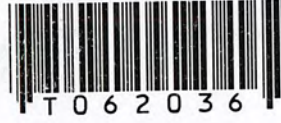


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการ



๒/๕๗  
๑ 1447  
2549  
เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 62036  
วัน,เดือน,ปี..... 27 ก.ค. 2549

b. 11๕๕๘๘๐๕  
i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF A SMALL COOLING TOWER FOR LABORATORY SCALE



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE  
DEGREE OF BACHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง

การพัฒนาหอทำน้ำเย็นระดับห้องปฏิบัติการ

โดย

นายคมกริบ ขจรโมทย์

นายสมยศ สาระภิรมย์

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์

ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



*(Signature)*

(ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์)

ประธานกรรมการ

*(Signature)*

(ดร.อภิเนษฐ์ นิ่มคณิตสรณ์)

กรรมการ

*(Signature)*

(อ.ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การพัฒนาหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการ
โดย	นายคมกริบ ขจรโมทย์ นายสมยศ สาระภิรมย์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. สุรัตน์ อารีย์รัตน์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือการสร้างชุดทดลองหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการขนาด 3 ตันความเย็น เพื่อใช้ป็นสื่ออุปกรณ์การเรียนในหลักสูตรวิศวกรรมเคมี ในรายวิชาปฏิบัติการทางวิศวกรรมเคมี โดยชุดทดลองหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้นจะง่ายต่อการเข้าใจถึงองค์ประกอบ หลักการทำงานและตัวแปรพื้นฐานต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็น ซึ่งชุดทดลองหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้นจะสามารถปรับเปลี่ยนชนิดของแผงกระจายฟิล์มน้ำและตัวแปรพื้นฐานต่าง ๆ เช่น อัตราการไหลของน้ำขาเข้า อุณหภูมิของน้ำขาเข้า เป็นต้น ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นได้ง่าย

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทดลองปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของน้ำและชนิดของแผงกระจายฟิล์มน้ำ เพื่อศึกษาผลของตัวแปรทั้งสองที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็น ซึ่งในการทดลองจะเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำ ตั้งแต่ 0.3 ถึง 0.5 ลิตร/วินาที ส่วนแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิดคือ ชนิดที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมและชนิดที่ทำจากท่อพีวีซี โดยแผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมจะกำหนดให้มีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำและอากาศคิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่สองทำมาจากท่อพีวีซี และถูกออกแบบให้มีค่าของพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยกว่าชนิดแรก โดยแผงกระจายน้ำชนิดที่ทำจากท่อพีวีซีมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสคิดเป็น 22 เปอร์เซ็นต์ของแผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม

เมื่อนำข้อมูลที่สภาวะออกแบบและข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปสร้างกราฟคุณลักษณะเฉพาะของชุดทดลองหอนำน้ำเย็นเพื่อวิเคราะห์หาค่าขีดความสามารถในการทำงานพบว่า ค่าขีดความสามารถในการทำงานที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 34 ถึง 96 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่สภาวะออกแบบ และเมื่อเปลี่ยนไปใช้แผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยกว่าพบว่าค่าขีดความสามารถที่ได้ลดลงเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่ออกแบบเท่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title                   Development of a small cooling tower for laboratory scale  
By                                   Mr. Komkrib    Khajohnmot  
  Mr. Somyot    Sarapirom  
Advisor                         Dr. Surat        Areerat  
Report for                     Bachelor's Degree of Chemical Engineering  
  Department of Chemical Engineering  
  Faculty of Engineering  
  King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

## Abstract

The main purpose of this project is to build a laboratory cooling tower which has capacity of heat transfer is 3000 BTU. This cooling tower designed to be used as a demonstrative operating unit for the unit operation laboratory in chemical engineering department. This easy to operate cooling tower allows user to understand its components and the working principles of cooling tower as well as the fundamental parameters which affect its performance. Parameters this tower includes volumetric flow rate of input, temperature of inlet water and water distribution screen inside the cooling tower.

In this experiments, the volumetric, type of distributor screen were evaluated on tower performance. Water volumetric flow rate ranging from 0.3 to 0.5 liter/second and two types of distribution screens were compared. A commercial distribution screen was used as received from the cooling tower manufacturer which is defined as 100% surfaces area for contacting of air to water film. A second type of distribution screen is made from PVC pipes of various diameters and it has only 22 % of the effective area as compared to the commercial one.

A characteristic curve of cooling tower was constructed to provide information regarding to the tower capability. It was found that tower capability of this cooling tower ranged from 34 to 96 % of manufacturing designed condition. By using the distribution screen with less effective surface area, tower capability was decreased to only 10%.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้โดยความกรุณาและความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่  
ปรึกษา ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ คำชี้แนะและแนวทางในการปรับปรุง  
ข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนให้ความรู้และสปรการณในการทำงานที่ดี

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาความรู้

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษา  
และความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้

ขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่าง ๆ พร้อมทั้งช่วยตรวจและ  
แก้ไขข้อผิดพลาด จนทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบให้แก่  
ผู้มีพระคุณทุกท่าน



นายคมกริบ  
นายสมยศ

ขจรโมทย์  
สภาวะภิรมย์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของหอทำน้ำเย็น.....	4
2.1 หลักการทำงานของหอทำน้ำเย็น.....	4
2.2 กลไกการถ่ายเทความร้อนในหอทำน้ำเย็น.....	6
2.3 แผงกระจายฟิล์มน้ำ.....	7
2.4 ปฏิกิริยาการที่เกิเกิดขึ้นภายในหอทำน้ำเย็น.....	8
2.5 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของหอทำน้ำเย็น.....	9
2.5.1 ทฤษฎีเมอร์เคล.....	10
2.5.2 การพิสูจน์สมการของเมอร์เคล.....	11
2.5.3 เอลทัลปีจำเพาะของอากาศชื้น.....	12
2.5.4 เส้นสมการคุณลักษณะเฉพาะของหอทำน้ำเย็น.....	16
2.5.5 วิธีการหาค่า $KaV/L$ ของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูด.....	16
2.5.6 คุณสมบัติของอากาศที่ไหลผ่านหอทำน้ำเย็น.....	17
2.5.7 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความชื้น.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การทดลอง.....	23
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.2 การออกแบบ สร้างและติดตั้งชุดทดลองหอน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการ.....	25
3.3 วิธีการทดลอง.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล .....	29
4.1 การสร้างชุดทดลองหอน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการ.....	29
4.2 การสร้างกราฟคุณลักษณะเฉพาะของหอน้ำเย็น.....	29
4.2.1 คำนวณค่า $KaV/L$ โดยใช้วิธี Tchebycheff.....	29
4.2.2 สร้างกราฟสมรรถนะของผู้ผลิต.....	29
4.2.3 สร้างกราฟแอปไพร์ทที่ 5 องศาเซลเซียส.....	30
4.2.4 สร้างกราฟคุณลักษณะของหอน้ำเย็น.....	31
4.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลต่ออัตราไหลของอากาศ ที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของหอน้ำเย็น.....	32
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	44
เอกสารอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก ก.....	50
ภาคผนวก ข.....	53
ภาคผนวก ค.....	56
ภาคผนวก ง.....	58
ภาคผนวก จ.....	59
ภาคผนวก ฉ.....	69
ภาคผนวก ช.....	70

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 การคำนวณหาค่า $KaVL$ โดยใช้วิธี Tchebycheff.....	34
ตารางที่ 4.2 ค่า $KaVL$ ที่คำนวณได้จากสมการที่ (51) ที่ค่าอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหล ของอากาศต่าง ๆ กัน.....	35
ตารางที่ 4.3 ค่า $KaVL$ ที่คำนวณได้จากวิธีการของ Tchebycheff ที่ค่าอัตราการไหลของน้ำต่อ อัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ กัน.....	36
ตารางที่ 4.4 ขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นของที่มีการทดลองต่าง ๆ .....	40



# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	หอน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทาง.....	6
รูปที่ 2.2	การถ่ายเทความร้อนของหยดน้ำ.....	7
รูปที่ 2.3	แผนกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม.....	8
รูปที่ 2.4	ภาวะตอบนบนของหอน้ำเย็นชนิดลมดูด.....	9
รูปที่ 2.5	ภาวะตอกลางของหอน้ำเย็นชนิดลมดูด.....	10
รูปที่ 2.6	แผนภาพแสดงการทำงานของหอน้ำเย็นชนิดลมดูด.....	10
รูปที่ 2.7	พารามิเตอร์ของหอน้ำเย็นซึ่งแสดงบนกราฟเอนทัลปี – อุณหภูมิ.....	11
รูปที่ 2.8	พื้นที่หน้าตัดขวางของแผนกระจายฟิล์มน้ำ.....	12
รูปที่ 2.9	พื้นที่แสดงค่าศักยภาพความร้อนเฉลี่ย.....	18
รูปที่ 2.10	เส้นสภาวะการทำงานของอากาศ.....	19
รูปที่ 2.11	การหาค่า $\Delta h_m$ โดยวิธีของเมอร์เคิล.....	20
รูปที่ 2.12	การหาค่า $\Delta h_m$ โดยวิธีของ Tchebycheff.....	20
รูปที่ 2.13	การหาค่า $\Delta h_m$ โดยใช้วิธีแรงขับเฉลี่ย.....	22
รูปที่ 2.14	แผนภาพในการหาตัวประกอบ (f).....	23
รูปที่ 3.1	หอน้ำเย็นชนิดพัดลมดูดขนาด 3 ตันความเย็น.....	24
รูปที่ 3.2	แผนกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม.....	25
รูปที่ 3.3	แผนกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซี.....	25
รูปที่ 3.4	ชุดทดลองหอน้ำเย็น.....	26
รูปที่ 4.1	โปรไฟล์อุณหภูมิของน้ำขาเข้าสู่ชุดทดลองหอน้ำเย็น.....	29
รูปที่ 4.2	แผนภาพการทำงานของหอน้ำเย็น.....	30
รูปที่ 4.3	กราฟสมรรถนะของผู้ผลิต.....	36
รูปที่ 4.4	กราฟแอปโพรชที่ 5 องศาเซียส.....	37
รูปที่ 4.5	ข้อมูลจากสภาวะออกแบบของหอน้ำเย็น.....	38
รูปที่ 4.6	กราฟคุณลักษณะของหอน้ำเย็น.....	38
รูปที่ 4.7	การหาขีดความสามารถของหอน้ำเย็นจากการทดลองที่ 1.....	39

## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 กราฟระหว่างค่าขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นกับอัตราการไหลของน้ำ.....	40
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบขีดความสามารถการทำงานของหอทำน้ำเย็นที่ค่าอัตราการไหลของน้ำต่อ อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.299, 1.225 และ 0.760.....	41
รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบขีดความสามารถการทำงานของหอทำน้ำเย็นระหว่างการเดินเครื่องตอน กลางวันกับตอนกลางคืน.....	42
รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบขีดความสามารถการทำงานของหอทำน้ำเย็นระหว่างแผงกระจายฟิล์มน้ำ ชนิดที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมกับชนิดที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง.....	44
รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบขีดความสามารถการทำงานของหอทำน้ำเย็นระหว่างแผงกระจาย ฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมกับชนิดที่ทำจากท่อพีวีซี.....	45
รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบขีดความสามารถการทำงานของหอทำน้ำเย็นระหว่างอุณหภูมิของน้ำขา เข้าที่ 30 °C กับ 34 °C.....	46

## สัญลักษณ์และคำย่อ

$a$	=	ค่าคงที่พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของแผงกระจายฟิล์มน้ำ	$[m^2/m^3]$
$A$	=	พื้นที่หน้าตัดของแผงกระจายฟิล์มน้ำ	$[m^2]$
$A_1$	=	พื้นที่หน้าตัดของท่อ	$[m^2]$
$A_2$	=	พื้นที่หน้าตัดของออริฟิซ	$[m^2]$
$C_{pf}$	=	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำที่ความดันคงที่	$[kJ/kg-K]$
$C_{pv}$	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำที่ความดันคงที่	$[kJ/kg-K]$
$C_{pa}$	=	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศแห้งที่ความดันคงที่	$[kJ/kg-K]$
$C_{pm}$	=	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น	$[kJ/kg-K]$
$c$	=	ค่าคงที่สัมพันธ์กับการออกแบบแผงกระจายฟิล์มน้ำ	
$C_d$	=	สัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลของน้ำที่ทางออกท่อ	
$dA$	=	พื้นที่สัมผัส	$[m^2]$
$dQ$	=	ค่าความร้อนรวมที่เกิดขึ้น ณ พื้นที่ที่พิจารณา	$[kJ/s]$
$dQ_w$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำไปที่อากาศรอบ ๆ ฝวน้ำ	$[kJ/s]$
$dQ_s$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนสัมผัสของอากาศรอบ ๆ ฝวน้ำสู่อากาศภายนอก	$[kJ/s]$
$dQ_L$	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนแฝงของอากาศรอบ ๆ ฝวน้ำสู่อากาศภายนอก	$[kJ/s]$
$dt$	=	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป	$[K]$
$dV$	=	ปริมาตรของแผงกระจายฟิล์มน้ำ	$[m^3]$
$dm$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของไอน้ำในอากาศ	$[kg/s]$
$f$	=	ค่าของแฟคเตอร์	
$G$	=	ความเร็วเชิงมวลต่อหน่วยพื้นที่	$[kg/s-m^2]$
$h_w$	=	เอนทัลปีจำเพาะของอากาศอิ่มตัว ณ อุณหภูมิของน้ำ	$[kJ/kg]$
$h$	=	เอนทัลปีจำเพาะของอากาศ	$[kJ/kg]$
$h_w$	=	ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ	$[kJ/kg]$
$H$	=	เอนทัลปีของอากาศชื้นที่ไหลผ่านหอทำน้ำเย็น	$[kJ]$
$H_a$	=	เอนทัลปีของอากาศแห้ง	$[kJ]$
$H_v$	=	เอนทัลปีของไอน้ำ	$[kJ]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

$K$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวล	[kg/s-m <sup>2</sup> ]
$K_g$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อน	[kg/s-m <sup>2</sup> ]
$K'$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลระหว่างไอน้ำกับอากาศเฉพาะที่บริเวณที่พิจารณา	[kg/s-m <sup>2</sup> ]
$L$	=	ความสูงของแผงกระจายละอองน้ำ	[m]
$m_w$	=	อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ	[kg/s]
$m_G$	=	อัตราการไหลโดยมวลของอากาศแห้ง	[kg/s]
$m_v$	=	อัตราการถ่ายเทมวลของน้ำ	[kg/s]
$m_s$	=	อัตราการถ่ายเทมวลของอากาศแห้ง	[kg/s]
$NTU$	=	จำนวนหน่วยของการถ่ายเทความร้อน	
$n$	=	ค่าคงที่สัมพันธ์กับการออกแบบแผงกระจายฟิล์มน้ำ	
$q_o$	=	ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมิอ้างอิง	[kJ/kg]
$T$	=	อุณหภูมิไอน้ำที่ต้องการทราบค่าเอนทัลปี	[°C]
$T'$	=	อุณหภูมิของอากาศรอบๆฝัสน้ำ	[°C]
$T_o$	=	อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ	[°C]
$T_a$	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของฟิล์มอากาศ	[°C]
$T_2$	=	อุณหภูมิน้ำเย็นของหอทำน้ำเย็น	[°C]
$T_1$	=	อุณหภูมิน้ำร้อนของหอทำน้ำเย็น	[°C]
$T_{wb}$	=	อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ	[°C]
$V_1$	=	ความเร็วของน้ำก่อนผ่านออริฟิซ	[m/s]
$V_2$	=	ความเร็วของน้ำที่ผ่านออริฟิซ	[m/s]
$V_G$	=	ปริมาตรจำเพาะของอากาศแห้ง	[m <sup>3</sup> /kg]
$\omega$	=	ค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศชื้น	[kg/kg-air]
$\Delta h_m$	=	ค่าศักยภาพความร้อนเฉลี่ยปี	[kJ/kg]
$\lambda_1$	=	ผลต่างเอนทัลปี ( $h_{w2}-h_2$ )	[kJ/kg]
$\lambda_2$	=	ผลต่างเอนทัลปี ( $h_{w1}-h_1$ )	[kJ/kg]
$\lambda_m$	=	ผลต่างเอนทัลปี ( $h_{wm}-h_m$ )	[kJ/kg]
$\rho_o$	=	ความหนาแน่นของอากาศแห้ง	[kg/m <sup>3</sup> ]

## สัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

$\rho_w$	=	ความหนาแน่นของน้ำ	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{hg}$	=	ความหนาแน่นของปรอท	[kg/m <sup>3</sup> ]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

หอทำน้ำเย็น (Cooling Tower) จัดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความสำคัญที่จะต้องมีอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมเกือบทุกแห่ง ซึ่งจุดประสงค์หลักของการติดตั้งหอทำน้ำเย็นคือต้องการนำเอาน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ใหม่และ (หรือ) ต้องการลดอุณหภูมิของน้ำให้มีอุณหภูมิต่ำลงก่อนที่จะปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติต่าง ๆ ซึ่งกล่าวโดยสรุปแล้วหอทำน้ำเย็นมีหน้าที่ในการลดอุณหภูมิของน้ำให้ต่ำลง โดยน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะถูกทำให้กระจายตัวออกเป็นหยดน้ำขนาดเล็กด้วยหัวฉีด หลังจากนั้นหยดน้ำก็จะตกลงสู่แผงกระจายฟิล์มน้ำ (Film type fill) ในขณะเดียวกันก็อากาศจากภายนอกจะผ่านเข้าสู่หยดน้ำโดยใช้พัดลมเป็นตัวดูดอากาศผ่านแผงกระจายฟิล์มน้ำ โดยทิศทางการไหลของอากาศจะสวนทางกับทิศทางการไหลของน้ำ ทำให้ความร้อนที่มีอยู่ในน้ำถ่ายเทสู่อากาศด้วยการระเหยและการถ่ายเทความร้อน เป็นผลทำให้อุณหภูมิจึงสามารถนำน้ำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตหรือปล่อยทิ้งได้ต่อไป

แต่เนื่องจากในปัจจุบันการนำหอทำน้ำเย็นมาใช้งานนั้นยังทำได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพเท่าที่ควร ซึ่งประสิทธิภาพในการทำงานของหอทำน้ำเย็นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น อัตราการไหลของน้ำ อัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิของน้ำขาเข้า อุณหภูมิของน้ำขาออก อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศและประเภทของแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ และจากการศึกษาพบว่าการเพิ่มประสิทธิภาพและการใช้งานของหอทำน้ำเย็น จะเกี่ยวข้องกับตัวแปรพื้นฐานหลายตัวแปร ดังนั้นจึงได้พัฒนาหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการขึ้น เพื่อเป็นสื่ออุปกรณ์ในการเรียนในหลักสูตรวิศวกรรมเคมี ซึ่งหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้นสามารถเปลี่ยนชนิดของแผงกระจายฟิล์มน้ำและตัวแปรพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการทำงานของหอทำน้ำเย็นได้ง่าย

ด้วยเหตุผลนี้ทางผู้วิจัยจึงทำการศึกษาถึงสมการคุณลักษณะเฉพาะและตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทางขนาด 3 ตันความเย็นเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาและพัฒนาหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการ ในรายวิชาปฏิบัติการทางวิศวกรรมเคมีต่อไป

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. สร้างชุดทดลองหอนำน้ำเย็นเพื่อช่วยในการศึกษาถึงองค์ประกอบ หลักการทำงานและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของหอนำน้ำเย็น
2. สร้างกราฟคุณลักษณะเฉพาะของหอนำน้ำเย็นโดยใช้วิธีมาตรฐานของสถาบันหอนำน้ำเย็น (CTI)
3. เพื่อศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของหอนำน้ำเย็น

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. จัดเตรียมชุดทดลองหอนำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการขนาด 3 ตันความเย็น
2. ทดลองปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศโดยอัตราการไหลของน้ำอยู่ในช่วง 10-33 ลิตรต่อนาที ส่วนอัตราการไหลของอากาศจะคงที่ที่ 25 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที และน้ำร้อนที่ใช้ในการทดลองจะมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส
3. ทดลองเปลี่ยนชนิดของแผงกระจายฟิล์มน้ำ ซึ่งแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิด คือ แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม และแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซี โดยแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซีมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์ของแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม

## 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้อง รวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา และหาข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับหอนำน้ำเย็น
2. หาสมการทางคณิตศาสตร์ของหอนำน้ำเย็นและสมการที่ใช้คำนวณค่าคุณลักษณะของหอนำน้ำเย็น ( $KaVL$ ) โดยวิธีของเมอร์เคิล
3. ออกแบบและสร้างชุดทดลองหอนำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการ
4. แก้ไข ปรับปรุงข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อปรับตั้งสภาวะการทำงานของระบบของหอนำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการให้เหมาะสมสำหรับการเก็บข้อมูล
5. ศึกษาถึงองค์ประกอบและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของหอนำน้ำเย็นโดยใช้ชุดทดลองในระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้นเป็นเครื่องทดสอบ
6. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์และสรุปผล พร้อมทั้งเสนอวิธีการเพิ่มสมรรถนะในการทำงานของหอนำน้ำเย็น

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบองค์ประกอบและหลักการทำงานของหอทำน้ำเย็น พร้อมทั้งสามารถหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่แสดงคุณลักษณะเฉพาะของหอทำน้ำเย็น โดยวิธีเมอร์เคิลได้
2. ได้ชุดทดลองหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้เป็นสื่ออุปกรณ์ในการศึกษาและพัฒนาหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการ ในรายวิชาปฏิบัติการทางวิศวกรรมเคมีต่อไป
3. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบหอทำน้ำเย็นที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้

## 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.6.1 งานวิจัยภายในประเทศ

วิภาค อรรถนากุล ได้ดำเนินการทดสอบหอทำน้ำเย็นชนิดดาดม เพื่อที่จะศึกษาสมรรถนะของหอทำน้ำเย็น โดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำร้อนที่ 80% 90% 110% และ 120% ของอัตราการไหลที่สภาวะออกแบบ และยังได้ทำการวัดระดับเสียงก่อนและหลังการทำงานของหอทำน้ำเย็นอีกด้วย โดยทำการทดสอบกับหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทางขนาด 80ตันความเย็น

