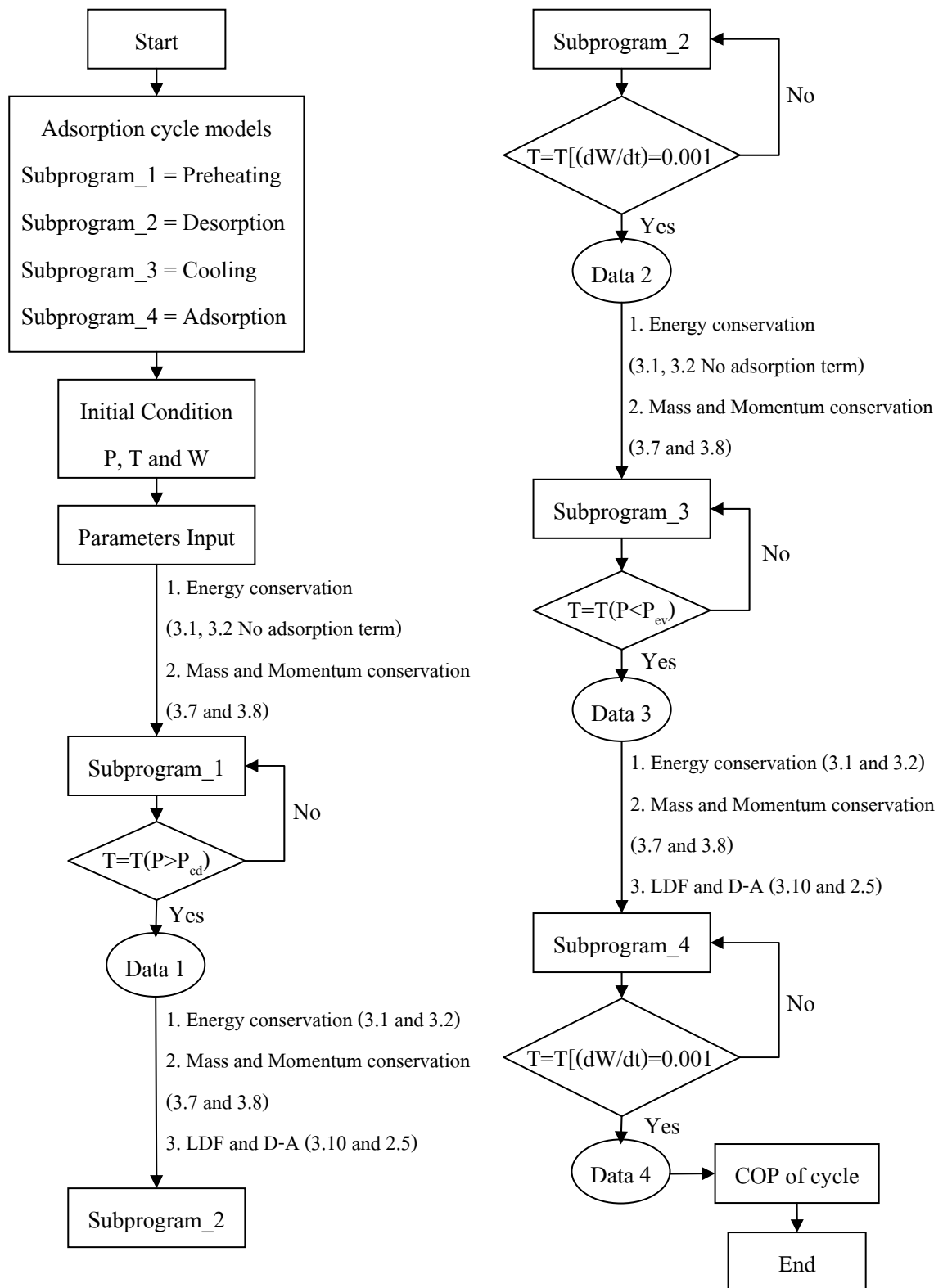
$$T_{b,avg} = \frac{\sum_{j=1}^N V_j T_{bj}}{V_{tot}} \quad (3.23)$$

$$P_{b,avg} = \frac{\sum_{j=1}^N V_j P_{bj}}{V_{tot}} \quad (3.24)$$

เมื่อ  $j$       คำนีของกริดในแนวแกนรัศมี  
 $N$       จำนวนกริดที่ใช้ในแนวแกนรัศมี

ในการจำลองโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB 7.0 ในการคำนวณและแสดงกระบวนการคำนวณเชิงตัวเลขดังรูปที่ 3.6

กรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ



รูปที่ 3.6 แผนผังกระบวนการคำนวณเชิงตัวเลข

### กรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ

กระบวนการคำนวณเชิงตัวเลขของกรณีศึกษานี้จะมีความใกล้เคียงกับรูปที่ 3.6 แต่จะเพิ่มเติมค่าอัตราส่วนผงทองแดงต่อแท่นดูดซับในส่วน Parameters Input และเปลี่ยนแปลงสมการที่ใช้ในการจำลองเป็นสมการที่ 3.15-3.17

### **3.3 การตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำของแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลข**

ในหัวข้อนี้เป็นการพิสูจน์ความถูกต้องและความแม่นยำของแบบจำลองใช้ในการจำลองเพื่อนำโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาไปใช้แก้ปัญหาการถ่ายเทมวลและความร้อนภายในแท่นดูดซับทั้งกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับและกรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับแทนการทดลองจริง

#### **3.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลข**

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ จะตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Restuccia (2005) ซึ่งได้ทำการทดลองเกี่ยวกับระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้ สารซีโอไลท์ (CBV-901) และสารเมทานอลเป็นคู่สารทำงาน ซึ่งลักษณะของแท่นดูดซับที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่สร้างขึ้น มีผลการทดลองที่ชัดเจน ทั้งยังมีข้อมูลของคุณสมบัติทางกายภาพของสารที่ใช้อย่างครบถ้วน

ในการวิเคราะห์ผลของการตรวจสอบความถูกต้อง ใช้หลักสถิติ (statistics) เพื่อแสดงความน่าเชื่อถือของโปรแกรม ซึ่งหลักสถิติที่ใช้แบ่งออกเป็น 2 วิธี

- ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของค่าที่ได้จากกระบวนการเชิงตัวเลข โดยใช้ Root Mean Square Error (RMSE)

- ตรวจสอบระดับความเชื่อมั่นของแบบจำลองกับผลการทดลองของผู้วิจัยที่ได้ทำมาก่อนโดยใช้การทดสอบแบบ t-Test โดยพิจารณาที่ความเชื่อมั่น 95% (Confidence level of 95 percent) การคำนวณค่า t จากสมการที่ (3.25) และเทียบกับค่า t จากตารางแจกแจงความน่าจะเป็นแบบที่ (Holman, 2000)

$$t = \frac{x_{m1} - x_{m2}}{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} \quad (3.25)$$

เมื่อ	$x_m$	ค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดข้อมูล
	$\sigma$	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	$n$	จำนวนชุดข้อมูล

ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ จะตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ เกศนที น้อยปิ่น (2546) ซึ่งได้ทำการทดลองเกี่ยวกับระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้สารซิลิกาเจลและน้ำเป็นคู่สารทำงานกรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนของสารซิลิกาเจลโดยการผสมปริมาณผงทองแดงในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวมีการทดลองที่มีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่สร้างขึ้น และมีผลการทดลองและข้อมูลของคุณสมบัติทางกายภาพของสารที่ใช้ในช่วงกระบวนการ preheating ที่ชัดเจน

ในการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณจะใช้วิธีการเดียวกับกรณีศึกษาไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ

### 3.3.2 การตรวจสอบความแม่นยำของที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลข

ในการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่ใช้ในการจำลอง จะตรวจสอบเพื่อหาขนาดของกริดคำนวณที่เหมาะสมกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาทั้งกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับและมีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการแบ่งจำนวนกริดแบบสี่เหลี่ยม (quadrilateral) ที่ใช้ในการคำนวณออกเป็น 4 ขนาด ดังนี้
  - ขนาด 10 x 10 mm. ใช้กริดทั้งหมด 78 กริด
  - ขนาด 5 x 5 mm. ใช้กริดทั้งหมด 260 กริด
  - ขนาด 2.5 x 2.5 mm. ใช้กริดทั้งหมด 1,248 กริด
  - ขนาด 1.25 x 1.25 mm. ใช้กริดทั้งหมด 4,992 กริด
2. หาค่าอนุกรมเฉลี่ยของซิลิกาเจลทุกขนาดของกริดคำนวณ (สำหรับกรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนนั้น จะวิเคราะห์ที่ค่าอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับเป็น 0.25)



3. วิเคราะห์ผลการจำลองจากแบบจำลองโดยใช้หลักสถิติ (statistics) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งใช้ค่า standardized residuals ( $d_k$ ) ดังสมการที่ (3.27) เป็นค่าในการชี้วัดความแม่นยำของกริดคำนวณ

$$d_k = \frac{e_k}{\sqrt{MSE}} \quad (3.27)$$

เมื่อ  $e_k$  ค่าผลต่างของข้อมูลการทำนายกับข้อมูลจริง (residual)  
 $MSE$  ค่าความคลาดเคลื่อนรวมของชุดข้อมูล (Mean Square Error)

โดยจะหาค่า  $d_k$  ของกริดคำนวณแต่ละขนาดเทียบกับค่าจากกริดคำนวณที่ละเอียดที่สุด (4992 กริด) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณีดังนี้ 1.  $d_k$  ของกริดคำนวณ 78 เทียบกับ 4992 2.  $d_k$  ของกริดคำนวณ 260 เทียบกับ 4992 3.  $d_k$  ของกริดคำนวณ 1248 เทียบกับ 4992 หลังจากนั้นนำค่า  $d_k$  ของทั้ง 3 กรณีมาเปรียบเทียบกันเพื่อหากรณีที่มีความเหมาะสมที่สุด

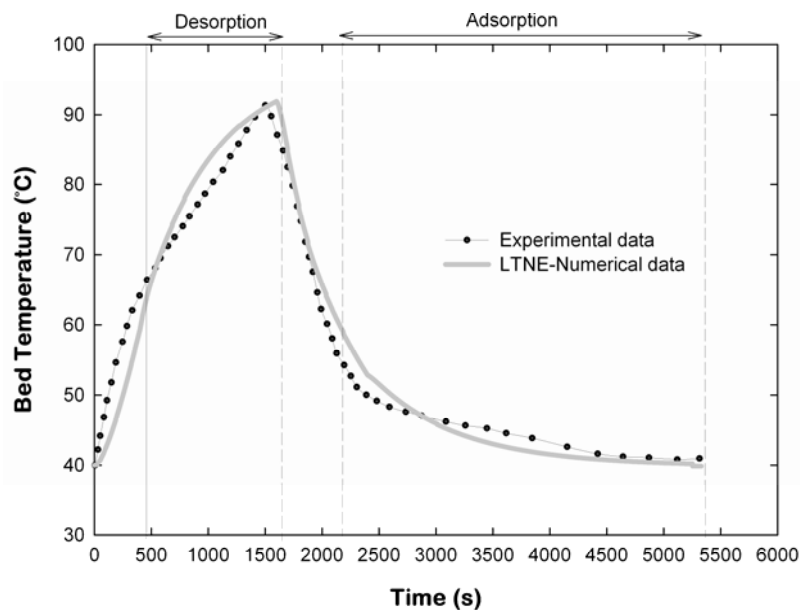
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 กรณีศึกษาที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ

##### 4.1.1 ผลการตรวจสอบความแม่นยำและความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ผลการทดลองของงานวิจัยของ Restuccia (2005) โดยใช้ค่าพหุคูณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชั้นซิลิกาเจลตลอดทั้งวัฏจักรในกรณีที่สารดูดซับมีลักษณะเป็นเม็ดกลม (pellet) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.1 เปรียบเทียบกับผลการจำลองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

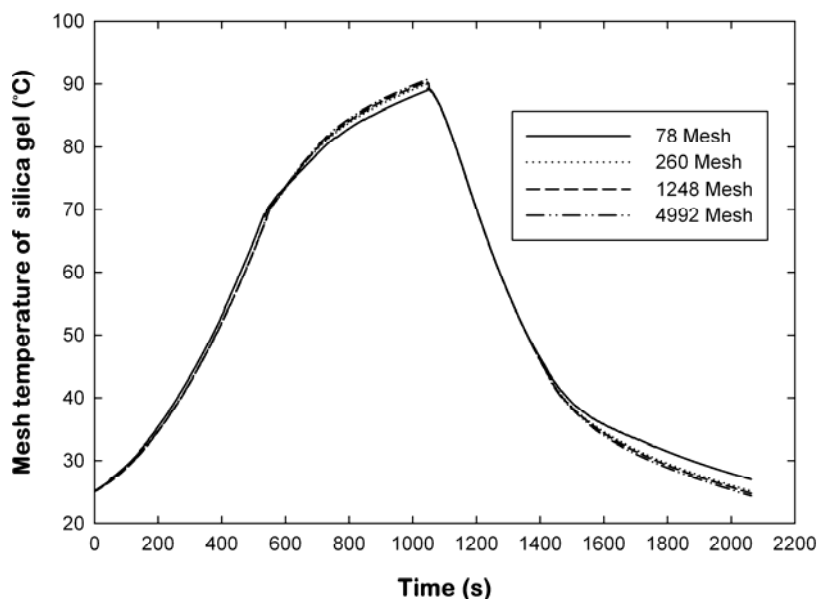


รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างค่าจากการทดลองและค่าจากกระบวนการเชิงตัวเลข

พิจารณารูปที่ 4.1 พบว่าแนวโน้มของข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลจากการจำลองเชิงตัวเลขมีลักษณะทิศทางที่ไปในแนวทางเดียวกัน แต่ในช่วงกระบวนการ desorption นั้นแนวโน้มของข้อมูลจากการทดลองมีลักษณะเป็นเชิงเส้น (linear regression) มากกว่าแนวโน้มของข้อมูลจากการจำลองเชิงตัวเลขซึ่งมีลักษณะเป็นแบบเส้นโค้งลง (exponential regression) และ

ในช่วงต้นของกระบวนการ adsorption อุณหภูมิจากการทดลองจะลดต่ำกว่าอุณหภูมิจากการจำลอง ในช่วงเวลาครบรอบวัฏจักรประมาณ 3,000 วินาที หลังจากนั้นค่าอุณหภูมิจากการทดลองจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิจากการจำลอง เนื่องจากระบบจะมีการปล่อยค่าความร้อนในการดูดซับ (Heat of adsorption) ออกมา เมื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสองพบว่า ค่า Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 3.76 หลังจากนั้นทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ T-test (Holman, 2000) เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองมีความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับความเชื่อมั่นเดียวกันที่ 95% โดยใช้สมการที่ (3.28) พบว่าค่า  $t$  เท่ากับ 0.35 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า  $t$  จากตารางแจกแจงซึ่งมีค่า 2.14 ดังนั้นจึงถือได้ว่าข้อมูลทั้งสองชุดมีความเชื่อมั่นในระดับเดียวกันที่ 95% และสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไปใช้ในการประยุกต์เพื่อแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนและมวลลัक्षणนี้ได้

หลังจากนั้นผู้วิจัยจะตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาจากค่าพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่นดูดซับของชั้นสารซิลิกาเจล ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2



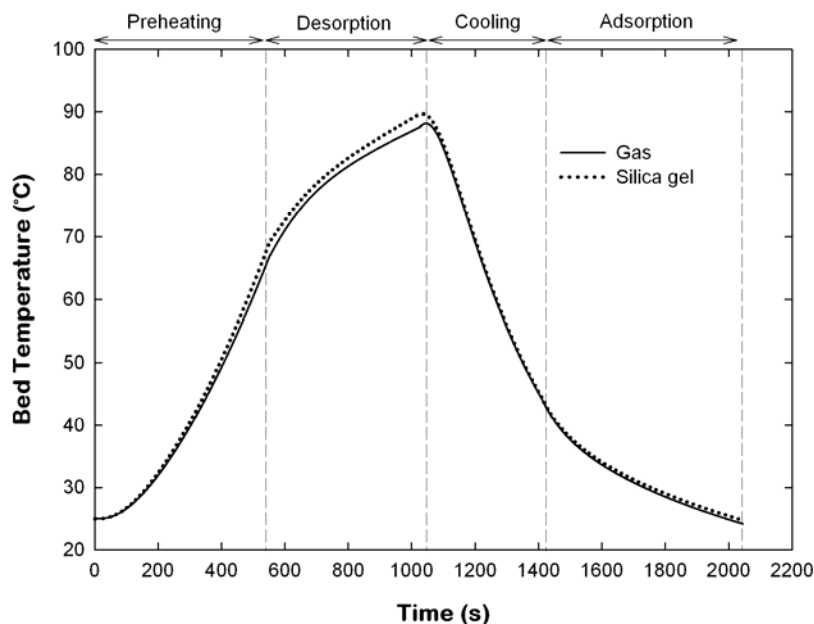
รูปที่ 4.2 ค่าพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละจำนวนกริดที่ใช้คำนวณ

พิจารณารูปที่ 4.2 พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทุกจำนวนกริดที่ใช้คำนวณ ดังนั้นจึงนำการหลักสถิติเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ ใช้ค่า standardized residuals ( $d_k$ ) เป็นตัวชี้วัดโดยยึดค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของกริดคำนวณ 4992 กริด

เป็นหลักในการเปรียบเทียบกับกริดในการคำนวณค่าอื่น เนื่องจากเป็นกริดที่มีความละเอียดที่สุด ผลที่ได้พบว่า ค่า  $d_k$  ของจำนวนกริดคำนวณ 78 กริดเทียบกับกริดคำนวณ 4992 กริด มีค่าเท่ากับ 2.9542 ค่า  $d_k$  ของจำนวนกริดคำนวณ 260 กริดเทียบกับกริดคำนวณ 4992 กริดมีค่าเท่ากับ 1.6134 และ ค่า  $d_k$  ของจำนวนกริดคำนวณ 1248 กริดเทียบกับกริดคำนวณ 4992 กริดมีค่าเท่ากับ 1.5931 สรุปได้ว่าจำนวนกริดคำนวณ 260 กริดและ 1248 กริด เป็นกริดที่มีความแม่นยำและมีความละเอียดอยู่ในระดับเดียวกันเมื่อเทียบกับกริดที่มีความละเอียดที่สุด แต่งานวิจัยนี้จะเลือกใช้จำนวนกริดคำนวณ 260 กริด เนื่องจากเป็นกริดที่เริ่มแสดงความแม่นยำและเป็นการประหยัดเวลาสำหรับการคำนวณปัญหาการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในแท่นดูดซับในกรณีศึกษา

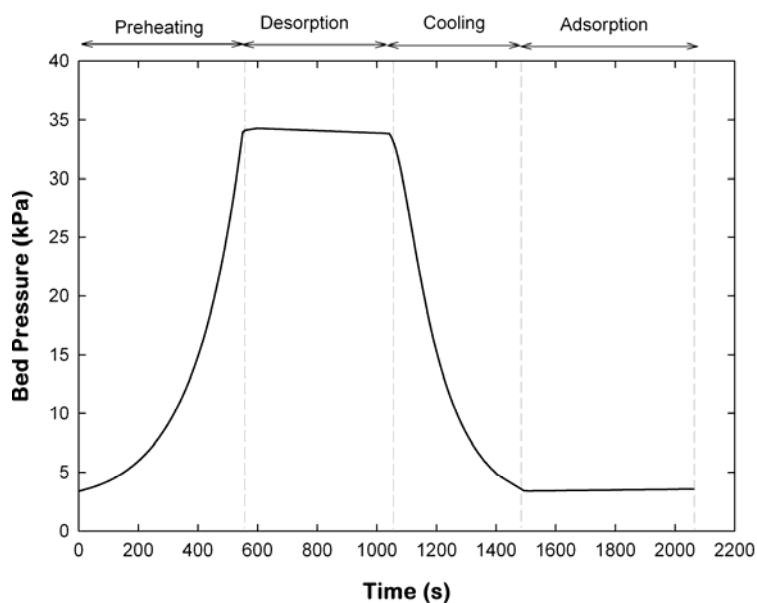
#### 4.1.2 ผลการจำลองเชิงตัวเลข

ผลจากการจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เมื่อวิเคราะห์ตามเงื่อนไขการทำงาน ของระบบ (Di, 2007) พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบดูดซับ (COP) ได้แก่ อุณหภูมิภายในแท่นดูดซับ ความดันของก๊าซในชั้นสารดูดซับและค่าความสามารถในการดูดซับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3 4.4 และ 4.5

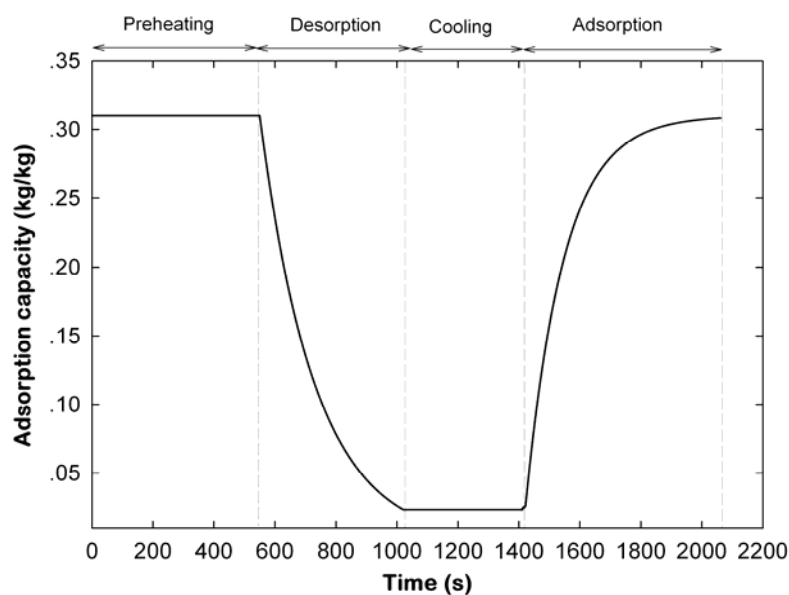


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นดูดซับในแต่ละสถานะ

พิจารณารูปที่ 4.3 พบว่าลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิของกราฟทั้งสองไปในทิศทางเดียวกันและมีความแตกต่างกันน้อย เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทั้ง 2 สถานะเกิดขึ้นได้ดี โดยอุณหภูมิของชั้นสารซิลิกาเจลจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของก๊าซที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากค่าการนำความร้อนของสารซิลิกาเจลที่มีค่ามากกว่าก๊าซ