ผลจากการทดสอบเมื่อนำมาคำนวณวิเคราะห์ค่า  $KaVL$  จะได้ค่าเท่ากับ 1.5 ซึ่งสูงกว่าที่คำนวณจากภาวะออกแบบซึ่งมีค่า  $KaVL$  เท่ากับ 0.921 ได้มีการทำกราฟสมรรถนะของหอทำน้ำเย็นโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำร้อน มีการควบคุมเสียงดังโดยใช้เส้นด้ายในลอนอัดตัวเป็นแผงวางบนอ่างพักน้ำ โดยสามารถลดระดับเสียงจาก 79 เดซิเบลเป็น 76 เดซิเบล [1]

วิศิษฐ์ ธีระเจตกุล ได้ดำเนินการศึกษาการทำงานของแผงกระจายละอองน้ำของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทางว่าจะส่งผลกระทบต่อหอทำน้ำเย็นอย่างไร เมื่อสภาวะการทำงานเปลี่ยนแปลงไป โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิของน้ำ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าหอทำน้ำเย็น และขนาดของแผงกระจายฟิล์มน้ำ สร้างสมการลักษณะเฉพาะของหอทำน้ำเย็นตลอดจนการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ

ผลจากการทดสอบพบว่า แผงกระจายฟิล์มน้ำจะทำงานได้ดี เมื่อสัดส่วนอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศและน้ำที่เข้าหอทำน้ำเย็นมีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะแสดงผลโดยค่า  $KaVL$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศต่ำ ๆ จะได้ค่าเรย์โนลด์สเพิ่มขึ้น แต่ค่า  $KaVL$  จะลดลง [2]

สุระเดช ฉั่วสุวรรณ ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของแผงกระจายฟิล์มน้ำในหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทางขนาด 3 ตันความเย็น โดยได้ศึกษาแผงกระจายฟิล์มน้ำในการทดลอง 2 แบบ โดยศึกษาประสิทธิภาพของแผงกระจายฟิล์มน้ำแต่ละแบบในเทอมของความสามารรถการทำน้ำเย็น โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ภาวะออกแบบ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเพื่อหากราฟสมรรถนะของหอทำน้ำเย็นของแผงกระจายละอองน้ำทั้งสองแบบ รวมถึงการหาค่าความดันตกของอากาศที่ผ่านแผงกระจายละอองน้ำทั้งสองแบบอีกด้วย

ผลจากการทดสอบพบว่า ประสิทธิภาพของแผงกระจายฟิล์มน้ำต่ำกว่าประสิทธิภาพที่ภาวะออกแบบคิดเป็น 81.6% ของภาวะออกแบบเท่านั้น [3]

นิรัตน์ เดชไพบูลย์ และ กัมปนาท ไชยฤกษ์ ได้ทำการทดสอบและปรับปรุงสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นแบบไหลสวนทาง โดยในการทดสอบได้ทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็น [4]

พันธุศักดิ์ อานาจตระกูล ได้ศึกษาสมรรถนะของหอทำน้ำเย็นซึ่งจะพิจารณาจากขีดความสามารถในการทำน้ำเย็น โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ภาวะออกแบบ และยังสามารถสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหอทำน้ำเย็น แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลจากทางทฤษฎี [5]

### 1.6.2 งานวิจัยต่างประเทศ

Milosavljevic and Heikkila (2001) ได้นำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาใช้ เพื่อทำนายประสิทธิภาพการทำงานของหอทำความเย็น และยังสามารถนำเอาผลที่ได้จากการทดลองที่ทำบนหอทำความเย็นนําร่อง มาใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ยังนำเอาผลการทดลองที่ได้จากหอทำความเย็นนําร่องมาใช้เพื่อหาประเภทของชั้นวัสดุที่เหมาะสมที่สุด [6]

## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐานของหอทำน้ำเย็น

### 2.1 หลักการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทาง [5]

หอทำน้ำเย็นจัดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่ง โดยน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะถูกฉีดให้กระจายตัวออกเป็นละอองเล็ก ๆ ตกผ่านแผงกระจายฟิล์มน้ำ ในขณะที่ผิวอากาศจากภายนอกก็จะถูกพัดลมดูดเข้ามาในหอ ทำให้น้ำกับอากาศสัมผัสกันในทิศทางสวนทางกัน (Counter flow) แล้วเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนสัมผัส (Latent heat) ระหว่างน้ำที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ขณะเดียวกันนั้นน้ำบางส่วนก็จะระเหยตัวกลายเป็นไอน้ำไปในอากาศ เพราะอากาศขณะนั้นยังมีสภาพไม่อิ่มตัวน้ำจึงสามารถระเหยกลายเป็นไอน้ำได้ ซึ่งการที่น้ำจะระเหยกลายเป็นไอน้ำนั้นจะต้องดึงความร้อนแฝง (Sensible heat) จากน้ำในส่วนอื่น ๆ ดังนั้นน้ำที่ออกจากหอทำน้ำเย็นจึงมีอุณหภูมิลดลง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ากระบวนการถ่ายเทความร้อนภายในหอทำน้ำเย็นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. การถ่ายเทความร้อนสัมผัส จากที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

2. การถ่ายเทความร้อนแฝง จากการระเหยตัวของน้ำไปสู่อากาศที่ยังไม่อิ่มตัว

ซึ่งในการทำงานของหอทำน้ำเย็นมีปัจจัยหลายอย่างที่จะช่วยเพิ่มอัตราการระบายความร้อนออกจากน้ำให้สูงขึ้น ดังนี้

1. เพิ่มการแตกตัวของหยดน้ำ ทำให้พื้นที่ผิวของหยดน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการระบายความร้อนออกจากหยดน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

2. เพิ่มพื้นที่ผิวของแผงกระจายฟิล์มน้ำ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศให้มากขึ้น

3. เพิ่มปริมาณอากาศ เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากน้ำ

ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของหอทำน้ำเย็น จะขึ้นอยู่กับค่าเรนจ์ (Range) และแอปโพรช (Approach) โดยที่

เรนจ์ คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิกระเปาะแห้งของน้ำเข้าและออกจากหอทำน้ำเย็น แสดงถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสัมผัส

แอปโพรช คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศขาเข้าและอุณหภูมิของน้ำเย็นที่หอทำน้ำเย็นทำได้ แสดงถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนแฝง

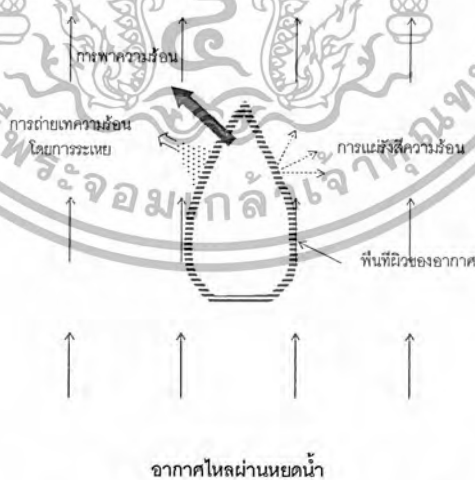


รูปที่ 2.1 หอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทาง

## 2.2 กลไกการถ่ายเทความร้อนในหอทำน้ำเย็น

การที่อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ออกจากหอทำน้ำเย็นลดลงได้ เนื่องมาจากการที่น้ำบางส่วนระเหยแล้วดูดความร้อนเพื่อใช้ในการระเหยจากน้ำในส่วนอื่น ๆ ทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลงและการลดลงของอุณหภูมิของน้ำอีกส่วนหนึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนสัมผัสระหว่างหยดน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่ากับอากาศซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการระเหยจะถูกอากาศที่ไหลผ่านหอทำน้ำเย็นพาออกไป ซึ่งการถ่ายเทความร้อนออกจากหยดน้ำจะเกิดขึ้นในลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

1. การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (Radiation heat transfer) จากผิวรอบ ๆ ของหยดน้ำ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เกิดขึ้นน้อยมาก โดยปกติการคำนวณจะไม่นำความร้อนส่วนนี้มาคิด
2. การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนของหยดน้ำ ซึ่งการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เกิดขึ้นน้อยมากเช่นเดียวกับข้อแรก และไม่นำมาคิดในการคำนวณ
3. การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศ ซึ่งค่าการถ่ายเทความร้อนจะมากหรือน้อยขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำกับอากาศ โดยปกติค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการพาจะมีค่าประมาณ 25 – 30 % ของความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมด
4. การถ่ายเทความร้อนจากการระเหย เป็นความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันไอ (หรือความชื้นสัมบูรณ์) ระหว่างฟิล์มอากาศรอบหยดน้ำกับอากาศที่ไหลผ่าน ซึ่งในหอทำน้ำเย็นจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนจากการระเหยประมาณ 70-75 % ของความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในหอทำน้ำเย็น

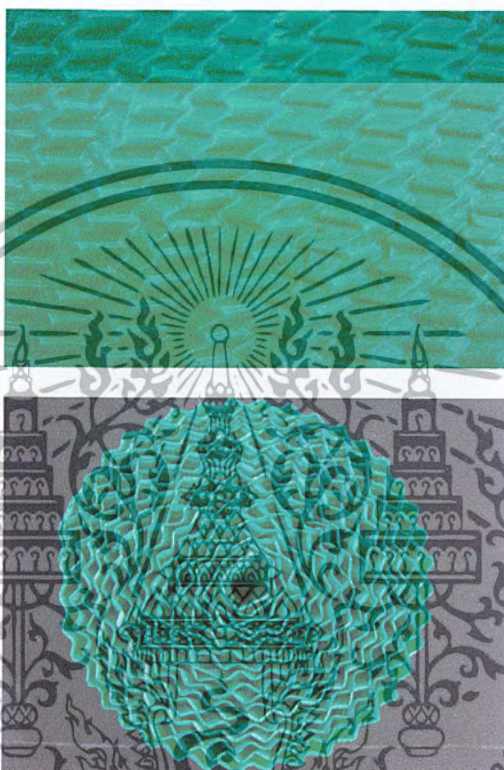


รูปที่ 2.2 การถ่ายเทความร้อนของหยดน้ำ

## 2.3 แผงกระจายฟิล์มน้ำ [7]

แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในหอทำน้ำเย็น มีหน้าที่ทำให้เกิดผิวฟิล์มบาง ๆ ของน้ำเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส และหน่วยเวลาให้น้ำกระจายอยู่ในหอทำน้ำเย็นได้นานขึ้น

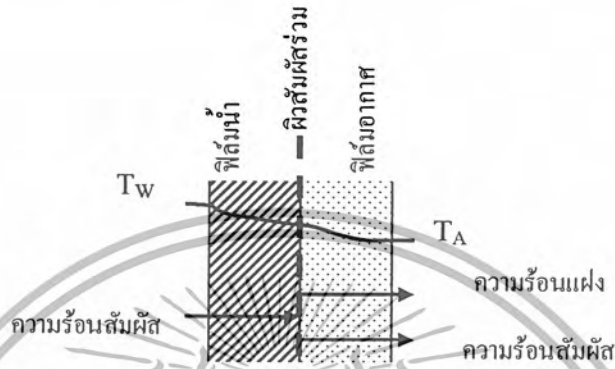
โดยแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในการวิจัยนี้จะทำจากวัสดุพีวีซี ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้หลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำในสภาพกรดหรือด่าง และไม่เกิดการเสียหายเมื่อมีตะกอนจับ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม

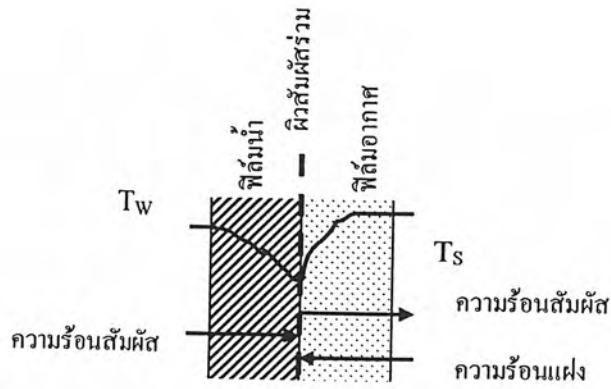
## 2.4 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในหอทำน้ำเย็น

กระบวนการถ่ายเทความร้อนและกระบวนการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในหอทำน้ำเย็น เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมกัน การถ่ายเทความร้อนเป็นกระบวนการพาความร้อนและการถ่ายเทมวลเป็นกระบวนการระเหย ซึ่งสามารถใช้ Whitman two-film theory มาอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ โดยในการพิจารณาจะแบ่งหอทำน้ำเย็นออกเป็นสองส่วน



รูปที่ 2.4 ภาวะตอนบนของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูด

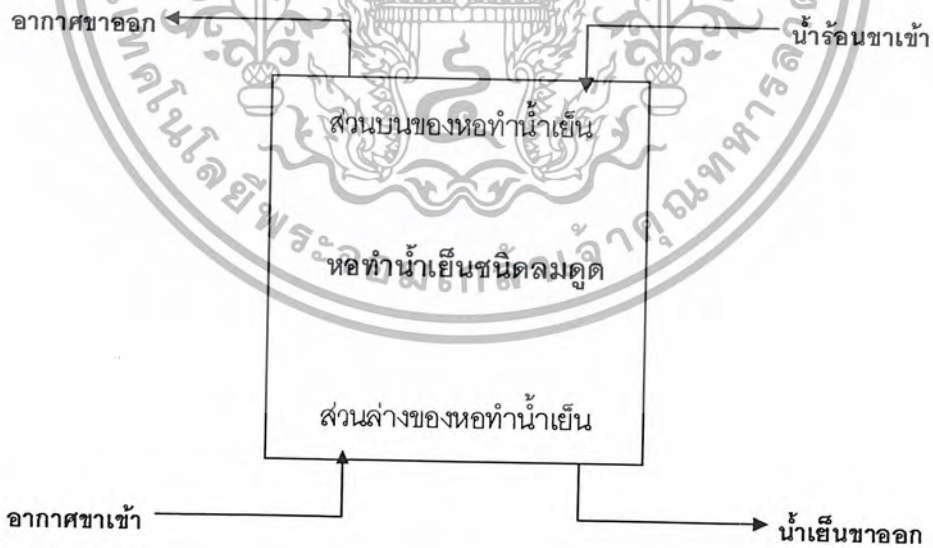
เมื่อพิจารณาที่ส่วนบนของหอทำน้ำเย็นดังรูปที่ 2.4 พบว่าผิวน้ำร้อนที่ถูกกระจายด้วยหัวฉีดจะสัมผัสโดยตรงกับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ขณะเดียวกันความดันไอของฟิล์มน้ำมีค่าสูงกว่าความดันไอด้านฟิล์มอากาศเช่นกัน จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัสจากน้ำไปสู่อากาศ อันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันไอน้ำ (แรงขับในทิศทางตามกัน) จึงทำให้น้ำร้อนที่ตกลงมามีอุณหภูมิลดลง



รูปที่ 2.5 ภาวะตอนล่างของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูด

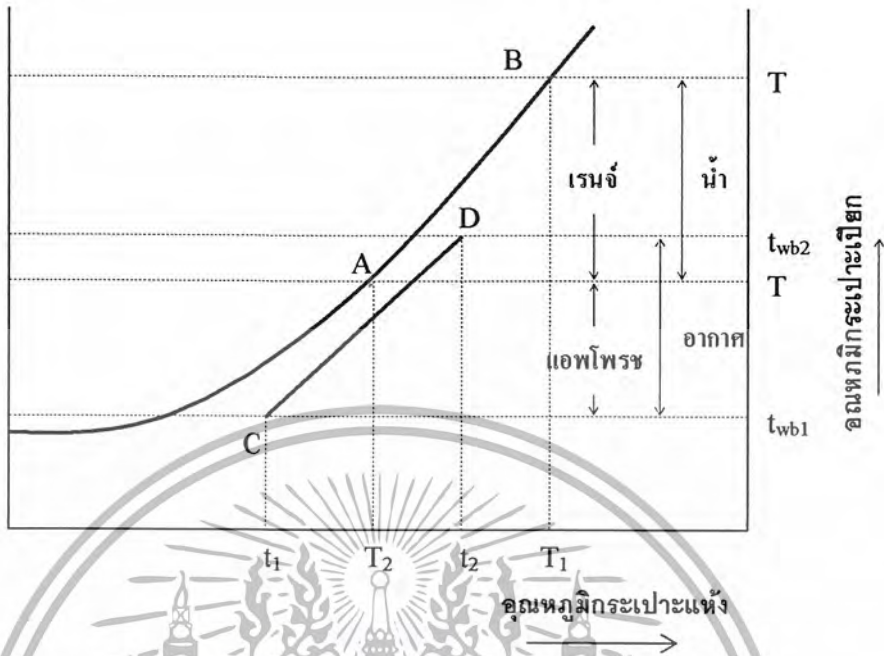
สำหรับส่วนล่างของหอทำน้ำเย็นดังรูปที่ 2.5 น้ำซึ่งมีอุณหภูมิลดลงแล้วอาจจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิกะเปาะแห้งของอากาศ ดังนั้น อากาศจึงถ่ายเทความร้อนสัมผัสไปยังน้ำและในขณะเดียวกันอากาศตอนล่างยังมีความชื้นต่ำอยู่ จึงเป็นสาเหตุให้มีการถ่ายเทมวล (ความร้อนแฝง) จากน้ำไปสู่อากาศ แรงขับทั้งสองจึงมีทิศทางตรงกันข้ามกัน จะเห็นว่าการปรากฏการณ์นี้เป็นลักษณะเดียวกับค่านิยมของอุณหภูมิกะเปาะเปียก หลักจากเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำและอากาศแล้ว อุณหภูมิของน้ำจะลดลง

2.5 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของหอทำน้ำเย็น [5]



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูด

เอนทัลปี



รูปที่ 2.7 พารามิเตอร์ของหอทำน้ำเย็นซึ่งแสดงบนกราฟเอนทัลปี - อุณหภูมิ

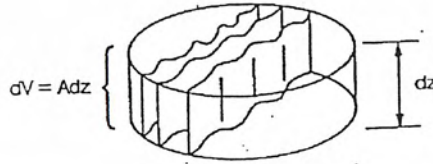
สำหรับในรูปที่ 2.6 แสดงแผนภูมิขณะทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ส่วนรูปที่ 2.7 เส้นตรง CD เป็นเส้นสภาวะการทำงานของอากาศ เส้นตรง AC และ BD เป็นเส้นแสดงแรงขับเอนทัลปีตอนล่างและตอนบนของหอทำน้ำเย็น

### 2.5.1 ทฤษฎีเมอร์เคิล (Merkel's theory)

เนื่องจากการทำงานของหอทำน้ำเย็น จะเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลขึ้นพร้อมกัน ซึ่งการหาค่าสมรรถนะของหอทำน้ำเย็นโดยการแยกคิดค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าการถ่ายเทมวลออกจากกันจะทำได้ยากมาก ดังนั้นเพื่อความง่ายในการคำนวณดอกเตอร์ Frederick Merkel จึงได้คิดคำนวณโดยพิจารณาใช้ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมแทน ซึ่งค่าการถ่ายเทความร้อนรวมเป็นการนำเอาค่าการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลมารวมกัน ซึ่งเรียกทฤษฎีนี้ว่าทฤษฎีความร้อนรวมของเมอร์เคิล (Merkel's total heat theory) ทฤษฎีนี้กล่าวไว้ว่า "อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม ( $dQ$ ) ที่จุดใด ๆ ในหอทำความเย็นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความแตกต่างระหว่างค่าเอนทัลปีของอากาศ ( $h$ ) กับค่าเอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว ( $h_w$ ) ที่อุณหภูมิของน้ำ ณ.จุดเดียวกัน" ดังสมการที่ 1

$$dQ = KdA(h_w - h) \quad (1)$$

### 2.5.2 การพิสูจน์สมการของเมอร์เคล [7]



รูปที่ 2.8 พื้นที่หน้าตัดขวางของแผงกระจายฟิล์มน้ำ

สมดุลความร้อนระหว่างไอน้ำเหนือผิวน้ำกับอากาศ

$$dQ_w = dQ_s + dQ_L \quad (2)$$

โดย

$$dQ_w = LC_{pr} dt \quad (3)$$

$$dQ_s = K_o adV(T' - T) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} dQ_L &= h_w dm \\ &= h_w K' adV(\omega' - \omega) \end{aligned} \quad (5)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} dm &= K' adV(\omega' - \omega) \\ &= Gd\omega \end{aligned} \quad (6)$$

แทนค่าสมการที่ (3), (4) และ (5) ลงในสมการที่ (2) จะได้

$$LC_{pr} dt = K_o adV(T' - T) + h_w K' adV(\omega' - \omega) \quad (7)$$

### 2.5.3 เอนทัลปีจำเพาะของอากาศชื้น

อากาศชื้นจะประกอบไปด้วยอากาศแห้งและไอน้ำความดันต่ำผสมกันอยู่ ดังนั้นเอนทัลปีของอากาศชื้นต้องประกอบด้วย เอนทัลปีของอากาศแห้งและเอนทัลปีของไอน้ำความดันต่ำ

$$H = H_o + H_v \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) หารถลอดสมการด้วยมวลของอากาศแห้ง ( $m_o$ ) จะได้

$$\frac{H}{m_o} = \frac{H_o}{m_o} + \frac{H_v}{m_o} \times \frac{m_v}{m_v} \quad (9)$$

$$h = h_o + \omega h_v \quad (10)$$

โดย

$$h_o = c_{ps} (T - T_o) \quad (11)$$

$$h_v = c_{pv} (T - T_o) + q_o \quad (12)$$

แทนสมการที่ (11), (12) ลงในสมการ (10) จะได้

$$h = c_{ps} (T - T_o) + \omega [c_{pv} (T - T_o) + q_o] \quad (13)$$

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ (13) จะได้

$$\begin{aligned} dh &= \frac{\partial h}{\partial T} dT + \frac{\partial h}{\partial \omega} d\omega \\ &= (c_{ps} + \omega c_{pv}) dT + [q_o + c_{pv} (T - T_o)] d\omega \quad (14) \end{aligned}$$

ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น

$$c_{pm} = (c_{ps} + \omega c_{pv}) \quad (15)$$

ดังนั้น

$$dh = \frac{\partial h}{\partial T} dT + \frac{\partial h}{\partial \omega} d\omega \quad (16)$$

จากสมดุลทางความร้อนระหว่างอากาศกับน้ำในหอทำน้ำเย็น เมื่อพิจารณาเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ ภายใต้อสมมติฐานที่ว่า