รูปที่ 4.4 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความดันเฉลี่ยของแท่นดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบ

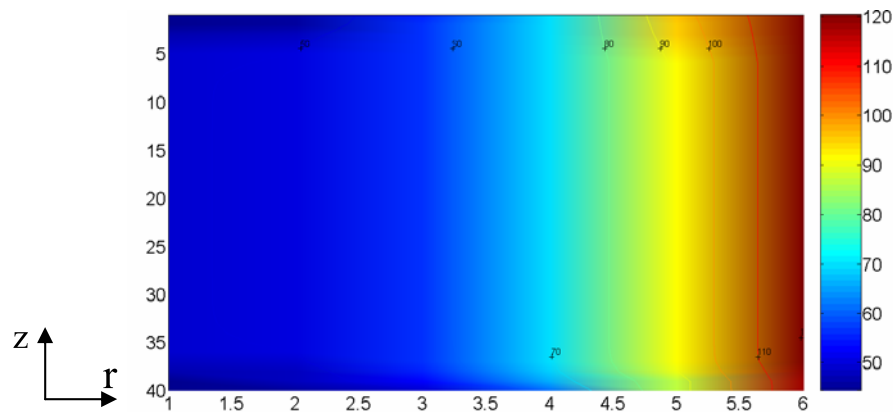


รูปที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบ

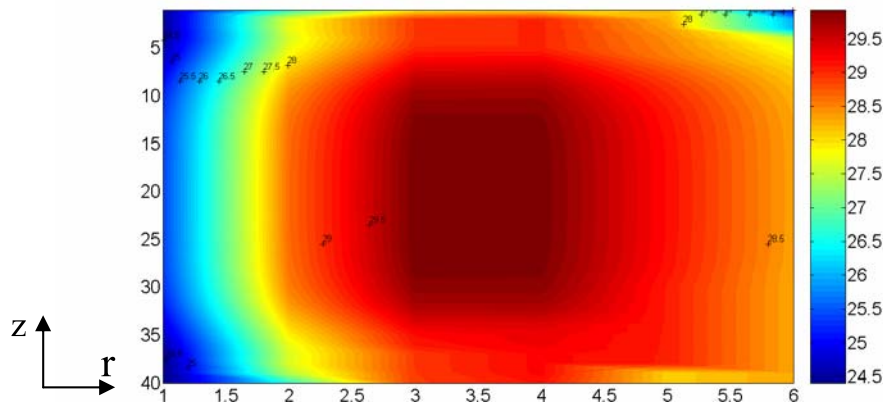
พิจารณารูปที่ 4.4 พบว่าพลวัตกรรมการเปลี่ยนแปลงความดันเฉลี่ยของแท่นดูดซับ จะเริ่มเพิ่มขึ้นในช่วงกระบวนการ Preheating ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบเส้นโค้งขึ้น (exponential regression) หลังจากนั้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการ Desorption ค่าความดันจะเริ่มคงที่เนื่องจากกระบวนการปล่อยมวลของไอน้ำที่ระเหยออกจากชั้นสารดูดซับไปยังเครื่องควบแน่น ในขณะที่ระบบยังรับความร้อนจากภายนอกอย่างเต็มที่ เมื่อเข้าสู่ช่วงกระบวนการ Cooling ค่าความดันจะลดลงในลักษณะเป็นแบบเส้นโค้งลง (exponential regression) จนเข้าสู่กระบวนการ Adsorption ค่าความดันจะคงที่อีกครั้งเนื่องจากเป็นช่วงที่ชั้นสารดูดซับดูดมวลไอน้ำจากเครื่องทำระเหยเข้ามาดูดซับภายในแท่นดูดซับขณะที่ระบบยังทำการหล่อเย็นแท่นดูดซับ

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 พบว่าความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับจะคงที่ในช่วงกระบวนการ Preheating และ Cooling เนื่องจากแท่นดูดซับเป็นระบบปิด แต่ในช่วงกระบวนการ Desorption และ Adsorption แท่นดูดซับจะเป็นระบบเปิด มีการถ่ายเทมวลเข้าออกระบบ ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับสามารถสูงสุดของแท่นดูดซับอยู่ที่ประมาณ 0.31 และสามารถคายสารทำความเย็นออกมาจนมีค่าน้อยที่สุดประมาณ 0.02015

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ย ความดันเฉลี่ยและความสามารถในการดูดซับของแท่นดูดซับเมื่อวิเคราะห์ครบรอบ 1 วัฏจักรใช้เวลาทั้งสิ้น 2,062 วินาที ประกอบไปด้วย ช่วงกระบวนการ Isosteric heating หรือ Preheating 550 วินาที ช่วงกระบวนการ Desorption 471 วินาที ช่วงกระบวนการ Cooling 390 วินาที และ ช่วงกระบวนการ Adsorption 651 วินาที เมื่อพิจารณาช่วงกระบวนการ Preheating และ Cooling พบว่าระยะเวลาที่ใช้ไปนั้นมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของเวลาทั้งวัฏจักร ส่วนนี้จึงเป็นสาเหตุหลักของการที่ระบบปรับอากาศประเภทนี้มีค่า COP ค่อนข้างต่ำและเป็นสาเหตุของการปรับปรุงค่าการนำความร้อนของสารดูดซับที่บรรจุอยู่ภายในแท่นดูดซับในกรณีศึกษาถัดไป ซึ่งในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ Preheating และ Cooling นั้นจะใช้การกระจายของอุณหภูมิ (Temperature distribution) ในการแสดงผลดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ในการพิจารณาการกระจายของอุณหภูมิทั้ง 2 กราฟนี้จะใช้ลักษณะทางกายภาพและขอบเขตในการวิเคราะห์ตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 4.6 การกระจายอุณหภูมิของซีลิกาเจลในช่วงทำยกระบวนกร Preheating ( $t_{\text{cycle}} = 550$  s)

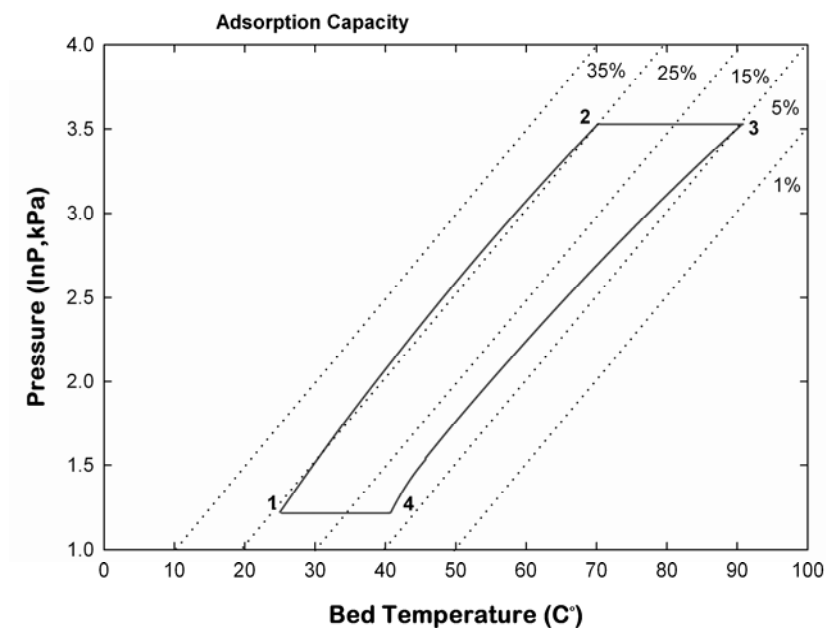


รูปที่ 4.7 การกระจายอุณหภูมิของซีลิกาเจลในช่วงทำยกระบวนกร Cooling ( $t_{\text{cycle}} = 1411$  s)

พิจารณารูปที่ 4.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิชั้นสารซีลิกาเจลค่อนข้างจะแพร่กระจายจากฝั่งที่อยู่บริเวณท่อด้านนอก (อุณหภูมิ 120 °C) มายังฝั่งที่อยู่บริเวณท่อด้านใน (อุณหภูมิ 50 °C) ได้ช้าและไม่ทั่วถึง เนื่องจากค่าการนำความร้อนของซีลิกาเจลมีค่าที่ต่ำ จึงเป็นสาเหตุให้ระบบต้องใช้เวลาสำหรับช่วงกระบวนการนี้นาน

พิจารณารูปที่ 4.7 การกระจายตัวของอุณหภูมิชั้นสารซีลิกาเจลค่อนข้างจะแพร่กระจายได้ทั่วถึงกว่าช่วงปลายกระบวนการ Preheating แต่ที่บริเวณตรงกลางท่ออุณหภูมิค่อนข้างสูงกว่าบริเวณอื่น เนื่องจากการนำความร้อนของซีลิกาเจลเกิดขึ้นได้ช้าและซีลิกาเจลมีค่าการนำความร้อนต่ำ จึงเป็นสาเหตุให้ระบบต้องใช้เวลาสำหรับช่วงกระบวนการนี้นานเช่นเดียวกัน

หลังจากนั้นนำตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์จะได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงวัฏจักรของระบบปรับอากาศแบบดูดซับสำหรับกรณีศึกษา



รูปที่ 4.8 แผนภาพ Clapeyron diagram สำหรับวัฏจักรทำความเย็นแบบดูดซับ

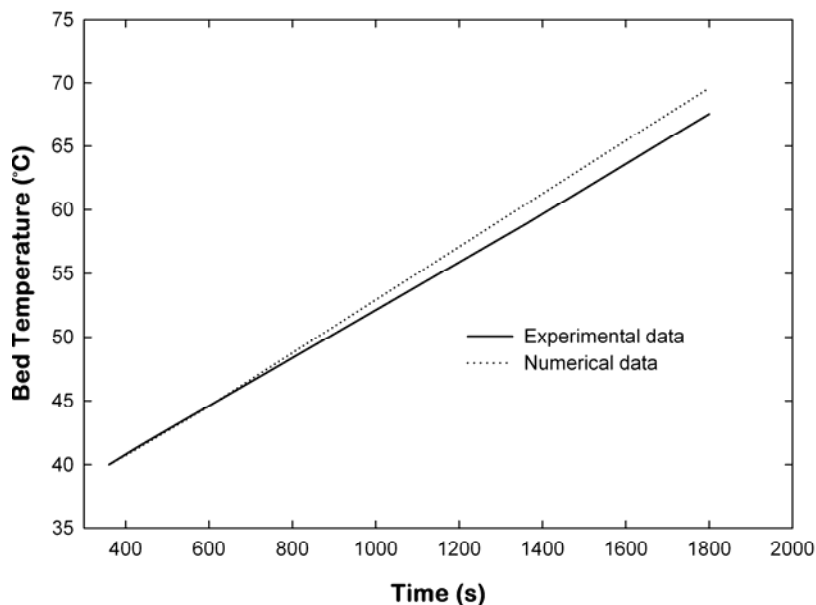
พิจารณารูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ของความดัน ( $P$ ) อุณหภูมิ ( $T$ ) และความสามารถในการดูดซับ ( $M$ ) พบว่าลักษณะของกราฟมีความใกล้เคียงกับกราฟ clapeyron ในวัฏจักรในอุดมคติ (Boubakri, 2000) และสามารถแสดงช่วงการทำงานของระบบได้ดังต่อไปนี้ กระบวนการ Preheating (1 → 2) กระบวนการ Desorption (2 → 3) กระบวนการ cooling (3 → 4) และกระบวนการ adsorption (4 → 1) และค่า COP ของระบบนี้อยู่ที่ 0.265 ซึ่งเป็นค่าทั่วไปที่ระบบทำความเย็นแบบดูดซับสามารถทำได้ (Dieng and Wang, 2001; Hasan, 2007)

## 4.2 กรณีศึกษาที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ

### 4.2.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ผลการทดลองของงานวิจัยของ เกศนที น้อยปิ่น (2546) โดยใช้ค่าพหุคูณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชั้นสารซิลิกาเจลดอตทั้งวัฏจักรในกรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนโดยการผสมเม็ดทองแดงในสัดส่วน  $1/5 \text{ kg}_{\text{copper}}/\text{kg}_{\text{silica}}$  ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1.3 เปรียบเทียบกับผลการจำลองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในรูปที่ 4.9

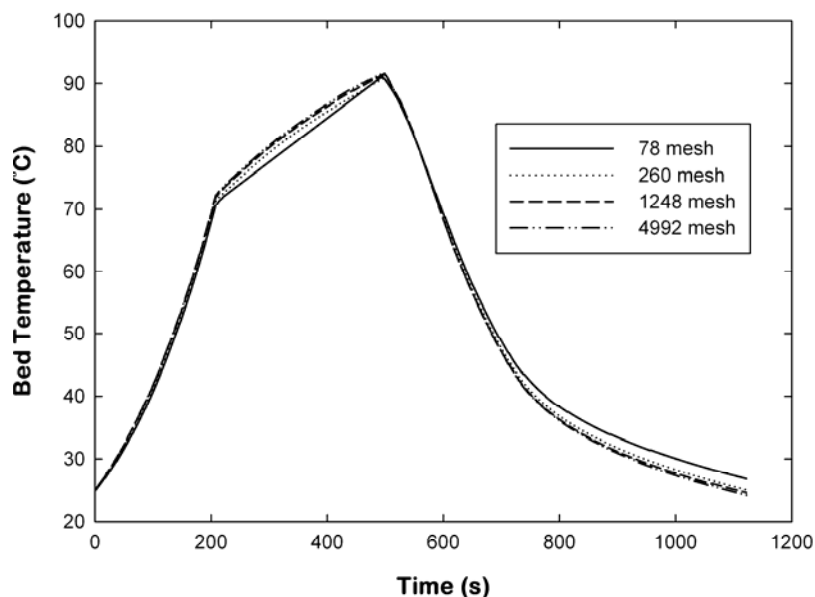




รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างค่าจากการทดลองและค่าจากระบบการเชิงตัวเลข ในช่วงกระบวนการ Preheating

พิจารณารูปที่ 4.9 พบว่าแนวโน้มของข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลจากการจำลองเชิงตัวเลขมีลักษณะทิศทางที่ไปในแนวทางเดียวกัน แต่พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการจำลองจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง โดยเฉพาะในช่วงปลายกระบวนการ Preheating เนื่องจากผลของเทอมการถ่ายเทความร้อนภายในของสารแต่ละชนิดในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (สมการที่ 3.15-3.17) เมื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของข้อมูลทั้งสองพบว่า ค่า Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 2.87 หลังจากนั้นทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ T-test (Holman, 2000) เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองมีความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับความเชื่อมั่นเดียวกันที่ 95% โดยใช้สมการที่ (3.28) พบว่าค่า  $t$  เท่ากับ 0.263 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า  $t$  จากตารางแจกแจงซึ่งมีค่า 2.012 ดังนั้นจึงถือได้ว่าข้อมูลทั้งสองชุดมีความเชื่อมั่นในระดับเดียวกันที่ 95% และสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ไปใช้ในการประยุกต์เพื่อแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนและมวลลักษณะนี้ได้

หลังจากนั้นผู้วิจัยทำการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาจากค่าพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่นดูดซับของชั้นสารซิลิกาเจลในกรณีที่มีการเติมปริมาณผงทองลงในแท่นดูดซับเป็น 25% ของปริมาณแท่นดูดซับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.10

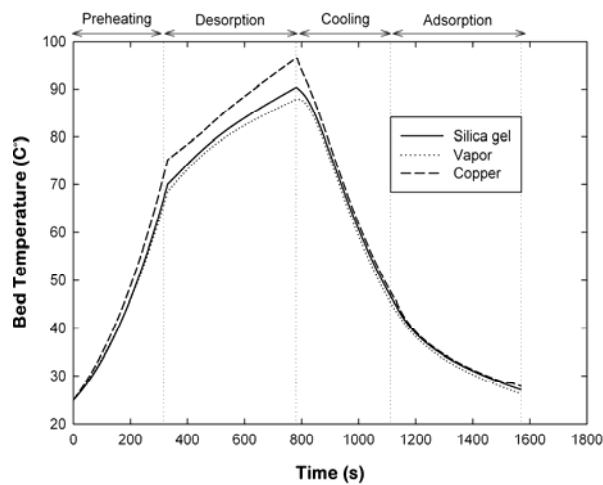


รูปที่ 4.10 ค่าพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละจำนวนกริดที่ใช้คำนวณ

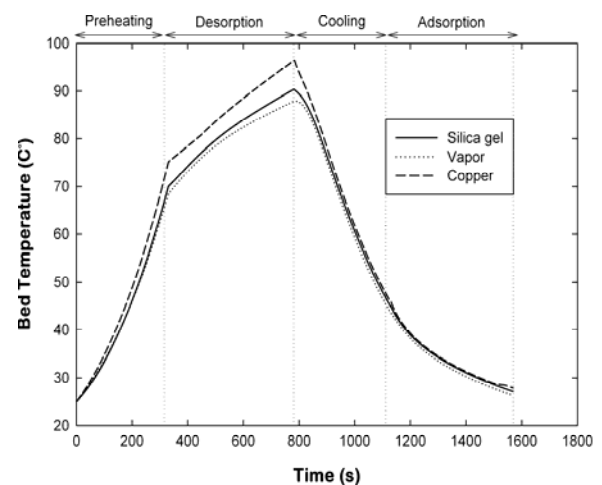
พิจารณารูปที่ 4.10 พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทุกจำนวนกริดที่ใช้คำนวณซึ่งจะมีความคล้ายกับกรณีศึกษาที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ เมื่อนำหลักสถิติเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ให้ค่า standardized residuals ( $d_k$ ) เป็นตัวชี้วัด ผลที่ได้พบว่า ค่า  $d_k$  ของจำนวนกริดคำนวณ 78 กริดเทียบกับกริดคำนวณ 4992 กริด มีค่าเท่ากับ 3.1192 ค่า  $d_k$  ของจำนวนกริดคำนวณ 260 กริดเทียบกับกริดคำนวณ 4992 กริดมีค่าเท่ากับ 1.7137 และ ค่า  $d_k$  ของจำนวนกริดคำนวณ 1248 กริดเทียบกับกริดคำนวณ 4992 กริดมีค่าเท่ากับ 1.6989 สรุปได้ว่ากริดคำนวณ 260 กริดและ 1248 กริดเป็นกริดที่มีความแม่นยำและมีความละเอียดอยู่ในระดับเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับกริดที่มีความละเอียดที่สุด แต่งานวิจัยนี้จะเลือกใช้จำนวนกริดคำนวณ 260 กริด เนื่องจากเป็นกริดที่เริ่มแสดงความแม่นยำและเป็นการประหยัดเวลาสำหรับการคำนวณปัญหาการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในแท่นดูดซับในกรณีศึกษา

#### 4.2.2 ผลการจำลองเชิงตัวเลข

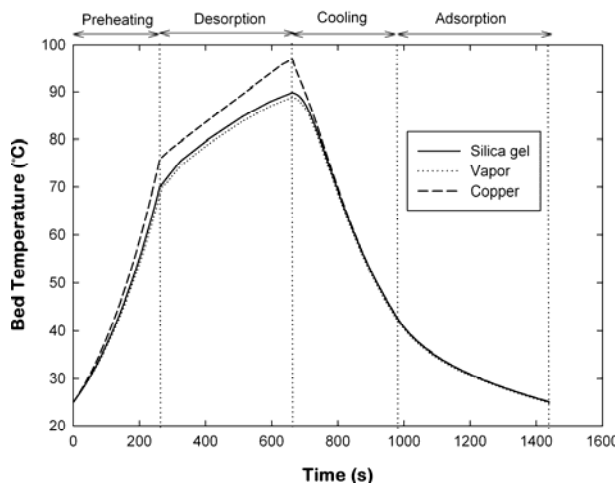
ผลการจำลองเชิงตัวเลขในกรณีศึกษาที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับจะแสดงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของสารที่อยู่ภายในแท่นดูดซับซึ่งแบ่งออกเป็น 2 สถานะ ได้แก่ สถานะของแข็งชนิดที่หนึ่ง (ซิลิกาเจล) สถานะของแข็งชนิดที่สอง (ผงทองแดง) และสถานะก๊าซ (ไอน้ำ) โดยเริ่มจากพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยของสารทั้ง 3 ชนิดภายในแท่นดูดซับซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.11



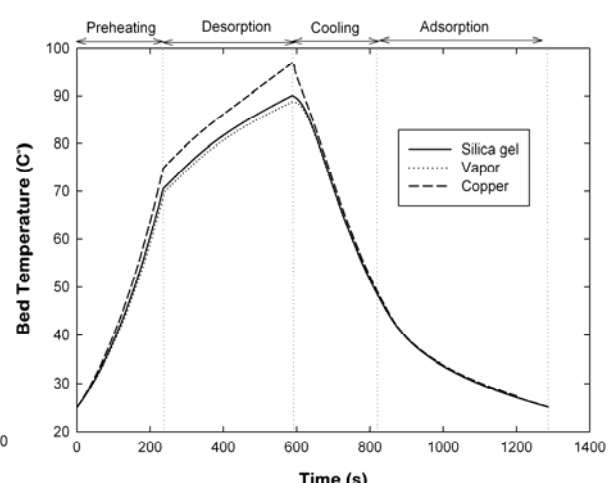
(ก)



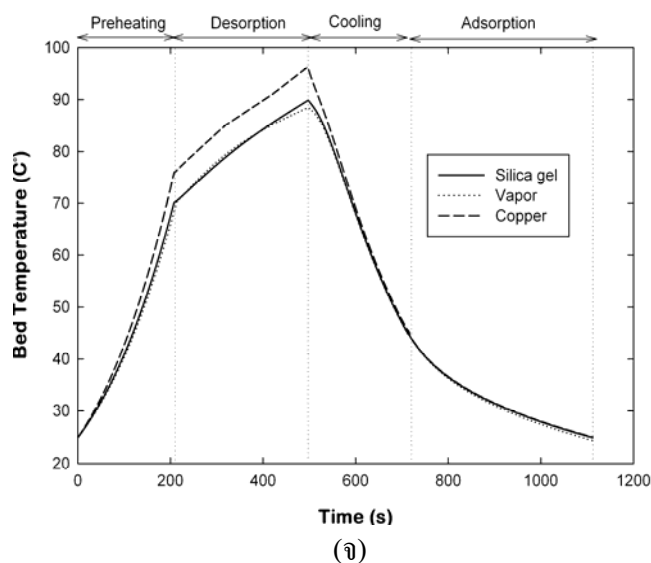
(ข)



(ค)



(ง)



รูปที่ 4.11 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยของสาร 3 ชนิดในเวลาต่างๆ ของระบบตามอัตราส่วนปริมาณผงทองแดงต่อปริมาณแท่นดูดซับ (ก) อัตราส่วนเป็น 5% (ข) อัตราส่วนเป็น 10% (ค) อัตราส่วนเป็น 15% (ง) อัตราส่วนเป็น 20% และ (จ) อัตราส่วนเป็น 25%

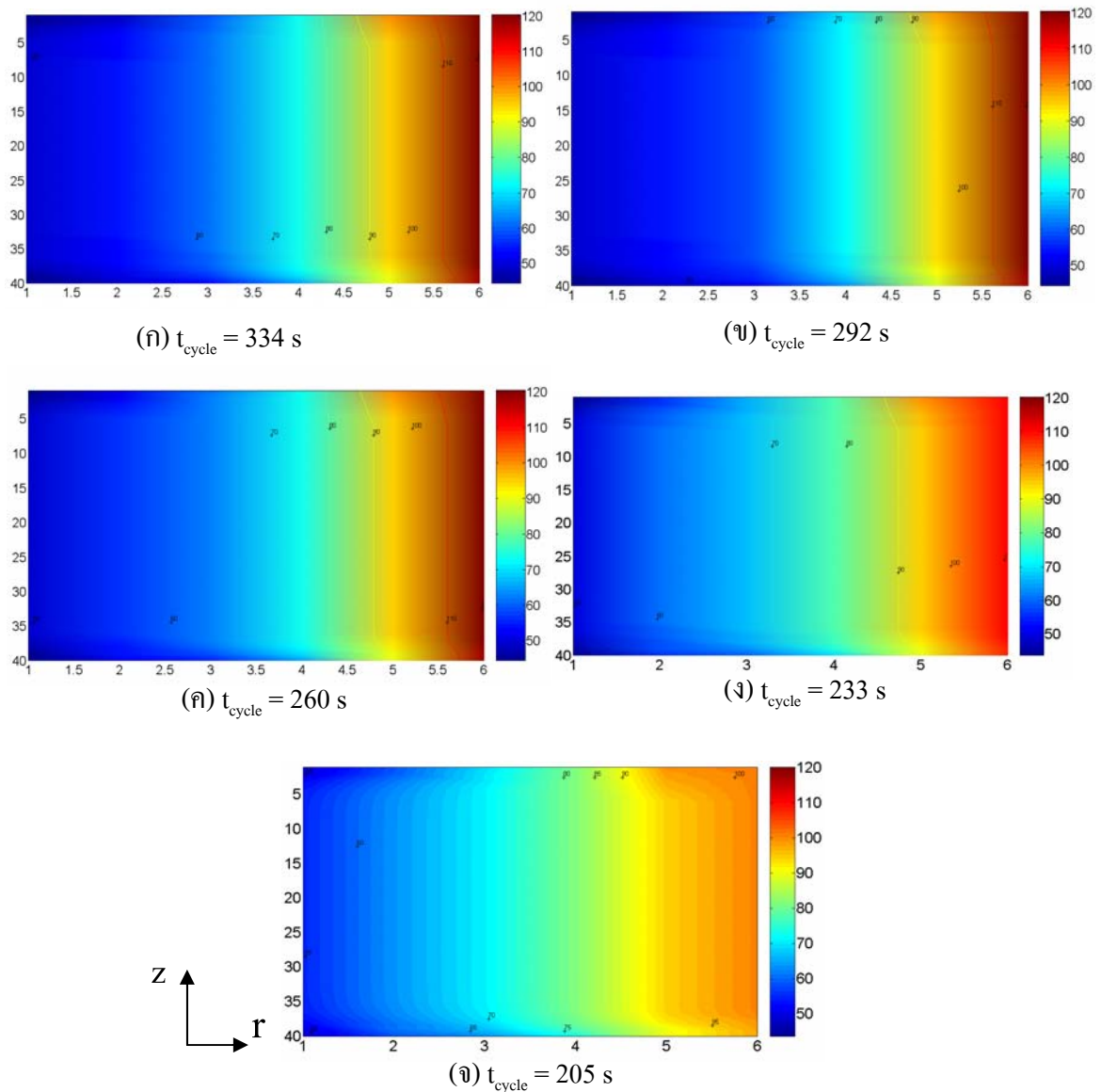
พิจารณารูปที่ 4.11 (ก) พบว่าพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารทั้ง 3 ชนิดในเวลาต่างๆ ของระบบนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยในช่วงกระบวนการ preheating อุณหภูมิของผงทองแดงจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เร็วกว่าอุณหภูมิซิลิกาเจลและไอน้ำ เมื่อเข้าสู่กระบวนการ desorption ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผงทองแดงจะเร็วกว่าอุณหภูมิสารชนิดอื่นอย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นช่วงที่แท่นดูดซับรับความร้อนจากภายนอกอย่างเต็มที่ หลังจากนั้นระบบจะเริ่มหล่อเย็นแท่นดูดซับ อุณหภูมิของสารทั้ง 3 ชนิดจะลดลงมาอยู่ในค่าที่ใกล้เคียงกันตลอดจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ adsorption เนื่องจากการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วของผงทองแดงเป็นตัวควบคุมการลดอุณหภูมิของสารทั้งสองชนิด ซึ่งพบว่าพฤติกรรมดังกล่าวนี้มีลักษณะคล้ายกันทุกอัตราส่วนปริมาณผงทองแดงต่อปริมาณแท่นดูดซับ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารทั้ง 3 ชนิดภายในแท่นดูดซับกับอัตราส่วนปริมาณผงทองแดงที่ผสมพบว่า เมื่อค่าอัตราส่วนผงทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มและลดของอุณหภูมิสารทั้ง 3 ชนิดเร็วขึ้นพิจารณาได้จากเวลาของกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เวลากระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับในแต่ละอัตราส่วนปริมาตร ผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับ

อัตราส่วนของปริมาตร ผงทองแดงต่อปริมาตร แท่นดูดซับ	เวลา (s)				ระยะเวลา ทั้งวัฏจักร (s)
	Preheating	Desorption	Cooling	Adsorption	
0.05	334	446	345	528	1653
0.10	292	437	319	521	1569
0.15	260	402	297	498	1457
0.20	233	385	258	470	1346
0.25	210	370	215	430	1165

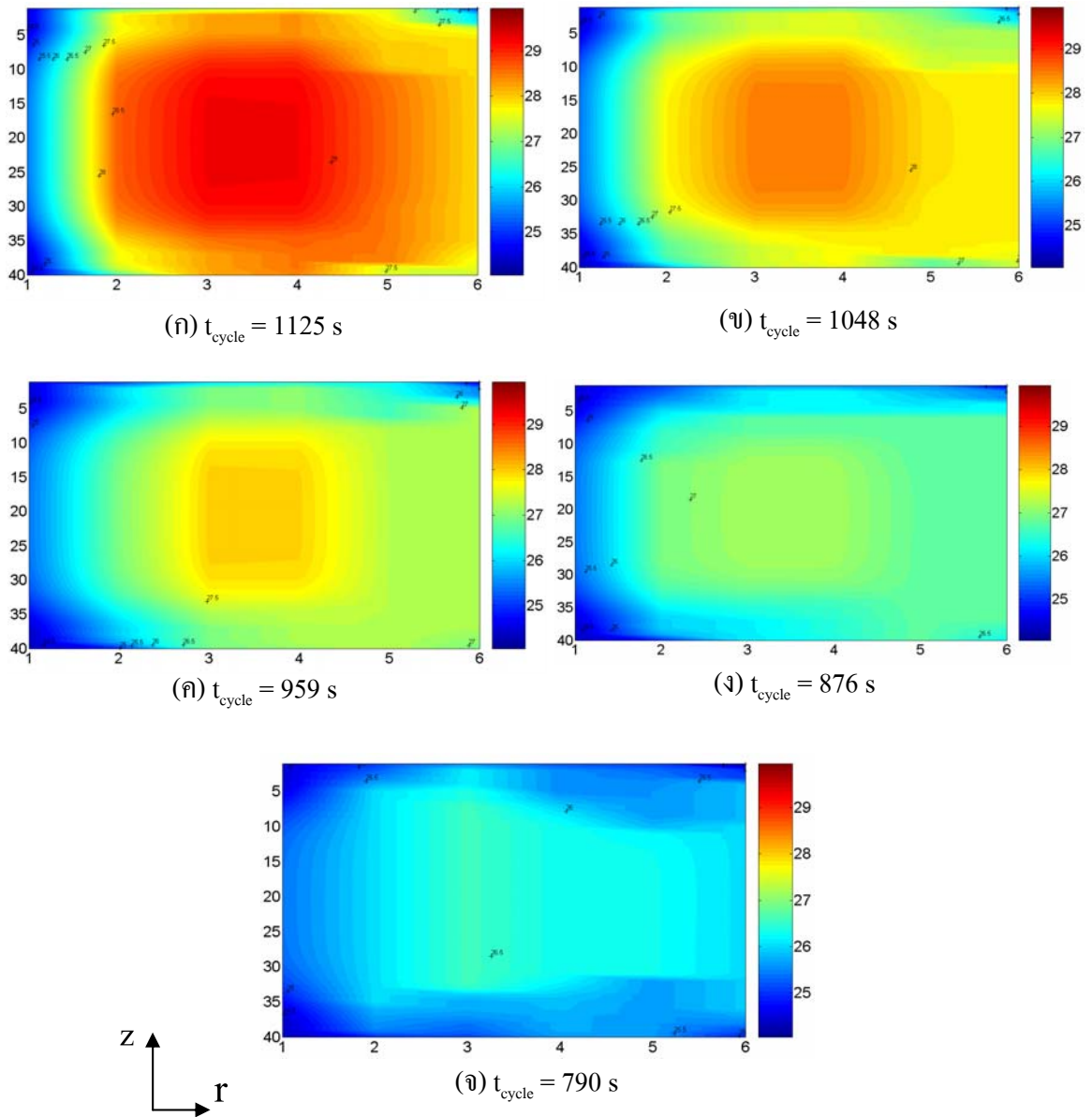
จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เวลาในช่วงกระบวนการ preheating และ cooling เร็วขึ้นอย่างชัดเจน แท่นดูดซับที่ผสมอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับเป็น 25% จะใช้เวลาครบวัฏจักรน้อยที่สุด 1,165 วินาที และแท่นดูดซับที่ผสมอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับเป็น 5% จะใช้เวลาครบรอบวัฏจักรมากที่สุด 1,653 วินาที แสดงว่าปริมาณผงทองแดงที่ผสมลงในแท่นดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดระยะเวลาทั้งวัฏจักร และยังส่งผลถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแท่นดูดซับด้วยเช่นกัน ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 ที่วิเคราะห์ในช่วงปลายกระบวนการ preheating และ cooling



รูปที่ 4.12 การกระจายตัวอุณหภูมิของสารซิลิกาเจลในช่วงปลายกระบวนการ Preheating เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับ (ก) อัตราส่วนเป็น 5% (ข) อัตราส่วนเป็น 10% (ค) อัตราส่วนเป็น 15% (ง) อัตราส่วนเป็น 20% และ (จ) อัตราส่วนเป็น 25%

พิจารณารูปที่ 4.12 เมื่ออัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับเพิ่มขึ้นส่งผลให้การกระจายตัวอุณหภูมิของสารซิลิกาเจลเร็วขึ้น และยังส่งผลให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่

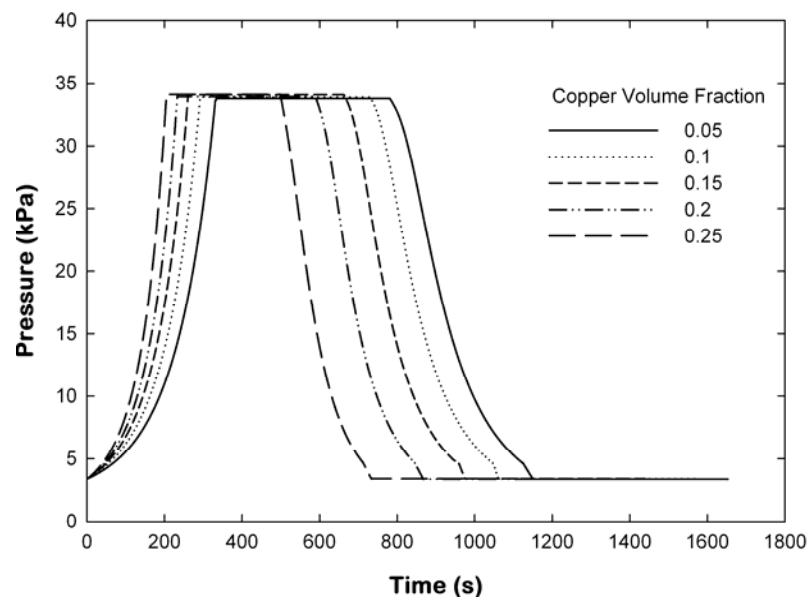
ขอบที่ด้านนอกลดลง (สังเกตจากผลต่างระหว่างขอบในกับขอบนอกน้อยลง) จึงเป็นสาเหตุของการลดลงของเวลาที่ใช้ในกระบวนการ Preheating



รูปที่ 4.13 การกระจายตัวอุณหภูมิของสารซิลิกาเจลที่ช่วงปลายกระบวนการ Cooling เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแทนคูดซับ (ก) อัตราส่วนเป็น 5% (ข) อัตราส่วนเป็น 10% (ค) อัตราส่วนเป็น 15% (ง) อัตราส่วนเป็น 20% และ (จ) อัตราส่วนเป็น 25%

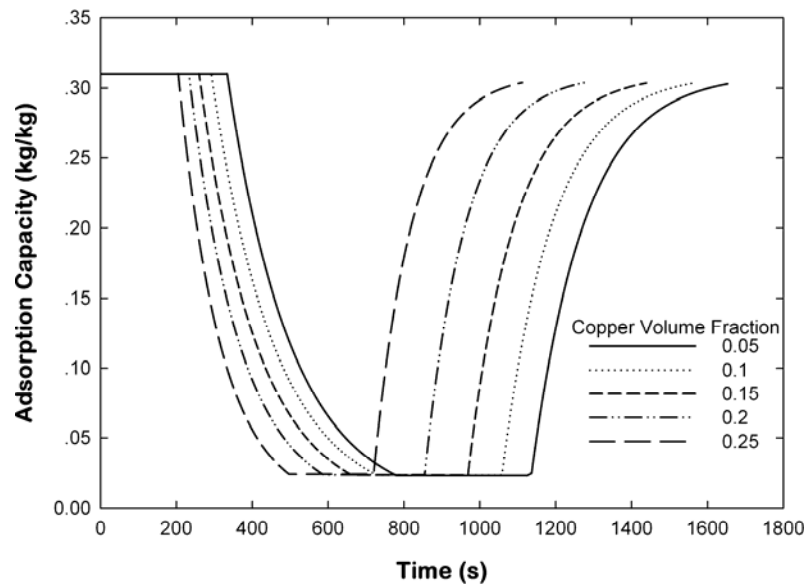
พิจารณารูปที่ 4.13 เมื่ออัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับเพิ่มขึ้นส่งผลให้การกระจายของอุณหภูมิภายในแท่นดูดซับค่อนข้างจะเร็วขึ้น สังเกตจากค่าอุณหภูมิสูงสุดในแท่นดูดซับจะลดลงในขณะที่อุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่นดูดซับคงที่ จึงเป็นสาเหตุของการลดลงของเวลาที่ใช้ในกระบวนการ cooling

ตัวแปรต่อมาที่ศึกษาคือค่าความดันเฉลี่ยของแท่นดูดซับและความสามารถในการดูดซับนั้น ไม่สามารถแสดงผลการจำลองเป็นความสัมพันธ์ของสารทั้ง 3 ชนิดได้ เนื่องจากความดันที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับเป็นความดันของก๊าซในแต่ละกระบวนการและความสามารถในการดูดซับเป็นเฉพาะในชั้นสารซิลิกาเจลอย่างเดียว ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.15



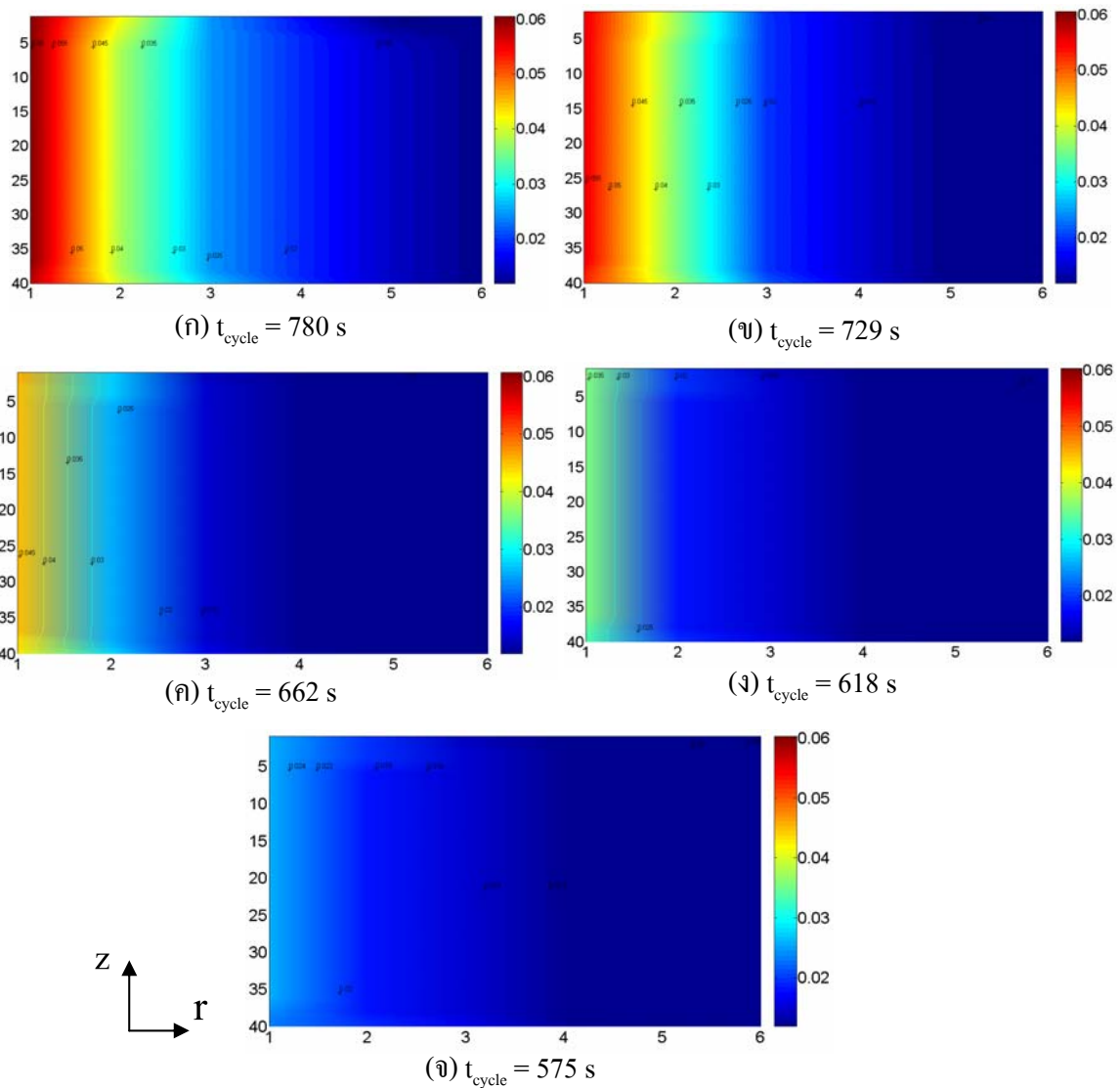
รูปที่ 4.14 ความดันเฉลี่ยของแท่นดูดซับในแต่ละอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบ





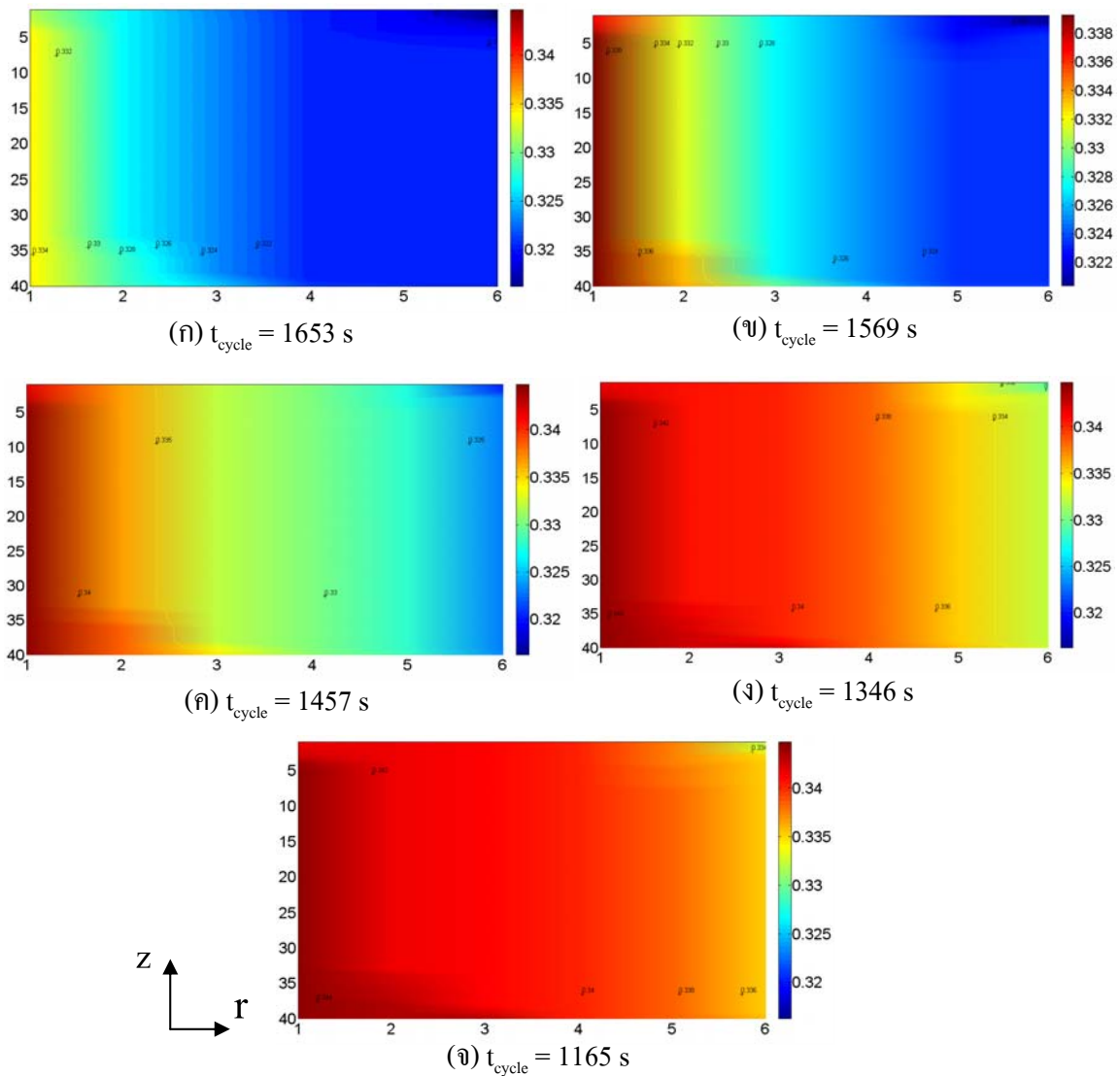
รูปที่ 4.15 ความสามารถในการดูดซับของแท่นดูดซับแต่ละอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อ ปริมาตรแท่นดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบ

พิจารณารูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่าความดันเฉลี่ยของแท่นดูดซับและความสามารถในการดูดซับของแท่นดูดซับแปรผันตามอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับ เมื่อค่าอัตราส่วนผงทองแดงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของความดันภายในแท่นดูดซับรวดเร็วขึ้น โดยพิจารณาจากความชันของกราฟเส้นที่ใช้อัตราส่วนผงทองแดง 0.25 จะมีความชันมากกว่ากราฟที่แสดงอัตราส่วนผงทองแดงค่าอื่น ซึ่งจะสัมพันธ์กับพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิดังรูปที่ 4.11 นั้นเอง และความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับจะแปรผันตามตามอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับเช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการกระจายตัวของความสามารถในการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ที่วิเคราะห์ในช่วงปลายกระบวนการ desorption และ adsorption



รูปที่ 4.16 ความสามารถในการกดซับที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับช่วงปลายกระบวนการ desorption ในแต่ละอัตราส่วนผงทองแดง (ก) อัตราส่วนเป็น 5% (ข) อัตราส่วนเป็น 10% (ค) อัตราส่วนเป็น 15% (ง) อัตราส่วนเป็น 20% และ (จ) อัตราส่วนเป็น 25%

พิจารณารูปที่ 4.16 ความสามารถในการกดซับที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับจะกระจายตัวได้เร็วขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนปริมาณผงทองแดงต่อปริมาณแท่นดูดซับเพิ่มขึ้น สังเกตจากค่าความสามารถในการกดซับตรงบริเวณที่อัตราส่วนลดลง แสดงว่าแท่นดูดซับคายสารทำความเย็นได้เร็วขึ้น



รูปที่ 4.17 ความสามารถในการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับช่วงปลายกระบวนการ adsorption ในแต่ละอัตราส่วนผงทองแดง (ก) อัตราส่วนเป็น 5% (ข) อัตราส่วนเป็น 10% (ค) อัตราส่วนเป็น 15% (ง) อัตราส่วนเป็น 20% และ (จ) อัตราส่วนเป็น 25%

พิจารณารูปที่ 4.17 ความสามารถในการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับจะกระจายตัวได้เร็วขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนปริมาณผงทองแดงต่อปริมาณแท่นดูดซับเพิ่มขึ้น สืบเนื่องจากค่าความสามารถในการดูดซับตรงบริเวณที่ด้านนอกเพิ่มขึ้น แสดงว่าแท่นดูดซับดูดสารทำความเย็นได้เร็วขึ้น

#### 4.3 การเปรียบเทียบการจำลองกรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนและกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนของแท่นดูดซับ

ในการเปรียบเทียบผลการจำลองจะเปรียบเทียบตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ค่าอุณหภูมิแท่นดูดซับ ความดันแท่นดูดซับ และความสามารถในการดูดซับในแต่ละกรณีศึกษา 6 กรณีดังนี้

1. กรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับโดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดซับเพียงอย่างเดียว ( $\varepsilon_{cu} = 0$ )

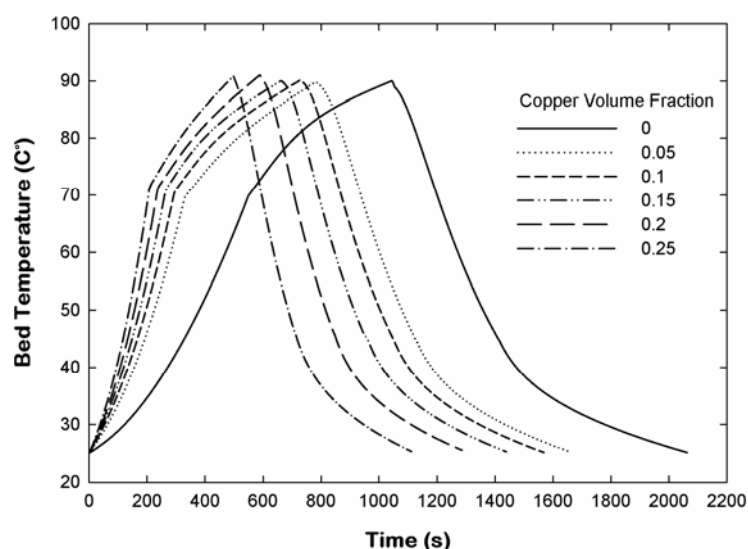
2. กรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับโดยการเติมผงทองแดงตามอัตราส่วน 5% ของปริมาตรแท่นดูดซับ ( $\varepsilon_{cu} = 0.05$ )

3. กรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับโดยการเติมผงทองแดงตามอัตราส่วน 10% ของปริมาตรแท่นดูดซับ ( $\varepsilon_{cu} = 0.1$ )

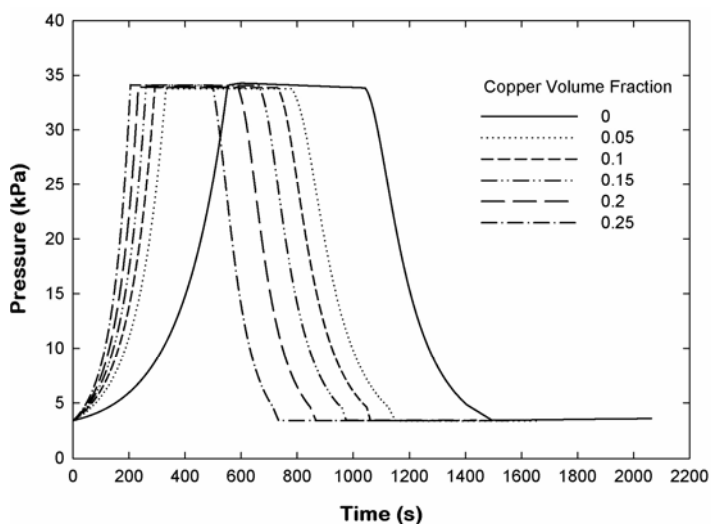
4. กรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับโดยการเติมผงทองแดงตามอัตราส่วน 15% ของปริมาตรแท่นดูดซับ ( $\varepsilon_{cu} = 0.15$ )

5. กรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับโดยการเติมผงทองแดงตามอัตราส่วน 20% ของปริมาตรแท่นดูดซับ ( $\varepsilon_{cu} = 0.2$ )

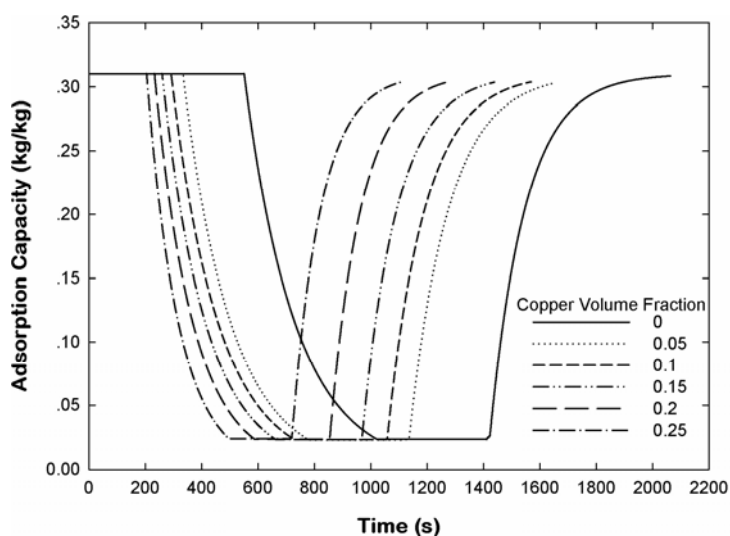
6. กรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับโดยการเติมผงทองแดงตามอัตราส่วน 25% ของปริมาตรแท่นดูดซับ ( $\varepsilon_{cu} = 0.25$ )



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นดูดซับแต่ละอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบ



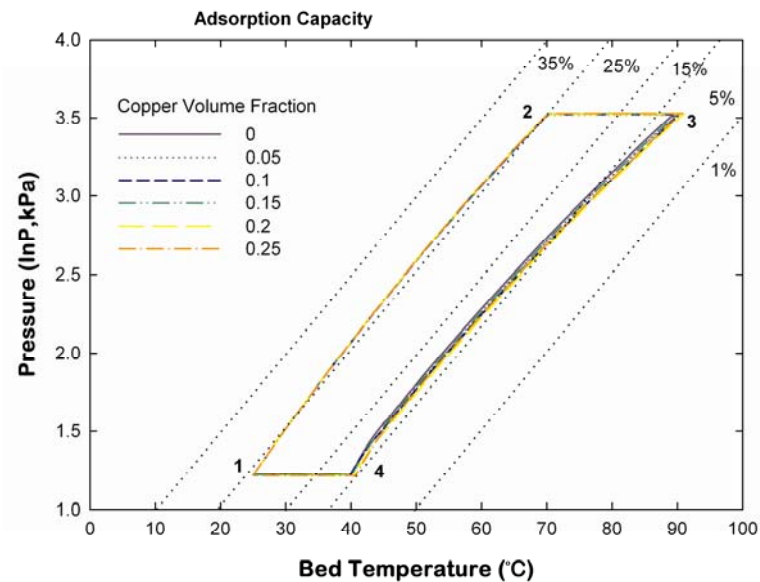
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบความดันของแท่นดูดซับแต่ละอัตราส่วนปริมาณผงทองแดง ต่อปริมาณแท่นดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบ



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของแท่นดูดซับแต่ละอัตราส่วนปริมาณผงทองแดงต่อปริมาณแท่นดูดซับในเวลาต่างๆ ของระบบ

พิจารณารูปที่ 4.18 4.19 และ 4.20 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ย ความดันเฉลี่ยและความสามารถในการดูดซับของแท่นดูดซับครบรอบวัฏจักรจะแปรผันตามอัตราส่วนปริมาณผงทองแดงที่ผสมในแท่นดูดซับ ซึ่งพิจารณาได้จากเวลาต่อรอบวัฏจักรที่ลดลงจาก 2,063 วินาที เป็น 1,653 1,569 1,457 1,346 และ 1,165 วินาทีตามลำดับอัตราส่วนผงทองแดงที่เพิ่มขึ้น

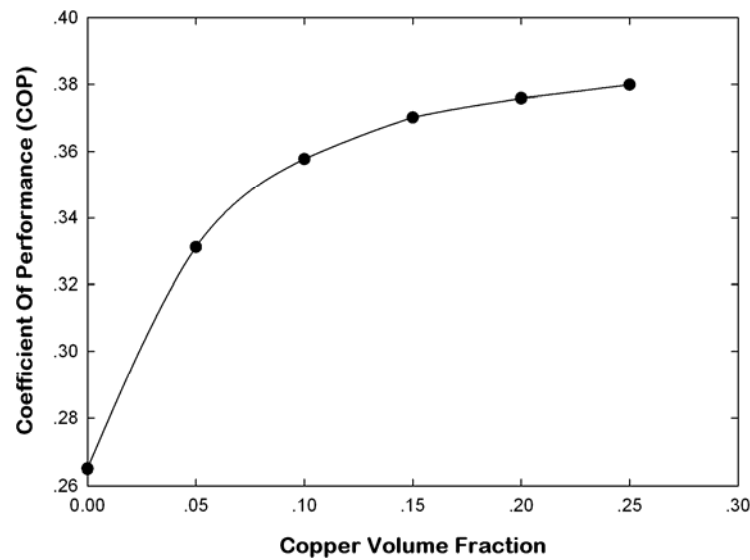
(จากตารางที่ 4.1) เมื่อนำตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ในแต่ละอัตราส่วน ปริมาตรผงทองแดงที่ผสมในแท่นดูดซับจะได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบ Clapeyron diagram ในแต่ละอัตราส่วนผงทองแดงที่ผสม

พิจารณารูปที่ 4.21 พบว่าลักษณะของกราฟ Clapeyron diagram มีลักษณะของกราฟเป็นไปตามกราฟวัฏจักรในอุดมคติ (Ideal cycle) ทุกอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับ

ในการเปรียบเทียบการจำลองกรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนและกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนของแท่นดูดซับ ค่าที่เป็นตัวชี้วัดผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรศึกษาทั้ง 3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแทนคูคซัซที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ

พิจารณารูปที่ 4.22 พบว่าผลอัตราส่วนปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแทนคูคซัซที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-0.05 แสดงว่าผงทองแดงมีผลต่อการเพิ่มของค่า COP ระบบอย่างชัดเจน เมื่อถึงค่าอัตราส่วนผงทองแดงเป็น 0.1 หลังจากนั้นค่า COP ระบบค่อนข้างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 0.36-0.38 เนื่องจากเวลาที่ใช้ในกระบวนการให้ความร้อนแก่ระบบและความร้อนสุทธิที่ใช้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4.1) ซึ่งค่า COP สูงสุดของระบบปรับอากาศแบบคูคซัซอยู่ที่ประมาณ 0.38 และอัตราส่วนผงทองแดงที่ผสมในแทนคูคซัซอยู่ 25% ของปริมาตรแทนคูคซัซ ( $\varepsilon_{cu} = 0.25$ )

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบจากการปรับปรุงค่าการนำความร้อนของแท่นดูดซับ โดยการเติมสารที่มีค่าการนำความร้อนสูงลงไปผสมในแท่นดูดซับ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งตัวบ่งชี้ความเหมาะสมของอัตราส่วนในการเติมคือค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ จากผลของการศึกษาการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของระบบปรับอากาศแบบดูดซับ โดยใช้ซิลิกาเจล-น้ำเพื่อปรับปรุงค่าการนำความร้อนในวัสดุรูพรุน สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้เป็นประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

1. ในการศึกษาระบบปรับอากาศแบบดูดซับ โดยใช้ซิลิกาเจลและน้ำเป็นคู่สารทำงานสามารถนำสมมติฐานการสมดุลทางความร้อน (Local Thermal Equilibrium) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ย ความดันเฉลี่ยและความสามารถในการดูดซับภายในแท่นดูดซับแทนการคำนวณค่าตัวแปรที่วิเคราะห์โดยใช้สมมติฐานทั่วไปในการคำนวณคือ Local Thermal Non-Equilibrium และยังสามารถช่วยประหยัดเวลาในขั้นตอนการคำนวณ

2. ระบบปรับอากาศแบบดูดซับกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนของแท่นดูดซับ โดยใช้ซิลิกาเจลเป็นสารดูดซับเพียงอย่างเดียวนั้น ใช้ระยะเวลาครบรอบวัฏจักร 2,062 วินาที ประกอบไปด้วย ช่วงกระบวนการ Isosteric heating หรือ Preheating 550 วินาที ช่วงกระบวนการ Desorption 471 วินาที ช่วงกระบวนการ Cooling 390 วินาที และ ช่วงกระบวนการ Adsorption 651 วินาที และให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบอยู่ที่ 0.265 ผลการจำลองที่ได้พบว่าระบบต้องใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนและหล่อเย็นแท่นดูดซับเป็นครึ่งหนึ่งของระยะเวลาทั้งวัฏจักร จึงเป็นสาเหตุให้ระบบปรับอากาศนี้มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะต่ำ

3. ระบบปรับอากาศแบบดูดซับกรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนของแท่นดูดซับ โดยใช้ผงทองแดงที่มีค่าการนำความร้อนสูงผสมลงในแท่นดูดซับในอัตราส่วน 5-25% ของ



ปริมาตรแทนดูคซั้บ ผลการจำลองพบว่า ค่าอัตราส่วนของปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแทนดูคซั้บจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่ศึกษาดังนี้

3.1 ค่าอุณหภูมิสูงสุดของสารภายในแทนดูคซั้บตลอดวัฏจักร จะแปรผันตามค่าอัตราส่วนผงทองแดงที่เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าอุณหภูมิสูงสุดของสารภายในแทนดูคซั้บตลอดวัฏจักร

อัตราส่วนของปริมาตร ผงทองแดงต่อปริมาตร แทนดูคซั้บ	อุณหภูมิ (°C)		
	ซิลิกาเจล	ไอน้ำ	ผงทองแดง
0.05	90.10	87.34	95.30
0.10	90.40	87.53	96.12
0.15	90.71	87.71	96.50
0.20	91.27	87.92	97.36
0.25	91.69	88.14	97.45

จากตารางที่ 5.1 เมื่ออุณหภูมิของผงทองแดงเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิภายในแทนดูคซั้บเพิ่มขึ้น แต่จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิซิลิกาเจลและไอน้ำค่อนข้างน้อย เนื่องจากสารทั้งสองชนิดมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ ซึ่งค่าอุณหภูมิของซิลิกาเจลในแต่ละอัตราส่วนผงทองแดงนั้นจะบ่งบอกถึงค่าความร้อนที่ใช้ไปในระบบปรับอากาศแบบดูคซั้บ

3.2 เมื่อค่าอัตราส่วนของปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแทนดูคซั้บเพิ่มขึ้นส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแทนดูคซั้บนั้นจะกระจายตัวได้ดีขึ้นซึ่งทำให้พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งวัฏจักรดีขึ้นเช่นกัน จึงเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เวลาของวัฏจักรลดลง

3.3 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความดันเฉลี่ยภายในแทนดูคซั้บจะแปรผันตามพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแทนดูคซั้บ ในช่วงกระบวนการ preheating และ cooling และจะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการดูคซั้บในช่วงกระบวนการ desorption และ adsorption

3.4 ค่าความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิภายในแท่นดูดซับ เมื่ออุณหภูมิมียุ่ค่าสูงขึ้นจะเร่งอัตราการคายสารทำความเย็นในช่วงกระบวนการ desorption ให้เร็วขึ้น และเมื่ออุณหภูมิมียุ่ค่าต่ำลงอัตราการดูดซับสารทำความเย็นในช่วงกระบวนการ adsorption จะเร็วขึ้นเช่นกัน

จากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั้ง 3 ที่ศึกษาพบว่าสามารถส่งผลกระทบต่อไปยังค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบและระยะเวลาของวัฏจักรให้แปรผันตามอัตราส่วนผงทองแดง ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะและระยะเวลาวัฏจักรในแต่ละอัตราส่วนผงทองแดง

Copper Volume Fraction	Time(s)				COP
	Preheating	Desorption	Cooling	Adsorption	
0.05	334	446	345	528	0.331
0.10	292	437	319	521	0.358
0.15	260	402	297	498	0.371
0.20	233	385	258	470	0.376
0.25	205	370	215	450	0.38

จากตารางที่ 5.2 เมื่ออัตราส่วนผงทองแดงเพิ่มขึ้นเวลาในช่วงกระบวนการ preheating และ cooling ลดน้อยลง จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลังงานสุทธิที่ใช้จากแหล่งพลังงานภายนอกมีค่าน้อยลง ดังนั้นระบบปรับอากาศแบบดูดซับที่ใช้ซิลิกาเจลและน้ำเป็นคู่สารทำงาน ผสมอัตราส่วนของปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับ 0.25 เป็นระบบที่มีความเหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้และให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบอยู่ที่ 0.38 ซึ่งสามารถใช้แก้ปัญหาค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบดูดซับที่มีค่าต่ำลงได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีที่ปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ มีข้อจำกัดอยู่ที่ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของแท่นดูดซับไม่เปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนของผงทองแดงที่ผสมลงในแท่นดูดซับ ดังนั้นในการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไปควรทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของซิลิกาเจลกับค่าสัดส่วนของผงทองแดงเพื่อนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีศึกษา

## บรรณานุกรม

- เกศนที น้อยปิ่น. 2546. การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและมวลในการดูดซับของซิลิกาเจล-น้ำ. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2549. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. 108-109.
- Boubakri, A. 2000. Adsorption solar powered ice maker experiment and model, *Solar Energy*. 69: 249–263.
- Di, J., Wu, J.Y., Xia, Z.Z. and Wang, R.Z. 2007. Theoretical and experimental study on characteristics of a novel silica gel-water chiller under the conditions of variable heat source temperature, *International Journal of Refrigeration*. 30: 515-526.
- Dieng, A.O and Wang, R.Z. 2001. Literature review on solar adsorption technologies for ice-making and air conditioning purposes and recent developments in solar technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 5: 313–342.
- Dixon, A.G. and Cresswell, D.L. 1979. Theoretical predictions of effective heat transfer mechanisms in regular shaped packed beds, *American Institute of Chemical Engineers Journal*. 25: 663–676.
- Dubinin, M.M. 1967. Adsorption in micropores, *Colloid and Interface Science*. 23: 487-499.
- Dubinin, M.M. and Astakhov, V.A. 1970. *Advance Chemistry Service*. 102: 69.
- Dullien, A.L. 1992. *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*, Academic. New York. 2<sup>nd</sup> Edition. 33-34.
- Donohue, M.D. and Aranovich, G.L. 1998. Classification of Gibbs adsorption isotherms, *Advances in Colloid and Interface Science*. 77: 137-152.
- Eun, T.W., Song, H.K., Jong, H., Lee, H.K. and Kim, J.K. 2009. Enhancement of heat and mass transfer in silica-expanded graphite composite blocks for adsorption heat pumps. Part II. Cooling system using the composite blocks, *International Journal of Refrigeration*. 23: 74-81.