1. ไม่คิดการสูญเสียมวลเนื่องจากการระเหยของน้ำ
2. ไม่คิดความต้านทานทางการถ่ายเทมวลของน้ำไปยังอากาศรอบ ๆ ผิวหน้า
3. ความร้อนแฝงในการระเหยมีค่าคงที่
4. ค่าอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของน้ำคูณด้วยค่าความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น (ค่า Lewis relationship) มีค่าเป็น 1
5. อุณหภูมิที่ผิวน้ำมีค่าเท่ากับอุณหภูมิน้ำและเท่ากับอุณหภูมิของอากาศใกล้ ๆ ผิวน้ำ
6. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรอบ ๆ ผิวน้ำเท่ากับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมทั้งหมด

จากสมดุลความร้อน

ความร้อนที่น้ำสูญเสียไป = ความร้อนที่อากาศได้รับ

$$LC_p dt = Gdh \quad (17)$$

แทนค่าสมการที่ (16) ลงในสมการที่ (17) จะได้

$$LC_p dt = LC_p dT + [q_0 + c_{pv}(T - T_0)]Gd\omega \quad (18)$$

จากสมการที่ (2)

$$dQ_w = dQ_s + dQ_L$$

เมื่อเทียบสมการที่ (18) และสมการที่ (2) จะได้ว่า

$$dQ_s = GC_{pm} dT = K_g a dV (T' - T_s) \quad (19)$$

$$dQ_L = [q_0 + c_{pv}(T - T_0)]Gd\omega \quad (20)$$

จากสมการที่ (19) และสมการที่ (4) จะได้

$$dQ_s = GC_{pm} dT = K_g adV(T' - T_s) \quad (21)$$

จาก Lewis Relationship พบว่า

$$K_g = K' C_{pm} \quad (22)$$

แทนสมการที่ (22) ลงในสมการที่ (21) จะได้

$$dQ_s = GC_{pm} dT = K' C_{pm} adV(T' - T) \quad (23)$$

จากสมการที่ (23) และสมการที่ (17) แทนในสมการที่ (18) จะได้

$$LC_{pv} dt = K' C_{pm} adV(T' - T) + [q_0 + C_{pv}(T - T_0)] K' adV(\omega' - \omega)$$

$$LC_{pv} dt = K' [C_{pm}(T' - T) + [q_0 + C_{pv}(T - T_0)](\omega' - \omega)] K' adV(\omega' - \omega) \quad (24)$$

จากเอนทัลปีของอากาศชื้นตามสมการที่ (13)

$$h = C_{pa}(T - T_0) + \omega [q_0 + C_{pv}(T - T_0)]$$

$$h = C_{pa}T + \omega C_{pv}T - C_{pa}T_0 + (q_0 - C_{pv}T_0)$$

$$h = (C_{pa} + \omega C_{pv})T - C_{pa}T_0 + \omega(q_0 - C_{pv}T_0) \quad (25)$$

$$h = (C_{pm}T + C_{pa}T_0) + \omega(q_0 - C_{pv}T_0)$$

ดังนั้น

$$C_{pm}T = h + C_{pa}T_0 + \omega(q_0 - C_{pv}T_0) \quad (26)$$

และในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (25) เมื่อพิจารณาไอน้ำเหนือผิวน้ำ

$$h_w = c_{pm} T' - c_{pa} T_0 + \omega_w (q_0 - c_{pv} T_0) \quad (27)$$

ดังนั้น

$$c_{pm} T' = h_w + c_{pa} T_0 + \omega_w (q_0 - c_{pv} T_0) \quad (28)$$

แทนสมการที่ (26), (28) ลงในสมการที่ (24) จะได้

$$LC_{pf} dt = K' adV \{ (h_w - h) + c_{pv} T (\omega_w - \omega) \}$$

เนื่องจากเทอม  $c_{pv} T (\omega_w - \omega) \ll (h_w - h)$

ดังนั้น

$$LC_{pf} dt = K' adV (h_w - h) \quad (29)$$

จากสมการที่ (29) และสมการที่ (17) จะได้ว่า

$$LC_{pf} dt = K' adV (h_w - h) \quad (30)$$

ในทางปฏิบัติเราจะให้  $t = T'$  และ  $K$  คือสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทมวลบนพื้นผิวน้ำทั้งหมด ดังนั้น จากสมการที่ (25) จะได้

$$LC_{pf} dt = KadV (h_w - h) \quad (31)$$

จากสมการที่ (31) จะได้

$$\frac{KaV}{L} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{C_{pf}}{(h_w - h)} dt = NTU \quad (32)$$

เรียกสมการที่ (32) ว่าสมการคุณลักษณะของหอทำน้ำเย็น

โดยค่า  $KaV/L$  หรือค่าจำนวนหน่วยของการถ่ายเท (NTU) นี้ได้ถูกนายซิลตัน (Chilton) และนายโคลเบิร์น (Colburn) ได้นำมาใช้เป็นครั้งแรกราว ค.ศ. 1935 โดย NTU จะเป็นกลุ่มไร้หน่วยในขบวนการถ่ายเท ที่บ่งถึงความสัมพันธ์ของชั้นขีดผิว (Boundary layer) และอัตราการไหลของน้ำและอากาศซึ่งปัญหาเฉพาะบริเวณจำกัด ของหอทำน้ำเย็นนั้นยากแก่การพิจารณา มาก เช่น ค่าการนำความร้อนเฉพาะที่ จึงหลีกเลี่ยงการวิเคราะห์ และมักจะใช้ค่าจำนวนหน่วยของการถ่ายเทมาแก้ปัญหาในหอทำน้ำเย็นแทน

2.5.4 เส้นสมการคุณลักษณะเฉพาะของหอทำน้ำเย็น

จากสมการที่ (32)

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{C_{pf}}{(h_w - h)} dt = \frac{C_{pf}(T_1 - T_2)}{\Delta h_m} \tag{33}$$

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปทั่วไปคือ

$$\frac{KaV}{L} = c \left( \frac{L}{G} \right)^{-n} \tag{34}$$

โดยค่า  $c$  เป็นค่าคงที่สัมพันธ์กับการออกแบบของแผงฟิล์มที่ใช้ในการกระจายละอองน้ำ ค่า  $n$  เป็นค่าคงที่สัมพันธ์กับการออกแบบแผงกระจายฟิล์มน้ำเช่นกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า  $n$  เป็นค่าแสดงถึงความชันของเส้นกราฟคุณลักษณะของหอทำน้ำเย็นนั่นเอง สำหรับการออกแบบแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้อยู่กันในปัจจุบันจะได้ค่า  $n$  อยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 1.0 เมื่อ  $n = 1.0$  จะเป็นแผงกระจายฟิล์มน้ำแบบน้ำกระเด็น และเมื่อ  $n = 0.25$  จะเป็นแผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดแผยฟิล์มแบบเพิ่มพื้นที่สัมผัส

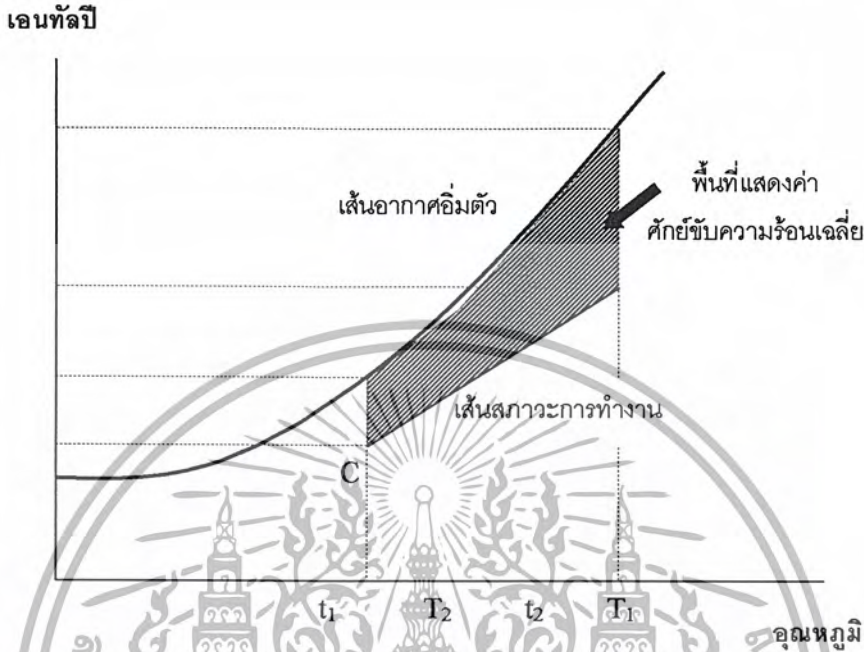
2.5.5 วิธีการหาค่า  $KaV/L$  ของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูด

จากสมการที่ (33)

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{C_{pf}}{(h_w - h)} dt = \frac{C_{pf}(T_1 - T_2)}{\Delta h_m}$$

62036

จะเห็นว่าค่า  $KaV/L$  จะขึ้นอยู่กับค่า  $\Delta h_m$  ซึ่งค่า  $\Delta h_m$  จะเป็นค่าศักยภาพความร้อนเฉลี่ย (Driving force) ซึ่งก็คือค่าผลต่างเอนทัลปีระหว่างอากาศกับน้ำในกราฟเอนทัลปีกับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 พื้นที่แสดงค่าศักยภาพความร้อนเฉลี่ย

### 2.5.6 คุณสมบัติของอากาศที่ไหลผ่านหอทำน้ำเย็น

จากสมการที่ (17) จะได้ว่า

$$LC_p(T_1 - T_2) = G(h_2 - h_1) \quad (35)$$

จากรูปที่ 2.10 พิจารณาความชันของเส้นสภาวะการทำงานของอากาศ ซึ่งคำนวณความชันได้โดย

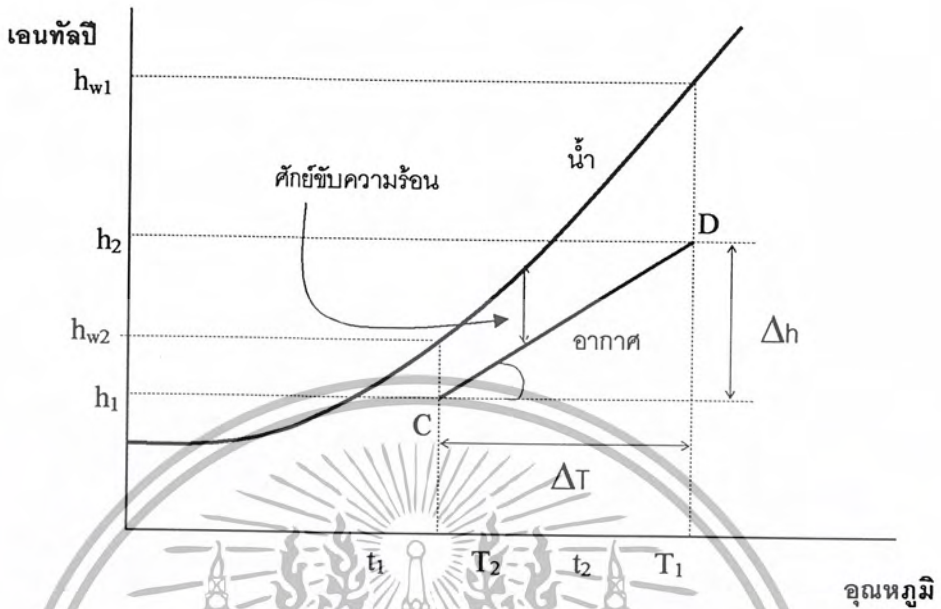
$$\text{ความชัน} = \tan \theta = \frac{h_2 - h_1}{\Delta T} \quad (36)$$

เปรียบเทียบสมการที่ (35) และ (36) จะได้ว่า

$$G(h_2 - h_1) = LC_p \Delta T = L(h_{w2} - h_{w1}) \quad (37)$$

ดังนั้น

$$h_2 = h_1 + \frac{L}{G} C_p (T_1 - T_2) \tag{38}$$



รูปที่ 2.10 เส้นสภาวะการทำงานของอากาศ

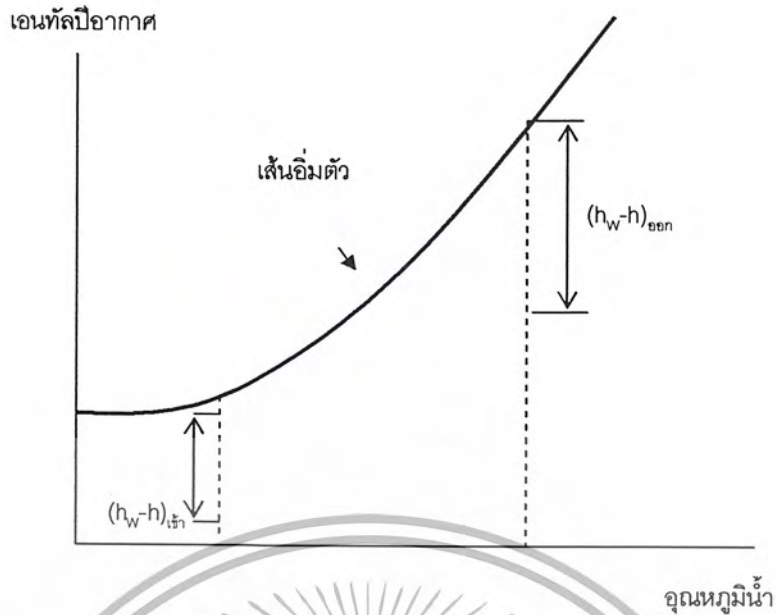
2.5.7 การหาค่าศักย์ขับความร้อนเฉลี่ย

โดยทั่วไปการหาค่า  $\Delta h_m$  ทำได้หลายวิธีคือ

1. วิธีเมอร์เคิล

เป็นวิธีดั้งเดิมซึ่งวิเคราะห์โดยนายเมอร์เคิล โดยหลักการคือ จะสมมติให้  $h_w - h$  มีค่าคงที่ตลอดตามเส้นภาวะทำงาน ดังนั้นสามารถหาค่า  $\Delta h_m$  ได้ดังสมการ

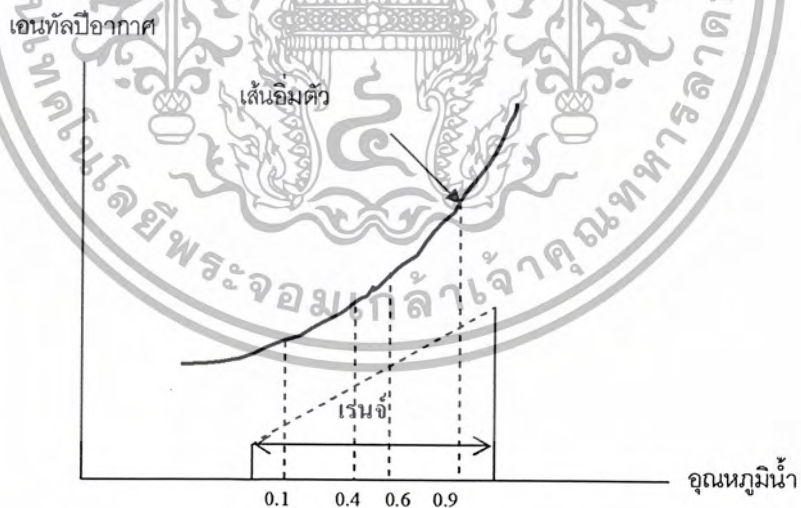
$$\Delta h_m = \frac{(h_w - h)_1 + (h_w - h)_2}{2} \tag{39}$$



รูปที่ 2.11 การหาค่า  $\Delta h_m$  โดยวิธีของเมอร์เคิล

2. วิธีมาตรฐานของสถาบันของทำน้ำเย็น (CTI)

จะใช้หลักการในการหา  $\Delta h_m$  โดยใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ของ Tchebycheff โดยจะแบ่งเส้นสภาวะการทำงานออกเป็น 3 ส่วน โดยในแต่ละส่วนจะมีสัดส่วนเป็น 0.1, 0.4, 0.6 และ 0.9 ของค่าเรนจ์



รูปที่ 2.12 การหาค่า  $\Delta h_m$  โดยวิธีของ Tchebycheff

$$\text{ดังนั้น } \Delta h_m = [(h_w - h)_1 + (h_w - h)_2 + (h_w - h)_3 + (h_w - h)_4]/4 \quad (40)$$

$$\text{โดย } (h_w - h)_1 = \text{ค่า } (h_w - h) \text{ ที่ } T = T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$$

$$(h_w - h)_2 = \text{ค่า } (h_w - h) \text{ ที่ } T = T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$$

$$(h_w - h)_3 = \text{ค่า } (h_w - h) \text{ ที่ } T = T_2 + 0.6(T_1 - T_2)$$

$$(h_w - h)_4 = \text{ค่า } (h_w - h) \text{ ที่ } T = T_2 + 0.9(T_1 - T_2)$$

### 3. วิธีผลต่างอุณหภูมิแบบล็อกกาลีทีม (LMTD)

วิธีนี้จะเป็นการหาค่า  $\Delta h_m$  โดยใช้หลักการเดียวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั่วไปโดยจะหาได้จากสมการ

$$\Delta h_m = \frac{(h_w - h)_2 - (h_w - h)_1}{\ln \left[ \frac{(h_w - h)_2}{(h_w - h)_1} \right]} \quad (41)$$

$$\text{โดย } (h_w - h)_1 = \text{ค่า } (h_w - h) \text{ ที่ } T = T_2$$

$$(h_w - h)_2 = \text{ค่า } (h_w - h) \text{ ที่ } T = T_1$$

### 4. วิธีอุณหภูมิเฉลี่ย

วิธีนี้จะเป็นการหาค่า  $\Delta h_m$  โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอุณหภูมิน้ำเข้าและออกจากหอทำน้ำเย็น โดยจะหาได้จากสมการ

$$\Delta h_m = (h_w - h) \quad (42)$$

$$\text{ที่ } T = (T_1 + T_2)/2$$

## 5. วิธีแรงขับเคลื่อน

วิธีนี้จะเป็นการหาค่า  $\Delta h_m$  โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอุณหภูมิน้ำเข้าและออกจากหอทำน้ำเย็น และจะมีตัวประกอบคูณเพื่อให้ค่าที่ได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยจะกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

1. หาค่า  $\lambda_1 = h_{w2} - h_2$  ที่  $T = T_1$
2. หาค่า  $\lambda_2 = h_{w1} - h_1$  ที่  $T = T_2$
3. หาค่า  $\lambda_m = h_{w3} - h_3$  ที่  $T = (T_1 + T_2)/2$
4. หาค่า

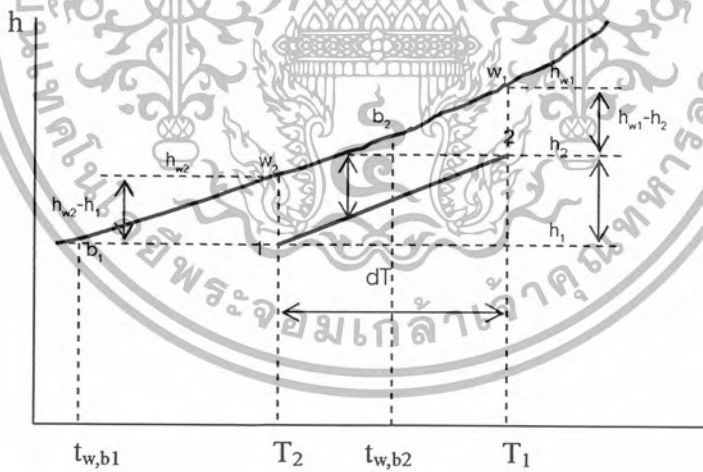
$$\frac{\lambda_m}{\lambda_1} = \frac{(h_{w3} - h_3)}{(h_{w2} - h_2)}$$

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_2} = \frac{(h_{w3} - h_3)}{(h_{w1} - h_1)}$$

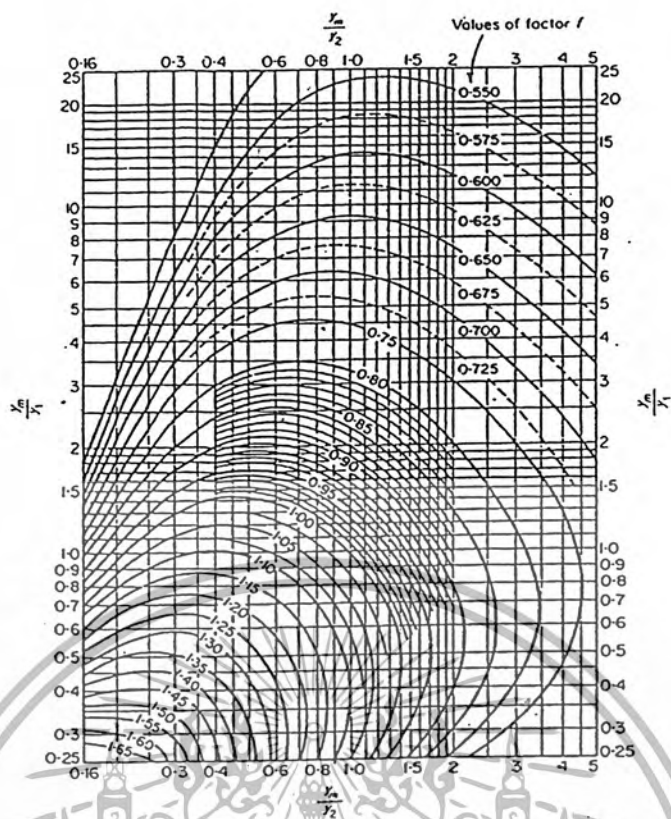
5. จากรูปที่ 2.14 จะสามารถหาค่า  $f$  ได้

6. หาค่า  $\Delta h_m$  ได้จากสมการ

$$\Delta h_m = f(h_{w3} - h_3) = f\lambda_m \quad (43)$$



รูปที่ 2.13 การหาค่า  $\Delta h_m$  โดยใช้วิธีแรงขับเคลื่อน



รูปที่ 2.14 แผนภาพในการหาตัวประกอบ (f)

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. หอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทาง

หอทำน้ำเย็นที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้จะเป็นชนิดพัดลมดูดแบบอากาศและน้ำไหลสวนทางกัน ขนาด 3 ตันความเย็น โดยน้ำร้อนจะเข้าทางตอนบนของหอจากนั้นจะถูกฉีดให้เป็นฝอยขนาดเล็กและตกลงสู่แผงกระจายฟิล์มน้ำ ในขณะที่เดียวกันอากาศจากภายนอกจะถูกดูดด้วยพัดลมเข้าทางตอนล่างและออกทางตอนบนของหอทำน้ำเย็น ส่วนน้ำเย็นที่ได้จะออกทางตอนล่างของหอทำน้ำเย็น



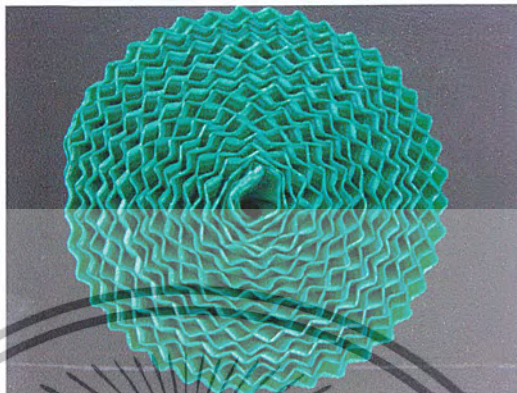
รูปที่ 3.1 หอทำน้ำเย็นชนิดพัดลมดูดขนาด 3 ตันความเย็น

2. ถังบรรจุน้ำทรงกลม ขนาด 200 ลิตร

3. เครื่องสูบน้ำชนิดอัดอากาศ (Compress Pump) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนน้ำร้อนเข้าสู่หอทำน้ำเย็น

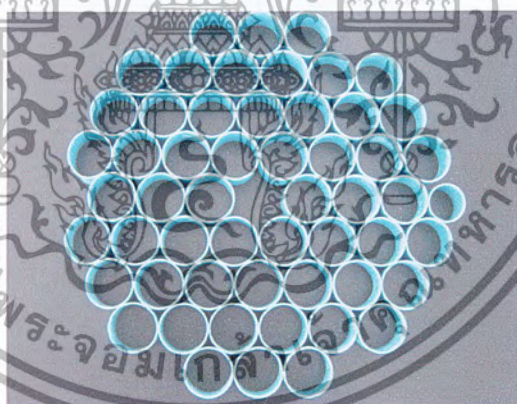
4. อุปกรณ์ทำความร้อน (Heater) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนให้แก่น้ำเพื่อให้ได้น้ำที่มีอุณหภูมิเข้าหอทำน้ำเย็นตามที่ต้องการ

5. แผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม มีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ขึ้นลอนเฉียงทางด้านกว้าง ขดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 52 เซนติเมตร ทำหน้าที่เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศและหน่วงเวลาให้น้ำกระจายอยู่ในหอทำน้ำเย็นนานขึ้น



รูปที่ 3.2 แผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม

6. แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง ทำจากท่อพีวีซี



รูปที่ 3.3 แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซี

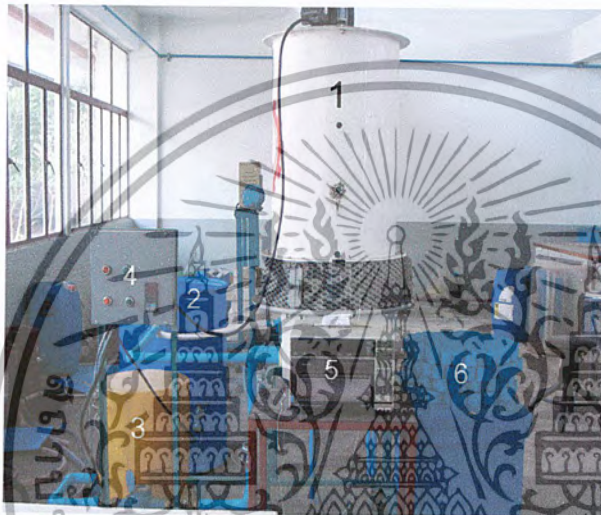
ทำจากท่อพีวีซี 2 ขนาด คือ 1.5 และ 2 นิ้ว ตัดเป็นชิ้นยาวประมาณชิ้นละ 5 เซนติเมตรยึดติดกันเป็นรูปร่างดังรูปที่ 3.3 โดยมีพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมด 36687.76 ตารางเซนติเมตร ซึ่งวิธีการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

7. อุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อน (Controller) ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิน้ำร้อนและน้ำเย็นที่เข้าและออกหอตำนน้ำเย็น ส่วนอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อนจะทำหน้าที่วัดและควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนในถังน้ำร้อนตามต้องการ

8. เทอร์มิสเตอร์กระเปาะเปียก ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของอากาศขึ้น

9. อุปกรณ์วัดความเร็วอากาศ (แอนิเมเตอร์) ใช้ในการวัดความเร็วของอากาศที่ทางออกของหอตำนน้ำเย็น สำหรับวิธีการวัดความเร็วของอากาศได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

### 3.2 ออกแบบ สร้างและติดตั้งชุดทดลองหอตำนน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการ



1. หอตำนน้ำเย็นชนิดลมดูดขนาด 3 ตันความเย็น
2. ถังตม่น้ำ
3. ปั๊มน้ำ
4. แผงควบคุมทางไฟฟ้า
5. อุปกรณ์แสดงผล
6. แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซี

รูปที่ 3.4 ชุดทดลองหอตำนน้ำเย็น

การออกแบบ สร้างและติดตั้งชุดทดลองหอตำนน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. ใช้หอตำนน้ำเย็นชนิดพัดลมดูดแบบไหลสวนทางขนาด 3 ตันความเย็น ซึ่งผลิตโดยบริษัท เหลียงซี อุตสาหกรรม (ประเทศไทย) จำกัด
  2. ติดตั้งระบบควบคุมวงจรทางไฟฟ้า ระบบทำความร้อน และระบบหมุนเวียนน้ำแบบปิด
  3. ทดลองเดินเครื่อง ปรับอัตราการไหลของน้ำตามค่าต่าง ๆ ที่ต้องการ
  4. แก้ไข ปรับปรุงข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อปรับตั้งสภาวะการทำงานของระบบของหอตำนน้ำเย็น
- ในระดับห้องปฏิบัติการให้เหมาะสมสำหรับการเก็บข้อมูล

### 3.3 วิธีารทดลอง

#### ตอนที่ 1

1. เติมน้ำเข้าสู่ถังน้ำ โดยให้มีปริมาณน้ำอยู่ในถังประมาณ 150 – 170 ลิตร
2. เปิดสวิตช์ฮีทเตอร์ที่ตู้ควบคุมไฟฟ้า จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิของน้ำที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิไว้ประมาณ 60 องศาเซลเซียส รอจนได้น้ำร้อนตามอุณหภูมิที่ได้ตั้งไว้
3. เปิดสวิตช์เดินเครื่องหอทำน้ำเย็นและเครื่องสูบน้ำที่ตู้ควบคุมไฟฟ้า
4. ปรับวาล์วน้ำให้อยู่ในตำแหน่งเปิดสุด ซึ่งจะมีค่าอัตราการไหลของน้ำประมาณ 0.58 ลิตร/วินาที
5. ปล่อยให้ระบบทำงานตามสภาวะที่กำหนด แล้วรอจนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) ซึ่งสังเกตได้จากอุณหภูมิของน้ำร้อนที่เข้าสู่หอทำน้ำเย็นมีค่าคงที่ โดยจะใช้เวลาประมาณ 30-45 นาที
6. เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ให้ทำการบันทึกค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการทดลองตามตารางที่ 1 โดยทำการบันทึกผลทุก ๆ 5 นาทีเป็นจำนวน 12 ครั้ง

#### ตารางที่ 3.1 ตัวแปรในการบันทึกข้อมูลขณะทดสอบหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูด

รายการบันทึก	หน่วย
1. อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ	$^{\circ}\text{C}$
2. อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ	$^{\circ}\text{C}$
3. อุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น	$^{\circ}\text{C}$
4. อุณหภูมิของน้ำเย็นขาออกจากหอทำน้ำเย็น	$^{\circ}\text{C}$
5. อัตราการไหลของน้ำร้อน	$\text{m}^3$

7. ปิดสวิตช์เดินเครื่องหอทำน้ำเย็น แล้วทำซ้ำใหม่ตั้งแต่ข้อ 2-6 โดยทำการเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำใหม่ 3 ค่า คือประมาณ 0.53, 0.50 และ 0.31 ลิตร/วินาที

#### ตอนที่ 2

1. ทำการเปลี่ยนแผงกระจายฟิล์มน้ำเป็นแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ออกแบบเอง
2. ทำการทดลองเหมือนตอนที่ 1 เพียงแต่เปลี่ยนจากการปรับอัตราการไหลของน้ำเป็นการเปลี่ยนอุณหภูมิของตู้ควบคุมอุณหภูมิของน้ำขาเข้าหอทำน้ำเย็นให้อยู่ที่ประมาณ 45 และ 60 องศาเซลเซียส

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์ผลในหลายลักษณะ คือ

4.1 การสร้างชุดทดลองหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการ

4.2 การสร้างกราฟคุณลักษณะเฉพาะของหอทำน้ำเย็นโดยใช้วิธีการมาตรฐานของสถาบันหอทำน้ำเย็น (CTI)

4.3 การวิเคราะห์ผลของการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ที่มีต่อสมรรถนะในการทำงานของหอทำน้ำเย็น

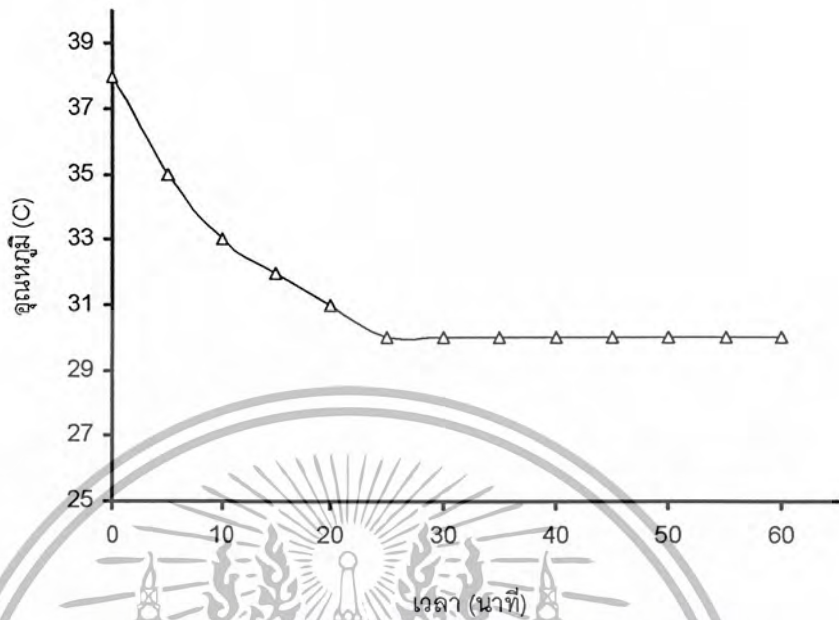
โดยตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อหาสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำที่สภาวะต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

#### 4.1 การสร้างชุดทดลองหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการ

จุดประสงค์หลักในการสร้างชุดทดลองหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการนี้ขึ้นก็เพื่อที่จะทดลองหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อค่าสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็น โดยชุดทดลองหอทำน้ำเย็นที่สร้างขึ้นในครั้งนี้ มีลักษณะเป็นชุดอุปกรณ์การทดลองที่มีระบบการหมุนเวียนของน้ำเป็นระบบปิด ประกอบด้วย หอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดขนาด 3 ตันความเย็น ถึงเก็บน้ำ อุปกรณ์หมุนเวียนน้ำ อุปกรณ์ทำความร้อน และอุปกรณ์การวัดต่าง ๆ ซึ่งผลจากการทดสอบการเดินเครื่องพบว่าสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำขาเข้าได้ในช่วง 10 ถึง 33 ลิตรต่อนาที ส่วนอัตราการไหลของอากาศจะคงที่ที่ 25 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที และน้ำร้อนที่ใช้ในการทดลองจะมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาเดินเครื่องจนเข้าสู่สมดุลประมาณ 30 – 45 นาที

สำหรับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในชุดทดลองหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้นคือ ในส่วนของอุปกรณ์ทำความร้อน โดยอุปกรณ์ไม่สามารถทำความร้อนได้ตามอุณหภูมิที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ในการทดลองแต่ละสภาวะต้องใช้เวลาานเพื่อที่จะรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ อีกทั้งอุปกรณ์ทำความร้อนที่ติดตั้งอยู่มีไม่เพียงพอจึงทำให้อุณหภูมิของน้ำร้อนที่สภาวะคงที่ลดลงมากจากอุณหภูมิที่สภาวะเริ่มต้นดังแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.1 นอกจากนั้นขณะดำเนินการทดลองเกิดการสูญเสียออกจากระบบเป็นจำนวนมากทำให้ระหว่างการทำทดลองต้องเติมน้ำ

เข้าสู่ระบบตลอดเวลาเป็นผลทำให้การทดลองขาดความต่อเนื่องและต้องใช้เวลามากในการที่จะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ดังเดิม



รูปที่ 4.1 โปรไฟร์อุณหภูมิของน้ำขาเข้าสู่ชุดทดลองหอทำน้ำเย็น

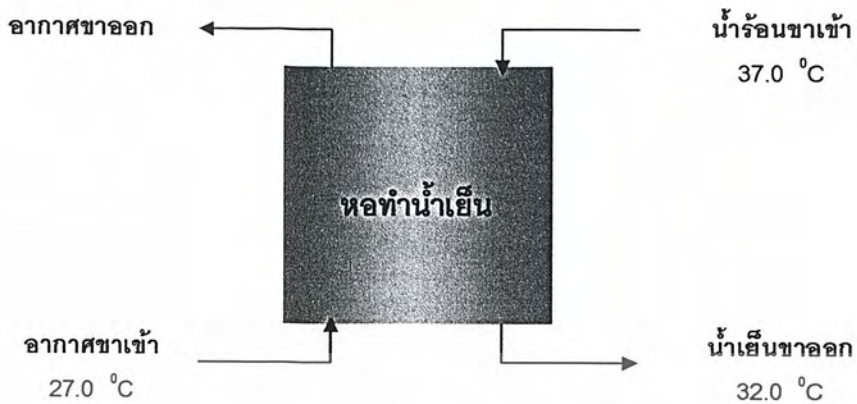
#### 4.2 การสร้างกราฟคุณลักษณะเฉพาะของหอทำน้ำเย็น

การสร้างกราฟคุณลักษณะเฉพาะของหอทำน้ำเย็นนั้นจะใช้วิธีมาตรฐานของสถาบันหอทำน้ำเย็น โดยจะแบ่งการคำนวณเป็นขั้นตอนดังนี้

- 4.2.1 คำนวณค่า  $KaVL$  โดยใช้วิธี Tchebycheff Method
- 4.2.2 สร้างกราฟสมรรถนะของผู้ผลิต
- 4.2.3 สร้างกราฟแอปไพเราะที่ 5 องศาเซลเซียส
- 4.2.4 สร้างกราฟคุณลักษณะของหอทำน้ำเย็น

ข้อมูลจากผู้ออกแบบหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดขนาด 3 ตันความเย็น มีดังนี้

- อัตราการไหลของน้ำร้อนที่สูเข้าหอทำน้ำเย็น 0.55 กิโลกรัม/วินาที
- อัตราการไหลของอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น 0.42 ลูกบาศก์เมตร/วินาที
- อุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น 37.0 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิของน้ำเย็นขาออกจากหอทำน้ำเย็น 32.0 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น 27.0 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 แผนภาพการทำงานของหม้อทำน้ำเย็น

กำหนดให้

$L$  = อัตราการไหลของน้ำร้อนขาเข้าหม้อทำน้ำเย็น (กิโลกรัม/วินาที-ตารางเมตร)

$G$  = อัตราการไหลของอากาศขาออกจากหม้อทำน้ำเย็น (กิโลกรัม/วินาที-ตารางเมตร)

(1) หาค่า  $L$  โดย

$$L = \frac{\text{อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ} (\dot{m}_w)}{\text{พื้นที่ภาคตัดขวางของแผงกระจายฟิล์มน้ำ} (A)}$$

$$= \frac{0.55}{0.238}$$

(2) หาค่า  $G$  โดย

$$G = \frac{\text{อัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศ} (\dot{V})}{\text{พื้นที่ภาคตัดขวางของแผงกระจายฟิล์มน้ำ} (A)} \times \text{ความหนาแน่นของอากาศ} (\rho_c)$$

$$= \frac{0.42}{0.238} \times \rho_c \quad (44)$$

(3) หาค่า  $\rho_o$  โดย (หลักข้างอิง: 1 กิโลกรัมของอากาศแห้ง)

$$\begin{aligned} \text{โดยความหนาแน่นของอากาศ } (\rho_o) &= \frac{\text{มวลของอากาศแห้ง}(m_o)}{\text{ปริมาตรของอากาศแห้ง}(V_o)} \\ &= \frac{1}{V_o} \end{aligned} \quad (45)$$

ปริมาตรของอากาศแห้ง ( $V_o$ ) หาได้จาก

- กฎของชาร์ลส์

กฎของชาร์ลส์กล่าวว่า "เมื่อความดันคงที่ ปริมาตรของก๊าซใด ๆ ที่มีมวลคงที่จะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิเคลวิน"

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

(46)

ดังนั้นการหาค่า  $V_o$  จะเปรียบเทียบกับปริมาตร ( $V_1$ ) ปริมาตรที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐาน STP ( $0^\circ\text{C}, 1 \text{ atm}$ )  $V_1$

- หา  $V_1$  โดยใช้ความสัมพันธ์ของโมล

$$\begin{aligned} \text{โมล} &= \frac{\text{มวล}}{\text{มวลโมเลกุล}} = \frac{\text{ปริมาตร}}{22.4} = \frac{\text{จำนวนโมเลกุล}}{6.02 \times 10^{23}} \\ n &= \frac{g}{M} = \frac{V}{22.4} = \frac{N}{6.02 \times 10^{23}} \end{aligned}$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$V_1 = 22.4 \frac{g}{M} = \frac{22.4(1000)}{28.967} = 773.29 \text{ ลิตร}$$

$$= 0.7733 \text{ ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมอากาศแห้ง}$$

จากสมการ (46)

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_0}{T_0}$$

เมื่อ

$$V_1 = 0.773 \text{ ลูกบาศก์เมตร / กิโลกรัมอากาศแห้ง}$$

$$T_1 = 0 + 273 \text{ K}$$

$$V_2 = V_0$$

$$T_2 = \text{อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น}$$

$$= 27 + 273 \text{ K}$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงไปในสมการจะได้

$$\frac{0.7733}{273} = \frac{V_0}{300}$$

ดังนั้นจากสมการ (45)

$$\rho_0 = \frac{1}{V_0}$$

$$= \frac{1}{0.849}$$

$$= 1.178 \text{ กิโลกรัมอากาศแห้ง/ลูกบาศก์เมตร}$$

จากสมการ (44) จะหาค่า G ได้โดยแทนค่า  $\rho_0 = 1.1847$  ลงไป

$$G = \frac{0.42}{0.238} \times 1.178$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศ} &= L/G \\ &= 2.31/2.08 \\ &= 1.111 \end{aligned}$$

กำหนด: ที่สภาวะออกแบบค่า  $L/G$  เท่ากับ 1.111 คิดเป็น 100% ของภาวะออกแบบ

#### 4.2.1 คำนวณค่า $KaV/L$ โดยใช้วิธี Tchebycheff Method

ในการคำนวณค่า  $KaV/L$  นั้นจะใช้วิธี Tchebycheff Method โดยวิธีนี้จะแบ่งเส้นกราฟ ออกเป็น 4 ส่วนคือ 0.1, 0.4, 0.6 และ 0.9 ของค่าเรนจ์ จากสมการที่ (33)

โดย

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{C_{pf}}{(h_w - h)} dt$$

$C_{pf}$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ = 4.19, กิโลจูล / กิโลกรัม-องศาเซลเซียส  
 $h_w$  คือ เอนทัลปีจำเพาะของอากาศอิ่มตัว ณ อุณหภูมิของน้ำ, กิโลจูล / กิโลกรัม  
 หาได้จากตารางเอนทัลปีอิ่มตัวของอากาศที่แสดงไว้ในภาคผนวก ค.  
 $h$  คือ เอนทัลปีจำเพาะของอากาศ, กิโลจูล / กิโลกรัม

จากวิธี Tchebycheff

$$\frac{KaV}{L} = \frac{T_1 - T_2}{4} \left[ \frac{1}{(h_w - h)_1} + \frac{1}{(h_w - h)_2} + \frac{1}{(h_w - h)_3} + \frac{1}{(h_w - h)_4} \right] C_{pf} \quad (47)$$

ซึ่งวิธีการและผลที่ได้จากการคำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การคำนวณหาค่า  $KaV/L$  โดยใช้วิธี Tchebycheff

T	$h_w$	h	$h_w-h$	$1 / (h_w-h)$
$T_2 = 32.0$	110.61	$h_1 = h_{Twb} = 85.030$	-	-
$T_2+0.1(T_1-T_2) = 32.5$	113.50	$h_1+0.1(L/G)C_{pf}(T_1-T_2) = 88.288$	25.212	0.0397
$T_2+0.4(T_1-T_2) = 34.0$	122.59	$h_1+0.4(L/G)C_{pf}(T_1-T_2) = 98.061$	24.529	0.0408
$T_2+0.6(T_1-T_2) = 35.0$	129.00	$h_1+0.6(L/G)C_{pf}(T_1-T_2) = 104.576$	24.424	0.0409
$T_2+0.9(T_1-T_2) = 36.5$	139.20	$h_1+0.9(L/G)C_{pf}(T_1-T_2) = 114.350$	24.850	0.0402
$T_1 = 37.0$	142.77	$h_1+1.0(L/G)C_{pf}(T_1-T_2) = 117.607$	-	-

ดังนั้น

$$\frac{KaV}{L} = \frac{37 - 32}{4} [0.0397 + 0.0408 + 0.0409 + 0.0402] \quad (4.19)$$

$$= 0.718$$

สำหรับค่า  $KaV/L$  ของการทดลองเพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก

#### 4.2.2 สร้างกราฟสมรรถนะของผู้ผลิต

จากสมการที่ (34) จะได้รูปแบบทั่วไปของสมการ  $KaV/L$  คือ

$$\frac{KaV}{L} = c \left( \frac{L}{G} \right)^{-n}$$

โดย

$c$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับการออกแบบของแผงฟิล์มที่ใช้ทำแผงกระจายฟิล์มน้ำ

$$n = 0.6$$

เมื่อนำค่า  $L/G$  และ  $KaV/L$  ที่ 100% ของค่าที่สภาวะออกแบบตามแผนป้ายผลิตภัณฑ์ แทนลงในสมการที่ (34) จะได้

$$0.718 = c(1.1054)^{-0.6}$$

$$c = 0.764$$

ดังนั้นจะได้สมการคุณลักษณะเฉพาะของหย่อนน้ำเย็นคือ

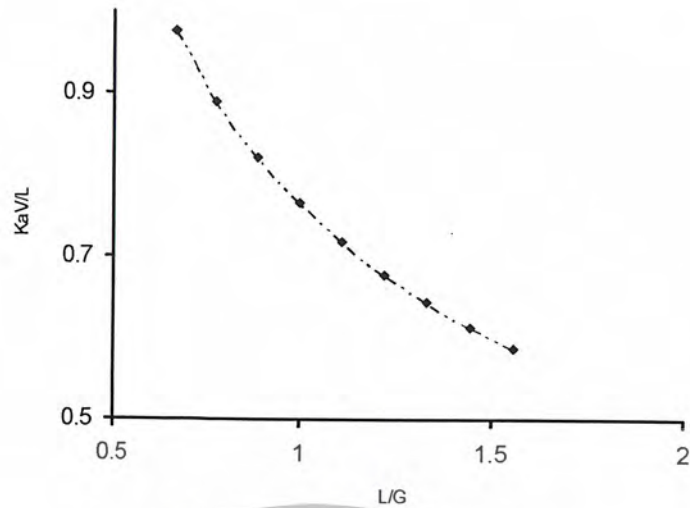
$$\frac{KaV}{L} = 0.7648 \left( \frac{L}{G} \right)^{-0.6} \quad (48)$$

จากนั้นทำการคำนวณค่า  $KaV/L$  โดยเปลี่ยนค่า  $L/G$  เป็น 60% ถึง 140 % ของสภาวะ ออกแบบ

ตารางที่ 4.2 ค่า  $KaV/L$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ (48) ที่ค่าอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ กัน

เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศ	$L/G$	$KaV/L$
140	1.555	0.587
130	1.444	0.613
120	1.333	0.644
110	1.222	0.678
100	1.111	0.718
90	1.000	0.765
80	0.889	0.821
70	0.778	0.889
60	0.667	0.976

จากตารางที่ 4.2 นำข้อมูลค่า  $L/G$  และ  $KaV/L$  ที่ค่าต่าง ๆ มาเขียนกราฟ โดยให้แกนตั้งเป็นค่า  $KaV/L$  และแกนนอนเป็นค่า  $L/G$  จะได้กราฟดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเรียกรูปนี้ว่า กราฟสมรรถนะของผู้ผลิต



รูปที่ 4.3 กราฟสมรรถนะของผู้ผลิต

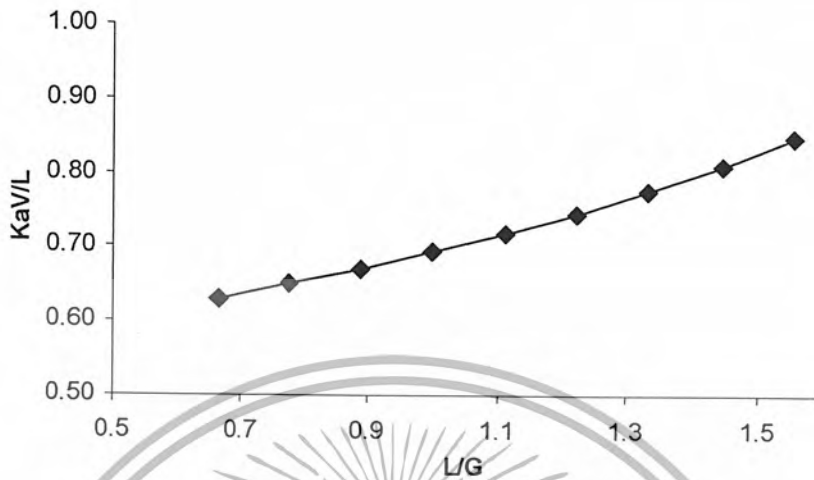
#### 4.2.3 สร้างกราฟแอปโพรชที่ 5 องศาเซลเซียส

กราฟแอปโพรชเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $KaVL$  และ  $L/G$  โดยกำหนดให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ กับอุณหภูมิของน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็นคงที่ไว้ที่ค่า ๆ หนึ่ง ในที่นี้ใช้ค่าเดียวกับภาวะออกแบบ คือ 5 องศาเซลเซียส จากนั้นคำนวณหาค่า  $KaVL$  โดยเปลี่ยนค่า  $L/G$  เป็น 60% ถึง 140% ของค่าที่สภาวะออกแบบ

ตารางที่ 4.3 ค่า  $KaVL$  ที่คำนวณได้จากวิธีการของ Tchebycheff ที่ค่าอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ กัน

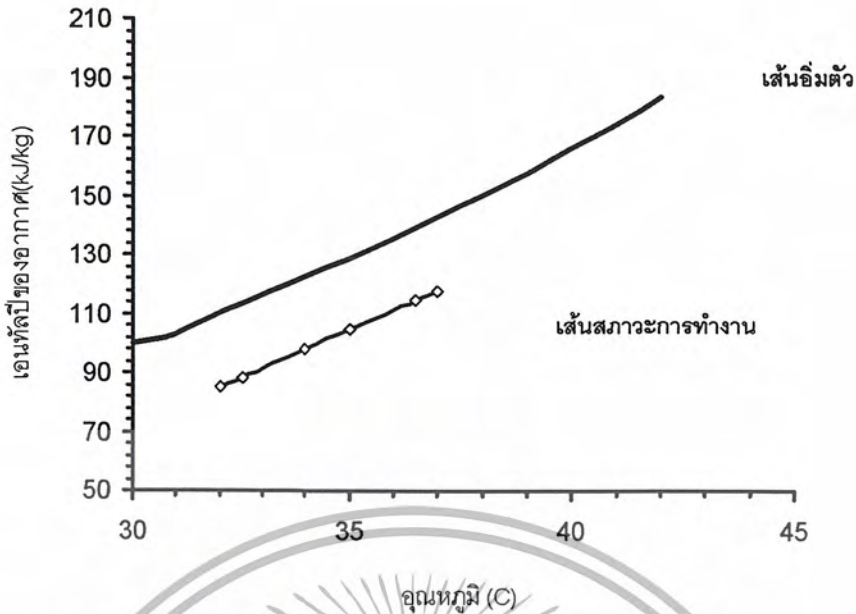
เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลของน้ำต่อ อัตราการไหลของอากาศ	$L/G$	$KaVL$
140	1.555	0.846
130	1.444	0.809
120	1.333	0.775
110	1.222	0.745
100	1.111	0.718
90	1.000	0.693
80	0.889	0.671
70	0.778	0.650
60	0.667	0.630

จากตารางที่ 4.3 นำข้อมูลค่า  $L/G$  และ  $KaVL$  ที่ค่าต่าง ๆ มาเขียนกราฟ โดยให้แกนตั้งเป็นค่า  $KaVL$  และแกนนอนเป็นค่า  $L/G$  จะได้รูปดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเรียกว่า กราฟแอปโพรชที่ 5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 กราฟแอปโพรชที่ 5 องศาเซียส

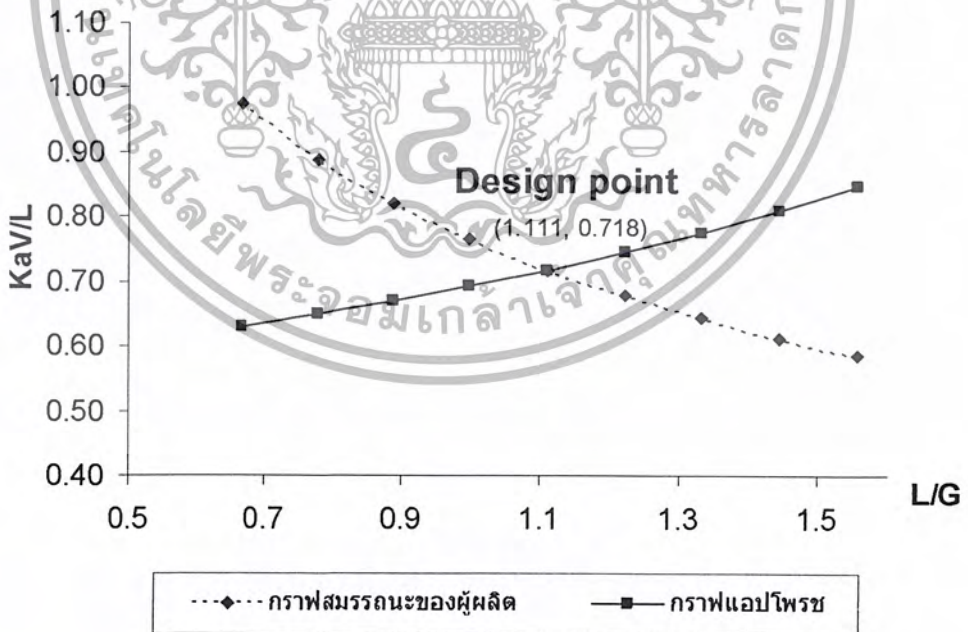
โดยผลจากการคำนวณค่า  $KaVL$  ของหอทำน้ำเย็นในตารางที่ 4.3 ได้แสดงวิธีในการคำนวณไว้ในภาคผนวก ง. เมื่อนำข้อมูลที่สภาวะอิ่มตัวและข้อมูลที่สภาวะออกแบบมาสร้างกราฟ โดยให้แกนตั้งเป็นค่าเอนทัลปีส่วนแกนนอนเป็นอุณหภูมิจะได้กราฟดังรูปที่ 4.5 โดยเส้นอิ่มตัว (Saturated line) ได้มาจากการเปิดค่าเอนทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังตารางที่แสดงไว้ในภาคผนวก ข. ส่วนค่าเอนทัลปีในเส้นสภาวะการทำงาน (Operating line) หาได้โดยวิธีการของ Tchebycheff ซึ่งวิธีการคำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.5 ข้อมูลจากสภาวะออกแบบของหอทำน้ำเย็น

#### 4.2.4 การสร้างกราฟคุณลักษณะของหอทำน้ำเย็น

เป็นการนำแผนรูปกราฟสมรรถนะจากผู้ผลิตมาเขียนรวมกันกับกราฟแอปโพรชบนแผนรูป KaV/L กับ L/G โดยจุดที่เส้นกราฟตัดกันจะเป็นจุดออกแบบ (Design point)

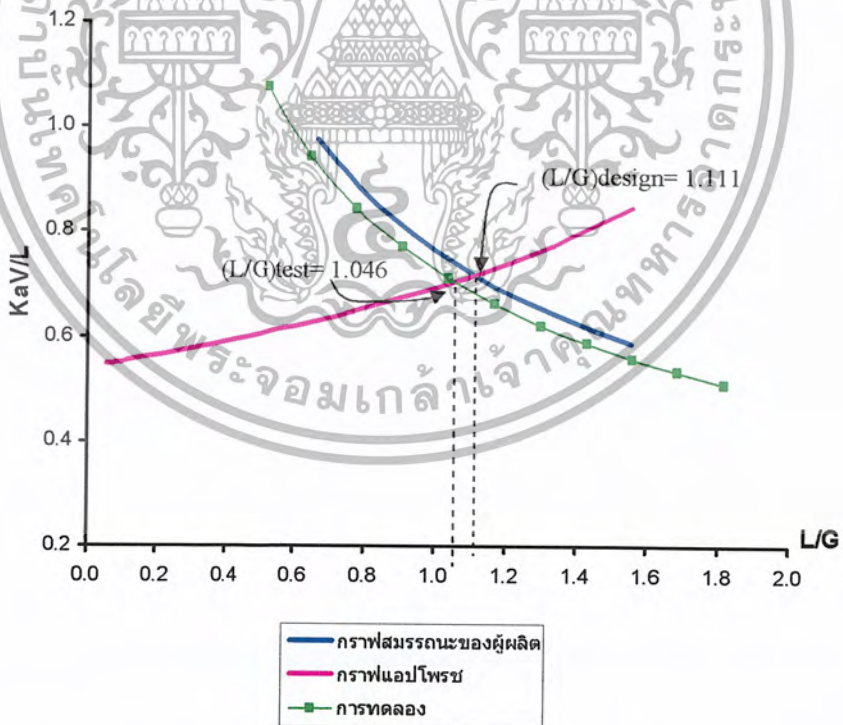


รูปที่ 4.6 กราฟคุณลักษณะของหอทำน้ำเย็น

### 4.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของน้ำต่ออัตราไหลของอากาศ ที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็น

การพิจารณาว่าหอทำน้ำเย็นการวิเคราะห์ว่าหอทำน้ำเย็นมีสมรรถนะในการทำงานมีค่ามากน้อยเพียงใด สามารถพิจารณา ได้จากขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็น ซึ่งวิธีหาค่าขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นโดยทั่วไปจะใช้วิธีมาตรฐานของสถาบันหอทำน้ำเย็นนานาชาติ (CTI) โดยจะเริ่มจากนำเอาข้อมูลของหอทำน้ำเย็นจากผู้ผลิตมาคำนวณและสร้างแผนภาพกราฟสมรรถนะของผู้ผลิต หลังจากนั้นทำการสร้างกราฟแอปโพรชลงบนกราฟเดียวกัน ซึ่งจุดตัดระหว่างเส้นทั้งสองจะเรียกว่าจุดออกแบบ (Design point) ซึ่งที่จุดนี้จะให้ค่า  $(L/G)_{design}$  หลังจากนั้นทำการทดลองแล้วคำนวณหาค่า  $L/G$  และ  $KaVL$  จากข้อมูลการทดลอง แล้วนำมากำหนดจุดลงบนกราฟคุณลักษณะเฉพาะของหอทำน้ำเย็นจะจุดที่เรียกว่าได้จุดทำงาน เมื่อลากเส้นโค้งจากจุดทำงานให้ขนานกับเส้นกราฟสมรรถนะของผู้ผลิตและไปตัดกับเส้นแอปโพรช ก็จะได้จุดตัดซึ่งที่จุดนั้นจะให้ค่า  $(L/G)_{test}$  ดังนั้นขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นสามารถคำนวณหาค่าได้ดังสมการที่ (48)

$$\text{Tower capability} = \frac{(L/G)_{test}}{(L/G)_{design}} \times 100 \tag{48}$$



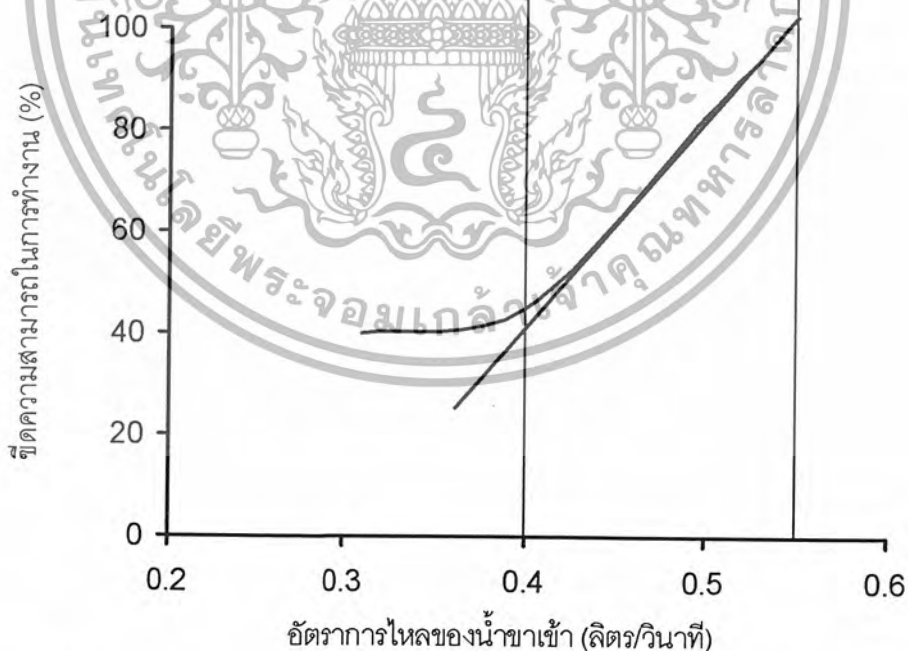
รูปที่ 4.7 การหาขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นจากการทดลองที่ 1

รูปที่ 4.7 เป็นผลการวิเคราะห์ค่าขีดความสามารถการทำงานของหอทำน้ำเย็นจากการทดลองที่ 1 เมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าค่า  $L/G_{test}$  มีค่าเท่ากับ 1.046 ส่วนค่า  $L/G_{design}$  มีค่าเท่ากับ 1.111 ดังนั้นค่าขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นของการทดลองที่ 1 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (48) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 94.15 โดยค่าขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นของการทดลองอื่น ๆ ที่อัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศต่าง ๆ กัน ได้แสดงค่าไว้ในตารางที่ 4.4 และภาคผนวก จ.

ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าการเดินชุดทดลองหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อมีค่าสมรรถนะในการทำงานสูง ควรปรับอัตราการไหลของน้ำขาเข้าให้อยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.55 ลิตร/วินาที ดังที่กราฟในรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.4 ขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นของที่การทดลองต่าง ๆ

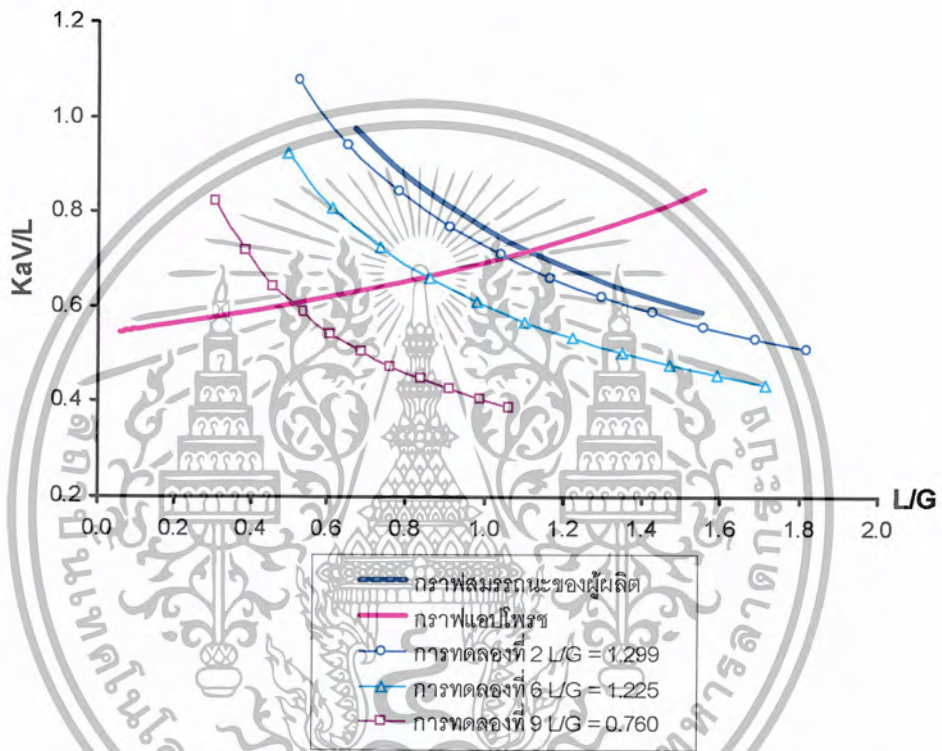
การทดลอง ครั้งที่	$L/G$	$KaV/L$	$L/G_{test}$	$L/G_{design}$	ขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็น (เปอร์เซ็นต์)
1	1.299	0.621	1.046	1.111	94.15
4	1.225	0.571	0.924	1.111	83.14
7	0.760	0.436	0.443	1.111	39.87
17	0.980	0.408	0.502	1.111	45.15



รูปที่ 4.8 กราฟระหว่างค่าขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นกับอัตราการไหลของน้ำ

#### 4.3.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็น

ในสภาวะปกติ การเดินเครื่องหอทำน้ำเย็นเพื่อให้เกิดค่าสมรรถนะในการทำงานสูงสุดจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ หลายปัจจัย ซึ่งปัจจัยสำคัญตัวหนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นคือ ค่าอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศ เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองพบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศ ทำให้สมรรถนะในการทำงานของหอทำน้ำเย็นมีค่าแตกต่างกัน โดยสามารถวัดได้จากขีดความสามารถในการทำงานของหอทำน้ำเย็น



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบขีดความสามารถการทำงานของหอทำน้ำเย็นที่ค่าอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.299, 1.225 และ 0.760

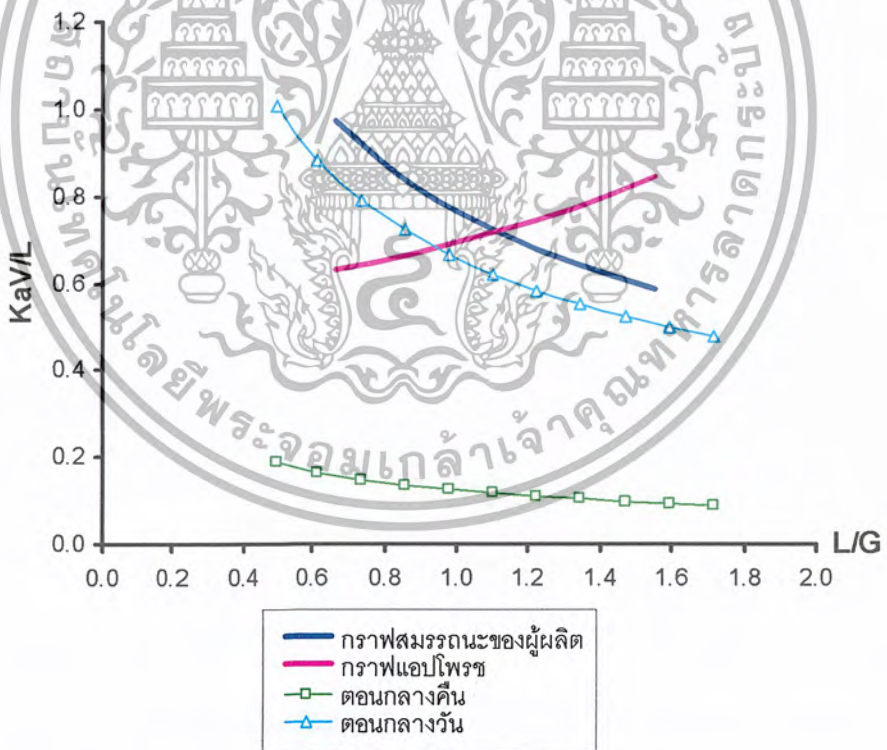
รูปที่ 4.9 เป็นกราฟที่ได้มาจากการทดลองปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศจาก 0.760, 1.255 จนถึง 1.299 ในสภาวะที่ใช้แผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดเดียวกัน โดยจากกราฟพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นมีผลทำให้สมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นเพิ่มขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จากค่าขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 35.89, 85.01 จนถึง 96.47 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่สภาวะออกแบบ

ตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศแล้วส่งผลให้สมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นเพิ่มขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้โดยปรากฏการณ์การกระจายตัวของน้ำ

โดยปกติผู้ผลิตจะออกแบบให้อัตราการหมุนของหัวฉีดกระจายน้ำสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่หอทำน้ำเย็น ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่หอทำน้ำเย็น จึงทำให้อัตราการหมุนของหัวฉีดกระจายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น หยดน้ำจึงสามารถกระจายตัวบนแผงกระจายฟิล์มน้ำได้ดี ส่งผลให้พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากหยดน้ำมีค่ามากขึ้นด้วย

#### 4.3.2 ผลของช่วงเวลาในการเดินเครื่องต่อค่าสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็น

การเดินเครื่องหอทำน้ำเย็นในทางอุตสาหกรรมนั้น บางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องเปิดเดินเครื่องตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งช่วงเวลาที่แตกต่างกันในวันหนึ่ง ๆ นั้น มีผลต่อค่าสมรรถนะของหอทำน้ำเย็น ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาเดินเครื่องหอทำน้ำเย็นและค่าสมรรถนะของเครื่องหอทำน้ำเย็น โดยให้อัตราการไหลของน้ำคงที่ที่ 0.5 ลิตร/นาที่ อุณหภูมิของน้ำขาเข้าคงที่ที่ 30 องศาเซลเซียส ค่าอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศคงที่ที่ 1.225 ได้ผลดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบขีดความสามารถการทำงานของหอทำน้ำเย็นระหว่างการเดินเครื่องตอนกลางวันกับตอนกลางคืน

จากรูปที่ 4.10 จะพบว่าหอทำน้ำเย็นที่เดินเครื่องตอนกลางคืนนั้นจะมีค่าสมรรถนะต่ำมากเมื่อเทียบกับการเดินเครื่องตอนกลางวัน ทั้งนี้เนื่องจากในตอนกลางคืนนั้นอากาศจะมีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่าตอนกลางวันมาก เป็นผลทำให้การถ่ายโอนความร้อนจากน้ำไปสู่อากาศเป็นไปได้น้อย เพราะการถ่ายโอนความร้อนส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในหอทำน้ำเย็นจะมาจากการระเหยของน้ำ ดังนั้นเมื่อสภาวะความชื้นในอากาศมีค่าสูงมากๆ ก็จะส่งผลต่อสมรรถนะของหอทำน้ำเย็น ทำให้หอทำน้ำเย็นมีสมรรถนะต่ำมาก หรืออาจจะไม่สามารถทำความเย็นได้เลย

#### 4.4 ผลของชนิดของแผงกระจายฟิล์มน้ำที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็น

นอกจากอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศที่เป็นตัวแปรสำคัญซึ่งมีผลต่อสมรรถนะในการทำงานของหอทำน้ำเย็น ตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาเพื่อให้หอทำน้ำเย็นทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ คือ ชนิดของแผงกระจายฟิล์มน้ำ

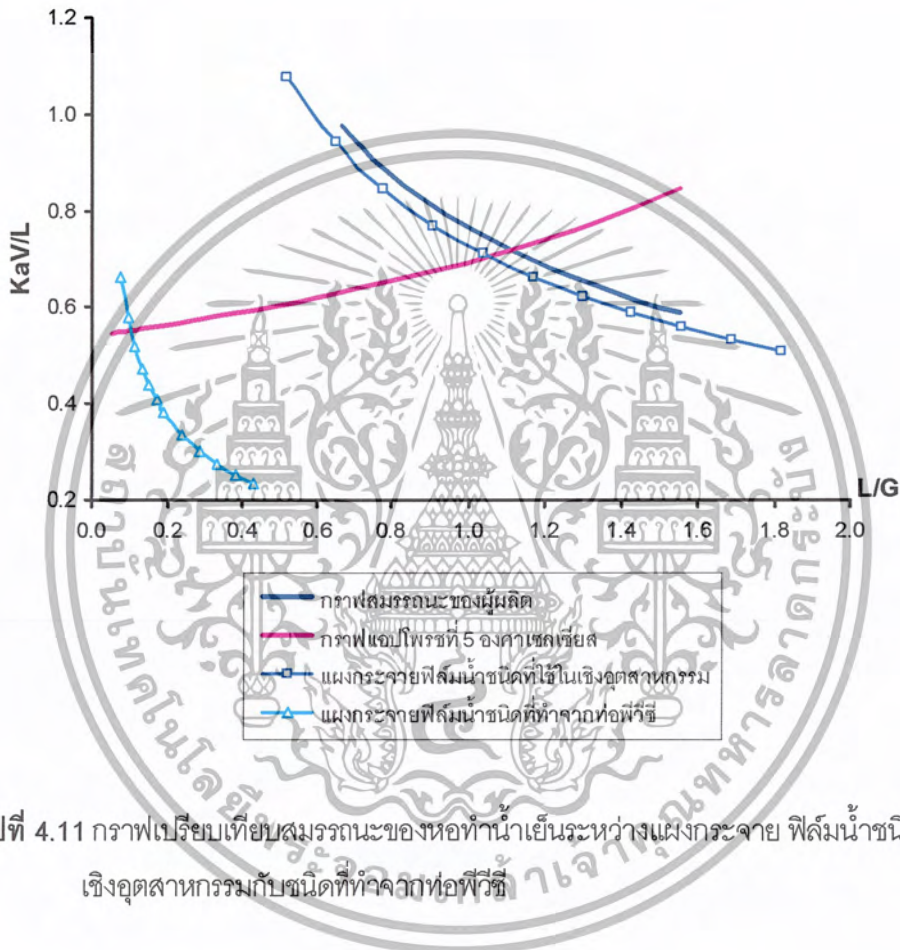
##### 4.4.1 ผลของชนิดของแผงกระจายฟิล์มน้ำที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็น

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วเมื่อตอนต้นว่าชนิดของแผงกระจายน้ำก็เป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทดลองเปรียบเทียบขีดความสามารถในการทำงานของหอทำน้ำเย็นระหว่างแผงกระจายฟิล์มน้ำ 2 ชนิดคือแผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมกับแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซีซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัส 21.79 เพอร์เซ็นต์ของแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม ที่อุณหภูมิของน้ำขาเข้า 30 องศาเซลเซียสและอัตราการไหลของน้ำเท่ากันคือ 0.53 ลิตร/วินาที จากกราฟรูปที่ 4.11 จะพบว่าเมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสของแผงกระจายฟิล์มน้ำแตกต่างกันมาก มีผลทำให้ขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นแตกต่างกันมากตามไปด้วย ซึ่งสามารถวัดได้จากค่าขีดความสามารถในการทำงานของหอทำน้ำเย็น โดยหอทำน้ำเย็นที่ใช้แผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้กันทางอุตสาหกรรมมีค่าขีดความสามารถการทำงานเป็น 96.49 เพอร์เซ็นต์ของสภาวะออกแบบ ส่วนหอทำน้ำเย็นที่ใช้แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซีมีค่าขีดความสามารถในการทำงานน้อยกว่าโดยมีค่าเพียง 10.67 เพอร์เซ็นต์ของสภาวะออกแบบเท่านั้น

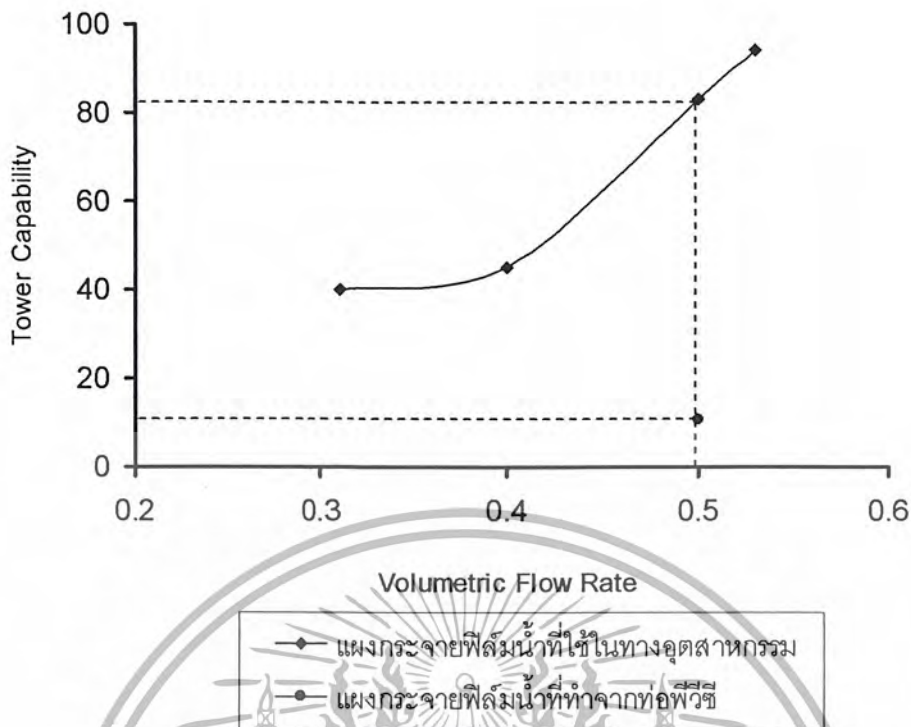
โดยผลที่ได้จากกราฟรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าชนิดของแผงกระจายฟิล์มน้ำมีผลต่อสมรรถนะของหอทำน้ำเย็น โดยที่แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมนั้นจะมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซี โดยแผงกระจายฟิล์มน้ำที่มีพื้นที่ผิวสัมผัส

มากจะมีผลทำให้อากาศและน้ำมีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้น อัตราการโอนความร้อนที่เกิดขึ้นจึงมีค่ามากกว่าแผงกระจายฟิล์มน้ำที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยกว่า

รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นที่ใช้แผงกระจายฟิล์มน้ำทั้งสองชนิด จะพบว่าที่อัตราการไหลที่เท่ากันค่าขีดความสามารถของแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมจะมีค่าถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่ออกแบบ ส่วนแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซีจะมีค่าขีดความสามารถเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่ออกแบบเท่านั้น



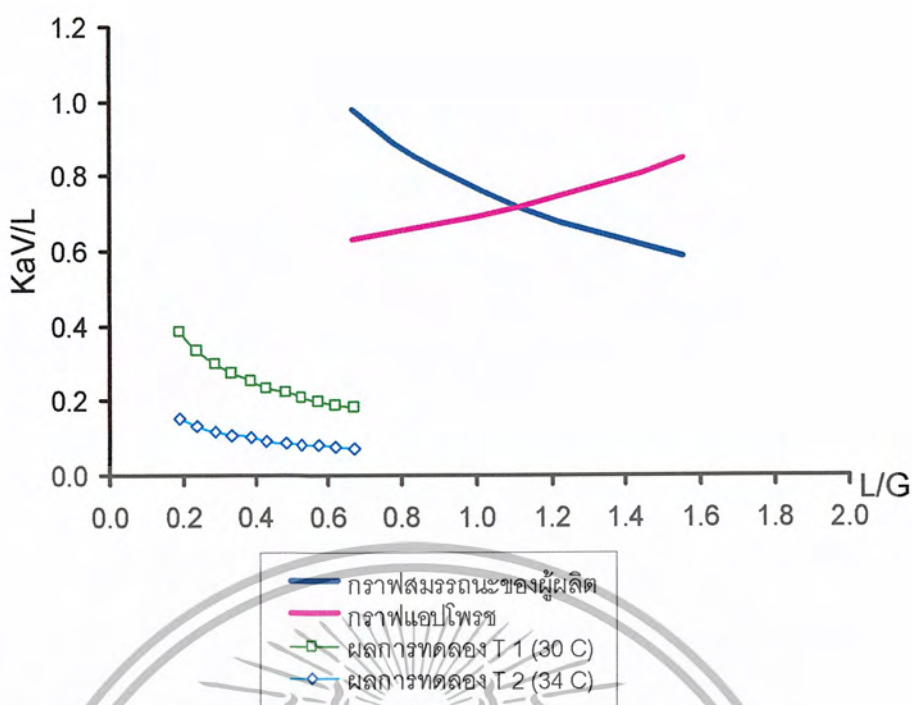
รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบสมรรถนะของหอทำน้ำเย็นระหว่างแผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมกับชนิดที่ทำจากท่อพีวีซี



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบขีดความสามารถการทำงานของหอทำน้ำเย็นระหว่างแผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมกับชนิดที่ทำจากท่อพีวีซี

#### 4.4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำขาเข้าที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็น

นอกจากอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศ และชนิดของแผงกระจายฟิล์มน้ำแล้ว อุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้าก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะในการทำงานของหอทำน้ำเย็น จากการทดลองเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิของน้ำขาเข้าหอทำน้ำเย็น ที่ค่าอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศเดียวกันคือ 1.299 พบว่า อุณหภูมิของน้ำขาเข้าหอทำน้ำเย็นมีความสัมพันธ์กับปริมาณขีดความสามารถที่หอทำน้ำเย็นจะทำได้ ดังนั้นในการออกแบบหอทำน้ำเย็นจึงต้องคำนึงถึงอุณหภูมิของน้ำขาเข้าด้วย การทดลองนี้เป็นการทดลองเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าของน้ำจาก 30 °C เป็น 34 °C โดยให้อัตราการไหลของน้ำคงที่ที่ 0.5 ลิตร/นาที และใช้แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซี ได้ผลดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบขีดความสามารถการทำงานของห่อทำน้ำเย็นระหว่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้าที่ 30 °C กับ 34 °C

จากรูปที่ 4.13 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำขาเข้าเพิ่มจาก 30 °C เป็น 34 °C จะพบว่าค่าสมรรถนะของห่อทำน้ำเย็นจะลดลง เนื่องจากแผงกระจายฟิล์มน้ำแต่ละชนิดนั้นจะมีค่าพื้นที่ผิวสัมผัสแตกต่างกันออกไปตามการออกแบบ ฉะนั้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนก็จะแตกต่างกันไปตามค่าพื้นที่ผิวสัมผัสของแผงกระจายฟิล์มน้ำแต่ละชนิด ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.1 ดังนั้นเมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิของน้ำขาเข้าห่อทำน้ำเย็นมากขึ้นมากกว่าค่าที่แผงกระจายฟิล์มน้ำนั้นทำได้ จะมีผลทำให้สมรรถนะของห่อทำน้ำเย็นลดลง ดูได้จากค่าขีดความสามารถของห่อทำน้ำเย็นที่ลดลง ดูได้จากค่าขีดความสามารถของห่อทำน้ำเย็นที่อุณหภูมิน้ำขาเข้า 30 องศาเซลเซียสจะมีค่า 10 เปอร์เซ็นต์ของสภาวะที่ออกแบบ และที่ 34 องศาเซลเซียสจะมีค่าแค่ 1 เปอร์เซ็นต์

# บทที่ 5

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ค่าสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็น โดยใช้ชุดทดลองหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการขนาด 3 ตันความเย็นที่สร้างขึ้นเป็นเครื่องทดสอบสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ชุดทดลองหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้นเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็น มีลักษณะเป็นชุดอุปกรณ์การทดลองที่มีระบบการหมุนเวียนของน้ำเป็นระบบปิด ซึ่งชุดทดลองหอทำน้ำเย็นในระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้นประกอบด้วย หอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดขนาด 3 ตันความเย็น ถึงเก็บน้ำ อุปกรณ์หมุนเวียนน้ำ อุปกรณ์ทำความร้อน และอุปกรณ์การวัดต่าง ๆ โดยผลจากการทดสอบการเดินเครื่องพบว่าสามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำขาเข้าได้ในช่วง 10 ถึง 33 ลิตรต่อวินาที ส่วนอัตราการไหลของอากาศจะคงที่ที่ 25 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และน้ำร้อนที่ใช้ในการทดลองจะมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาเดินเครื่องจนเข้าสู่สมดุลประมาณ 30 – 45 นาที

2. จากการวิเคราะห์ค่าสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นในรูปแบบของขีดความสามารถในการทำน้ำเย็น โดยพิจารณาจากค่าจำนวนหน่วยของการถ่ายเท (KaV/L) พบว่าที่สภาวะออกแบบมีค่าจำนวนหน่วยของการถ่ายเทเท่ากับ 0.718 ที่อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 1.111 และเมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาคำนวณหาค่าจำนวนหน่วยของการถ่ายเทพบว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วง 0.533 ถึง 0.636 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าที่ผู้ผลิตได้ออกแบบไว้ ส่งผลให้สมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นที่ได้มีค่าน้อย โดยสามารถวัดได้จากขีดความสามารถในการทำงานของหอทำน้ำเย็น ซึ่งมีค่า 76.69 ถึง 96.49 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่สภาวะออกแบบเท่านั้น

3. จากการทดลองปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศจาก 0.760, 1.255 จนถึง 1.299 ในสภาวะที่ใช้แผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดเดียวกันพบว่าเมื่อค่าอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นมีผลทำให้สมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นเพิ่มขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จากค่าขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 35.89, 85.01 จนถึง 96.47 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่สภาวะออกแบบ ตามลำดับ

4. จากการทดลองเปรียบเทียบขีดความสามารถ ในการทำงานของหอทำน้ำเย็นระหว่างแผงกระจายฟิล์มน้ำ 2 ชนิดคือแผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมกับแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซีซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยกว่า 21.79 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิของน้ำขาเข้า 30 องศาเซลเซียสและอัตราการไหลของน้ำเท่ากันคือ 0.53 ลิตร/วินาที พบว่าหอทำน้ำเย็นที่ใช้แผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้กันในทางอุตสาหกรรมมีค่าขีดความสามารถการทำงานเป็น 96.49 เปอร์เซ็นต์ของสภาวะออกแบบ ส่วนหอทำน้ำเย็นที่ใช้แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซีมีค่าขีดความสามารถในการทำงานน้อยกว่าโดยมีค่าเพียง 10.67 เปอร์เซ็นต์ของสภาวะออกแบบเท่านั้น

5. จากการทดลองจะเห็นว่าแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ออกแบบมาสำหรับอุณหภูมิสูงสุดค่าหนึ่ง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำขาเข้าให้มากกว่าค่าที่ออกแบบไว้ จะทำให้ขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นลดลงจาก 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่ออกแบบเหลือเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่ออกแบบเท่านั้น

6. ช่วงเวลาที่เดินเครื่องหอทำน้ำเย็นก็มีความสำคัญไม่แพ้กัน ถ้าเดินเครื่องในช่วงเวลาที่อากาศมีความชื้นสูงๆ เช่น ตอนกลางคืนหรือวันที่มีฝนตก จะทำให้ขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นลดลงจาก 90 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่ออกแบบเหลือเพียง 6 เปอร์เซ็นต์ของค่าที่ออกแบบเท่านั้น

### ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

จากการศึกษาวิจัย พบว่าในการดำเนินการทดลองมีข้อบกพร่องในเรื่องของอุปกรณ์ทำความร้อน โดยอุปกรณ์ไม่สามารถทำความร้อนได้ตามอุณหภูมิที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ในการทดลองแต่ละสภาวะต้องใช้เวลานานเพื่อที่จะรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ อีกทั้งอุปกรณ์ทำความร้อนที่ติดตั้งอยู่มีไม่เพียงพอจึงทำให้อุณหภูมิของน้ำร้อนในสภาวะคงที่ลดลงมากจากอุณหภูมิเริ่มต้น และขณะทดลองเกิดการสูญเสียออกจากระบบเป็นจำนวนมากทำให้ระหว่างการทำทดลองต้องเติมน้ำเข้าสู่ระบบตลอดเวลาเป็นผลทำให้การทำทดลองขาดความต่อเนื่องและต้องใช้เวลามากในการที่จะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ดังเดิม

### ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยครั้งต่อไป

ในการวิจัยครั้งต่อไปควรมีการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องการปรับเปลี่ยนค่าความเร็วรอบของพัดลมดูดของหอทำน้ำเย็น และศึกษาการกระจายตัวของหยดน้ำในบริเวณต่าง ๆ ของหอทำน้ำเย็น รวมทั้งอาจทำการศึกษาสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นควบคู่กับระบบอื่น เช่น ระบบปรับอากาศ เป็นต้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา และนำไปใช้ในทางปฏิบัติในอนาคตอีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ขรรชัย โชคไพโรสิน. 2546. การศึกษาการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกระจายน้ำในหอทำน้ำเย็นแบบไหลสวนทาง.
- [2] Hill, G.B., E.J. Pring and P.D. Osborn. 1990. Cooling Tower Principle and Practice. Butterworth-Heinemann Ltd., London.
- [3] พันธุ์ศักดิ์ อำนาจตระกูล. 2545. การศึกษาสมรรถนะและสมการคุณลักษณะเฉพาะการทดสอบของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] ชัชชัย ศิริพิลา นพดล เลิศศรีสว่างวงศ์ สุจริต พลวิจิตรและ สุรจิตร์ ตรีรังสี. 2544. การควบคุมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของหอทำน้ำเย็น. วิทยานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] วิภาค อรรถนกุล. 2528. การศึกษาสมรรถนะของหอทำน้ำเย็นชนิดพัดลมดูด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [6] นีรัตน์ เดชไพบูลย์ และ กัมปนาท ไชยฤกษ์. 2535. การพัฒนาหอบายความร้อนแบบลมอัดไหลสวนทาง. วิทยานิพนธ์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [7] นที ลีมีประสิทธิ์ศักดิ์. 2534. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหอผึ่งน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [8] วศิษฐ ธีระเจตกุล. 2536. การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์และทดสอบแผงกระจายน้ำของหอบายความร้อนชนิดลมอัดแบบไหลสวนทาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [9] Nenad Milosavljevic and Pertti Heikkila. 2001. A comprehensive approach to cooling tower design. Applied Thermal Engineering 21, 899-915.