- Freni, A., Bonaccorsi, L., Proverbio, E., Maggio, G. and Restuccia, G. 2009. Zeolite synthesised on copper foam for adsorption chillers: A mathematical model, *Microporous and Mesoporous Materials*. 120: 402-409.
- Hasan, D. Moghtada, M. Semra, U. 2008. A review on adsorption heat pump: Problems and solutions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12: 2381–2403.
- Holman, J.P., 2000. *Experimental Methods for Engineers*, McGraw Hill Higher Education, New York. 98-99.
- Hu, P., Yao, J.J. and Chen, Z.S. 2009. Analysis for composite zeolite/foam aluminum–water mass recovery adsorption refrigeration system driven by engine exhaust heat, *Energy Conversion and Management*. 50: 255-261.
- Hui, T.C., Kim C. Ng, Anutosh C.N and Mohamed A.O., 2002. Adsorption Characteristics of Silica Gel + Water Systems, *Journal Chemistry Engineering Data*. 47: 1177-1181.
- Hulse, G.E. 1929. Refroidissement d'un wagon frigorifique a marchandises par un systeme adsorption utilisant le gel de silice, *Revue Generale de Froid*. 10: 281-287.
- Khan, M.Z.I., Sultana, S., Akisawa, A., Kashiwagi, T. 2006. Numerical simulation of advanced adsorption refrigeration chiller with mass recovery, *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*. 3: 59-67.
- Li, M., Wang, R.Z. and Shi, F. 2001. Thermodynamics analysis of a solar solid adsorption refrigeration ice-maker model and experimental validation, *Acta Energiæ Solaris Sinica*. 22: 274–279.
- Liu, Y. and Leong, K.C. 2008. Numerical modeling of a zeolite/water adsorption cooling system with non-constant condensing pressure, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 35: 618–622.
- Mers, Al., Azzabakh, A., Mimet, A. and Kalkha, H. 2006. Optimal design study of cylindrical finned reactor for solar adsorption cooling machine working with activated carbon–ammonia pair, *Applied Thermal Engineering*. 26: 1866–1875.
- Mhimid, A. 1998. Theoretical study of heat and mass transfer in a zeolite bed during water desorption : validity of local thermal equilibrium assumption, *Internatinal Journal of Heat and Mass Transfer*. 41: 2967 – 2977.

- Nield, D. and Bejan, A. 2006. *Convection in Porous Media*, Springer Science and Business Media, Inc. United State of America. 30-31.
- Patankar, V. 1980. *Numerical Heat transfer and fluid flow*, Hemisphere Publishing Corporation. United State of America. 45-50.
- Restuccia, G., Freni, A., Russo, F. and Vasta, S. 2005. Experimental investigation of a solid adsorption chiller based on a heat exchanger coated with hydrophobic zeolite, *Applied Thermal Engineering*. 25: 1419–1428.
- Saha, B.B., Alam, KCA., Akisawa, A., Kashiwagi, T., KC. and Chua, HT. 2000. Two-stage non-regenerative silica gel-water adsorption-refrigeration cycle. *Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Divisions*. 40: 65-69.
- Sridhar, K., 1987. *Studies of Activated carbon - Methanol Pairs with ice Making*, Master of Engineering, Energy Technology program, Asian Institute of Technology 1: 84.
- Suzuki, M. 1990. *Adsorption Engineering*, Professor, Institute of Industrial Science. University of Tokyo. Tokyo. 37-44.
- Wang, L.W., Wang, R.Z. and Oliveira, R.G. 2009. A review on adsorption working pairs for refrigeration, *Renew Sustain Energy Reviews*. 13: 518-534.
- Wei-Dong, W., Hua, Z. and Da-Wen, S. 2009. Mathematical simulation and experimental study of a modified zeolite 13X–water adsorption refrigeration module, *Applied Thermal Engineering*. 29: 645–651.
- Yunus, A.C. 2004. *Heat transfer a practical approach*, McGraw-Hill companies. Singapore. 441-442.
- Zhang, L.Z. and Wang, L. 1999. Momentum and heat transfer in the adsorbent of a waste heat adsorption cooling system, *Energy*. 24: 605–624.

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างของการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลข

## 1. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

จากเงื่อนไขค่าขอบเขตที่ได้แสดงในบทที่ 3 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในและภายนอกแท่นดูดซับ ได้ดังนี้

### 1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกแท่นดูดซับ

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศแบ่งการใช้งานออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีทำความร้อนและกรณีทำความเย็น

กรณีทำความร้อน (คุณสมบัติของอากาศที่ 90 °C จาก Table A-15 [Yunus, 2004])

$$k = 0.03024 \text{ W/m.K}, \quad \nu = 2.201 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}, \quad \text{Pr} = 0.7132$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{(2)(0.05)}{(2.201 \times 10^{-5})} = 4543.4$$

$$\text{Nu} = (0.023)(4543.4)^{0.8}(0.7132)^{0.4} = 16.94$$

$$h_{\text{air}} = \frac{k\text{Nu}}{D} = \frac{(0.03024)(16.94)}{(0.05)} = 10.24 \text{ W/m}^2\text{K}$$

กรณีทำความเย็น (คุณสมบัติของอากาศที่ 25°C จาก Table A-15 [Yunus, 2004])

$$k = 0.02504 \text{ W/m.K}, \quad \nu = 1.562 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}, \quad \text{Pr} = 0.7296$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{(2)(0.05)}{(1.562 \times 10^{-5})} = 6402.048$$

$$\text{Nu} = (0.023)(6402.048)^{0.8}(0.7296)^{0.3} = 23.212$$

$$h_{\text{air}} = \frac{k\text{Nu}}{D} = \frac{(0.025)(23.212)}{(0.05)} = 11.605 \text{ W/m}^2\text{K}$$



ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของไอน้ำแบ่งการใช้งานออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ใช้ในกระบวนการ desorption และกรณีที่ใช้ในกระบวนการ adsorption

กรณี Desorption (คุณสมบัติของไอน้ำที่ 40 °C จาก Table A-9 [Yunus, 2004])

$$k = 0.0196 \text{ W/m.K}, \quad \nu = 1.0063 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad \text{Pr} = 1$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{(0.1)(0.01)}{(1.0063 \times 10^{-6})} = 4966.23$$

$$\text{Nu} = (0.023)(4966.23)^{0.8}(1)^{0.4} = 20.82$$

$$h_{\text{air}} = \frac{k\text{Nu}}{D} = \frac{(0.0196)(20.82)}{(0.01)} = 8.16 \text{ W/m}^2\text{K}$$

กรณี Adsorption (คุณสมบัติของไอน้ำที่ 15 °C จาก Table A-9 [Yunus, 2004])

$$k = 0.0176 \text{ W/m.K}, \quad \nu = 1.0011 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad \text{Pr} = 1$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{(0.1)(0.01)}{(1.0011 \times 10^{-6})} = 4994.506$$

$$\text{Nu} = (0.023)(4994.506)^{0.8}(1)^{0.3} = 20.91$$

$$h_{\text{air}} = \frac{k\text{Nu}}{D} = \frac{(0.0176)(20.91)}{(0.01)} = 7.36 \text{ W/m}^2\text{K}$$

## 1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในแท่นดูดซับ

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในแท่นดูดซับเป็นค่าที่มาจากพจน์การถ่ายเทความร้อนระหว่างสถานะของสารภายในแท่นดูดซับ

ตัวอย่าง กรณีไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ ( $\varepsilon_r = 0.3$ )

ค่าคุณสมบัติของไอน้ำที่ 25 °C จาก Table A-9 (Yunus, 2004)

ค่าคุณสมบัติของซิลิกาเจล (Hui et al., 2002)

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{(0.0708)(0.035)}{(1.1061 \times 10^{-6})} = 225.27$$

$$Nu_{fs} = (0.255/0.3)(1)^{1/3} (225.27)^{2/3} = 18.3203$$

$$\frac{1}{h} = \frac{d_p}{Nu_{fs} k_f} + \frac{d_p}{\beta k_s} = \frac{0.025}{(18.3203)(0.01812)} + \frac{0.025}{(10)(0.196)}$$

$$h = 0.784 \text{ W/m}^2\text{K}$$

## 2. ค่าสัดส่วนช่องว่างเชิงปริมาตร

ค่าสัดส่วนช่องว่างเชิงปริมาตร  $\varepsilon_t$  (Volume fraction) คือ อัตราส่วนของปริมาตรช่องว่างต่อปริมาตรทั้งหมด แทนจุดซัฟที่ใช้เป็นแบบทรงกระบอก บรรจุซิลิกาเจลจำนวน 1kg

ปริมาตรซิลิกาเจล 1 kg ( $V_s$ )

$$V_s = m / \rho_s = 1 / 1980 = 5.055 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

\*ปริมาตรแทนจุดซัฟ ( $V_{total}$ )

$$\begin{aligned} V_{total} &= [\pi(r_o^2) - \pi(r_i^2)](H) \\ &= [\pi(0.035^2) - \pi(0.005^2)](0.26) \\ &= 7.28 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ปริมาตรช่องว่าง ( $V_g$ )

$$V_g = V_{total} - V_s = 2.225 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

สัดส่วนช่องว่างเชิงปริมาตร ( $\varepsilon_t$ )

$$\varepsilon_t = \frac{V_{total} - V_s}{V_{total}} = \frac{V_g}{V_{total}} = 0.305$$

\*ขนาดของแทนจุดซัฟที่เหมาะสมกับงานวิจัยได้แสดงวิธีการคำนวณไว้ในบทความวิชาการท้ายเล่ม

**ภาคผนวก ข**

**การวิเคราะห์สมการการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในแท่งดูดซับ**

ในการวิเคราะห์สมการการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในแท่งดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยสมการอัตราการดูดซับของกระบวนการดูดซับ (Linear Diving Force, LDF)

$$\frac{\partial W}{\partial t} = G(W_{eq} - W) \quad (ข.1)$$

เมื่อ  $G = (15D_{so} / R_p^2) \exp[-E_a / (R(T_b + 273.15))]$  ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของกระบวนการ desorption และ กระบวนการ adsorption และค่า  $W_{eq}$  หาค่าได้จากสมการการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนมวลสารในชั้นสารดูดซับของ Dubinin-Astakhov

$$W_{eq} = W_0 \exp \left[ -k \left( \frac{T_b}{T_{sat}} - 1 \right)^n \right] \quad (ข.2)$$

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการปรับสมการอัตราการดูดซับ (LDF) ให้ง่ายขึ้นโดยการตั้งสมมุติฐานให้ค่า  $G$  และ  $W_{eq}$  ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (Di, 2007) ดังนั้นจะได้สมการดังนี้

$$W(t) = W_{eq} (1 - \exp(Gt^y)) + W(0) \exp(-Gt^y) \quad (ข.3)$$

ค่าดัชนี  $y$  ในสมการที่ (ข.3) เป็นค่าผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่งดูดซับซึ่งพบว่าช่วงของอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ค่า  $y$  จึงมีค่าเป็นหนึ่งหน่วย สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$W(t) = W_{eq} (1 - \exp(Gt)) + W(0) \exp(-Gt) \quad (ข.4)$$

ทำการ differencing สมการที่ (ข.4) โดยขึ้นอยู่กับเวลา (t) จะได้

$$\frac{dW(t)}{dt} = G(W_{eq} - W(0)) \exp(-Gt) \quad (ข.5)$$

สมการที่ (ข.5) เป็นสมการที่ใช้ในส่วนของการดูดซับในสมการอนุพันธ์พลังงานและมวล

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างของการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบดูดซับ

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบดูดซับ  
กรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อน

เวลาที่ใช้ไปใน 1 วัฏจักรของระบบ

กระบวนการ Preheating	550	วินาที
กระบวนการ Desorption	471	วินาที
กระบวนการ Cooling	390	วินาที
กระบวนการ Adsorption	651	วินาที

อัตราการไหลเชิงมวลภายในแทนดูดซับเฉลี่ยทั้งวัฏจักร

$$\begin{aligned} \dot{m}_w &= \rho \bar{V}_g A \\ &= (0.1)(0.708)(0.00354) \\ &= 2.5023 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

กระบวนการ 1-2 ความร้อนสัมผัสที่ใส่สารดูดซับและสารทำความเย็นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Q_{12} &= \dot{m}_w (C_{ps} + C_{pw} W_{ads})(T_2 - T_1)(t_{1 \rightarrow 2}) \\ &= (0.0002503)(920 + (4180)(0.015))(70 - 25)(550) \\ &= 60804.56 \text{ J} \end{aligned}$$

กระบวนการ 2-3 ความร้อนสัมผัสที่ให้แก่กระบวนการ 2-3 นั้นสามารถแบ่งได้เป็นความร้อนสัมผัส  
ที่ให้กับสารดูดซับและสารทำความเย็นจากอุณหภูมิ  $T_2$  ถึง  $T_3$  และความร้อนสำหรับการคายตัว  
ของสารทำความเย็นออกจากสารดูดซับ

$$\begin{aligned} Q_{23} &= \dot{m}_w \left( C_{ps} + C_{pw} \left( \frac{W_{ads} + W_{des}}{2} \right) \right) (T_3 - T_2)(t_{2 \rightarrow 3}) + (W_{ads} - W_{des})(\Delta H) \\ &= (0.0002503)(920 + (4180)(0.1625))(90 - 70)(471) + (0.31 - 0.015)(2700000) \\ &= 834207.53 \text{ J} \end{aligned}$$

กระบวนการทำความเย็นความสามารถในการทำความเย็นของระบบสามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$\begin{aligned} Q_{ev} &= \dot{m}_w (L_{ev} - c_{pw} (T_1 - T_{ev})) (t_{4 \rightarrow 1}) \\ &= (0.0002503)(2800000 - (4180)(25 - 8))(651) \\ &= 237178.2039 \text{ J} \end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ

$$\begin{aligned} COP &= \frac{Q_{ev}}{Q_{12} + Q_{23}} \\ &= \frac{237178.2039}{895012.09} \\ &= 0.265 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ง  
โปรแกรมที่ใช้จำลองระบบสำหรับงานวิจัย



## กรณีที่ไม่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแทนดูดซับ

**%Adsorption Cycle composes preheating, desorption, cooling and adsorption process**

**%Preheating process (Close system)**

**%Parameters**

**%porosity**

Et=0.3;

**%Properties of Silica gel type A**

cps=920;

ks=0.5;

ps=1980;

W0=0.35;

**%Properties of Water**

cpw=4100;

cpg=1840;

pg=0.0512;

kg=0.1;

**%Source Term**

Wpre=0.35;

Wcool=0.015;

pcp\_Heat=(1-Et)\*ps\*(cps+Wpre\*cpw)+Et\*cpg\*pg;

pcp\_Cool=(1-Et)\*ps\*(cps+Wcool\*cpw)+Et\*cpg\*pg;

Dso=2.54e-4;

Ea=2.33e3;

R=4.62E2;

Ds=Dso\*exp(-Ea/(R\*300));

G=15\*Ds/(Rp^2);

DH=2.7e6;

**%Coefficient**

h\_heat=11.65;

h\_cool=10.24;

k=(1-Et)\*ks+Et\*kg;

```

pcp=pcp_Heat;
Th=90;
h=h_heat;
%Physical of Adsorber
dr=0.005;
rin=0.01;
rout=0.035;
for a=1:7
    r(a)=rin+dr*(a-1);
end
for b=1:6
    Ae(b)=2*pi*r(b+1)*dr;
    Aw(b)=2*pi*r(b)*dr;
    An(b)=(pi*(r(b+1)^2-r(b)^2));
    As(b)=An(b);
    V(b)=(pi*(r(b+1)^2-r(b)^2))*dr;
end
%Increment
dr=0.005;
dz=dr;
dt=0.1;
%Initial Condition
for j=1:52
    for i=1:5
        T(j,i,g)=25;
    end
end
%Numerical
time=1000;
while T(:,3,g) < 70    %center
    for i=1:52
        for j=1:5
            %Interior V

```

```

if (i>1 & i<52 & j>1 & j<5)
    T(i,j,g+1)=[(2*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j))]*T(i,j+1,g)+[(2*k*pi*dt*r(j))/(pcp*V(j))]*T(i,j-1,g)+
    [(k*dt)/(pcp*dz^2)]*T(i+1,j,g)+[(k*dt)/(pcp*dz^2)]*T(i-1,j,g)+[1-((2*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j)))-
    ((2*k*pi*dt*r(j))/(pcp*V(j)))-((2*k*dt)/(pcp*dz^2))]*T(i,j,g);

%Boundary V
elseif (j==1 & i>1 & i<52)
    T(i,j,g+1)=[(2*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j))]*T(i,j+1,g)+[(k*dt)/(pcp*dz^2)]*T(i+1,j,g)+[(k*dt)/(pcp*dz^2)]*T(i-
    1,j,g)+[1-((2*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j)))-((2*k*dt)/(pcp*dz^2))]*T(i,j,g);

elseif (i==1 & j>1 & j<5)
    T(i,j,g+1)=[(2*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j))]*T(i,j+1,g)+[(2*k*pi*dt*r(j))/(pcp*V(j))]*T(i+1,j,g)+[(k*dt)/(pcp*d
    z^2)]*T(i+1,j,g)+[1-((2*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j)))-((2*k*pi*dt*r(j))/(pcp*V(j)))-
    ((k*dt)/(pcp*dz^2))]*T(i,j,g);

elseif (i==52 & j>1 & j<5)
    T(i,j,g+1)=[(2*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j))]*T(i,j+1,g)+[(2*k*pi*dt*r(j))/(pcp*V(j))]*T(i,j-
    1,g)+[(k*dt)/(pcp*dz^2)]*T(i-1,j,g)+[1-((2*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j)))-((2*k*pi*dt*r(j))/(pcp*V(j)))-
    ((k*dt)/(pcp*dz^2))]*T(i,j,g);

elseif (j==5 & i>1 & i<52)
    T(i,j,g+1)=[(2*k*pi*dt*r(j))/(pcp*V(j))]*T(i,j-1,g)+[(k*dt)/(pcp*dz^2)]*T(i+1,j,g)+[(k*dt)/(pcp*dz^2)]*T(i-
    1,j,g)+[1-((2*k*pi*dt*r(j))/(pcp*V(j)))-((k*dt)/(pcp*dz^2))-
    (4*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j))+6*pi*r(j+1)*dt*k^2/(pcp*V(j)*(h*dz+2*k))]*T(i,j,g)+[(4*pi*r(j+1)*k*h*dz*d
    t*Th-2*pg*pi*u*dz*k*r(j+1))/(pcp*V(j)*(h*dz+2*k))];

%Corner V
elseif (i==1 & j==1)
    T(i,j,g+1)=[(2*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j))]*T(i,j+1,g)+[(k*dt)/(pcp*dz^2)]*T(i+1,j,g)+[1-
    ((2*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j)))-((k*dt)/(pcp*dz^2))]*T(i,j,g);
elseif (i==1 & j==5)

```

```

T(i,j,g+1)=[(2*k*pi*dt*r(j))/(pcp*V(j))*T(i,j-1,g)+[(k*dt)/(pcp*dz^2)]*T(i+1,j,g)+[1-((2*k*pi*dt*r(j))
/(pcp*V(j)))-((k*dt)/(pcp*dz^2))-(4*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j))+(8*pi*r(j+1)*dt*k^2)/(pcp*V(j)*
(h*dz+2*k))]*T(i,j,g)+[(4*pi*r(j+1)*k*h*dz*dt*Th-2*pg*pi*u*dz*k*r(j+1))/(pcp*V(j)*(h*dz+2*k))];

elseif(i==52 & j==1)
T(i,j,g+1)=[(2*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j))*T(i,j+1,g)+[(k*dt)/(pcp*dz^2)]*T(i-1,j,g)+[1-((2*k*pi*dt*r(j+1))
/(pcp*V(j)))-((k*dt)/(pcp*dz^2))]*T(i,j,g);

elseif(i==52 & j==5)
T(i,j,g+1)=[(2*k*pi*dt*r(j))/(pcp*V(j))*T(i,j-1,g)+[(k*dt)/(pcp*dz^2)]*T(i-1,j,g)+[1-((2*k*pi*dt*r(j))
/(pcp*V(j)))-((k*dt)/(pcp*dz^2))-(4*k*pi*dt*r(j+1))/(pcp*V(j))+(8*pi*r(j+1)*dt*k^2)/(pcp*V(j)*
(h*dz+2*k))]*T(i,j,g)+[(4*pi*r(j+1)*k*h*dz*dt*Th-2*pg*pi*u*dz*k*r(j+1))/(pcp*V(j)*(h*dz+2*k))];
end
tor = abs(T(26,3,g)-T(26,3,g+1));
T(:,:,g) = T(:,:,g+1);
if tor<0.001, break, end
end
end
g=g+1;
end
#####

%Desorption process (Open system) is connected the condenser

%Initial Condition
T_Int=xlsread('Initial T Desorption.xls');
P_Int=xlsread('initial P Desorption.xls');
g=1;
T(:,:,g)=T_Int;
P(:,:,g)=P_Int;
%Desorption
Th=90;
Tco=40;

```

```

h=h_heat;
k1=1.56;
n=1.7;
Wo=0.35;

%Numerical
time=1000;
while T(:,3,g) < 90 %center
W(g)=G*(Weq-Wo*exp(-G*(g)));
pcp(g)=(1-Et)*ps*(cps+W(g)*cpw)+Et*cpg*pg;
    for i=1:52
        for j=1:5
%Interior V
%Boundary V
%corner
#####

```

สำหรับกระบวนการ Cooling โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองจะมีความคล้ายกับโปรแกรมที่ใช้ในกระบวนการ Preheating เนื่องจากแทนจุดขับอยู่ในสภาวะระบบปิด แต่แตกต่างกันในส่วนของเงื่อนไขค่าขอบเขตตรงบริเวณผิวแทนจุดขับที่เปลี่ยนแปลงเป็นการหล่อเย็นแทนจุดขับซึ่งแสดงได้ดังนี้

```

%Coefficient
k=(1-Et)*ks+Et*kg;
pcp=pcp_cool;
Tc=25; %Change Th to Tc (Cooling temperature)
h=h_cool;

```

สำหรับกระบวนการ Adsorption โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองจะมีความคล้ายกับโปรแกรมที่ใช้ในกระบวนการ Desorption แต่จะแตกต่างกันที่พฤติกรรมของค่าความสามารถในการดูดซับเนื่องจากกระบวนการ Adsorption จะเป็นการดูดมวลสารจากอิวาเปอร์เตอร์เข้ามายังแทนจุดขับซึ่งแสดงได้ดังนี้

**%Coefficient**

```

k=(1-Et)*ks+Et*kg;
pcp=pcp_cool;
Tev=10; %Change Tc to Tev (Evaporating temperature)
Tc=25;
h=h_cool;
ha=7.36;

```

**%Numerical**

```

time=1000;
while W(:,;g) > 0.31 %Saturated adsorption capacity
W(g)=G*(Weq+Wo*exp(-G*(g)));
pcp(g)=(1-Et)*ps*(cps+W(g)*cpw)+Et*cpg*pg;

```

**กรณีที่มีการปรับปรุงค่าการนำความร้อนภายในแท่นดูดซับ**

ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับกรณีนี้จะต้องวิเคราะห์สมการเชิงตัวเลขทั้งหมด 3 สมการ เนื่องจากการวิเคราะห์ภายใต้สมมุติฐาน Local Thermal Non-Equilibrium (LTNE) และต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนของปริมาตรผงทองแดงต่อปริมาตรแท่นดูดซับซึ่งแสดงได้ดังนี้

**%Porosity**

```

Eb=0.3;
Ecu=0.05; % Depend on copper volume
Et=Eb-Ecu;
Eg=Et;
Es=1-Et;

```

**%Coefficient**

```

hg=0.784; %Internal heat transfer depend copper volume fraction
pcp_s=(1-Et)*ps*(cps+Wpre*cpw);
pcp_g=Eg*cpg*pg;
pcp_cu=Ecu*cpcu*pcu;

```

**%Initial Condition****%gas**

for j=1:52

for i=1:5

Tg(j,i,g)=25; % Ts = solid, Tcu = copper

end

end

ในส่วนของกระบวนการเชิงตัวเลขจะคล้ายกับกรณีศึกษาที่ไม่มีการปรับปรุงความร้อนภายในแท่น  
ดูดซับทั้ง 4 กระบวนการแต่จะเพิ่มในส่วนการถ่ายเทความร้อนภายในแท่นดูดซับ

**%Numerical**

%Interior V

$$T_s(i,j,g+1) = \frac{(2 \cdot k_s \cdot \pi \cdot dt \cdot r(j+1))}{(pcp\_s \cdot V(j))} \cdot T_s(i,j+1,g) + \frac{(2 \cdot k_s \cdot \pi \cdot dt \cdot r(j))}{(pcp\_s \cdot V(j))} \cdot T_s(i,j-1,g) + \frac{(k_s \cdot dt)}{(pcp\_s \cdot dz^2)} \cdot T_s(i+1,j,g) + \frac{(k_s \cdot dt)}{(pcp\_s \cdot dz^2)} \cdot T_s(i-1,j,g) + [1 - \frac{(2 \cdot k_s \cdot \pi \cdot dt \cdot r(j+1))}{(pcp\_s \cdot V(j))} - \frac{(2 \cdot k_s \cdot \pi \cdot dt \cdot r(j))}{(pcp\_s \cdot V(j))} - \frac{(2 \cdot k_s \cdot dt)}{(pcp\_s \cdot dz^2)}] \cdot T_s(i,j,g) + hg \cdot (T_g(i,j,g) - T_s(i,j,g)) + hg \cdot (T_{cu}(i,j,g) - T_s(i,j,g));$$

$$T_g(i,j,g+1) = \frac{(2 \cdot k_g \cdot \pi \cdot dt \cdot r(j+1))}{(pcp\_g \cdot V(j))} \cdot T_g(i,j+1,g) + \frac{(2 \cdot k_g \cdot \pi \cdot dt \cdot r(j))}{(pcp\_g \cdot V(j))} \cdot T_g(i,j-1,g) + \frac{(k_g \cdot dt)}{(pcp\_g \cdot dz^2)} \cdot T_g(i+1,j,g) + \frac{(k_g \cdot dt)}{(pcp\_g \cdot dz^2)} \cdot T_g(i-1,j,g) + [1 - \frac{(2 \cdot k_g \cdot \pi \cdot dt \cdot r(j+1))}{(pcp\_g \cdot V(j))} - \frac{(2 \cdot k_g \cdot \pi \cdot dt \cdot r(j))}{(pcp\_g \cdot V(j))} - \frac{(2 \cdot k_g \cdot dt)}{(pcp\_g \cdot dz^2)}] \cdot T_g(i,j,g) + hg \cdot (T_s(i,j,g) - T_g(i,j,g)) + hg \cdot (T_{cu}(i,j,g) - T_g(i,j,g));$$

$$T_{cu}(i,j,g+1) = \frac{(2 \cdot k_{cu} \cdot \pi \cdot dt \cdot r(j+1))}{(pcp\_cu \cdot V(j))} \cdot T_{cu}(i,j+1,g) + \frac{(2 \cdot k_{cu} \cdot \pi \cdot dt \cdot r(j))}{(pcp\_cu \cdot V(j))} \cdot T_{cu}(i,j-1,g) + \frac{(k_{cu} \cdot dt)}{(pcp\_cu \cdot dz^2)} \cdot T_{cu}(i+1,j,g) + \frac{(k_{cu} \cdot dt)}{(pcp\_cu \cdot dz^2)} \cdot T_{cu}(i-1,j,g) + [1 - \frac{(2 \cdot k_{cu} \cdot \pi \cdot dt \cdot r(j+1))}{(pcp\_cu \cdot V(j))} - \frac{(2 \cdot k_{cu} \cdot \pi \cdot dt \cdot r(j))}{(pcp\_cu \cdot V(j))} - \frac{(2 \cdot k_{cu} \cdot dt)}{(pcp\_cu \cdot dz^2)}] \cdot T_{cu}(i,j,g) + hg \cdot (T_g(i,j,g) - T_{cu}(i,j,g)) + hg \cdot (T_s(i,j,g) - T_{cu}(i,j,g));$$

ในส่วนของปริมาตรย่อยส่วนอื่นทำในลักษณะเดียวกันกับปริมาตรภายใน (Interior Volume)

ภาคผนวก จ  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์





การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23  
4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

## ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้ซิลิกาเจล-น้ำ

เป็นคู่สารทำงาน : หาขนาดของแท่นดูดซับที่เหมาะสม

### A Mathematic Model of an Adsorption Refrigeration Using Silica gel-Water as

### Working Pairs: Optimizing the Adsorber

จานวิทย์ แนมใส\*, สมชาย แซ่อึ้ง, จิระภา สุขแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

\*อีเมลล์ thanwit\_n@hotmail.com, โทร 0-7428-7223, โทรสาร 0-7421-2893

#### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของขนาดแท่นดูดซับที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับชนิดไม่ต่อเนื่องที่ใช้ซิลิกาเจลและน้ำเป็นคู่สารทำงาน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อออกแบบขนาดของแท่นดูดซับทรงกระบอกให้เหมาะกับระบบทำความเย็นที่ใช้ซิลิกาเจล 1 kg ในการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะมุ่งเน้นในส่วนของการถ่ายเทความร้อนและมวลของชั้นสารดูดซับ ที่มีลักษณะเป็นแบบ 2 มิติ และใช้เทคนิคระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) ทำนายค่าอุณหภูมิของแท่นดูดซับในการคำนวณได้กำหนดค่าอุณหภูมิต่างๆในการใช้งานคงที่ และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างรัศมีภายนอกและภายในของแท่นเป็น 2.5 3 3.5 4 และ 4.5 ผลจากการศึกษาพบว่าความกว้างของแท่นดูดซับที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระบบสามารถดูดซับสารทำงานและทำความเย็นได้เพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงค่าอัตราส่วนเป็น 3.5 หลังจากนั้นก็มีค่าลดลง ดังนั้นค่าอัตราส่วน 3.5 จึงเป็นแบบที่เหมาะสมที่สุด และให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ 0.265

**คำหลัก:** ซิลิกาเจล / ระบบทำความเย็น / การดูดซับ / ไฟไนต์วอลุ่ม

#### Abstract

This research is to study a mathematical model of an adsorption refrigeration system using silica gel-water as working pairs in order to determine the size of the cylindrical adsorber. This numerical focused on two-dimensional heat and mass transfer. The cylindrical adsorber has a varied aspect ratio between outer and inner radius of 2.5, 3, 3.5, 4 and 4.5. The model was solved using the Finite Volume Method (FVM) for temperature profile in each aspect ratio. The numerical results indicated that the adsorption capacity is proportional to the aspect ratio. However, the Coefficient Of Performance (COP)

increased to aspect ratio of 3.5. Afterward, it decreased. Therefore, the optimal aspect ratio of the adsorber is 3.5 and its COP is 0.265.

**Keywords:** Silica gel / Refrigeration / Adsorption / Finite Volume

## 1. บทนำ

ปัจจุบันนี้ระบบทำความเย็นได้เข้ามาเป็นสิ่งจำเป็นในชีวิตประจำวันของคนส่วนใหญ่ โดยเฉพาะงานด้านปรับอากาศ แต่ระบบทำความเย็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายนั้นนิยมใช้สารทำงานจำพวก CFC ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก และนำไปสู่วิกฤตการณ์สภาวะโลกร้อน ดังนั้นจึงมีการนำเทคโนโลยีทำความเย็นแบบดูดซับเข้ามาใช้แทนระบบทำความเย็นที่ใช้กันในปัจจุบัน

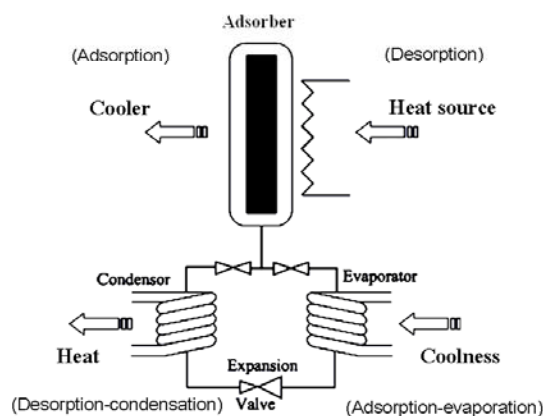
ระบบทำความเย็นแบบดูดซับได้มีการวิจัยและพัฒนาเรื่อยมา แต่ระบบยังมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) ที่ค่อนข้างต่ำ อัตราการดูดซับช้า และระบบใช้เวลานาน สาเหตุหลักเกิดจากปัญหาการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในตัวดูดซับ จึงมีการทำวิจัยเพื่อศึกษาปัญหากรณีนี้ Zhang และ Wang [2] สร้างแบบจำลองการถ่ายเทมวลและความร้อนของระบบทำความเย็นแบบดูดซับโดยวิธี finite difference ใช้ซีไอไลท์-น้ำเป็นคู่สารทำงาน ใช้แทนดูดซับแบบทอสองชั้น ผลการทำนายพบว่าที่จุดใกล้เคียงท่อในตำแหน่งต่างๆ ตามแนวท่อมี่ค่าต่างกันน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าในแนวรัศมีที่แต่ละตำแหน่งต่างๆ ตามแนว เนื่องจากเกิดความต้านทานความร้อนและมวลในชั้นสารดูดซับ สมบูรณ์และคณะ [3] พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชนิดเปลี่ยนแปลงกับเวลา เพื่อศึกษาอุณหภูมิศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ ใช้ถ่านกัมมันต์และเมทานอลเป็นคู่สารทำงาน โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องแบบชัดเจนประมาณค่าเชิงตัวเลขในแบบจำลองพบว่า ระยะเวลาการทำงานของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าชั้นความหนาเพิ่มขึ้น และเมื่อความหนาของชั้นสารดูดซับเพิ่มขึ้นค่า COP ของระบบเพิ่มขึ้น Khan et al. [4] พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในห้องทำความเย็นแบบดูดซับโดยใช้ซิลิกาเจล-น้ำเป็นคู่สารทำงาน ใช้แทนดูดซับ 3

ตัวในการทำ mass recovery ผลการคำนวณพบว่าสามารถลดช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ desorption และสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบ

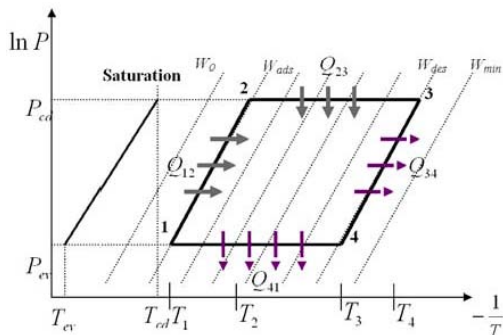
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับและเขียนโปรแกรมคำนวณผลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อระบบและเลือกใช้ซิลิกาเจลและน้ำเป็นคู่สารทำงาน เนื่องจากสารทั้ง 2 ชนิด เป็นสารที่มีคุณสมบัติไม่เป็นพิษ ไม่ไวไฟและไม่กัดกร่อนต่อสิ่งแวดล้อม ค่า Heat of adsorption ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับคู่สารชนิดอื่น [5]

## 2. ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

ระบบทำความเย็นประกอบด้วยอุปกรณ์หลักได้แก่ แท่นดูดซับ (Adsorber) เครื่องควบแน่น (Condenser) เครื่องทำระเหย (Evaporator) และแหล่งให้ความร้อน (Heat source) แสดงดังรูปที่ 1 ระบบทำความเย็นแบบดูดซับเกี่ยวข้องกับ 3 ตัวแปรหลัก คือ ความดัน ( $P$ ) อุณหภูมิ ( $T$ ) และอัตราการดูดซับ ( $W$ ) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน ( $\ln P$ ) กับส่วนกลับของอุณหภูมิสมบูรณ์  $-1/T$  ที่  $W$  คงที่ จะได้แผนภาพแสดงสมดุล  $P-T-W$  (Clapeyron-diagram) แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ส่วนประกอบระบบทำความเย็นแบบดูดซับ



รูปที่ 2 แผนภูมิสมมูล  $P-T-W$  ภายในแท่นดูดซับ [6]

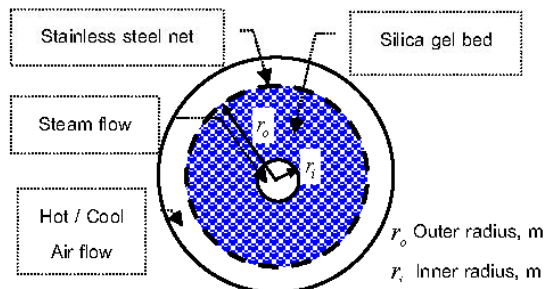
เมื่อ	$P_{cd}, P_{ov}$	ความดันควบแน่นและความดันระเหยของสารดูดซับ $kPa$
	$T_{cd}, T_{ov}$	อุณหภูมิควบแน่นและอุณหภูมิระเหยของสารดูดซับ $K$
	$T_4, T_1$	อุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้ายของกระบวนการดูดซับ $K$
	$T_2, T_3$	อุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้ายของกระบวนการคายสารดูดซับ $K$
	$Q_{12}$	ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ 1-2 $kJ/kg$
	$Q_{23}$	ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ 2-3 $kJ/kg$
	$Q_{34}$	ความร้อนที่ปล่อยออกจากกระบวนการ 3-4 $kJ/kg$
	$Q_{41}$	ความร้อนที่ปล่อยออกจากกระบวนการ 4-1 $kJ/kg$

กระบวนการที่แสดงในรูปที่ 2 เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับประกอบด้วย 4 กระบวนการดังนี้

1. กระบวนการ 1-2 เป็นกระบวนการรับความร้อนแบบอัตรการดูดซับคงที่ (isosteric heating)
2. กระบวนการ 2-3 เป็นกระบวนการคายสารด้วยความเย็นขณะที่ความดันคงที่ (isobaric desorption)
3. กระบวนการ 3-4 เป็นกระบวนการคายความร้อนแบบอัตรการดูดซับคงที่ (isosteric cooling)
4. กระบวนการ 4-1 เป็นกระบวนการดูดซับสารด้วยความเย็นขณะที่ความดันคงที่ (isobaric adsorption)

### 3. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการพัฒนาแบบจำลองจะมุ่งเน้นไปในส่วนการถ่ายเทความร้อนและมวลผ่านชั้นสารดูดซับภายในแท่นดูดซับซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ แท่นดูดซับที่ใช้เป็นแบบท่อทรงกระบอกวางซ้อนกัน 2 ท่อ ใช้แท่นลักษณะนี้จำนวน 4 แท่น บรรจุซิลิกาเจลชนิด A แท่นละ 1 kg ภายในแท่นดูดซับแต่ละแท่นสามารถแบ่งสถานะของสารออกเป็น 2 สถานะ ส่วนแรกคือส่วนที่เป็นของแข็ง (Silica gel bed) ซึ่งบรรจุอยู่บริเวณผิวด้านนอกของท่อชั้นในจนถึงบริเวณตาข่ายเหล็กสแตนเลส (stainless steel net) และส่วนที่เป็นก๊าซ (Steam flow) ซึ่งไหลอยู่รอบชั้นสารซิลิกาเจล ระบบนี้จะใช้ลมร้อน/เย็น (Hot/Cool Air flow) เป็นของไหลในการถ่ายเทความร้อนให้แท่นดูดซับลักษณะทางกายภาพของแท่นดูดซับแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ภาพหน้าตัดส่วนประกอบของแท่นดูดซับ

ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้สมมติฐานต่อไปนี้ [7]

- ลักษณะแท่นดูดซับเป็นทรงกระบอก ชั้นสารดูดซับประกอบด้วยขนาดอนุภาคสม่ำเสมอและมีสมบัติแบบไอโซโทรปิก (Isotropic-properties)
- คุณสมบัติทางกายภาพของคู่สารทำงานมีค่าคงที่ ยกเว้นก๊าซที่เกิดขึ้น ความหนาแน่นจะไม่คงที่โดยพิจารณาเป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal gas)
- ไม่มีการถ่ายเทความร้อนบริเวณตาข่ายสแตนเลส (Stainless steel net)
- ลักษณะการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับใช้แบบจำลอง LTEM (Local Thermal Equilibrium Model)

- ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในชั้นสารดูดซับเป็นแบบ 2 มิติ แปรผันตามแนวรัศมี (r) และความยาวของแท่งดูดซับ (z) เท่านั้น

**3.1 สมการอัตราการดูดซับ**

อัตราการดูดหรือคายปริมาณสารทำความเย็นระหว่างของแข็งและก๊าซที่เกิดขึ้นภายในชั้นสารดูดซับนั้น พิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของสมการ Linear Driving Force [8] เมื่อภายในแท่งดูดซับมีการแพร่กระจายเป็นแบบ macroscopic

$$\frac{\partial W}{\partial t} = G(W_{eq} - W) \quad (1)$$

เมื่อ  $G$  สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล 1/s และค่า  $W_{eq}$  หาได้จากสมการ Dubinin-Astakhov [8]

$$W_{eq} = W_0 \exp \left[ -k \left( \frac{T_b}{T_{sat}} - 1 \right)^n \right] \quad (2)$$

- เมื่อ  $W_{eq}$  อัตราส่วนของปริมาณน้ำต่อปริมาณซิลิกาเจล  $kg/kg$
- $W_0$  อัตราส่วนสูงสุดของปริมาณน้ำต่อปริมาณซิลิกาเจล  $kg/kg$
- $k, n$  ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคู่สารทำงาน
- $T_b$  อุณหภูมิภายในแท่งดูดซับ  $K$
- $T_{sat}$  อุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำ  $K$

**3.2 สมการสมดุลมวลและพลังงาน**

สมการสมดุลมวลในชั้นสารดูดซับเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \vec{V}_g) + (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

- เมื่อ  $\varepsilon$  ค่าสัดส่วนช่องว่างเชิงปริมาตร
  - $\vec{V}_g$  ความเร็วของก๊าซในแนวแกน  $m/s$
- ความเร็วของก๊าซในแนวแกนที่ไหลผ่านวัสดุที่มีรูพรุนสามารถแสดงได้ด้วย Darcy's law

$$\vec{V}_g = -\frac{K}{\mu} \nabla P_g \quad (4)$$

- เมื่อ  $\mu$  ค่าความหนืดพลศาสตร์  $kg/m.s$
  - $K$  ค่าความการซึมผ่านวัสดุรูพรุน  $m^2$
- สมการสมดุลพลังงานในชั้นสารดูดซับเมื่อประยุกต์ใช้ LTEM คือ ค่าอุณหภูมิของก๊าซที่เกิดขึ้น ( $T_z$ ) เท่ากับ

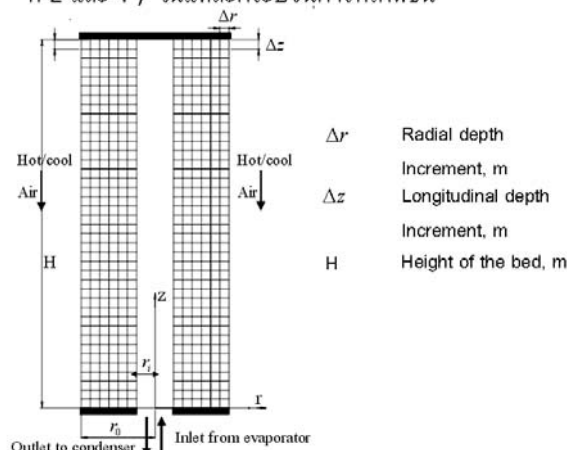
อุณหภูมิของแข็ง ( $T_s$ ) ในชั้นซิลิกาเจล และลักษณะการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 2 มิติเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & [(1 - \varepsilon) \rho_s (C_{ps} + WC_{pl}) + \varepsilon \rho_g C_{pg}] \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_g C_{pg} (V_g)_z T) \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_g C_{pg} (V_g)_r T) = \frac{\partial}{\partial z} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rk_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}) \\ & + (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t} \Delta H \end{aligned} \quad (5)$$

- เมื่อ  $k_{eff} = (1 - \varepsilon)k_s + \varepsilon k_g$
- $k_s$  ค่าการนำความร้อนของแข็ง  $W/m.K$
- $k_g$  ค่าการนำความร้อนของไหล  $W/m.K$
- $\Delta H$  ค่าความร้อนของการดูดซับ  $kJ/kg$

**3.3 เงื่อนไขค่าเริ่มต้นและค่าขอบเขต**

งานวิจัยนี้ได้กำหนดเงื่อนไขทั้งสองให้สอดคล้องตามสภาวะและขั้นตอนการทำงานของระบบ (รูปที่ 2 และ 4) ในแต่ละกระบวนการที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4 หน่วยย่อยและขอบเขตของแท่งดูดซับ