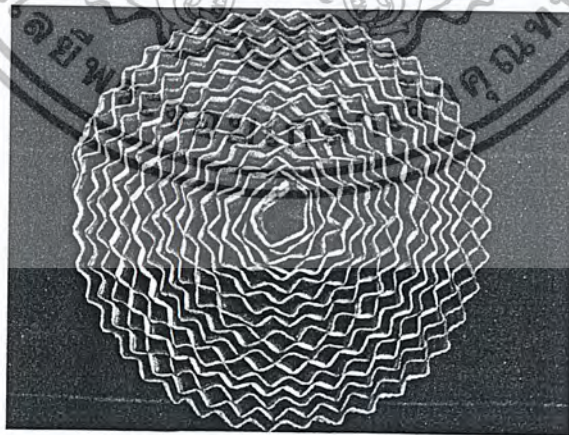
## ภาคผนวก ก

# การหาพื้นที่ผิวสัมผัสของแผงกระจายฟิล์มน้ำ

การหาพื้นที่ผิวสัมผัสที่แท้จริงของแผงกระจายฟิล์มน้ำนั้นเป็นเรื่องที่ยากต่อการคำนวณ เนื่องจากพื้นที่ผิวของแผงกระจายฟิล์มน้ำจะขึ้นอยู่กับการออกแบบแผงกระจายฟิล์มน้ำ อีกทั้งเราไม่ทราบแน่นอนว่าพื้นที่ที่น้ำและอากาศสัมผัสกันและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกันจริง ๆ นั้นเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดและมีพื้นที่เท่าไร ดังนั้นจึงไม่มีวิธีที่แน่นอนที่จะใช้คำนวณหาพื้นที่ผิวสัมผัสของแผงกระจายฟิล์มน้ำ สำหรับแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ทั้งสองแบบจะสามารถประมาณค่าพื้นที่ผิวสัมผัสได้ดังต่อไปนี้

1. การหาพื้นที่ผิวสัมผัสของแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม

รูปที่ ก.1 แบบจำลองแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม



รูปที่ ก.2 แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม

แผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 52 เซนติเมตร ประกอบไปด้วย วงกลมซ้อนกันอยู่ 17 วง ห่างกันประมาณวงละ 1.5 เซนติเมตร ตรงกลางกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกว้าง 2.54 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร ดังนั้นสามารถประมาณค่าพื้นที่ผิวสัมผัส ได้จากการหาเส้นรอบวงของแต่ละวงคูณด้วยความสูง โดยคิดรวมพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งทางด้านหน้า และด้านหลัง ผลการคำนวณได้แสดงไว้ในตาราง ก.1

ตารางที่ ก.1 พื้นที่ผิวสัมผัสของแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม

แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม

รัศมี (เซนติเมตร)	พื้นที่ผิวสัมผัส $2 \cdot \pi \cdot R \cdot 20$
26.00	3265.60
24.50	3077.20
23.00	2888.80
21.50	2700.40
20.00	2512.00
18.50	2323.60
17.00	2135.20
15.50	1946.80
14.00	1758.40
12.50	1570.00
11.00	1381.60
9.50	1193.20
8.00	1004.80
6.50	816.40
5.00	628.00
3.50	439.60
2.00	251.20
1.27	159.51
	30052.31

เมื่อ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวที่หาได้ต่อพื้นที่ผิวจริง เท่ากับ 1.4

เพราะฉะนั้นพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดหาได้จาก

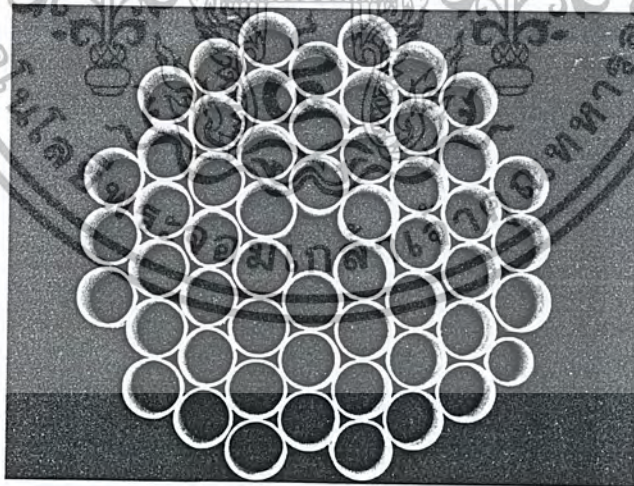
$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมด} &= \text{พื้นที่ผิวสัมผัส (ต่อชั้น)} \times 2 \text{ ด้าน} \times 2 \text{ ชั้น} \times 1.4 \\ &= 30052.31 \times 2 \times 2 \times 1.4 \\ &= 168292.936 \text{ ตารางเซนติเมตร} \end{aligned}$$

2. การหาพื้นที่ผิวสัมผัสของแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากพีวีซี

หาได้จากการหาเส้นรอบวงของท่อพีวีซีทั้งสองขนาดแล้วคูณด้วยความสูง จำนวนท่อ  
จำนวนชั้นและจำนวนด้านที่มีพื้นที่ผิวสัมผัส ได้แสดงไว้ในตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 พื้นที่ผิวสัมผัสของแผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซี

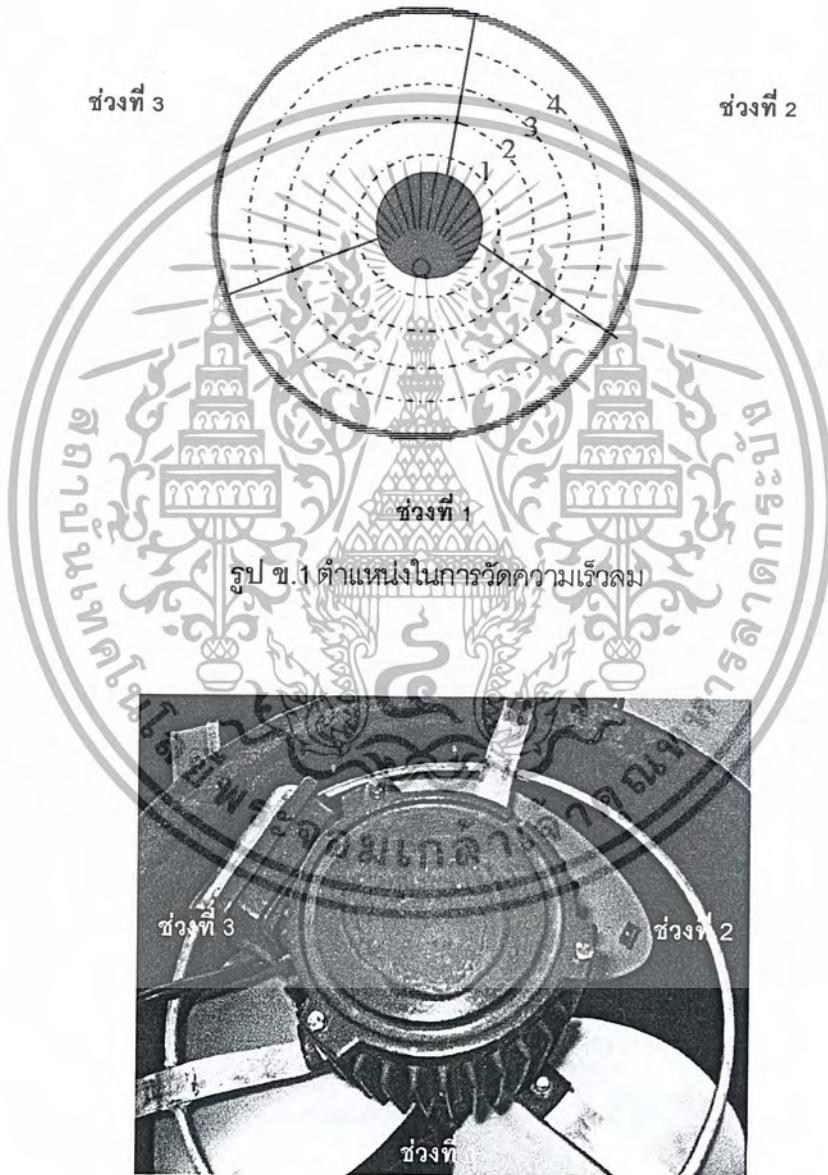
แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซี			
จำนวนท่อที่ใช้ต่อชั้น	จำนวนชั้นที่ใช้	รัศมี (เซนติเมตร)	พื้นที่ผิวสัมผัส $3.14 \times D \times 5 \times \text{จำนวนท่อที่ใช้} \times 2$
55.00	2.00	5.08	17546.32
80.00	2.00	3.81	19141.44
			36687.76



รูปที่ ก.3 แผงกระจายฟิล์มน้ำที่ทำจากท่อพีวีซี

## ภาคผนวก ข. การวัดค่าอัตราการไหลของอากาศ

การหาค่าอัตราการไหลของอากาศ (G) จะต้องทราบค่าความเร็วของอากาศที่ทางออกของหอทำน้ำเย็น ซึ่งการวัดความเร็วของอากาศจะใช้แอนนิโมมิเตอร์แบบใบพัดเป็นตัววัด โดยรูปที่ ข.1 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วของอากาศ ซึ่งผลที่ได้จากการวัดได้แสดงไว้ในตาราง ข.1 ถึง ข.10



รูป ข.1 ตำแหน่งในการวัดความเร็วลม

รูป ข.2 ส่วนบนของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทาง

ตาราง ข.1 ผลการวัดความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้  
ในทางอุตสาหกรรม

ครั้งที่วัด	ความเร็วของอากาศ (เมตร / วินาที)											
	ช่วงที่ 1				ช่วงที่ 2				ช่วงที่ 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.00	1.00	2.00	2.60	0.00	1.00	2.00	2.60	0.00	1.20	2.00	2.80
2	0.00	1.30	1.70	2.60	0.00	1.30	2.00	2.50	0.00	1.30	2.00	2.40
3	0.60	1.20	2.00	2.70	0.00	1.30	2.00	2.50	0.00	1.40	2.00	2.40
4	0.00	1.20	2.00	2.50	0.00	1.30	2.00	2.60	0.00	1.30	2.00	2.60
5	0.00	1.20	2.00	2.70	0.00	1.20	2.00	2.50	0.00	1.20	2.00	2.60
6	0.00	1.20	2.00	2.30	0.00	1.00	2.00	2.40	0.00	1.30	2.00	2.00
7	0.00	1.30	2.00	2.60	0.00	1.00	3.00	2.60	0.00	1.50	2.00	2.40
8	0.00	1.30	2.00	2.50	0.00	1.30	1.80	2.60	0.00	1.30	2.00	2.40
9	0.00	1.40	2.00	2.50	0.00	1.30	1.80	2.60	0.00	1.40	2.00	2.30
10	0.00	1.30	2.00	2.30	0.00	1.20	1.80	2.60	0.00	1.40	2.00	2.60
ค่าเฉลี่ย	0.06	1.24	1.97	2.53	0.00	1.19	2.04	2.55	0.00	1.33	2.00	2.45
ค่าความเร็วของอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 1.45												

ดังนั้นค่าอัตราการไหลของอากาศ = 1.45 (ความหนาแน่นของอากาศ)  
 = 1.45 (1,178)  
 = 1.708 กิโลกรัม / ตารางเมตร-วินาที

ตาราง ข.2 ผลการวัดความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ทำจากท่อพีวีซี

ครั้งที่วัด	ความเร็วของอากาศ (เมตร / วินาที)											
	ช่วงที่ 1				ช่วงที่ 2				ช่วงที่ 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	1.30	3.40	5.50	6.00	0.70	4.00	5.40	6.80	0.50	3.10	5.70	7.00
2	0.90	4.40	5.20	6.00	0.50	3.30	5.30	7.10	0.50	2.50	5.10	6.90
3	0.60	4.40	5.60	5.60	0.60	2.80	4.40	7.00	0.60	3.20	5.90	7.00
4	1.50	4.80	5.60	5.10	1.00	2.50	4.80	6.00	0.60	3.50	5.80	7.00
5	1.00	4.00	5.20	5.70	0.80	2.20	4.60	7.00	1.30	1.60	4.80	7.00
6	1.50	4.20	5.30	5.00	1.00	1.80	5.00	7.00	0.50	2.50	5.50	7.00
7	0.80	2.60	4.20	5.20	0.40	2.90	4.40	6.90	0.50	4.10	6.10	7.20
8	1.00	2.60	4.40	5.30	2.10	4.60	5.50	5.60	0.50	3.40	5.70	7.20
9	0.80	4.00	5.50	5.70	1.80	4.10	5.50	6.00	0.40	3.40	5.10	7.00
10	0.30	2.90	5.80	5.86	2.10	4.00	5.70	6.50	1.30	1.60	4.80	7.00
ค่าเฉลี่ย	0.97	3.73	5.23	5.55	1.10	3.22	5.06	6.59	0.67	2.89	5.45	7.03

ค่าความเร็วของอากาศเฉลี่ยเท่ากับ 3.96

ดังนั้นค่าอัตราการไหลของอากาศ = 1.96 (ความหนาแน่นของอากาศ)  
 = 3.96 (1.178)  
 = 4.665 กิโลกรัม / ตารางเมตร-วินาที

**ภาคผนวก ค.**  
**ค่าเอนทัลปีของอากาศอิมตัว**

ตาราง ค.1 ค่าเอนทัลปีของอากาศอิมตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	เอนทัลปีของอากาศอิมตัว (กิโลจูล/กิโลกรัมอากาศแห้ง)									
	ช่วงห่างอุณหภูมิ (°C)									
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	9.44	9.61	9.78	9.95	10.12	10.30	10.47	10.64	10.82	10.99
1	11.16	11.34	11.52	11.69	11.87	12.05	12.22	12.40	12.58	12.76
2	12.64	13.13	13.30	13.48	13.66	13.85	14.03	14.21	14.40	14.58
3	14.77	14.95	15.14	15.32	15.51	15.70	15.89	16.08	16.27	16.46
4	16.65	16.84	17.03	17.22	17.42	17.61	17.80	18.00	18.19	18.39
5	18.59	18.78	18.98	19.18	19.38	19.58	19.78	19.98	20.18	20.38
6	20.59	20.79	21.00	21.20	21.41	21.61	21.82	22.03	22.23	22.44
7	22.65	22.86	23.07	23.29	23.50	23.71	23.92	24.14	24.35	24.57
8	24.79	25.00	25.22	25.44	25.66	25.88	26.10	26.32	26.55	26.77
9	26.99	27.22	27.44	27.67	27.9	28.13	28.35	28.58	28.81	29.05
10	29.26	29.51	29.74	29.98	30.21	30.45	30.69	30.92	31.16	31.40
11	31.64	31.88	32.13	32.37	32.61	32.86	33.10	33.35	33.59	33.84
12	34.09	34.34	34.59	34.84	35.10	35.35	35.61	35.86	36.12	36.37
13	36.63	36.89	37.15	37.41	37.67	37.94	38.20	38.47	38.73	39.00
14	39.27	39.54	39.81	40.08	40.35	40.62	40.90	41.17	41.45	41.73
15	42.00	42.28	42.56	42.85	43.13	43.41	43.70	43.98	44.27	44.56
16	44.85	45.14	45.43	45.72	46.02	46.31	46.61	46.90	47.20	47.50
17	47.80	48.10	48.41	48.71	49.02	49.32	49.63	49.94	50.25	50.56
18	50.87	51.19	51.50	51.82	52.14	52.46	52.78	53.10	53.42	53.75
19	54.07	54.40	54.73	55.06	55.39	55.72	56.05	56.39	56.72	57.06
20	57.40	57.74	58.08	58.43	58.77	59.12	59.46	59.81	60.16	60.51
21	60.87	61.22	61.58	61.94	62.29	62.66	63.02	63.38	63.75	64.11
22	64.48	64.85	65.22	65.59	65.97	66.34	66.72	67.10	67.48	67.86
23	68.25	68.63	69.02	69.41	69.80	70.19	70.59	70.98	71.38	71.78
24	72.18	72.58	72.98	73.39	73.80	74.21	74.62	75.03	75.44	75.86
25	76.28	76.7	77.12	77.54	77.97	78.39	78.82	79.25	79.69	80.12
26	80.56	81	81.44	81.88	82.32	82.77	83.22	83.67	84.12	84.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.2 ค่าเอนทัลปีของอากาศอิมตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	เอนทัลปีของอากาศอิมตัว (กิโลจูล/กิโลกรัมอากาศแห้ง)									
	ช่วงห่างอุณหภูมิ (°C)									
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
27	85.03	85.49	85.95	86.41	86.87	87.34	87.81	88.28	88.75	89.22
28	85.70	90.18	90.66	91.14	91.63	92.11	92.60	93.09	93.59	94.08
29	94.58	95.08	95.58	96.09	96.60	97.11	97.62	98.13	98.65	99.17
30	99.69	100.21	100.74	101.26	101.79	102.33	102.86	103.40	103.94	104.48
31	103.03	105.57	106.12	106.63	107.23	107.79	108.35	108.91	109.48	110.04
32	110.61	111.19	111.76	112.34	112.92	113.50	114.09	114.68	115.27	115.86
33	116.46	117.06	117.66	118.27	118.88	119.49	120.10	120.72	121.34	121.96
34	122.59	123.21	123.84	124.48	125.11	125.75	126.40	127.04	127.69	128.34
35	129.00	129.66	130.32	130.98	131.65	132.32	132.99	133.67	134.35	135.03
36	135.72	136.41	137.10	137.80	138.50	139.20	139.91	140.62	141.33	142.05
37	142.77	143.49	144.21	144.94	145.68	146.41	147.16	147.90	148.65	149.40
38	150.15	150.91	151.67	152.44	153.21	153.98	154.76	155.54	156.32	157.11
39	157.90	158.70	159.50	160.30	161.11	161.92	162.73	163.55	164.37	165.20
40	166.03	166.87	167.71	168.55	169.40	170.25	171.10	171.96	172.83	173.69
41	174.57	175.44	176.32	177.21	178.10	178.99	179.89	180.79	181.70	182.61
42	183.53	184.45	185.37	186.30	187.24	188.18	189.12	190.07	191.02	191.98
43	192.94	193.91	194.88	195.86	196.84	197.83	198.82	199.82	200.82	201.82
44	202.84	203.85	204.87	205.80	206.93	207.97	209.01	210.06	211.11	212.17
45	213.24	214.31	215.38	216.46	217.55	218.64	219.73	220.84	221.94	223.06
46	224.18	225.30	226.43	227.57	228.71	229.86	231.01	232.17	233.34	234.51
47	235.69	236.87	238.06	239.26	240.46	241.67	242.88	244.10	245.33	246.56
48	247.80	249.05	250.30	251.56	252.83	254.10	255.38	256.67	257.96	259.26
49	260.67	261.88	263.20	264.53	265.86	267.20	268.55	269.90	271.27	272.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ค่าจำนวนหน่วยของการถ่ายเท (KaVL) ของการทดลองต่าง ๆ

กำหนดให้

- $T_1$  อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น
- $T_2$  อุณหภูมิของน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น
- $T_{wb}$  อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ
- $L/G$  อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของน้ำต่ออัตราการไหลของอากาศ
- $KaVL$  จำนวนหน่วยของการถ่ายเท

ตาราง ง.1 ค่าจำนวนหน่วยของการถ่ายเทที่การทดลองต่าง ๆ

การทดลองที่	$T_1$	$T_2$	$t_{wb}$	$L/G$	$KaVL$
1	28.0	26.9	25.1	1.299	0.621
2	30.6	29.3	27.5	1.299	0.636
3	32.0	29.9	27.0	1.299	0.626
4	32.0	30.4	28.0	1.225	0.571
5	31.0	29.3	26.5	1.225	0.533
6	31.6	30.0	27.6	1.225	0.583
7	30.0	28.3	25.0	0.760	0.436
8	30.0	28.2	25.0	0.760	0.474
9	30.8	28.9	25.0	0.760	0.407
10	29.2	28.5	26.1	0.478	0.242
11	29.0	28.3	26.5	0.478	0.220
12	29.2	28.4	25.6	0.478	0.240
13	34.0	33.2	25.6	0.478	0.087
14	33.4	33.0	25.6	0.478	0.044
15	32.8	32.3	25.8	0.478	0.062
16	31.0	30.5	26.5	1.225	0.109
17	30.5	28.7	24.8	0.980	0.408

หมายเหตุ: การทดลองที่ 1-9 และ 16-17 ใช้แผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม  
 การทดลองที่ 10-15 ใช้แผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ทำจากท่อพีวีซี

ภาคผนวก จ

ตารางผลการทดสอบสมรรถนะของหอทำน้ำเย็นของการทดลองต่าง ๆ

ตาราง จ.1 ผลการทำสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 1

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	26.5	27.0	27.0	27.0	26.5	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	26.9
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	25.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	25.1
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	28.5	28.6	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.6	28.7	28.5	28.6	28.3	28.5
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	58.0	57.2	58.0	58.0	58.0	58.0	58.0	57.6	57.8	57.8	57.0	56.0	57.6
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	60.0	60.0	61.0	60.0	61.0	61.0	61.0	60.0	60.0	60.0	58.0	58.0	60.0
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)													0.53

ตาราง ๑.2 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 2

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.6
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	28.0	28.0	28.0	28.0	29.3
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.0	27.5
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	30.0	30.0	29.9	29.8	29.7	29.7	29.7	29.8	29.7	29.7	29.7	29.6	29.8
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	65.6	64.5	65.0	65.5	59.9	60.2	58.7	59.5	59.3	59.6	59.0	59.0	61.3
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	66.0	65.0	65.0	65.0	64.0	64.0	64.0	64.0	63.0	63.0	63.0	63.0	64.1
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.53												

ตาราง ๑.3 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 3

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	29.0	29.9
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	30.2	30.5	30.6	30.7	30.6	30.6	30.6	30.6	30.5	30.5	30.6	30.5	30.5
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	60.8	60.2	59.8	60.4	59.5	59.5	59.5	60.3	60.2	60.4	60.0	60.0	60.1
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	63.0	63.0	63.0	64.0	64.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.0	63.2
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.53												

ตาราง ๑.4 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 4

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	30.0	30.0	30.0	30.4
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	29.7	29.7	29.7	29.7	29.4	29.4	29.5	29.5	29.7	29.7	29.9	29.9	29.7
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	64.3	64.3	65.1	65.1	65.8	65.8	67.1	67.4	66.7	66.7	67.2	67.2	66.0
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	68.0	68.0	69.0	69.0	69.0	69.0	68.0	68.0	70.0	70.0	70.0	70.0	69.0
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.50												