เงื่อนไขค่าเริ่มต้น เรียงลำดับตามช่วงการทำงาน ดังนี้

1. กรณี Isosteric heating
  - อุณหภูมิชั้นสารดูดซับ  $T(z, r, 0) = T_i = 25^\circ C$
  - ความดันภายในแท่ง  $P(z, r, 0) = P_0 = 3.38 \text{ kPa}$
  - อัตราการดูดซับ  $W = W_{ads}$
2. กรณี Desorption
  - อุณหภูมิชั้นสารดูดซับ  $T_2(z, r, 0) = T_1 (P \geq P_{cd})$
  - ความดันภายในแท่ง  $P(z, r, 0) = P_{cd}$
3. กรณี Isosteric cooling
  - อุณหภูมิชั้นสารดูดซับ  $T_3(z, r, 0) = T_2 (W = W_{des})$



- ความดันภายในแท่น  $P(z, r, 0) = P_{cd}$

- อัตราการดูดซับ  $W = W_{dis}$

#### 4. กรณี Adsorption

- อุณหภูมิชั้นสารดูดซับ  $T_4(z, r, 0) = T_3 (P \leq P_{sv})$

- ความดันภายในแท่น  $P(z, r, 0) = P_{sv}$

เงื่อนไขขอบเขต ประกอบด้วยเงื่อนไขที่ใช้ทุกกระบวนการ ได้แก่

$$\frac{\partial T}{\partial z}(t, r, H) = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z}(t, r, 0) = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial z}(t, r, H) = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial z}(t, r, 0) = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial z}(t, r_0, z) = 0$$

และเงื่อนไขที่ใช้ตามกระบวนการแบ่งได้ดังนี้

##### 1. กรณี Isosteric heating

$$-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_0, z) = h_{air}(T - T_h)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(t, r_1, z) = 0$$

##### 2. กรณี Desorption

$$-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_0, z) = h_{air}(T - T_h)$$

$$-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_1, z) = h_{air}(T - T_{cd})$$

##### 3. กรณี Isosteric cooling

$$-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_0, z) = h_{air}(T - T_c)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(t, r_1, z) = 0$$

##### 4. กรณี Adsorption

$$-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_0, z) = h_{air}(T - T_c)$$

$$-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_1, z) = h_w(T - T_{sv})$$

#### 3.4 การออกแบบขนาดของแท่นดูดซับ

ในการออกแบบขนาดของแท่นดูดซับทรงกระบอกกำหนดให้ปริมาตรของแท่นนั้นมีค่าคงที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแท่นดูดซับตามอัตราส่วนของรัศมีภายนอกต่อรัศมีภายใน (Aspect ratio,  $r_0/r_i$ ) ออกเป็น 5 ค่า คือ 2.5 3 3.5 4 และ 4.5 โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเป็นตัวชี้วัด ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้ [2,6]

$$COP = \frac{Q_{ev}}{Q_{12} + Q_{23}} \quad (6)$$

- อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ

$$\dot{m}_w = \rho_g \vec{V}_g A \quad (7)$$

เมื่อ  $A$  พื้นที่หน้าตัดแท่นดูดซับ  $m^2$

- ค่าผลการทำความเย็นที่ผลิตได้

$$Q_{ev} = \dot{m}_w (L_{ev} - c_{pw}(T_2 - T_1))(t_{4 \rightarrow 1}) \quad (8)$$

เมื่อ  $L_{ev}$  ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ  $kJ/kg$

$t$  เวลาของการเกิดกระบวนการ  $s$

- ค่าความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ Isosteric heating

$$Q_{12} = \dot{m}_w c_{pw}(T_2 - T_1)(t_{1 \rightarrow 2}) \quad (9)$$

- ค่าความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ Desorption

$$Q_{23} = \dot{m}_w c_{pw}(T_3 - T_2)(t_{2 \rightarrow 3}) \quad (10)$$

#### 4. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

กระบวนการเชิงตัวเลขสำหรับการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (FVM) โดยมีการใช้ Central difference scheme ในการ Discretized เทอมของ diffusive ใช้ Hybrid scheme ในการ Discretized เทอมของ convective และใช้ Explicit scheme ในการ Discretized เทอมของ transient ลักษณะของกริดที่ใช้คำนวณเป็นแบบสี่เหลี่ยม (Quadrilateral) ขนาด  $5 \times 5$  mm ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 สำหรับสมการการไหลทั่วไปในรูปแบบ Explicit ของแต่ละปริมาตรควบคุมสามารถแสดงดังสมการที่ 11

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + [a_p^0 - (a_E + a_W + a_N + a_S) + F_e + F_n - F_w - F_s - S_p] \phi_p^0 + S_u \quad (11)$$

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมีดังนี้ [4,8]

$$k_s = 0.196 \text{ W/m.K}, C_{ps} = 924 \text{ J/kg.K},$$

$$\rho_s = 1300 \text{ kg/m}^3, C_{pw} = 4180 \text{ J/kg.K},$$

$$C_{pg} = 1840 \text{ J/kg.K}, k_g = 0.024 \text{ W/m.K}$$

$$\Delta H = 2800 \text{ kJ/kg}, L_{ev} = 2500 \text{ kJ/kg}$$

ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นดูดซับวิเคราะห์ได้จาก

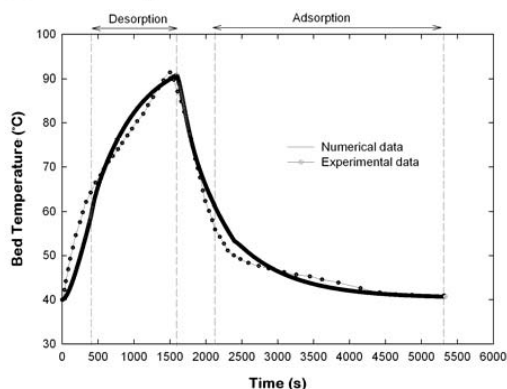
$$T_{b,avg} = \frac{\sum_{j=1}^N V_j T_{bj}}{V_{tot}} \quad (12)$$

เมื่อ  $j$  ดัชนีกริดในแนวรัศมี

$V_{tot}$  ปริมาตรรวมของแท่นดูดซับ  $m^3$

### 5. ผลการวิเคราะห์

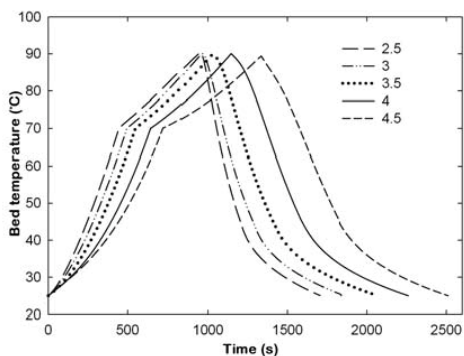
ในส่วนของการวิเคราะห์คำตอบที่ได้จากการจำลอง ได้มีขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้คำนวณ โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิภายในแท่นดูดซับ [9] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5



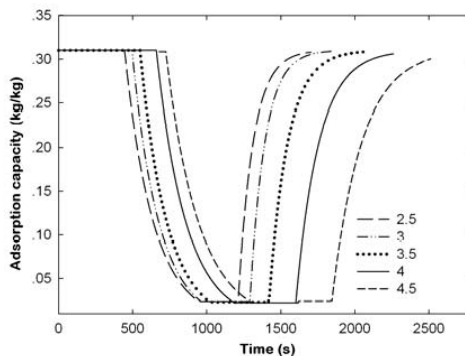
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างค่าจากการทดลองและค่าจากกระบวนการเชิงตัวเลข

พิจารณารูปที่ 5 พบว่าแนวโน้มของข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลจากการจำลองมีทิศทางไปในทางเดียวกัน เมื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของข้อมูลทั้งชุด (RMSE) มีค่าเท่ากับ 3.35 และเมื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของโปรแกรมโดยใช้ t-Test [10] พบว่าข้อมูลทั้งสองชุดมีความเชื่อมั่นในระดับเดียวกันที่ 95% ดังนั้นสามารถนำโปรแกรมนี้ไปใช้ในการประยุกต์เพื่อแก้ปัญหาหลักขณะนี้ได้

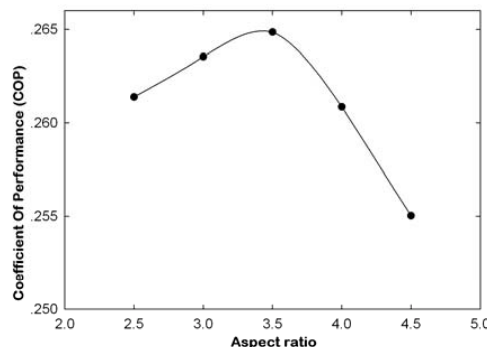
ผลจากการจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแสดงดังรูปที่ 6 7 และ 8



รูปที่ 6 เปรียบเทียบการเปลี่ยนอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นดูดซับแต่ละแบบในเวลาต่างๆ ของระบบ



รูปที่ 7 เปรียบเทียบความสามารถการดูดซับแต่ละแบบในเวลาต่างๆ ของระบบ



รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนที่มีภายนอกต่ออัตราที่มีภายในของแท่นดูดซับที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ

พิจารณารูปที่ 6 และ 7 พบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนที่มีภายนอกต่ออัตราที่มีภายในของแท่นดูดซับมีค่าลดลง ส่งผลให้ระยะเวลาต่อรอบวัฏจักรมีค่าน้อยลง การกระจายตัวของอุณหภูมิแท่นดูดซับและอัตราการดูดซับเร็วขึ้น แสดงว่าลักษณะแท่นดูดซับที่มีขนาดเล็กเป็นแบบที่น่าจะเหมาะกับการใช้งาน

เมื่อพิจารณารูปที่ 8 พบว่าผลของความหนาชั้นสารดูดซับที่เพิ่มขึ้น (ค่าอัตราส่วนเพิ่มขึ้น) ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงค่าอัตราส่วนเป็น 3.5 หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง เนื่องจากความหนาของชั้นสารดูดซับที่เกิน 3.5 ขึ้นไปนั้น ลักษณะของแท่นดูดซับจะเป็นทรงกระบอกที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนและหล่อเย็นแท่นดูดซับนานขึ้นและอัตราการดูดซับช้าลงเช่นกัน ดังนั้นในค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับออกแบบแท่นดูดซับทรงกระบอกสำหรับบรรจุซิลิกา

เจล 1 kg คือ 3.5 ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงสุดที่ 0.265

### 6. สรุปผล

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลกรณีใช้ซิลิกาเจลและน้ำเป็นคู่สารทำงาน โดยสร้างแบบจำลองให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต (Algebraic equation) พบว่าสามารถใช้คำนวณหาค่าตัวแปรที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆ และใช้ศึกษาอิทธิพลของชั้นความหนาสารดูดซับที่มีต่อพฤติกรรมของการดูดซับและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบเพื่อการออกแบบขนาดของแท่นดูดซับให้เหมาะสมกับการใช้งานระบบทำความเย็นแบบดูดซับชนิดนี้

### 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

### 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang, L.W., Wang, R.Z., Oliveira, R.G. (2009). A review on adsorption working pair for refrigeration, *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2009, Vol. 13, pp. 518-534.
- [2] Zhang, L.Z. and Wang, L. (1999). Momentum and heat transfer in the adsorbent of a waste heat adsorption cooling system, *Energy*, 1999, Vol. 24, No. 7, pp. 605-624.
- [3] สมบูรณ์ เวชกามา, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และ วิภาวี วงษ์สุวรรณ (2549). การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของระบบดูดซับแบบไม่ต่อเนื่อง , *การประชุมวิชาการการถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ความร้อนครั้งที่ 5*, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่
- [4] Khan, M.Z.I., Sultana, S., Akisawa, A., Kashiwagi, T. (2006). Numerical simulation of advanced adsorption refrigeration chiller with mass recovery, *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*, 2006, Vol. 3, pp. 59-67.
- [5] Hasan, D., Moghtada, M., Semra, U. (2008). A review on adsorption heat pump: problems and solutions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, Vol. 12, pp. 2381-2403.
- [6] Boubakri, A. (2002). Adsorption solar powered ice maker experiment and model, *Solar Energy*, 2002, Vol. 69, pp. 249-263.
- [7] Mhimid, A. (1998). Theoretical study of heat and mass transfer in a zeolite bed during water desorption : validity of local thermal equilibrium assumption, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, Vol. 41, pp. 2967 – 2977.
- [8] Di, J., Wu, J.Y., Xia, Z.Z., Wang, R.Z. (2007). Theoretical and experimental study on characteristics of a novel silica gel-water chiller under the conditions of variable heat source temperature, *International Journal of Refrigeration*, 2007, Vol. 30, pp. 515-526.
- [9] Restuccia, G., Freni, A., Russo, F and Vasta, S., (2005). Experimental investigation of a solid adsorption chiller based on a heat exchanger coated with hydrophobic zeolite, *Applied Thermal Engineering*, 2005, Vol. 25, pp. 1419-1428.
- [10] Holman, J.P., (2000), *Experimental Methods for Engineers*, McGraw Hill Higher Education, New York, 2000, pp. 97-98.

## ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ : พิสูจน์การใช้สมมติฐานการสมดุลทางความร้อนในคู่สารทำงานซิลิกาเจลและน้ำ

### A Mathematic Model of Adsorption Refrigeration: Validity of Local Thermal Equilibrium Assumption of Silica gel-Water Working Pairs

ฐานวิทย์ แนมใส\* สมชาย แซ่จิ่ง จีระภา สุขแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

E-mail: thanwit\_n@hotmail.com\*

Thanwit Naemsai\* Somchai Sae-ung Jeerapa Sookgaew

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

E-mail: thanwit\_n@hotmail.com\*

#### บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวลของระบบทำความเย็นแบบดูดซับชนิดไม่ต่อเนื่องที่ใช้ซิลิกาเจลและน้ำเป็นคู่สารทำงาน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพิสูจน์การใช้สมมติฐานการสมดุลทางความร้อน (Local Thermal Equilibrium, LTE) ในคู่สารทำงาน โดยการศึกษาจะทำนายการกระจายตัวอุณหภูมิของแท่งดูดซับโดยใช้เทคนิคระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method) ผลการคำนวณพบว่าสมมติฐานการสมดุลทางความร้อนสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนและมวลของระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้ซิลิกาเจลและน้ำเป็นคู่สารทำงานได้

**คำหลัก** ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ การสมดุลทางความร้อน

#### Abstract

This research is to study a mathematical model of an adsorption refrigeration system using silica gel-water as working pairs in order to validating local thermal equilibrium assumption (LTE). The bed temperature profile of model was solved using the Finite Volume Method (FVM). The results show that Local Thermal Equilibrium assumption is validated.

**Keywords:** Adsorption Refrigeration, local thermal equilibrium

#### 1. บทนำ

ปัจจุบันนี้ระบบทำความเย็นได้เข้ามาเป็นสิ่งจำเป็นในชีวิตประจำวันของคนส่วนใหญ่โดยเฉพาะงานด้านปรับอากาศ แต่ระบบทำความเย็นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายนั้นนิยมใช้สารทำงานจำพวก CFC ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดปรากฏการณ์เรือน

กระจก และนำไปสู่วิกฤตการณ์สภาวะโลกร้อน ดังนั้นจึงมีการนำเทคโนโลยีทำความเย็นแบบดูดซับเข้ามาใช้แทนระบบทำความเย็นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งระบบทำความเย็นแบบดูดซับมีข้อดีหลายด้าน [1] ได้แก่ ระบบทำงานได้ช่วยแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ระบบใช้สารทำงานที่ไม่ทำลายชั้นบรรยากาศ และส่วนประกอบหลักในระบบจะยึดตรึงกับที่ไม่มีการเคลื่อนไหว (non-moving parts) จึงทำให้ง่ายต่อการบำรุงรักษา

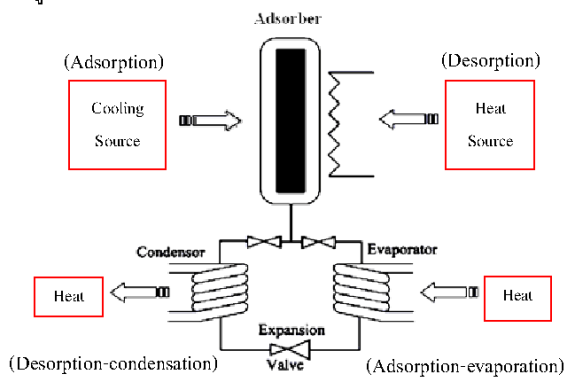
ระบบทำความเย็นแบบดูดซับได้มีการวิจัยและพัฒนาในส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในแท่งดูดซับ แต่ส่วนใหญ่นิยมทำการวิเคราะห์การกระจายตัวอุณหภูมิของแท่งดูดซับแบบใช้การแยกสถานะของสารดูดซับกับสถานะของสารทำงานหรือสารทำความเย็น [2-4] ซึ่งกรณีดังกล่าวนี้เรียกว่า การวิเคราะห์ปัญหาแบบใช้สมมติฐาน Local Thermal Non-Equilibrium (LTNE) หรือไม่คิดการสมดุลทางความร้อนของคู่สารทำงาน วิธีนี้ค่อนข้างจะมียุ่งยากในการแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนภายในแท่งดูดซับ ดังนั้นจึงมีการนำสมมติฐานการสมดุลทางความร้อน (Local Thermal Equilibrium, LTE) หรือคิดการสมดุลทางความร้อนของคู่สารทำงานเข้ามาช่วย ซึ่งเคยมีการนำมาใช้ในคู่สารทำงาน ซีโอไลต์กับเอทานอล [5] มาก่อนแล้ว แต่ในส่วนของคู่สารทำงานซิลิกาเจลและน้ำยังไม่มีการพิสูจน์ถึงการนำสมมติฐาน LTE ไปใช้งาน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำสมมติฐานนี้มาใช้ประยุกต์ในการแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในแท่งดูดซับกรณีที่ใช้ซิลิกาเจลและน้ำเป็นคู่สารทำงาน โดยเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้การวิเคราะห์ปัญหาแบบใช้สมมติฐาน Local Thermal Non-Equilibrium ซึ่งใช้กันในงานวิจัยที่ผ่านมา



## 2. ระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

ระบบทำความเย็นประกอบด้วยอุปกรณ์หลักได้แก่ แท่นดูดซับ (Adsorber) เครื่องควบแน่น (Condenser) เครื่องทำระเหย (Evaporator) และแหล่งให้ความร้อน (Heat source) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบระบบทำความเย็นแบบดูดซับ

จากรูปที่ 1 กระบวนการทำงานของระบบเริ่มจากสารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องทำระเหยโดยจะดึงเอาความร้อนจากสิ่งแวดล้อม (Heat) เข้ามาใช้ในการทำระเหยและให้ความเย็น (Coolness) ออกมา หลังจากนั้นไอของสารทำความเย็นจะถูกดูดซับไปยังแท่นดูดซับ (Adsorber) ในช่วงนี้ระบบใช้ความเย็นจากสิ่งแวดล้อม (Cooling Source) ทำการหล่อเย็นแท่นดูดซับจนเกิดกระบวนการดูดซับ (Adsorption) ขึ้น เมื่อแท่นดูดซับเกิดการดูดซับที่อิ่มตัวแล้ว ระบบจะให้ความร้อนแก่แท่นดูดซับส่งผลให้สารทำความเย็นที่เกาะอยู่กับผิวของสารดูดซับนั้นแยกตัว เรียกว่ากระบวนการนี้ว่ากระบวนการคายสารถูกดูดซับ (Desorption) ช่วงกระบวนการนี้ความดันภายในแท่นดูดซับจะสูงขึ้นจนเกินค่าความดันของเครื่องควบแน่น ทำให้ไอของสารทำความเย็นนั้นไหลผ่านเข้าเครื่องควบแน่น โดยไอของสารทำความเย็นจะถูกควบแน่นและปล่อยค่าความร้อนออกมา (Heat) จากนั้นก็จะไหลผ่านวาล์วขยายตัว (expansion valve) เพื่อลดความดัน และไหลไปยังเครื่องระเหย (evaporator) ต่อไป

กระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการด้วยกันดังนี้

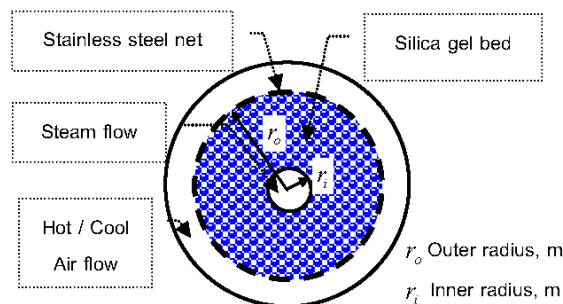
1. กระบวนการรับความร้อนแบบอัตรากการดูดซับคงที่ (isosteric heating) เป็นกระบวนการที่เริ่มจากการให้ความร้อนชั้นสารดูดซับทำให้ความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จนค่าความดันมีค่ามากกว่าความดันของเครื่องควบแน่นโดยเกิดขึ้นขณะที่ปริมาณสารทำความเย็นในชั้นสารดูดซับยังมีค่าคงที่
2. กระบวนการคายสารทำความเย็นขณะที่ความดันคงที่ (isobaric desorption) เป็นกระบวนการที่แท่นดูดซับรับความร้อนจากภายนอกต่อจากกระบวนการ isosteric heating ทำให้สารทำความเย็นระเหยออกจากชั้นสารดูดซับและมีปริมาณลดลงจนมีค่าน้อยมาก

3. กระบวนการคายความร้อนแบบอัตรากการดูดซับคงที่ (isosteric cooling) เป็นกระบวนการลดอุณหภูมิและความดันในแท่นดูดซับโดยใช้ของไหลเย็น ซึ่งความดันและอุณหภูมิลดลงขณะที่สารทำความเย็นมีปริมาณคงที่

4. กระบวนการดูดซับสารทำความเย็นขณะที่ความดันคงที่ (isobaric adsorption) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อความดันแท่นดูดซับลดลงจนมีค่าต่ำกว่าความดันเครื่องทำระเหย ส่งผลให้สารทำความเย็นไหลเข้ามาดูดซับภายในแท่นดูดซับจนกระทั่งถึงสภาวะอิ่มตัว

## 3. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการพัฒนาแบบจำลองจะมุ่งเน้นไปในส่วนการถ่ายเทความร้อนและมวลผ่านชั้นสารดูดซับภายในแท่นดูดซับซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ แท่นดูดซับที่ใช้เป็นท่อทองแดงทรงกระบอกวางซ้อนกัน 2 ท่อ ท่อนอกและท่อในมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 cm และ 2 cm ตามลำดับ ความยาวของแท่นดูดซับ 26 cm ซึ่งเป็นขนาดที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ [6] ภายในแท่นดูดซับแต่ละแท่นสามารถแบ่งสถานะของสารออก เป็น 2 สถานะ ส่วนแรกคือส่วนที่เป็นของแข็ง (Silica gel bed) ซึ่งบรรจุอยู่บริเวณผิวด้านนอกของท่อชั้นในจนถึงบริเวณตาข่ายเหล็กสแตนเลส (stainless steel net) และส่วนที่เป็นก๊าซ (Steam flow) ซึ่งไหลอยู่รอบชั้นสารซิลิกาเจล ระบบนี้จะใช้ลมร้อน/เย็น (Hot/Cool Air flow) เป็นของไหลในการถ่ายเทความร้อนให้แท่นดูดซับลักษณะทางกายภาพของแท่นดูดซับแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพหน้าตัดส่วนประกอบของแท่นดูดซับ

ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับโดยทั่วไปจะใช้สมมติฐานทั้งหมด 4 ข้อ ซึ่งแสดงได้ดังนี้ [5]

1. ลักษณะแท่นดูดซับเป็นทรงกระบอก ชั้นสารดูดซับมีสมบัติแบบไอโซโทรปิก (Isotropic-properties)
2. คุณสมบัติทางกายภาพของคู่สารทำงานมีค่าคงที่ ยกเว้นความหนาแน่นของก๊าซที่เกิดขึ้นจะไม่คงที่โดยพิจารณาเป็นก๊าซอุดมคติ (Ideal gas)
3. ไม่มีการถ่ายเทความร้อนบริเวณตาข่ายสแตนเลส (Stainless steel net)
4. ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในชั้นสารดูดซับเป็นแบบ 2 มิติ

แปรผันตามแนวรัศมี (r) และความยาวของแท่นดูดซับ (z) เท่านั้น

ในงานวิจัยนี้จะเพิ่มสมมุติฐานอีกหนึ่งข้อเพื่อช่วยในการแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนของระบบ คือ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแท่นดูดซับใช้การสมดุลทางความร้อน (Local Thermal Equilibrium) สมมุติฐานดังกล่าวนี้จะวิเคราะห์ให้ค่าอุณหภูมิของก๊าซ ( $T_g$ ) เท่ากับอุณหภูมิของแข็ง ( $T_s$ ) หรือ  $T_g = T_s = T$  สามารถนำไปใช้ได้กรณีที่สมบัติของสารเป็น isotropic และลักษณะการนำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในปริมาตรควบคุมเป็นแบบขนานกันเพื่อจะได้ไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนจากสถานะหนึ่งไปสถานะอื่น ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของสมมุติฐานนี้ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ไม่วิเคราะห์การสมดุลทางความร้อน (Local Thermal Non-equilibrium) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงดังสมการที่ (1)-(7)

**3.1 สมการอัตราการดูดซับ**

อัตราการดูดหรือคายปริมาณสารทำความเย็นภายในแท่นดูดซับ พิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของสมการ Linear Driving Force [4] เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial W}{\partial t} = G(W_{eq} - W) \tag{1}$$

เมื่อ  $G$  สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล  $s^{-1}$   
และค่า  $W_{eq}$  หาได้จากสมการ Dubinin-Astakhov [4]

$$W_{eq} = W_0 \exp \left[ -k \left( \frac{T_b}{T_{sat}} - 1 \right)^n \right] \tag{2}$$

เมื่อ  $W_{eq}$  อัตราส่วนของปริมาณน้ำต่อปริมาณซิลิกาเจล  $kg \ kg^{-1}$   
 $W_0$  อัตราส่วนสูงสุดของปริมาณน้ำต่อปริมาณซิลิกาเจล  $kg \ kg^{-1}$   
 $k, n$  ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับคู่สารทำงาน  
 $T_b$  อุณหภูมิภายในแท่นดูดซับ  $K$   
 $T_{sat}$  อุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำ  $K$

**3.2 สมการสมดุลมวลและพลังงาน**

สมการสมดุลมวลในชั้นสารดูดซับเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon_g \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \vec{V}_g) + (1 - \varepsilon_g) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t} = 0 \tag{3}$$

เมื่อ  $\varepsilon_g$  ค่าสัดส่วนช่องว่างทั้งหมดเชิงปริมาตร  
 $\vec{V}_g$  ความเร็วของก๊าซในแนวแกน  $m \ s^{-1}$

ความเร็วของก๊าซในแนวแกนที่ไหลผ่านวัสดุที่มีรูพรุนสามารถแสดงได้ด้วย Darcy's law

$$\vec{V}_g = -\frac{K}{\mu} \nabla P_g \tag{4}$$

เมื่อ  $\mu$  ค่าความหนืดพลศาสตร์  $kg \ m^{-1} \ s^{-1}$   
 $K$  ค่าความการซึมผ่านวัสดุรูพรุน  $m^2$

สมการสมดุลพลังงานภายในแท่นดูดซับสามารถเขียนแบ่งสถานะการวิเคราะห์ออกเป็น 2 สถานะ ซึ่งได้แสดงดังนี้

สมการการสมดุลของก๊าซ

$$\varepsilon_g C_{pg} \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \varepsilon_g \nabla \cdot (k_g \nabla T_g) - C_{pg} (1 - \varepsilon_g) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t} (T_g - T_s) + h_g S (T_s - T_g) \tag{5}$$

สมการการสมดุลของชั้นสารดูดซับ

$$\rho_s (1 - \varepsilon_g) [C_{ps} + W C_{pi}] \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \varepsilon_g) \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + (1 - \varepsilon_g) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t} \Delta H + h_g S (T_g - T_s) \tag{6}$$

เมื่อ  $h_g$  ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างชั้นซิลิกาเจลกับก๊าซ  $W \ m^2 \ K^{-1}$

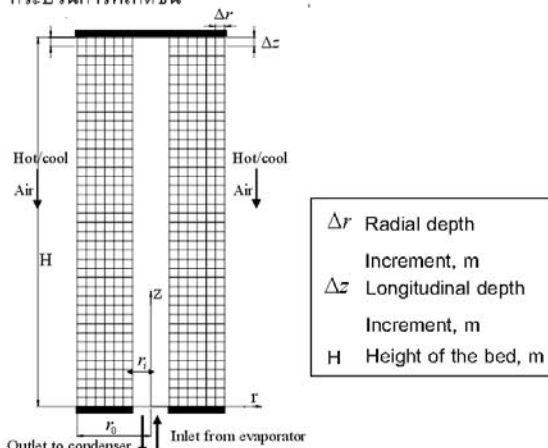
สมการสมดุลพลังงานในชั้นสารดูดซับเมื่อประยุกต์ใช้ LTEM สามารถเขียนได้ดังนี้

$$[(1 - \varepsilon_g) \rho_s (C_{ps} + W C_{pi}) + \varepsilon_g \rho_g C_{pg}] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}) + (1 - \varepsilon_g) \rho_s \frac{\partial W}{\partial t} \Delta H \tag{7}$$

เมื่อ  $k_{eff} = (1 - \varepsilon_g) k_s + \varepsilon_g k_g$   
 $k_s$  ค่าการนำความร้อนของแข็ง  $W \ m^2 \ K^{-1}$   
 $k_g$  ค่าการนำความร้อนของไหล  $W \ m^2 \ K^{-1}$

**3.3 เงื่อนไขค่าเริ่มต้นและค่าขอบเขต**

งานวิจัยนี้ได้กำหนดเงื่อนไขทั้งสองให้สอดคล้องตามสภาวะและขั้นตอนการทำงานของระบบ (รูปที่ 1 และ 3) ในแต่ละกระบวนการที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3 หน่วยย่อยและขอบเขตของแท่นดูดซับ

3.3.1. เงื่อนไขค่าเริ่มต้น เงื่อนไขค่าเริ่มต้นประกอบด้วยค่าอุณหภูมิความดันและความสามารถในการดูดซับ ซึ่งจะเป็นค่าคงที่ที่มาจากช่วงปลายการกระบวนการตามรอบวัฏจักรแสดงได้ดังนี้

$$T_g(z, r, 0) = T_s(z, r, 0) = T_i, P(z, r, 0) = P_i, W(z, r, 0) = W_i$$

3.3.2. เงื่อนไขค่าขอบเขต เงื่อนไขค่าขอบเขตประกอบด้วยเงื่อนไขที่ใช้ทุกกระบวนการได้แก่

$$\frac{\partial T_{z,\varepsilon}}{\partial z}(t, r, H) = 0, \frac{\partial T_{z,\varepsilon}}{\partial z}(t, r, 0) = 0$$

$$\frac{\partial P_\varepsilon}{\partial z}(t, r, H) = 0, \frac{\partial P_\varepsilon}{\partial z}(t, r, 0) = 0, \frac{\partial P_\varepsilon}{\partial z}(t, r_0, z) = 0$$

และเงื่อนไขที่ใช้ตามกระบวนการแบ่งได้ดังตารางที่ 1 ตารางที่ 1 เงื่อนไขค่าขอบเขตในแต่ละสมมุติฐาน

สภาวะสมดุลทางความร้อน	สภาวะไม่สมดุลทางความร้อน
Isostatic heating $-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_o, z)$ $= h_{air}(T - T_h)$ $\frac{\partial T}{\partial z}(t, r_i, z) = 0$	Isostatic heating $-k_{eff} \frac{\partial T_{s,g}}{\partial r}(t, r_o, z)$ $= h_{air}(T_{s,g} - T_h)$ $\frac{\partial T_{s,g}}{\partial z}(t, r_i, z) = 0$
Desorption $-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_o, z)$ $= h_{air}(T - T_h)$ $-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_i, z)$ $= h_{air}(T - T_{cd})$	Desorption $-k_{eff} \frac{\partial T_{s,g}}{\partial r}(t, r_o, z)$ $= h_{air}(T_{s,g} - T_h)$ $-k_{eff} \frac{\partial T_{s,g}}{\partial r}(t, r_i, z)$ $= h_{air}(T_{s,g} - T_{cd})$
Isostatic cooling $-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_o, z)$ $= h_{air}(T - T_h)$ $\frac{\partial T}{\partial z}(t, r_i, z) = 0$	Isostatic cooling $-k_{eff} \frac{\partial T_{s,g}}{\partial r}(t, r_o, z)$ $= h_{air}(T_{s,g} - T_h)$ $\frac{\partial T_{s,g}}{\partial z}(t, r_i, z) = 0$
Adsorption $-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_o, z)$ $= h_{air}(T - T_h)$ $-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}(t, r_i, z)$ $= h_{air}(T - T_{cd})$	Adsorption $-k_{eff} \frac{\partial T_{s,g}}{\partial r}(t, r_o, z)$ $= h_{air}(T_{s,g} - T_h)$ $-k_{eff} \frac{\partial T_{s,g}}{\partial r}(t, r_i, z)$ $= h_{air}(T_{s,g} - T_{cd})$

4. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับใช้คำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (FVM) โดยมีการใช้ Central difference scheme ในการ Discretized เทอมของ diffusive และใช้ Explicit scheme ในการ Discretized เทอมของ transient ลักษณะของกริดที่ใช้คำนวณเป็นแบบสี่เหลี่ยม (Quadrilateral) ขนาด 5x5 mm ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 ในการคำนวณค่าตัวแปรที่ศึกษาผู้วิจัยจะใช้ Gauss-Jacobi iteration method ใช้ time step 0.1 วินาที และใช้ค่า Convergence criteria อยู่ที่ 0.001 สมการการไหลทั่วไปในรูปแบบ Explicit ของแต่ละปริมาตรควบคุมสามารถแสดงดังสมการที่ 8

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E^0 + a_W \phi_W^0 + a_N \phi_N^0 + a_S \phi_S^0 + [a_p^0 - (a_E + a_W + a_N + a_S - S_p)] \phi_p^0 + S_u \tag{8}$$

ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นดูดซับวิเคราะห์ได้จาก

$$T_{b,avg} = \frac{\sum_{j=1}^N V_j T_{bj}}{V_{tot}} \tag{9}$$

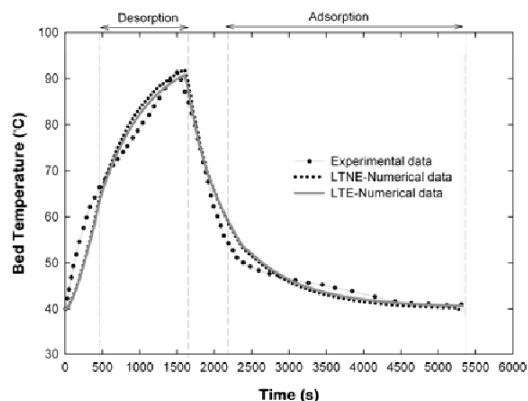
เมื่อ  $j$  คือดัชนีกริดในแนวนอนที่มี ปริมาตรรวมของแท่นดูดซับ  $m^3$

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขแสดงดังตารางที่ 2 ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลข [9]

พารามิเตอร์	ค่า
ขนาดซิลิกาเจล	2.5 mm
ความร้อนในการดูดซับ	2700 kJ/kg
ความหนาแน่นของซิลิกาเจล	2100 kg/m <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของน้ำ (ก๊าซ)	0.0512 kg/m <sup>3</sup>
ความจุความร้อนจำเพาะของซิลิกาเจล	924 J/kg.K
ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (ก๊าซ)	1840 J/kg.K
ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (ของเหลว)	4180 J/kg.K
ค่าการนำความร้อนของซิลิกาเจล	0.196 W/m.K
ค่าการนำความร้อนของน้ำ (ก๊าซ)	0.015 W/m.K
ความสามารถในการดูดซับสูงสุดซิลิกาเจล	0.35
ค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ	2800 kJ/kg
อุณหภูมิสมร้อน	363.15 K
อุณหภูมิสมเย็น	298.15 K

5. ผลการวิเคราะห์

ในส่วนของการวิเคราะห์คำตอบที่ได้จากการจำลอง ได้มีขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้คำนวณ โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองการกระจายอุณหภูมิภายในแท่นดูดซับ [7] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4

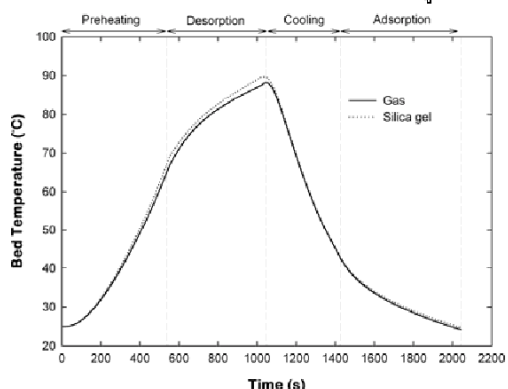


รูปที่ 4 การเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างค่าจากการทดลองและค่าจากกระบวนการเชิงตัวเลขในแต่ละสมมุติฐาน

พิจารณาจากรูปที่ 4 พบว่าแนวโน้มของข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลจากการจำลองทั้งสองกรณีนั้นมีลักษณะแนวโน้มที่ไปในทิศทางเดียวกัน ในส่วนของผลการจำลองกรณี LTNE มีลักษณะของกราฟที่คล้ายกับผลการจำลองกรณี LTE มาก และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของข้อมูล LTE เทียบกับผลการทดลองหรือ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) มีค่าเท่ากับ 3.35 ซึ่งน้อยกว่าค่า RMSE ของข้อมูล LTNE เทียบกับผลการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.76 เป็นการแสดงให้เห็นว่าการจำลองโดยใช้กรณีสมมุติฐาน LTE มีความแม่นยำกว่าการจำลองโดยทั่วไป (LTNE)

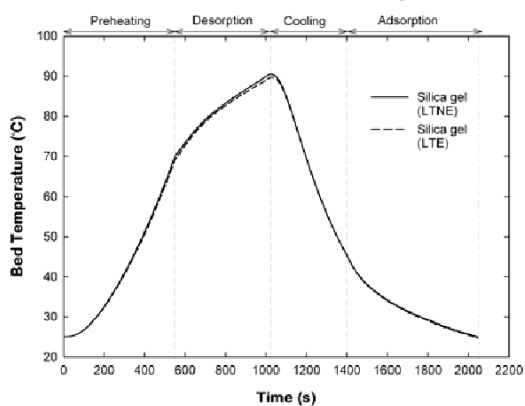
หลังจากนั้นทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของโปรแกรมทั้งสองกรณีศึกษาโดยใช้ T-test [8] เพื่อตรวจสอบว่ามีความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับความเชื่อมั่นเดียวกันที่ 95% พบว่าข้อมูลทั้งสองชุดมีความเชื่อมั่นในระดับเดียวกันที่ 95% ทั้งสองกรณีศึกษาดังนั้นจึงสามารถนำโปรแกรมทั้งสองกรณีศึกษาไปใช้ในการประยุกต์เพื่อแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนและมวลลักษณะนี้ได้

ผลจากการจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของระบบทำความเย็นแบบดูดซับกรณีทั่วไปก่อนที่ทำการใช้สมมุติฐาน local thermal equilibrium เข้ามาช่วยในการจำลองแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิเฉลี่ยของสารภายในแท่นดูดซับแต่ละสถานะในเวลาต่างๆ ของระบบ

พิจารณารูปที่ 5 พบว่าลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิของกราฟทั้งสองไปในทิศทางเดียวกันและมีความแตกต่างกันค่อนข้างน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างสถานะทั้งสองที่เกิดขึ้นได้ค่อนข้างดี ดังนั้นจึงนำเฉพาะค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิซิลิกาเจลมาใช้วิเคราะห์ขั้นตอนการทดสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของสมมุติฐานการสมดุลทางความร้อน (Local Thermal Equilibrium) โดยทำการเปรียบเทียบกับกรการกระจายตัวอุณหภูมิเฉลี่ยของซิลิกาเจลในกรณีที่ใช้สมมุติฐานการสมดุลทางความร้อนซึ่งแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่นดูดซับแต่ละสมมุติฐานในเวลาต่างๆ ของระบบ

พิจารณารูปที่ 6 พบว่าลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิของกราฟทั้งสองไปในทิศทางเดียวกันตลอดช่วงกระบวนการทั้งวัฏจักร แต่ในช่วงกระบวนการ desorption อุณหภูมิของชั้นซิลิกาเจล (LTNE) จะเริ่มแตกต่างจากอุณหภูมิของชั้นซิลิกาเจล (LTE) จนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ช่วงปลายกระบวนการ หลังจากนั้นระบบเริ่มหล่อเย็นแท่นดูดซับ ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งสองเริ่มมีค่าใกล้เคียงกันอีกครั้งจนสิ้นสุดกระบวนการ adsorption เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของกราฟทั้งสองอยู่ที่ประมาณ 2.1 %

ดังนั้นการใช้สมมุติฐาน Local Thermal Equilibrium นั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานที่วิเคราะห์อุณหภูมิเฉลี่ยของสาร 2 สถานะที่ใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดซับได้

## 6. สรุป

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลโดยใช้ซิลิกาเจลและน้ำเป็นคู่สารทำงาน เมื่อทดสอบสมมุติฐานการสมดุลทางความร้อน (Local Thermal Equilibrium) พบว่า สามารถนำสมมุติฐานนี้มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่นดูดซับแทนการคำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแท่นดูดซับที่วิเคราะห์โดยใช้สมมุติฐาน Local Thermal Non-Equilibrium และยังสามารถช่วยประหยัดเวลาในขั้นตอนการคำนวณ

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ และทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Fan, Y., Luo, L. and Souyri B. 2007. Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11: 1758-1775.
- [2] Liu, Y. and Leong, K.C. 2008. Numerical modeling of a zeolite/water adsorption cooling system with non-constant condensing pressure. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35: 618-622.
- [3] Zhang, L.Z. and Wang, L. 1999. Momentum and heat transfer in the adsorbent of a waste heat adsorption cooling system. *Energy*, 24: 605-624.
- [4] Wei-Dong, W., Hua, Z. and Da-Wen, S. 2008. Mathematical simulation and experimental study of a modified zeolite 13X-water adsorption refrigeration module. *Applied Thermal Engineering*, 29: 645-651.

- [5] Mhimid, A. 1998. Theoretical study of heat and mass transfer in a zeolite bed during water desorption : validity of local thermal equilibrium assumption. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41: 2967 – 2977.
- [6] ฐานวิทย์ แนมใส่, สมชาย แซ่อึ้ง และ จีระภา สุขแก้ว. 2552. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้ซิลิกาเจล-น้ำเป็นคู่สารทำงาน:หาขนาดของแท่นดูดซับที่เหมาะสม.การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, เชียงใหม่, ประเทศไทย, 4-7 พฤศจิกายน 2552: 213.
- [7] Restuccia, G., Freni, A., Russo, F. and Vasta, S. 2005. Experimental investigation of a solid adsorption chiller based on a heat exchanger coated with hydrophobic zeolite. *Applied Thermal Engineering*, 25: 1419–1428.
- [8] Holman, J.P. 2000. *Experimental Methods for Engineers*, McGraw Hill Higher Education, New York. 97-98.
- [9] Di, J., Wu, J.Y., Xia, Z.Z. and Wang, R.Z. 2007. Theoretical and experimental study on characteristics of a novel silica gel-water chiller under the conditions of variable heat source temperature. *International Journal of Refrigeration*, 30: 515-526.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายฐานวิทย์ แนมไส	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5110120012	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

1. ทุนผู้ช่วยวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ “การสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อปรับปรุงค่าการนำความร้อนในวัสดุพรุนของระบบปรับอากาศแบบดูดซับ โดยใช้ซิลิกาเจล-น้ำเป็นคู่สารทำงาน” สัญญาเลขที่ ENG-52-2-7-01-0062-S ระหว่างเดือน สิงหาคม 2552 – กรกฎาคม 2553
2. ทุนอุดหนุนการวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
3. ทุนศิษย์ก้นกุฏิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ฐานวิทย์ แนมไส, สมชาย แซ่อึ้งและ จิระภา สุขแก้ว. 2552. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับที่ใช้ซิลิกาเจล-น้ำเป็นคู่สารทำงาน: หาขนาดของแท่นดูดซับที่เหมาะสม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, 4 – 7 พฤศจิกายน 2552. เชียงใหม่ ETM-003035 หน้า 212.

ฐานวิทย์ แนมไส, สมชาย แซ่อึ้งและ จิระภา สุขแก้ว. 2553. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำความเย็นแบบดูดซับ: พิสูจน์การใช้สมมุติฐานการสมดุลทางความร้อนในคู่สารทำงานซิลิกาเจลและน้ำ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8, 22-23 เมษายน 2553. สงขลา หน้า 755-760.