ตาราง ๑.5 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 5

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	30.0	30.0	30.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	30.0	29.3
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.5
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	29.0	29.2	29.2	29.0	29.2	29.2	29.2	29.2	29.2	29.0	29.0	29.0	29.1
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	67.9	67.9	67.9	67.9	68.1	68.1	68.4	68.4	68.3	68.2	68.2	68.3	68.1
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	71.0	71.0	72.0	71.0	72.0	72.0	72.0	73.0	73.0	73.0	73.0	73.0	72.2
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.50												

ตาราง ๑.6 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 6

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.6
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.6
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	30.0	30.0	29.2	29.0	29.2	29.2	29.2	29.2	28.9	28.9	28.9	28.9	29.2
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	67.9	67.9	67.9	67.9	68.1	68.1	68.4	68.4	68.3	68.2	68.2	68.3	68.1
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	71.0	71.0	72.0	71.0	72.0	72.0	72.0	73.0	73.0	73.0	73.0	73.0	72.2
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.50												

ตาราง ๑.7 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 7

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	28.8	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.0	28.0	27.5	27.5	28.6	28.6	28.3
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	31.3	31.3	31.4	31.4	31.3	31.3	31.0	31.0	31.2	31.2	31.3	31.3	31.3
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	49.6	49.6	49.1	49.1	49.5	49.5	49.2	49.2	49.0	49.0	49.5	49.5	49.3
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	53.0	53.0	52.0	52.0	53.0	53.0	52.0	52.3
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.31												

ตาราง ๑.8 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 8

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	28.0	28.0	28.0	28.9	28.9	28.5	28.5	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.2
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	31.2	30.7	30.7	30.9	30.9	30.9	31.2	30.9	30.8	30.8	30.8	30.8	30.9
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	49.0	49.0	49.0	49.0	50.0	50.0	50.5	50.5	50.5	50.5	50.5	50.5	49.9
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	50.0	52.0	52.0	52.0	52.0	50.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	51.7
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.31												

ตาราง ๑.9 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 9

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	30.0	30.8
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	28.0	28.5	28.9
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	31.2	31.0	31.0	31.0	31.0	30.9	31.2	30.9	30.8	30.8	30.8	30.8	31.0
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	49.0	49.0	49.0	49.0	50.0	50.0	50.5	50.4	49.0	49.8	49.6	49.7	49.6
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	50.0	52.0	52.0	52.0	52.0	50.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	51.7
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.31												

ตาราง จ.10 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 10

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	30.0	30.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.2
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	29.5	29.2	28.7	28.4	28.3	28.1	28.1	28.0	28.5	28.3	28.5	28.5	28.5
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.5	26.0	26.0	26.5	26.1
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	28.4	28.3	28.2	28.1	28.0	28.0	27.8	27.8	27.7	27.7	27.7	27.6	27.9
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	63.0	63.0	63.0	62.0	62.0	62.3	62.3	63.0	62.9	63.0	63.0	63.0	62.7
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	68.0	69.0	69.0	68.0	68.0	67.0	67.0	68.0	68.0	68.0	68.0	67.0	67.9
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.53												

ตาราง จ.11 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 11

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	29.0	29.0	29.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.3
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.5
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	29.2	29.1	29.1	28.9	28.9	28.9	29.1	28.9	29.0	29.0	29.2	29.2	29.0
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	63.1	63.0	63.3	63.2	63.0	62.1	62.2	62.2	61.4	62.1	60.3	60.3	62.2
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	68.0	69.0	69.0	68.0	68.0	68.0	67.0	68.0	67.0	67.0	66.0	66.0	67.6
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.53												

ตาราง จ.12 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 12

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	30.0	30.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.2
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	29.5	29.5	28.5	28.5	28.5	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.4
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	26.0	26.0	25.5	25.0	25.0	26.0	26.0	25.0	25.5	26.0	26.0	25.5	25.6
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	29.2	29.1	29.0	29.0	28.9	28.9	28.9	28.9	28.8	28.7	28.6	28.5	28.9
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	62.0	62.3	62.4	61.7	61.8	61.8	62.4	62.7	63.5	64.8	65.1	65.1	63.0
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	66.0	67.0	67.0	66.0	66.0	66.0	67.0	67.0	67.0	68.0	69.0	69.0	67.1
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.53												

ตาราง จ.13 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 13

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	33.0	33.0	33.0	33.5	33.0	33.0	33.0	33.0	33.5	33.5	33.5	33.0	33.2
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	29.6	29.8	29.8	30.1	30.2	29.8	29.8	29.8	30.1	30.1	30.3	30.3	30.0
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	60.6	61.2	61.2	59.8	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.3	60.3	60.3	60.4
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	65.0	65.0	65.0	64.0	64.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	65.0	64.8
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.53												

ตาราง จ.13 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 13

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	35.0	34.5	34.0	33.5	33.2	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.4
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	34.0	34.0	33.5	33.0	33.0	32.9	32.8	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	33.0
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	25.5	25.5	25.5	25.5	25.0	25.0	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.2
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	30.6	30.4	30.3	30.3	30.3	30.3	30.4	30.3	30.2	30.3	30.2	30.3	30.3
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	56.9	57.3	57.3	57.4	57.3	57.2	57.2	57.2	57.7	57.3	57.4	57.4	57.3
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.53												

ตาราง จ.14 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 14

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	35.0	34.5	34.0	33.5	33.2	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0	33.4
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	34.0	34.0	33.5	33.0	33.0	32.9	32.8	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	33.0
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	25.5	25.5	25.5	25.5	25.0	25.0	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.2
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	30.6	30.4	30.3	30.3	30.3	30.3	30.4	30.3	30.2	30.3	30.2	30.3	30.3
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	56.9	57.3	57.3	57.4	57.3	57.2	57.2	57.2	57.7	57.3	57.4	57.4	57.3
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.53												

ตาราง จ.15 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 15

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.8
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.3
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	72.3	72.3	73.3	73.8	73.8	73.8	72.3	73.8	72.3	73.8	72.3	73.3	73.1
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	79.0	79.0	80.0	80.0	80.0	80.0	79.0	80.0	79.0	80.0	79.0	80.0	79.6
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.50												

ตาราง จ.16 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 16

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.5
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	29.0
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	24.8
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	31.3	31.3	31.2	31.3	31.2	31.2	31.2	31.2	31.2	31.2	31.2	31.2	31.2
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	50.6	50.6	50.6	50.6	50.8	50.8	50.8	49.9	49.9	49.9	50.6	50.6	50.5
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.40												

ตาราง จ.17 ผลการทำสอบสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดการทดลองที่ 17

รายการ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ค่าเฉลี่ย
อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.5
อุณหภูมิน้ำขาออกจากหอทำน้ำเย็น (องศาเซลเซียส)	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	28.5	29.0
อุณหภูมิกระเปาะเปียก (องศาเซลเซียส)	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	24.8
อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (องศาเซลเซียส)	31.3	31.3	31.2	31.3	31.2	31.2	31.2	31.2	31.2	31.2	31.2	31.2	31.2
ความชื้นอากาศขาเข้าหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	50.6	50.6	50.6	50.6	50.8	50.8	50.8	49.9	49.9	49.9	50.6	50.6	50.5
ความชื้นอากาศขาออกจากหอทำน้ำเย็น (ร้อยละ)	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/วินาที)	0.40												

ภาคผนวก จ.

ค่าขีดความสามารถในการทำงานของการทดลองต่าง ๆ

การหาขีดสมรรถนะการทำงานของหอทำน้ำเย็นสามารถพิจารณาได้จากค่าขีดความสามารถในการทำงานของหอทำน้ำเย็น ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าขีดความสามารถของหอทำน้ำเย็นได้จากสมการที่ (48)

$$\text{Tower capability} = \frac{(L/G)_{\text{test}}}{(L/G)_{\text{design}}} \times 100 \quad (48)$$

โดยค่าขีดความสามารถในการทำงานของหอทำน้ำเย็นของการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ ได้แสดงค่าไว้ในตาราง จ.1

ตาราง จ.1 ขีดความสามารถในการทำงานของหอทำน้ำเย็นของการทดลองต่าง ๆ

การทดลองที่	L/G	(L/G) <sub>test</sub>	(L/G) <sub>design</sub>	%Capacity
1	1.299	1.046	1.111	94.15
2	1.299	1.072	1.111	96.49
3	1.299	1.054	1.111	94.87
4	1.225	0.924	1.111	83.17
5	1.225	0.852	1.111	76.69
6	1.225	0.944	1.111	84.97
7	0.760	0.443	1.111	39.87
8	0.760	0.501	1.111	45.09
9	0.760	0.399	1.111	35.91
10	0.478	0.111	1.111	9.99
11	0.478	0.119	1.111	10.71
12	0.478	0.110	1.111	9.90
13	0.478	0.020	1.111	1.80
14	0.478	0.007	1.111	0.63
15	0.478	0.012	1.111	1.08
16	0.478	0.076	1.111	6.84
17	0.478	0.502	1.111	45.18

หมายเหตุ: การทดลองที่ 1-9 และ 16-17 ใช้แผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม  
 การทดลองที่ 10-15 ใช้แผงกระจายฟิล์มน้ำชนิดที่ทำจากท่อพีวีซี

ภาคผนวก ข.

การคำนวณค่าจำนวนหน่วยของการถ่ายเท  
โดยวิธีของ Tchebycheff

ตาราง ข.1 การคำนวณค่า  $KaV/L$  ที่ 60% ของค่าที่ภาวะออกแบบ

การคำนวณค่า  $KaV/L$  ที่สภาวะออกแบบ

$T_1$  37.0     $T_2$  32.0  
 $t_{wb}$  27     $T_1 - T_2$  5.0  
 $L/G$  0.667

T	$h_w$	h	$h_w - h$	$1/(h_w - h)$	
$T_2 = T_{cw,out}$	32.0	110.61	$h_i = h_{T_{wb,in}}$	85.030	-
$T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$	32.5	113.50	$h_i + 0.1(L/G)C_{pl}(T_1 - T_2)$	86.427	27.073
$T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$	34.0	122.59	$h_i + 0.4(L/G)C_{pl}(T_1 - T_2)$	90.619	31.971
$T_2 + 0.6(T_1 - T_2)$	35.0	129.00	$h_i + 0.6(L/G)C_{pl}(T_1 - T_2)$	93.414	35.586
$T_2 + 0.9(T_1 - T_2)$	36.5	139.20	$h_i + 0.9(L/G)C_{pl}(T_1 - T_2)$	97.606	41.594
$T_1 = T_{hw,in}$	37.0	142.77	$h_i + 1.0(L/G)C_{pl}(T_1 - T_2)$	99.004	-
			$\sum (1/\Delta h)$		0.1204

$KaV/L = (T_1 - T_2)/4 \times (4.19) \times \sum (1/\Delta h)$   
 $= (5/4) \times (4.19) \times (0.1204)$   
 $= 0.630$

ตาราง ข.2 การคำนวณค่า  $KaV/L$  ที่ 70% ของค่าที่ภาวะออกแบบ

การคำนวณค่า $KaV/L$ ที่สภาวะออกแบบ						
$T_1$	37.0	$T_2$	32.0			
$t_{wb}$	27	$T_1 - T_2$	5.0			
$L/G$	0.778					
$T$	$h_w$	$h$		$h_w - h$	$1/(h_w - h)$	
$T_2 = T_{cw,out}$	32.0	110.61	$h_1 = h_{twb,in}$	85.030	-	-
$T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$	32.5	113.50	$h_1 + 0.1(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	86.660	26.840	0.0373
$T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$	34.0	122.59	$h_1 + 0.4(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	91.550	31.040	0.0322
$T_2 + 0.6(T_1 - T_2)$	35.0	129.00	$h_1 + 0.6(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	94.809	34.191	0.0292
$T_2 + 0.9(T_1 - T_2)$	36.5	139.20	$h_1 + 0.9(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	99.699	39.501	0.0253
$T_1 = T_{hw,in}$	37.0	142.77	$h_1 + 1.0(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	101.329	-	-
$\sum (1/\Delta h)$					0.1240	
$KaV/L = (T_1 - T_2)/4 \times (4.19) \times \sum (1/\Delta h)$ $= (5/4) \times (4.19) \times (0.1240)$ $= 0.650$						

ตาราง ข.3 การคำนวณค่า  $KaV/L$  ที่ 80% ของค่าที่ภาวะออกแบบ

การคำนวณค่า $KaV/L$ ที่สภาวะออกแบบ						
$T_1$	37.0	$T_2$	32.0			
$t_{wb}$	27	$T_1 - T_2$	5.0			
$L/G$	0.889					
$T$	$h_w$	$h$		$h_w - h$	$1/(h_w - h)$	
$T_2 = T_{cw,out}$	32.0	110.61	$h_1 = h_{twb,in}$	85.030	-	-
$T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$	32.5	113.50	$h_1 + 0.1(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	86.892	26.608	0.0376
$T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$	34.0	122.59	$h_1 + 0.4(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	92.480	30.110	0.0332
$T_2 + 0.6(T_1 - T_2)$	35.0	129.00	$h_1 + 0.6(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	96.205	32.795	0.0305
$T_2 + 0.9(T_1 - T_2)$	36.6	139.20	$h_1 + 0.9(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	101.792	37.408	0.0267
$T_1 = T_{hw,in}$	37.0	142.77	$h_1 + 1.0(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	103.655	-	-
$\sum (1/\Delta h)$					0.1280	
$KaV/L = (T_1 - T_2)/4 \times (4.19) \times \sum (1/\Delta h)$ $= (5/4) \times (4.19) \times (0.1280)$ $= 0.671$						

ตาราง ข.4 การคำนวณค่า  $KaVL$  ที่ 90% ของค่าที่ภาวะออกแบบ

การคำนวณค่า  $KaVL$  ที่สภาวะออกแบบ

$T_1$	37.0	$T_2$	32.0
$t_{wb}$	27	$T_1 - T_2$	5.0
$L/G$	0.884		

T	$h_w$	h		$h_w - h$	$1/(h_w - h)$	
$T_2 = T_{cw,out}$	32.0	110.61	$h_1 = h_{Twb,in}$	85.030	-	-
$T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$	32.5	113.50	$h_1 + 0.1(L/G)C_p(T_1 - T_2)$	87.125	26.375	0.0379
$T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$	34.0	122.59	$h_1 + 0.4(L/G)C_p(T_1 - T_2)$	93.410	29.180	0.0343
$T_2 + 0.6(T_1 - T_2)$	35.0	129.00	$h_1 + 0.6(L/G)C_p(T_1 - T_2)$	97.600	31.400	0.0318
$T_2 + 0.9(T_1 - T_2)$	36.5	139.20	$h_1 + 0.9(L/G)C_p(T_1 - T_2)$	103.885	35.315	0.0283
$T_1 = T_{hw,in}$	37.0	142.77	$h_1 + 1.0(L/G)C_p(T_1 - T_2)$	105.980	-	-
				$\sum (1/\Delta h)_i$		0.1323

$$\begin{aligned}
 KaVL &= (T_1 - T_2)/4 \times (4.19) \times \sum (1/\Delta h) \\
 &= (5/4) \times (4.19) \times (0.1323) \\
 &= 0.693
 \end{aligned}$$

ตาราง ข.5 การคำนวณค่า  $KaV/L$  ที่ 100% ของค่าที่ภาวะออกแบบการคำนวณค่า  $KaV/L$  ที่สภาวะออกแบบ

$T_1$	37.0	$T_2$	32.0
$t_{wb}$	27	$T_1 - T_2$	5.0
$L/G$	1.111		

$T$	$h_w$	$h$	$h_w - h$	$1/(h_w - h)$
$T_2 = T_{cw,out}$	32.0	$h_1 = h_{Twb,in}$	85.030	-
$T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$	32.5	$h_1 + 0.1(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	87.358	26.142
$T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$	34.0	$h_1 + 0.4(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	94.340	28.250
$T_2 + 0.6(T_1 - T_2)$	35.0	$h_1 + 0.6(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	98.995	30.005
$T_2 + 0.9(T_1 - T_2)$	36.5	$h_1 + 0.9(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	105.978	33.222
$T_1 = T_{hw,in}$	37.0	$h_1 + 1.0(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	108.305	-
		$\sum (1/\Delta h)$		0.1371

$$\begin{aligned}
 KaV/L &= (T_1 - T_2)/4 \times (4.19) \times \sum (1/\Delta h) \\
 &= (5/4) \times (4.19) \times (0.1371) \\
 &= 0.718
 \end{aligned}$$

ตาราง ข.6 การคำนวณค่า  $KaVL$  ที่ 110% ของค่าที่ภาวะออกแบบ

การคำนวณค่า $KaVL$ ที่สภาวะออกแบบ						
$T_1$	37.0	$T_2$	32.0			
$t_{wb}$	27	$T_1 - T_2$	5.0			
$L/G$	1.222					
$T$	$h_w$	$h$		$h_w - h$	$1/(h_w - h)$	
$T_2 = T_{cw,out}$	32.0	110.61	$h_1 = h_{twb,in}$	85.030	-	-
$T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$	32.5	113.50	$h_1 + 0.1(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	87.590	25.910	0.0386
$T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$	34.0	122.59	$h_1 + 0.4(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	95.270	27.320	0.0366
$T_2 + 0.6(T_1 - T_2)$	35.0	129.00	$h_1 + 0.6(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	100.391	28.609	0.0350
$T_2 + 0.9(T_1 - T_2)$	36.5	139.20	$h_1 + 0.9(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	108.071	31.129	0.0321
$T_1 = T_{hw,in}$	37.0	142.77	$h_1 + 1.0(L/G)C_{pf}(T_1 - T_2)$	110.631	-	-
					$\sum (1/\Delta h)$	0.1423
$KaVL = (T_1 - T_2)/4 \times (4.19) \times \sum (1/\Delta h)$ $= (5/4) \times (4.19) \times (0.1423)$ $= 0.745$						

ตาราง ข.7 การคำนวณค่า  $KaV/L$  ที่ 120% ของค่าที่สภาวะออกแบบการคำนวณค่า  $KaV/L$  ที่สภาวะออกแบบ

$T_1$	37.0	$T_2$	32.0
$t_{wb}$	27	$T_1 - T_2$	5.0
$L/G$	1.333		

T		$h_w$	h		$h_w - h$	$1/(h_w - h)$
$T_2 = T_{cw,out}$	32.0	110.61	$h_1 = h_{Twb,in}$	85.030	-	-
$T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$	32.5	113.50	$h_1 + 0.1(L/G)C_p(T_1 - T_2)$	87.823	25.677	0.0389
$T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$	34.0	122.59	$h_1 + 0.4(L/G)C_p(T_1 - T_2)$	96.201	26.389	0.0379
$T_2 + 0.6(T_1 - T_2)$	35.0	129.00	$h_1 + 0.6(L/G)C_p(T_1 - T_2)$	101.786	27.214	0.0367
$T_2 + 0.9(T_1 - T_2)$	36.5	139.20	$h_1 + 0.9(L/G)C_p(T_1 - T_2)$	110.164	29.036	0.0344
$T_1 = T_{hw,in}$	37.0	142.77	$h_1 + 1.0(L/G)C_p(T_1 - T_2)$	112.956	-	-
$\sum (1/\Delta h)$						0.1480

$$\begin{aligned}
 KaV/L &= (T_1 - T_2)/4 \times (4.19) \times \sum (1/\Delta h) \\
 &= (5/4) \times (4.19) \times (0.1480) \\
 &= 0.775
 \end{aligned}$$

ตาราง ข.8 การคำนวณค่า  $KaV/L$  ที่ 130% ของค่าที่ภาวะออกแบบ

การคำนวณค่า  $KaV/L$  ที่สภาวะออกแบบ

$T_1$	37.0	$T_2$	32.0
$t_{wb}$	27	$T_1 - T_2$	5.0
$L/G$	1.444		

T	h <sub>w</sub>	h		h <sub>w</sub> -h	1/(h <sub>w</sub> -h)	
$T_2 = T_{cw,out}$	32.0	110.61	$h_1 = h_{Twb,in}$	85.030	-	-
$T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$	32.5	113.50	$h_1 + 0.1(L/G)C_{pi}(T_1 - T_2)$	88.055	25.445	0.0393
$T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$	34.0	122.59	$h_1 + 0.4(L/G)C_{pi}(T_1 - T_2)$	97.131	25.459	0.0393
$T_2 + 0.6(T_1 - T_2)$	35.0	129.00	$h_1 + 0.6(L/G)C_{pi}(T_1 - T_2)$	103.181	25.819	0.0387
$T_2 + 0.9(T_1 - T_2)$	36.5	139.20	$h_1 + 0.9(L/G)C_{pi}(T_1 - T_2)$	112.257	26.943	0.0371
$T_1 = T_{hw,in}$	37.0	142.77	$h_1 + 1.0(L/G)C_{pi}(T_1 - T_2)$	115.282	-	-
$\sum (1/\Delta h)$					0.1544	

$$KaV/L = (T_1 - T_2)/4 \times (4.19) \times \sum (1/\Delta h)$$

$$= (5/4) \times (4.19) \times (0.1544)$$

$$= 0.809$$

ตาราง ข.9 การคำนวณค่า  $KaVL$  ที่ 140% ของค่าที่ภาวะออกแบบ

การคำนวณค่า  $KaVL$  ที่สภาวะออกแบบ

$T_1$	37.0	$T_2$	32.0
$t_{wb}$	27	$T_1 - T_2$	5.0
$L/G$	1.555		

T	$h_w$	h		$h_w - h$	$1/(h_w - h)$	
$T_2 = T_{cw,out}$	32.0	110.61	$h_1 = h_{Twb,in}$	85.030	-	-
$T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$	32.5	113.50	$h_1 + 0.1(L/G)C_{pl}(T_1 - T_2)$	88.288	25.212	0.0397
$T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$	34.0	122.59	$h_1 + 0.4(L/G)C_{pl}(T_1 - T_2)$	98.061	24.529	0.0408
$T_2 + 0.6(T_1 - T_2)$	35.0	129.00	$h_1 + 0.6(L/G)C_{pl}(T_1 - T_2)$	104.576	24.424	0.0409
$T_2 + 0.9(T_1 - T_2)$	36.5	139.20	$h_1 + 0.9(L/G)C_{pl}(T_1 - T_2)$	114.350	24.850	0.0402
$T_1 = T_{hw,in}$	37.0	142.77	$h_1 + 1.0(L/G)C_{pl}(T_1 - T_2)$	117.607	-	-
				$\sum(1/\Delta h)$		0.1616

$$\begin{aligned}
 KaVL &= (T_1 - T_2)/4 \times (4.19) \times \sum(1/\Delta h) \\
 &= (5/4) \times (4.19) \times (0.1616) \\
 &= 0.846
 \end{aligned}$$